doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.07.018

草莓穴盘苗弓背定向自动移栽装置设计与试验

孙　良[1]　张　煜[1]　崔荣江[2]　叶潘宇[1]　陈东顺[1]
(1.浙江理工大学机械工程学院,杭州 310018;2.杭州职业技术学院,杭州 310018)

摘要:针对现有草莓移栽装置缺乏弓背定向功能的问题,设计了一种具有弓背定向的草莓穴盘苗自动移栽装置。该装置由送苗装置、取苗定向装置、传送装置及直立下栽装置等组成,可实现穴盘输送、取苗、弓背定向及下栽作业。分析适栽期草莓穴盘苗外形参数,设计适用于草莓大苗钵特征的气动楔形弹性自复位取苗爪;开展直立下栽装置运动参数匹配分析,确定下栽鸭嘴开合角为 0°~30°;基于匍匐茎与弓背反向关系,提出融合超绿算法与 DBSCAN 密度聚类的弓背识别算法进行弓背识别定向。以插入速度、取出速度、钵体含水率为试验因素,取苗成功率为指标进行正交试验。试验结果表明,影响取苗成功率因素主次顺序为:钵体含水率、插入速度、取出速度,最优参数组合为:插入速度 150 mm/s、取出速度 124 mm/s、钵体含水率 50%~60%。整机试验结果表明,最优参数组合下移栽效率为 16 株/min,取苗成功率为 91.4%,平均株深为 98.8 mm,平均株距为 194.3 mm,定向成功率为 95.7%,移栽成功率达 87.5%,符合草莓移栽农艺要求。本研究为草莓高架栽培自动移栽装备研发提供了技术参考。

关键词:草莓移栽;取苗爪;下栽鸭嘴;弓背定向;图像识别
中图分类号:S223.92　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)07-0200-10　　**OSID**:

Design and Experiment of Automatic Transplanting Device for Strawberry Plug Seedlings with Arch-back Orientation

SUN Liang[1]　ZHANG Yu[1]　CUI Rongjiang[2]　YE Panyu[1]　CHEN Dongshun[1]
(1. *Faculty of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou* 310018, *China*
2. *Hangzhou Vocational and Technical College, Hangzhou* 310018, *China*)

Abstract: Aiming at addressing the deficiencies in the arch-back orientation function of existing strawberry transplanting devices, an automatic arch-back oriented transplanting apparatus for strawberry plug seedlings was designed. The system consisted of a seedling feeding device, a seedling extraction and orientation mechanism, a conveying device, and a vertical planting unit, which sequentially accomplished tray transportation, seedling extraction, arch-back orientation, and planting operations. Through analysis of morphological parameters of strawberry seedlings at transplanting stage, a pneumatic wedge-shaped elastic self-resetting extraction claw was developed to accommodate the characteristics of large strawberry plug seedlings. Motion parameter matching analysis for the vertical planting unit determined the optimal opening angle of the planting duckbill. Leveraging the inverse relationship between stolons and arch-back orientation, an orientation recognition method integrating ExG algorithm and DBSCAN clustering segmentation was implemented. Orthogonal experiments with insertion speed, extraction speed, and substrate moisture content as influencing factors revealed that substrate moisture (50%~60%) exerted the most significant impact on extraction success rate, followed by insertion speed (150 mm/s) and extraction speed (124 mm/s). System validation tests demonstrated that under optimal parameters, the device achieved a transplanting efficiency of 16 plants/min with 91.4% extraction success rate, 95.7% orientation accuracy, and 87.5% overall transplanting success. The average planting depth and spacing reached 98.8 mm and 194.3 mm, respectively, meeting agronomic requirements for strawberry cultivation. The research result can provide technical references for developing automated transplanting equipment in elevated strawberry cultivation systems.

Key words: strawberry transplanting; seedling picking claw; planting duckbill; arched-back orientation; image recognition

收稿日期:2025-02-24　修回日期:2025-03-26
基金项目:国家自然科学基金项目(52375275)和浙江省自然科学基金项目(LY23E050013)
作者简介:孙良(1981—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械设计、机构运动学与动力学优化研究,E-mail:liangsun@zstu.edu.cn

0　引言

穴盘苗因其发达的根系结构和显著高于裸根苗的移栽成活率，成为草莓高架栽培首选育苗方式[1-3]。草莓移栽有着“深不埋心、浅不露根、弓背向外”的农艺要求[4-5]，其中弓背定向作为草莓花序生长的方向性指标，直接影响植株采光效率与果实品质。现有钵苗移栽设备缺乏草莓弓背定向功能，不适用于草莓移栽。人工移栽效率低，劳动强度大、生产成本高[6-7]。因此，设计一款能够准确识别草莓苗弓背的自动化移栽机械，对于中国草莓产业发展具有重要的现实意义。

意大利 Rain－Flo 1600 型移栽机[8]和美国 Driscolls 公司[9]的草莓苗移栽机只适合裸根苗及钵体苗大株距的单行垄上作业。美国的 948T 型移栽机[10]无分苗机构，且无法实现定向移栽。GUTIERREZ 等[11]的草莓裸根苗移栽机，未考虑弓背定向问题。尹大庆等[12]、许春林等[13]设计了不同的非圆齿轮行星轮系移栽机，虽满足移栽所需轨迹与姿态要求，但均未实现弓背定向功能。李男等[14]设计了打孔放苗高架草莓苗全自动移栽机，栽植速度在 1 000 株/h，移栽成功率约 85%，但结构复杂，定向栽植需要人工辅助。刘继展等[15]、武东东[16]和孟庆宇[17]相继研发了自动仿形高垄双行草莓穴盘苗移栽机、旋转式分苗-多连杆栽植联动草莓移栽机和菱形变距温室草莓移栽装置，适用于高垄作业，但缺乏弓背定向功能。上述草莓移栽机械研究主要集中在裸根苗和高起垄栽培模式，鲜有准确识别草莓苗弓背的自动化移栽机械研究报道。

针对上述问题，本文结合高架草莓栽培要求，设计一种集自动取苗、弓背定向及直立下栽功能为一体的草莓穴盘苗自动移栽装置。对关键部件进行结构分析，确定零件参数，利用图像识别技术对草莓弓背进行识别，重点解决草莓移栽弓背识别功能不足、自动化程度低等问题，以期为高架栽培草莓机械化移栽提供理论依据和技术支撑。

1　装置结构与工作原理

1.1　装置结构

草莓穴盘苗自动移栽装置主要由送苗装置、取苗定向装置、传动装置和直立下栽装置组成，如图 1 所示。工作部件对称分布于机器中心面两侧，左右各配有一套完整移栽组件。可依次实现穴盘输送、钵苗抓取、弓背定向和钵苗栽植。

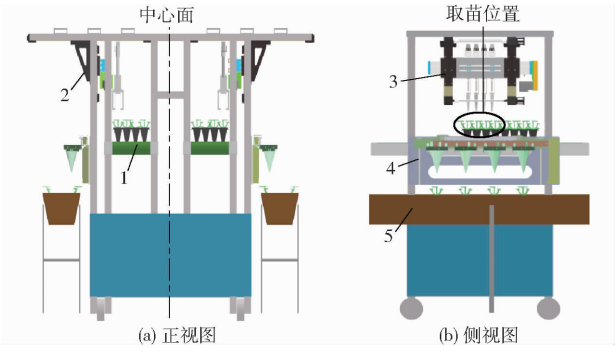


图 1　草莓穴盘苗自动移栽装置结构图

Fig. 1　Schematics of automatic transplanting device for strawberry plug seedlings

1. 送苗装置　2. 取苗定向装置　3. 传送装置　4. 直立下栽装置　5. 栽培槽

1.2　工作原理

草莓穴盘苗自动移栽原理如图 2 所示，送苗装置将草莓穴盘苗输送至取苗位置，取苗定向装置的取苗爪从远离中心面的穴盘苗先取，每次夹取 4 株，而后由传送装置将取苗定向装置移至鸭嘴上方，并将苗间距调整至指定值后定向落苗；落入鸭嘴中的草莓苗，经直立下栽装置栽植于栽培槽中。同时，取苗定向装置复位到下一取苗工位准备取苗，进入下一循环。移栽装置主要技术参数如表 1 所示。

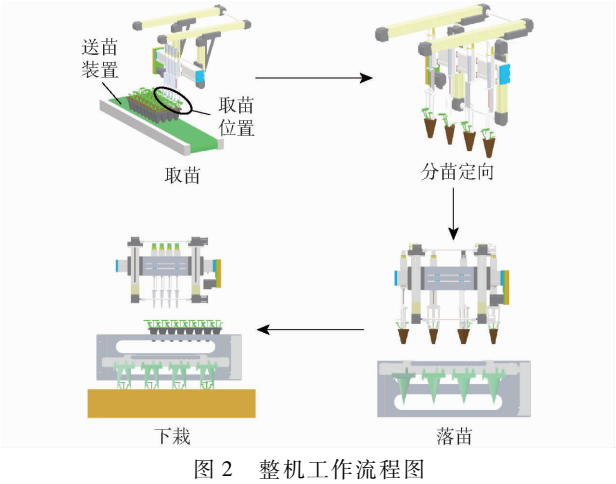


图 2　整机工作流程图

Fig. 2　Overall machine workflow diagram

表 1　草莓穴盘苗自动移栽装置技术参数

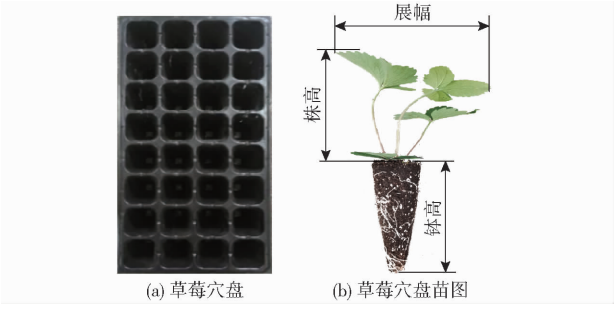
Tab. 1　Strawberry plug seedling automatic transplanting device technical parameters

参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 500×1 000×2 000
工作气压/MPa	0.5
单次取苗数量/株	8
移栽株距/mm	200
移栽深度/mm	100
移栽效率/(株·min^{-1})	16
移栽成功率/%	87.5

2 关键部件设计与分析

2.1 草莓穴盘苗外形尺寸参数测定

育苗盘采用 32 孔(4×8)穴盘,长、宽为 54 cm×28 cm,穴孔上、下口边长分别为 6、2 cm,深度为 10 cm[18-19],见图 3。适栽期草莓苗外形尺寸平均值分别为:钵高 98.2 mm,株高 56.6 mm,展幅 114.7 mm。



(a) 草莓穴盘 (b) 草莓穴盘苗图

图 3 草莓穴盘及草莓穴盘苗

Fig. 3 Strawberry plug trays and strawberry plug tray seedlings

2.2 取苗爪设计与分析

相较果蔬穴盘苗,草莓穴盘苗具有特殊性:

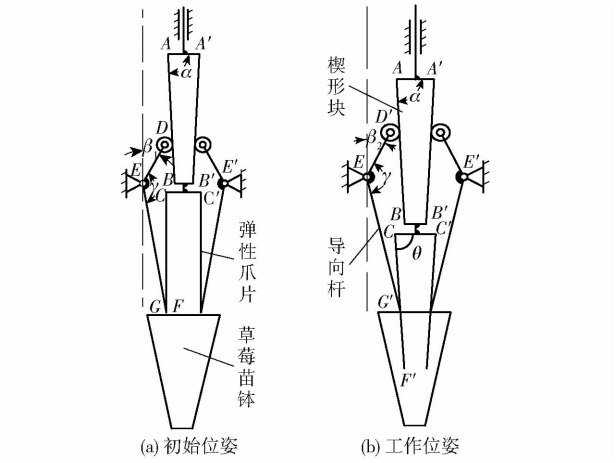
(1)草莓苗茎秆多且细长,要求取苗爪在向下靠近、探出时,不能对茎秆造成损伤。

(2)苗的钵体大且长,要求取苗爪在插入深度和夹紧度需更大幅度调整。

(3)草莓苗植株高、冠层展幅大,苗与苗之间空隙小,要求取苗爪配备细长支架。

2.2.1 取苗爪参数计算

取苗爪的机构简图如图 4 所示,其工作原理为:取苗时,气缸进气推动楔形块移出,爪片刺入草莓穴盘苗钵体。楔形块运动使导向杆收缩,爪片夹紧草莓穴盘苗钵体。放苗时,气缸出气带动楔形块回收,爪片脱离草莓穴盘苗钵体,导向杆在爪片弹性作用下复位。



(a) 初始位姿 (b) 工作位姿

图 4 取苗爪结构简图

Fig. 4 Structure schematics of gripper

取苗爪各零件尺寸参数应满足如下关系:

(1)取苗爪在初始位姿时需满足 2 个导向杆下端点之间距离大于连接块 CC' 长度,即

$$L_{EE'} - 2L_{EG}\sin(\pi - \beta_1 - \gamma) > L_{CC'} \tag{1}$$

式中 $L_{EE'}$——E、E'之间距离,mm

L_{EG}——导向杆 EG 长度,mm

β_1——导向杆 ED 与竖直线初始夹角,(°)

γ——导向杆 DE、EG 夹角,(°)

$L_{CC'}$——连接块长度,mm

(2)取苗爪在工作位姿时需满足 2 个爪片收缩不会发生碰撞,即

$$\theta \geqslant \arccos\frac{L_{CC'}}{2L_{CF'}} \tag{2}$$

$$\theta = \arccos\frac{L_{EG'}\sin(\pi - \beta_2 - \gamma) - 0.5(L_{EE'} - L_{CC'})}{L_{CG'}} \tag{3}$$

$$\sin\beta_1 = \frac{0.5(L_{EE'} - L_{AA'}) + L_{AD}\cos\alpha}{L_{ED}} \tag{4}$$

$$\sin\beta_2 = \frac{0.5(L_{EE'} - L_{AA'}) + L_{AD'}\cos\alpha}{L_{ED'}} \tag{5}$$

式中 θ——爪片与连接块夹角

$L_{CF'}$——弹性爪片 CF' 长度,mm

β_2——导向杆 DE 与竖直线工作夹角,(°)

$L_{EG'}$——导向杆 EG' 长度,mm

$L_{CG'}$——C 与 G'的距离,mm

$L_{AA'}$——楔形块宽边 AA' 长度,mm

L_{AD}——A 与 D 的距离,mm

$L_{AD'}$——A 与 D'的距离,mm

L_{ED}——导向杆 ED 长度,mm

$L_{ED'}$——导向杆 ED' 长度,mm

α——楔形块斜边与宽边的夹角,(°)

(3)为确保取苗爪在工作位姿时有足够预留高度以容纳草莓穴盘苗枝叶,防止对其造成损伤,即

$$L_{CG'}\sin\theta \geqslant [H_{\min}] \tag{6}$$

式中 $[H_{\min}]$——不对草莓穴盘苗枝叶造成损伤的最小高度,mm

(4)爪片入土深度大于顺利取苗最小深度,即

$$L_{G'F'} \geqslant [L_{\min}] \tag{7}$$

式中 $L_{G'F'}$——G'与 F'距离(入土距离),mm

$[L_{\min}]$——取苗最小刺入深度,mm

联立式(1)~(7)并代入已知参数,对所得结果进行取整处理,得到取苗爪零件参数如表 2 所示。取苗爪具有 70 mm 的入土深度,在工作位姿时为草莓穴盘苗枝叶留出 40 mm 的高度空间。

2.2.2 取苗爪结构设计

根据计算获得的机构参数,开发适用于草莓大

表 2　取苗爪零件参数

Tab. 2　Parameters of picking gripper

参数	数值
L_{DE}/mm	125
L_{EG}/mm	32
$L_{CC'}$/mm	40
α/(°)	89
γ/(°)	105
L_{AB}/mm	115
$L_{AA'}$/mm	20.5

苗钵特征的气动楔形弹性自复位取苗爪，如图 5 所示。两个对称导向杆通过销钉链接固定在爪支架两端，楔形块宽边与气缸固定，窄边与连接块固定，爪片由弹性较好的弹簧钢制造，安装在连接块两侧，取苗爪尺寸为长 480 mm、宽 150 mm、厚 45 mm。

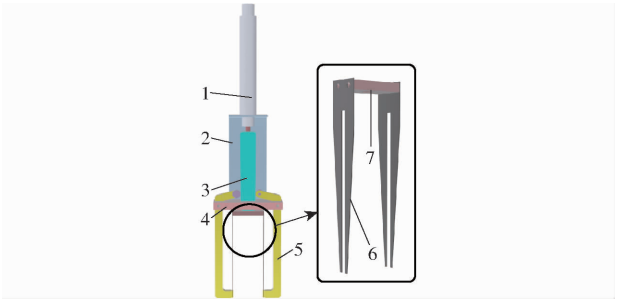


图 5　取苗爪

Fig. 5　Picking gripper

1. 气缸　2. 法兰板　3. 楔形块　4. 爪支架　5. 导向杆　6. 爪片　7. 连接块

草莓穴盘苗钵体含水率对取苗爪入土阻力有显著影响。相同速度下，钵体含水率越低，取苗爪入土阻力越大[20]。经测力计测得取苗爪入土阻力 F 峰值达到 57 N。当空压机提供气压 $P = 0.5$ MPa 时，所需气缸内径 D 为

$$D = \sqrt{\frac{4F}{\pi P\eta} + d^2} \approx 14 \text{ mm} \tag{8}$$

式中　d——活塞杆直径，mm

为满足气缸输出动力达 57 N 的需求，选择 MA20 × 10 − S − CA 型气缸，杆径为 16 mm，最大推力为 80 N，行程为 75 mm，符合设计要求。

2.3　直立下栽装置设计与分析

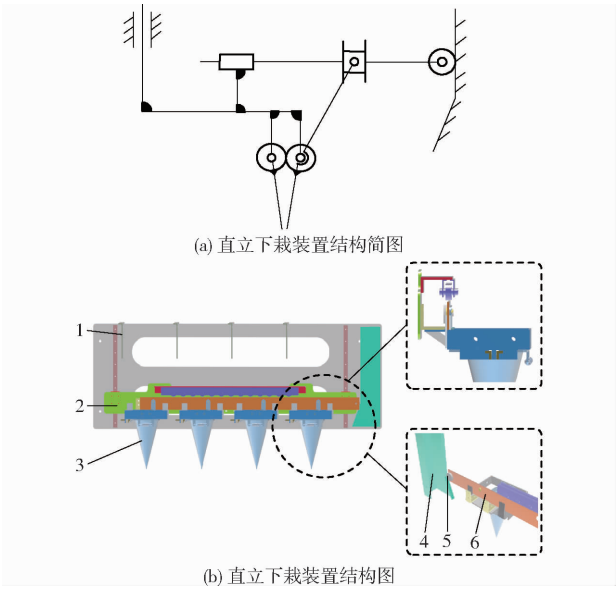
高架栽培槽呈倒梯形，上口宽为 30 cm，下底宽为 20 cm，深度为 25 cm[21-22]。通常采用双行定植，草莓苗离槽边缘距离约 5 cm，要求栽种鸭嘴满足以下条件：

(1)栽培槽上宽下窄，要求鸭嘴开合方向与其平行，不能垂直开合。

(2)鸭嘴设计应适合草莓穴盘苗尺寸，草莓穴盘苗落入下栽鸭嘴需保持直立。

2.3.1　直立下栽装置结构

基于上述要求，设计硬限位互锁直立下栽装置，该装置由拨杆、连接板、下栽鸭嘴总成、开合导轨和开合板等部件组成，连接板安装在滑块上，沿导轨垂直移动，4 个下栽鸭嘴总成以等间距方式安装在连接板上，开合板嵌于下栽鸭嘴总成两挡板之间，控制下栽鸭嘴联动，其右端安装有螺栓轴承，可沿开合导轨移动，如图 6 所示。



(a) 直立下栽装置结构简图

(b) 直立下栽装置结构图

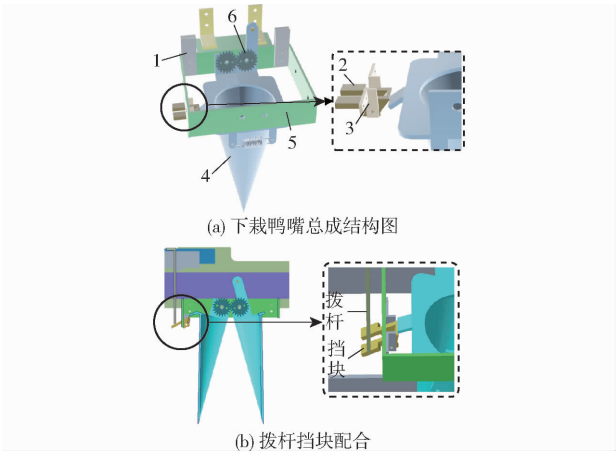
图 6　直立下栽装置

Fig. 6　Vertical planting device

1. 拨杆　2. 连接板　3. 下栽鸭嘴总成　4. 开合导轨　5. 螺栓轴承　6. 开合板

2.3.2　下栽鸭嘴总成结构及工作原理

下栽鸭嘴总成由限位片、挡块、挡块固定板、鸭嘴、支架和齿轮组成。鸭嘴通过齿轮驱动绕支架轴旋转实现同步开合，挡块通过挡块固定块安装在支架一端，鸭嘴边缘的凸起与挡块配合，如图 7 所示。鸭嘴总成入土到合适位置时，开合板横向移动，控



(a) 下栽鸭嘴总成结构图

(b) 拨杆挡块配合

图 7　下栽鸭嘴总成

Fig. 7　Schematics of planting duckbill

1. 限位片　2. 挡块　3. 挡块固定板　4. 鸭嘴　5. 支架　6. 齿轮

制下栽鸭嘴总成张开。鸭嘴凸起推动挡块旋转直至脱离接触,挡块复位。鸭嘴总成出土过程中,挡块卡住鸭嘴凸起以保持张开状态。拨杆下压挡块使鸭嘴凸起完全脱离,鸭嘴闭合,完成一次移栽,依此循环。

2.3.3 下栽鸭嘴参数计算

下栽鸭嘴形状和尺寸参数如图 8 所示,分为接苗区、定位区和入土区。

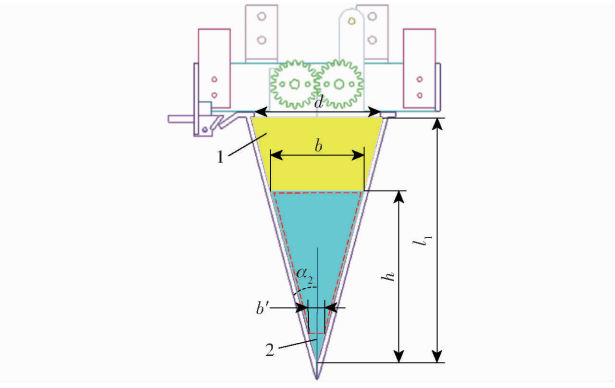


图 8 下栽鸭嘴结构图

Fig. 8 Schematic of planting duckbill structure

1. 接苗区 2. 定位区

下栽鸭嘴接种区要保证草莓穴盘苗落入下栽鸭嘴型腔中且不横躺,接种区以草莓穴盘苗外形尺寸为设计基准,即

$$\begin{cases} d' > D_{max} \\ b \geqslant B_{max} \\ b' \leqslant B_{max} \\ h \geqslant H_{max} \end{cases} \tag{9}$$

式中 d'——鸭嘴接种区开口直径,mm

D_{max}——钵体上端最大宽度,mm

b——鸭嘴接种区末端直径,mm

B_{max}——钵体下端最大宽度,mm

b'——鸭嘴定位区末端直径,mm

h——鸭嘴定位区长度,mm

H_{max}——钵体高度,mm

下栽鸭嘴入土区高度依据草莓穴盘苗栽植深度设定,一般为 H_{max} 加 10 ~ 20 mm。入土角为 α_2,由鸭嘴接种口直径和鸭嘴长度确定,即

$$\alpha_2 = 2\arctan\frac{0.5d}{l_1 + h} \tag{10}$$

鸭嘴打开角度需要满足以下条件:

(1)鸭嘴下栽至最深处时(即鸭嘴打开最大角度),挡块能顺利复位,且打开角度不能过大。

(2)鸭嘴闭合时能被挡块卡住,并保持合适打开角度,以确保草莓穴盘苗能顺利掉落,如图 9 所示,其表达式为

$$\begin{cases} \varphi \geqslant \varphi_{max} \\ \varphi' \geqslant \varphi_{min} \\ X_1 + X_2 - X_3 \geqslant 0 \end{cases} \tag{11}$$

式中 φ——鸭嘴打开最大角度,(°)

φ_{max}——挡块复位角度,(°)

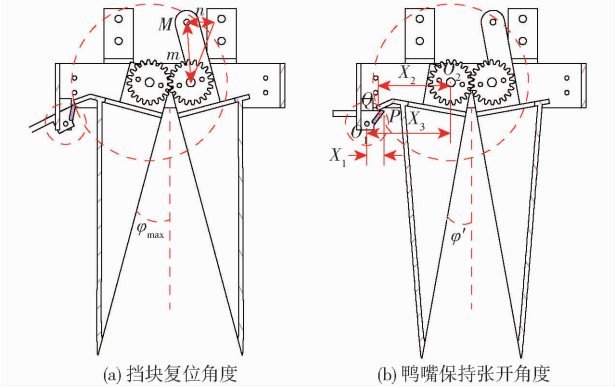
φ'——鸭嘴保持角度,(°)

φ_{min}——草莓穴盘苗掉落最小角度,(°)

X_1——P 与 O_1 水平距离,mm

X_2——Q 与 O_2 水平距离,mm

X_3——O_1 与 O_2 水平距离,mm



(a) 挡块复位角度 (b) 鸭嘴保持张开角度

图 9 鸭嘴打开角度

Fig. 9 Duckbill opening angles

开合导轨是直立下栽装置核心部件,控制鸭嘴开合位置与角度,开合板的移动距离控制鸭嘴打开角度,其最大的移动距离(即鸭嘴打开最大角度)必须确保挡块能顺利复位,即

$$n \geqslant m\sqrt{2(1 - \cos\varphi_{max})} \tag{12}$$

式中 n——开合板最小横移距离,mm

m——点 M 到鸭嘴旋转中心距离,mm

联立式(9) ~ (12)并代入已知参数,对所得结果进行取整处理,各零件参数见表 3。

表 3 直立下栽装置参数

Tab. 3 Parameters of upright planting device

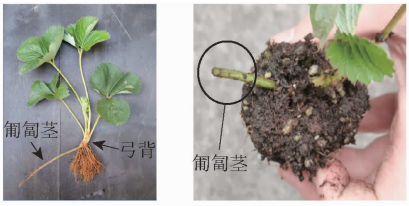
参数	数值
d'/mm	100
l_1/mm	170
α_2/(°)	15
φ_{max}/(°)	16
φ_{min}/(°)	11
X_1/mm	11.5
X_2/mm	49.5
X_3/mm	57

3 草莓弓背识别

3.1 弓背识别原理及方案

受草莓扦插育苗方式及其穴盘苗结构特征影响,草莓穴盘苗上的匍匐茎清晰可辨,且匍匐茎方向与弓背方向相反。基于此特性,运用图像识别技术

对匍匐茎进行识别，间接确定弓背方向。当俯视草莓穴盘苗时，匍匐茎及其偏转角度清晰可见，具体如图 10 所示。

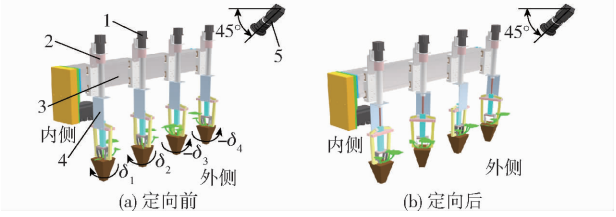


(a) 草莓苗结构　(b) 俯视草莓穴盘苗

图 10　草莓匍匐茎识别

Fig. 10　Strawberry creeping stem recognition

取苗定向装置由定向电机、联轴器、变距等分模组、取苗爪和相机组成。相机以与水平面呈 45°俯角方式安装。相机获取取苗爪夹取草莓穴盘苗的图像，经算法识别出每株草莓穴盘苗匍匐茎并获取其偏转角度，将每个角度转换成相应的脉冲数，由 PLC 的 4 个输出端发出对应脉冲信号，精确控制各个定向电机旋转角度，实现每株草莓穴盘苗弓背均朝向外侧，如图 11 所示。



(a) 定向前　(b) 定向后

图 11　弓背定向方案

Fig. 11　Arched-back orientation scheme

1. 定向电机　2. 联轴器　3. 变距等分模组　4. 取苗爪　5. 相机

3.2　弓背识别方法

选用 500 幅取苗爪抓取草莓穴盘苗的图像，对图像进行预处理。由于主要识别内容为草莓苗，故运用掩膜法去除无关内容将 4 株苗分割出来，如图 12 所示。

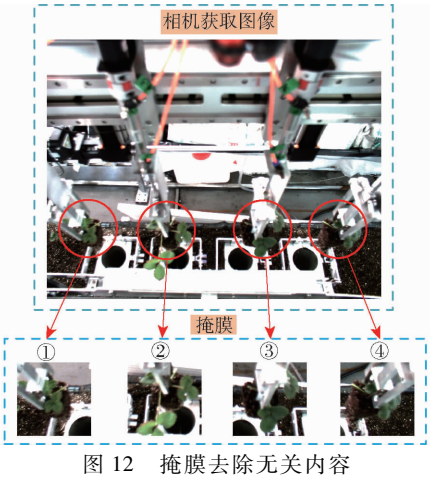


图 12　掩膜去除无关内容

Fig. 12　Remove irrelevant content from mask

草莓穴盘苗图像主要包含植物（枝叶与匍匐茎）和背景（基质、取苗爪等）几种主体颜色，根据颜色特征进行分析。采用以 G 通道为主要特征的超绿算法实现背景分割。超绿算法灰度图像因子计算公式为

$$\mathrm{gray}(i,j)=\begin{cases}255 & (2G-R-B>255)\\ 0 & (2G-R-B<0)\\ 2G(i,j)-R(i,j)-B(i,j) & (\text{其他})\end{cases}\tag{13}$$

式中　$\mathrm{gray}(i,j)$——灰度因子

i——图像像素行序号

j——图像像素列序号

$G(i,j)$——图像颜色空间绿色分量

$B(i,j)$——图像颜色空间蓝色分量

$R(i,j)$——图像颜色空间红色分量

用超绿算法获取灰度图像，利用基于 Otsu 分割算法进行背景分割，闭运算去除噪声并补全物体大小，如图 13 所示。



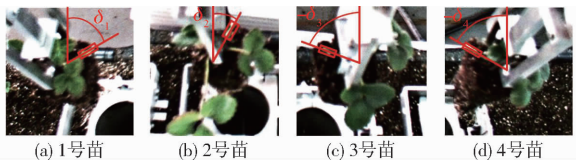
(a) 1号苗　(b) 2号苗　(c) 3号苗　(d) 4号苗

图 13　图像二值化

Fig. 13　Image binarization

利用密度聚类中 DBSCAN 方法进行草莓穴盘苗的匍匐茎与正常枝叶区分。实现步骤为：①找到每个样本的 ε-邻域内样本个数，若个数大于等于 MinPts，则该样本为核心点。②找到每个核心样本密度直达和密度可达样本，该样本亦为核心样本，忽略所有非核心样本。③若非核心样本在核心样本的 ε-邻域内，则非核心样本为边界样本，反之为噪声[23]。设定合适阈值，将匍匐茎与正常枝叶分离出来。

获得 DBSCAN 聚类分割图像后，用 OpenCV 中最小外接矩形函数，设置合适的长和宽，将匍匐茎框选出，用反馈角函数获取草莓穴盘苗匍匐茎偏转角度，同时以草莓苗中心线位基准，角度右偏记为正，左偏记为负，如图 14 所示。



(a) 1号苗　(b) 2号苗　(c) 3号苗　(d) 4号苗

图 14　获取偏转角度

Fig. 14　Obtaining deflection angle

综上可知，草莓弓背识别主要包括图像掩膜、阈值分割、DBSCAN 聚类分割、识别匍匐茎和获取偏转角度几个步骤，其具体算法流程如图 15 所示。

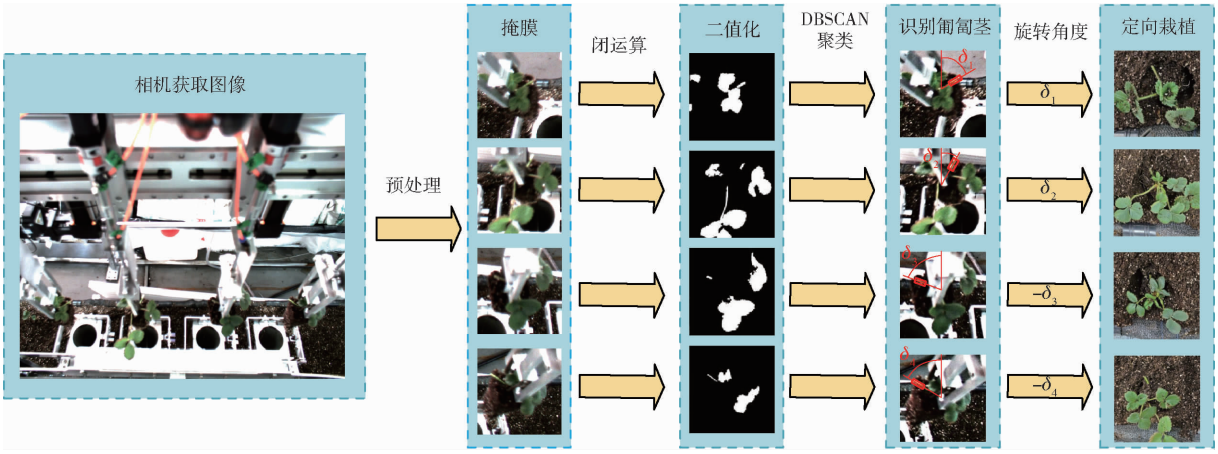


图 15 匍匐茎识别流程图

Fig. 15 Identification process of stolons

4 试验

4.1 取苗正交试验

4.1.1 试验方法

以取苗爪插入速度、取出速度、草莓穴盘苗钵体含水率为因子进行三因素三水平取苗正交试验，如表 4 所示，用取苗定向装置进行试验，每组试验重复 8 次，计算取苗成功率 Y，其成功评价标准为：①苗钵完整脱离穴孔。②取苗爪取出后 5 s 内无掉落。试验如图 16 所示。

表 4 正交试验因素编码

Tab. 4 Orthogonal test factors codes

编码	因素		
	插入速度/(mm·s^{-1})	取出速度/(mm·s^{-1})	含水率/%
-1	50	50	40 ~ 50
0	100	100	50 ~ 60
1	150	150	60 ~ 70

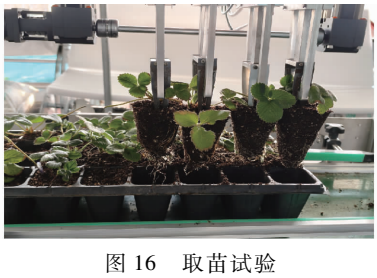


图 16 取苗试验

Fig. 16 Picking experiment

4.1.2 试验结果及分析

取苗爪正交试验方案及结果见表 5，U、V、W 为因素编码值。对试验数据进行多元回归拟合，得到各因素与取苗成功率 Y 回归方程为

$$Y = 88.12 + 4.7U + 2.73V + 5.08W + 3.15UV + 2.35VW - 2.26U^2 - 6.16V^2 - 12.41W^2 \quad (14)$$

表 5 取苗试验与结果

Tab. 5 Seedling extraction test and results

序号	因素			成功率 Y/%
	U	V	W	
1	-1	-1	0	71.9
2	1	-1	0	75.0
3	-1	1	0	78.1
4	1	1	0	93.8
5	-1	0	-1	62.5
6	1	0	-1	71.9
7	-1	0	1	75.0
8	1	0	1	84.4
9	0	-1	-1	68.8
10	0	1	-1	62.5
11	0	-1	1	71.9
12	0	1	1	75.0
13	0	0	0	90.6
14	0	0	0	87.5
15	0	0	0	90.6
16	0	0	0	84.4
17	0	0	0	87.5

方差分析结果见表 6，钵体含水率对取苗成功率有显著影响。原因在于钵体含水率过低导致基质松散，粘性差；含水率过高导致基质与爪片的摩擦力变小，钵体与穴孔侧壁吸附力过大，苗无法顺利取出。

4.1.3 因素影响效应分析

依据建立的取苗成功率回归模型，将其中一个试验因素不变，分析其他 2 个因素对试验指标的影响，绘制响应面图如图 17 所示。

图 17a 为取苗爪插入速度与取出速度对取出成功率 Y 的响应曲面。插入速度一定时，随取出速度增大，取出成功率先增大后减小。取出速度一定时，随插入速度增大，取出成功率增大。当插入速度为 100 mm/s、取出速度为 100 mm/s 时，成

表 6　方差分析结果

Tab. 6　Analysis of variance results

来源	平方和	均方	F	P
U	176.72	176.72	9.01	0.019 9 *
V	59.41	59.41	3.03	0.125 4
W	206.05	206.05	10.50	0.014 2 *
UV	39.69	39.69	2.02	0.198 0
UW	<0.000 1	<0.000 1	<0.001	1.000 0
VW	22.09	22.09	1.13	0.323 9
U^2	21.51	21.51	1.10	0.329 9
V^2	159.77	159.77	8.14	0.024 6 *
W^2	648.46	648.46	33.05	0.000 7 **
残差	137.36	19.62		
失拟项	110.45	36.82	5.47	0.067 1
误差	26.91	6.73		
总和	1 531.64			

注：* 表示影响显著（$0.01 \leqslant P < 0.05$），** 表示影响极显著（$P < 0.01$）。

功率较高。图 17b 所示为插入速度与钵体含水率对取出成功率响应曲面。插入速度一定时，随钵体含水率增大，取出成功率先增大后减小。钵体含水率一定时，随插入速度增大，取出成功率增大。当插入速度为 100 mm/s、钵体含水率为 50% ~60%时，取出成功率较高。图 17c 所示为取出速度与钵体含水率对取出成功率 Y 的响应曲面图。取出速度一定时，随钵体含水率增大，取出成功率先增大后减小。钵体含水率一定时，随取出速度增大，取出成功率 Y 先增大后减小。当取出速度为 100 mm/s、钵体含水率为 50% ~60%时，取出成功率 Y 较高。

利用 Design-Expert 软件对参数进行最优化求解，最佳参数组合为：插入速度为 150 mm/s、取出速度为 124 mm/s、钵体含水率为 50% ~60%，此时取苗成功率 Y 为 91.96%。

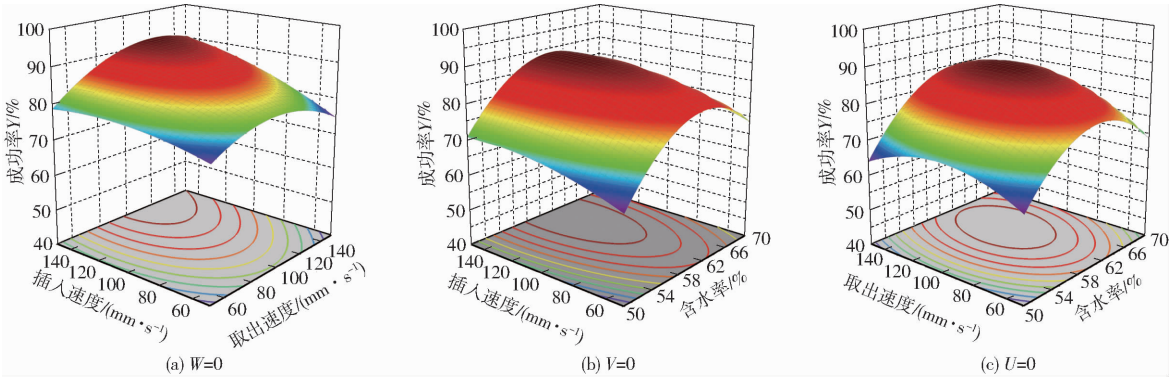


图 17　各因素交互响应面

Fig. 17　Orthogonal response surfaces of each factor

4.2　整机验证试验

4.2.1　试验条件

选用 32 孔穴盘培育的适栽期“章姬”草莓穴盘苗作为试验材料，苗龄 50 d，钵体含水率为 50% ~60%。搭建草莓穴盘苗自动移栽装置，设定移栽株距为 200 mm，行距为 80 mm。栽培槽为自制高架，试验基质由草炭、蛭石、珍珠岩按照质量比 3∶2∶1 均匀混合而成，基质含水率为 24% ~32%[24]，如图 18 所示。



图 18　试验设备

Fig. 18　Experimental materials

4.2.2　试验指标及方法

草莓穴盘苗自动移栽装置作业要求：

（1）取苗爪成功从穴盘中抓取草莓穴盘苗，并在移动和定向过程中，苗无掉落现象。

（2）草莓穴盘苗准确落入鸭嘴型腔中，并成功栽植于栽培槽中。

（3）草莓穴盘苗弓背方向应统一朝外。根据实际播种需求及草莓种植农艺研究标准，当草莓弓背与栽培槽垂直线夹角不大于 15°时，视为弓背朝外。

（4）草莓穴盘苗种植深度需满足“深不埋心，浅不露根”的农艺要求。

草莓移栽装置定向成功率 Z_1 与移栽成功率 Z_2 计算式为

$$Z_1 = \frac{N - N_1 - N_2 - N_3}{N - N_1} \times 100\% \tag{15}$$

$$Z_2 = \frac{N - N_1 - N_2 - N_3 - N_4}{N} \times 100\% \tag{16}$$

式中　N——草莓穴盘苗总数量

N_1——未取出的草莓穴盘苗数量

N_2——移栽过程中掉落草莓穴盘苗数量

N_3——弓背朝向不对的草莓穴盘苗数量

N_4——株深不符的草莓穴盘苗数量

选取 4 盘穴盘苗作为试验样本，将穴盘移到取苗位置，启动装置进行试验，统计每组试验所用时间，成功取出的株数，移动中掉落的株数，弓背朝向不正确的株数。试验结束后，测量栽植深度和株距，栽苗效果见图 19。



图 19 栽苗效果

Fig. 19 Seedling planting effect

4.2.3 试验结果与分析

试验结果如表 7 所示，移栽效率为 16 株/min，取苗成功率达 91.4%，移栽成功率达 87.5%，草莓穴盘苗平均株深为 98.8 mm，平均株距为 194.3 mm，定向成功率为 95.7%。上述各项指标均符合农艺要求。取苗效果与预测值相对误差为 0.52%。实测值与预测值较为吻合，回归模型可靠。

表 7 移栽试验结果

Tab. 7 Results of transplanting test

组别	取出数/个	取苗成功率/%	掉落数/个	平均株深/mm	平均株距/mm	定向成功数/个	定向成功率/%	栽苗成功率/%
1	30	93.8	1	98.5	195.2	28	93.3	87.5
2	28	87.5	0	96.1	194.6	27	96.4	84.4
3	30	93.8	0	99.7	194.9	30	100	93.8
4	29	90.6	1	100.8	192.3	27	93.3	84.4
平均值	29.25	91.4	0.5	98.8	194.3	28	95.7	87.5

经统计，试验样本中约 28.9% 的草莓穴盘苗发生枝叶折断和土钵断裂现象，如图 20 所示。分析枝叶折断特征，主要原因在于草莓穴盘苗生长位置与穴孔中心偏差较大，当取苗爪接近时，导向杆底端会与草莓穴盘苗枝叶发生挤压，为降低取苗爪接近过程中对草莓穴盘苗的伤害，可将导向杆的边缘圆滑处理。分析土钵断裂截面特征，主要原因在于实验室育苗时间太短，穴盘苗盘根不充分，可通过专业育苗方式解决。



(a) 挤压枝叶 (b) 土钵断裂

图 20 草莓穴盘苗破坏情况

Fig. 20 Damage situation of strawberry plug seedlings

5 结论

(1)设计了一种草莓穴盘苗自动移栽装置，主要由送苗装置、传送装置、取苗定向装置和直立下栽装置组成，可实现取苗、定向、移栽一体化作业。

(2)针对草莓穴盘苗苗钵大、植株高、展幅广的特征，设计了一种气动楔形弹性自复位取苗爪，解决了传统取苗爪不适用于草莓穴盘苗及易损伤苗钵完整性的问题，实现了取苗成功率不小于 90% 的目标。此外，设计了硬限位互锁直立下栽装置，确定了符合草莓大苗钵的鸭嘴型腔参数和开合角度(0°～35°)。

(3)基于弓背与匍匐茎方向相反特性，提出融合颜色特征与 DBSCAN 聚类分析的弓背识别方法。通过最小外接矩形函数将匍匐茎框出，获取匍匐茎偏移角度。

(4)试验结果表明，取苗成功率的影响因素主次顺序为：钵体含水率、插入速度、取出速度，最优参数组合为：插入速度 150 mm/s、取出速度 124 mm/s、钵体含水率 50%～60%。整机试验结果表明，最优参数组合下，装置移栽效率为 16 株/min，取苗成功率 91.4%，平均株深为 98.8 mm，平均株距为 194.3 mm，弓背定向成功率为 95.7%，移栽成功率为 87.5%，符合“弓背向外、深不埋心、浅不露根”的移栽农艺要求。

参 考 文 献

[1] 刘畅，王晓，李宪松，等. 我国草莓生产态势及国内外比较分析[J]. 中国果树，2023(7)：136－140.

[2] 王小萍，许梅玲，沈佩华. 草莓不同苗龄穴盘苗与裸根苗的大棚生产试验初报[J]. 上海农业科技，2023(5)：109－110.

[3] 周晓肖，杨肖芳，李伟龙. 穴盘苗与裸根苗对草莓生长结果的影响[J]. 中国南方果树，2023，52(3)：170－173，180.

[4] 徐丽明，张铁中. 我国草莓生产作业机械的设计特点探讨[J]. 中国农机化，2006，27(5)：102－105.
XU Liming，ZHANG Tiezhong. Regional development and machine characteristic in China strawberry production[J]. Chinese Agricultural Mechanization，2006，27(5)：102－105.(in Chinese)

[5] 胡建平，岳仁才，武东东，等. 草莓移栽机的发展现状与展望[J]. 农业装备技术，2020，46(1)：7－10.

[6] 彭珍凤，鄂颖. 镇江市设施草莓产业发展现状及建议[J]. 农业装备技术，2023，49(6)：13－14，19.

[7] 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. Development status and prospect of transplanting machinery[J]. Transactions

of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(8):44 – 53. (in Chinese)
[8] 田志伟,马伟,杨其长,等. 温室穴盘苗移栽机械研究现状及问题分析[J]. 中国农业大学学报,2022,27(5):22 – 38.
TIAN Zhiwei, MA Wei, YANG Qichang, et al. Research status and problem analysis of plug seedling transplanter in greenhouse[J]. Journal of China Agricultural University, 2022, 27(5): 22 – 38. (in Chinese)
[9] 刘育彤,胡建平,张永辉,等. 草莓移栽机设计与试验[J]. 农机化研究,2024,46(6):162 – 169.
LIU Yutong, HU Jianping, ZHANG Yonghui, et al. Design and testing of strawberry transplanting machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024,46(6):162 – 169. (in Chinese)
[10] DARA S. A first in strawberries: mechanical transplanter wows[J]. American Fruit Grower, 2016, 136(10):50 – 53.
[11] GUTIERREZ C, SERWATOWSKI R, GRACIA C, et al. Design, building and testing of a transplanting mechanism for strawberry plants of bare root on mulched soil[J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2009, 7(4): 791 – 799.
[12] 尹大庆, 张诺一, 周脉乐,等. 高速变姿态接苗鸭嘴式栽植机构优化设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(6):65 – 72.
YIN Daqing, ZHANG Nuoyi, ZHOU Maile, et al. Optimal design and experiment of high speed duckbill planting mechanism with variable catch-seedling attitude[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,51(6):65 – 72. (in Chinese)
[13] 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, LÜ 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)
[14] 李男, 刘继展. 高架草莓移栽机控制系统设计与试验[J]. 农机化研究, 2019, 41(11): 122 – 126.
LI Nan, LIU Jizhan. Design and experiment of the control system for elevated strawberry transplanting machinetic[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019,41(11):122 – 126. (in Chinese)
[15] 刘继展,周童,李男,等. 一种高垄自适应仿形底盘及其工作方法[P]. 2018 – 08 – 24.
[16] 武东东. 小型电动草莓定向移栽机设计及试验[D]. 镇江:江苏大学,2021.
WU Dongdong. Design and experiment of small electric strawberry directional transplanter machine[D]. Zhenjiang: Jiangsu University,2021. (in Chinese)
[17] 孟庆宇. 温室草莓移栽机设计[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2023.
MENG Qingyu. Design of greenhouse strawberry transplanting machine[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2023. (in Chinese)
[18] 宇军, 何波. 大棚草莓促成高效栽培技术[J]. 陕西农业科学,2022,68(2):103 – 104.
YU Jun, HE Bo. High-efficient techniques for strawberry cultivation in greenhouses[J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2022, 68(2): 103 – 104. (in Chinese)
[19] 沈佩华,王小萍,许梅玲,等. 草莓高垄穴盘育苗技术[J]. 中国农技推广,2023,39(5):57 – 58.
[20] 刘继展,李茂,李男. 草莓穴盘苗移栽末端执行器设计与试验[J]. 农业机械学报,2016,47(11): 49 – 58.
LIU Jizhan, LI Mao, LI Nan. Design and text of end-effector for automatic transplanting of strawberry plug seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 49 – 58. (in Chinese)
[21] 张凯良, 杨丽, 王粮局, 等. 高架草莓采摘机器人设计与试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(9): 165 – 172.
ZHANG Kailiang,YANG Li,WANG Liangju, et al. Design and experiment of elevated substrate culture strawberry picking robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(9): 165 – 172. (in Chinese)
[22] FENG Q, WANG X, ZHENG W, et al. New strawberry harvesting robot for elevated-trough culture[J]. Int. J. Agric. & Biol. Eng., 2012, 5(2): 1.
[23] 刘超, 陈锦明, 刘慧, 等. 基于三维激光雷达与优化 DBSCAN 算法的果树定位方法[J]. 农业机械学报, 2023, 54(4): 214 – 221,240.
LIU Chao, CHEN Jinming, LIU Hui, et al. Fruit tree location method based on 3D LiDAR and optimized DBSCAN algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(4): 214 – 221,240. (in Chinese)
[24] 陈巍, 吴娥娇, 韦小猜, 等. 不同配比基质对草莓扦插苗生长的影响[J]. 江苏农业学报, 2024, 40(7): 1305 – 1311.
CHEN Wei, WU Ejiao, WEI Xiaocai, et al. Effects of substrates with different ratios on the growth of strawberry cut-tage seedlings[J]. Jiangsu J. of Agr. Sci. 2024, 40(7): 1305 – 1311. (in Chinese)