doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.012

可调节式甘蓝钵苗取苗末端执行器设计与试验

韩　豹　申大帅　郭　畅　刘　俏　王　欣　宋春波
（东北农业大学工程学院，哈尔滨 150030）

摘要：针对现有取苗末端执行器取苗针间距固定、适应性差，难以实现按需调整以适应移栽过程中不同规格穴盘钵苗取苗的问题，设计了一种插入针间距可调的针式取苗末端执行器。该执行器由直流电动推杆驱动，取苗针沿根钵四角倾斜插入。通过调整调节滑块和针座在支架上的位置，实现取苗针间距的调整。本文以 72 穴、128 穴和 200 穴 3 种规格甘蓝穴盘所育钵苗为研究对象，研究了 3 种规格穴盘钵苗苗龄对根钵形成与甘蓝幼苗生长发育的影响，确定了取苗末端执行器主要结构参数，并对取苗瞬间进行了受力分析。在根钵均已形成的前提下，运用 EDEM 对根钵提取进行单因素仿真模拟，以穴盘规格、取苗加速度、取苗针插入边距比和根钵含水率为试验因素，根钵完整率和取苗失败率为评价指标，采用 $L_9(3^4)$ 正交试验，考察试验因素对评价指标的影响，通过极差分析、方差分析和综合加权法，得到各因素对评价指标影响的主次顺序为取苗加速度、根钵含水率、穴盘规格、插入比；得到优选参数组合：取苗加速度为 0.1 m/s^2，根钵含水率为 56.2%，穴盘规格为 128 穴，插入边距比为 15%，此时根钵完整率为 97.93%，取苗失败率为 0.81%。

关键词：甘蓝钵苗；末端执行器；根钵完整率；穴盘
中图分类号：S223.92　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2019)11-0111-10

Design and Experiment of Adjustable End-effector of Cabbage Seedlings

HAN Bao　SHEN Dashuai　GUO Chang　LIU Qiao　WANG Xin　SONG Chunbo
(*College of Engineering*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*)

Abstract: In the view of fixed spacing and poor adaptability of the existing seedling needle, and the difficulty of ensuring the on-demand adjustment to adapt to different plugs of seedlings in the transplanting process, a needle-type seeding end-effector with adjustable insertion pitch was designed. The actuator was driven by a DC electric push rod, and the seedling needle was inserted obliquely along the four corners of the root. The adjustment of spacing among the needles was achieved by changing the position of the slider and the needle holder on the bracket. The seedlings of cabbages plugs were studied, namely 72, 128 and 200 points. The effects of seedling age on the formation of root mites and the growth of cabbage seedlings were studied. The main structural parameters of the end-effector were determined, and the force analysis was carried out on the taking seedling. Under the premise that the roots were formed, single factor simulation was conducted for the seedling picking by EDEM. The specifications of plugs, the acceleration of seedling picking, the insertion ratio of the needle and the moisture content of root were regarded as the test factors. The root integrity rate and the failure rate of the seedling picking were regarded as evaluation indexes. Using $L_9(3^4)$ orthogonal test to investigate the influence of test factors on evaluation indexes. Through the range analysis, variance analysis and comprehensive weighting method, the primary and secondary influence of factors on the indexes were obtained as the acceleration of seedling picking, the moisture content of root, the specifications of plug, and the insertion ratio. The preferred parameter combinations were obtained as the acceleration of seedling picking was 0.1 m/s^2, the moisture content of root was 56.2%, the specification of plugs was 128 and the insertion ratio was 15%. At this time, the root integrity rate was 97.93%. The failure rate of the seedling picking was 0.81%.

Key words: cabbage seedlings; end-effector; root integrity rate; plugs

收稿日期：2019-02-28　修回日期：2019-05-01
基金项目：国家重点研发计划项目(2018YFD0201000)和国家科技支撑计划项目(2014BAD06B04)
作者简介：韩豹(1964—)，男，研究员，博士，主要从事农业机械装备研究，E-mail：hanbao2004@126.com

0 引言

甘蓝是我国主要蔬菜品种之一,其播种面积已超过 25.3 万 hm^2,在我国蔬菜种植面积中位列第 3 位[1]。而我国蔬菜机械化水平较低,严重影响着蔬菜种植业的可持续发展[2]。当前,育苗移栽依然是蔬菜产业的主要种植方式,应用于全球约 60% 的蔬菜种类[3],但移栽机械的用苗要求与钵苗育苗工艺之间的结合尚不完善。甘蓝以穴盘育苗为主要育苗方式,文献[4-5]针对不同穴盘规格与基质对甘蓝育苗的影响进行了研究,但目前针对甘蓝钵苗配套的自动移栽机械及其末端执行器的研究报道较少。

取苗末端执行器是育苗移栽机械的关键部件,是实现钵苗全自动移栽的重要组成部分[6-7]。美国、日本、荷兰等国家钵苗移栽装备较为成熟[8]。文献[9-12]开发了应用于不同蔬菜及花卉移栽的取苗末端执行器。国内学者近年来也进行了针对性的研究[13-17]。以上取苗末端执行器主要针对某种特定穴盘规格进行应用。当前我国甘蓝育苗常用秧盘有 72 穴、128 穴和 200 穴 3 种规格,其钵苗栽植主要应用半自动移栽机械完成,即通过人工将钵苗由育秧盘内逐个取出并投放到移栽机栽植器内,然后再由机械完成后续栽植和镇压等工作,人工喂苗劳动强度大,作业环境差。为此,本文结合甘蓝穴盘苗的结构特点,设计一种插入针间距可调的针式钵苗末端执行器,对甘蓝育苗常用的 3 种规格穴盘所育钵苗开展取苗试验研究,以期提升甘蓝钵苗半自动移栽机技术水平,解决人工喂苗劳动强度大问题。

1 取苗末端执行器总体结构与工作原理

取苗末端执行器的机械结构如图 1 所示,该执行器主要由电动推杆、安装架、调节滑块、针座、弹簧、取苗针和推板等组成。其中,安装架可在固定板四角的矩形管中竖直上下移动,根据钵苗的高度调节机构的取苗空间,然后通过紧定螺钉进行限位固定,以适应不同苗高的取苗要求。调节滑块也可在安装架下端倾斜部分沿倾斜角度上下移动,通过改变调节滑块与推板之间距离,对弹簧进行预紧,保证投苗时取苗针在根钵中能够顺利拔出。同时,针座安装在调节滑块的卡槽中,并可沿卡槽方向移动,实现对入土宽度的调节,以满足大、中、小根钵取苗要求。该末端执行器取苗工作原理是通过电动推杆的伸出,带动推板下压,弹簧压缩,轴承在滑轨中滑移,使 4 根取苗针倾斜插入根钵,在取苗机构的带动下取出钵苗,电动推杆回缩,取苗针在弹簧的作用下回缩直至脱离根钵,完成取苗放苗的过程。

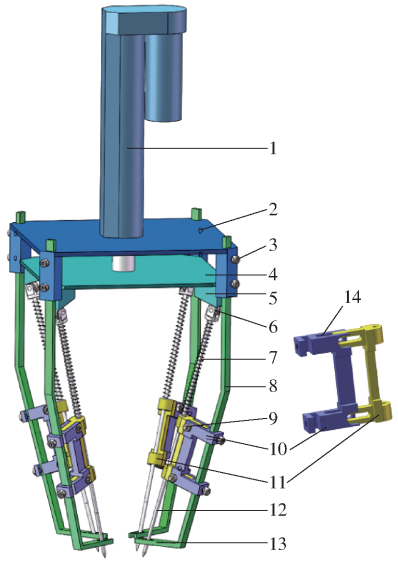


图 1 甘蓝钵苗取苗末端执行器结构图

Fig. 1 Structure diagram of end-effector of cabbage seedlings

1. 电动推杆 2. 固定板 3. 紧定螺钉 4. 推板 5. 滑轨 6. 转向轴承 7. 弹簧 8. 安装架 9. 螺栓 10. 调节滑块 11. 针座 12. 取苗针 13. 挡苗板 14. 卡槽

该执行器用于甘蓝钵苗的稀植作业,取苗过程如图 2 所示,具体操作过程如下:

(1)在一个取苗过程的起始点(图 2a),为了减少末端执行器对钵苗茎叶的损伤,从钵苗的一侧沿垂直穴盘的方向进给,到达取苗高度后,穴盘在进给机构的控制下把钵苗送到取苗点(图 2b)。

(2)钵苗到达取苗点后,4 根取苗针下端针尖处与根钵四角相对,此时钵上植株部分处于机构内部空间的中心位置,不会受到挤压碰撞。并根据根钵规格对取苗针的入土宽度进行调节,以满足根钵取苗要求。

(3)电动推杆伸出,带动推板向下运动,在倾斜滑轨与转向轴承的作用下,弹簧被压缩,取苗针从根钵四角处以最大深度倾斜插入根钵内(图 2c)。

(4)取苗末端执行器在取苗装置的带动下沿垂直于穴盘方向上移,根钵在取苗针的作用下脱离穴盘,从而将钵苗从穴孔中取出(图 2d)。

(5)末端执行器把取出的钵苗移送到放苗位置(图 2e),电动推杆向上缩回,带动推板上升,弹簧复位,取苗针回缩,在挡苗板的反推作用下,取苗针从根钵中拔出,完成投苗过程(图 2f、2g)。

2 取苗末端执行器结构设计与参数确定

取苗末端执行器主要用于全自动蔬菜钵苗移栽机自动取苗投苗作业。常见的取苗末端执行器按驱动方式可分为气动驱动、电机驱动、电磁驱动 3 种形式[7]。气动驱动末端执行器结构简单、便于控制,

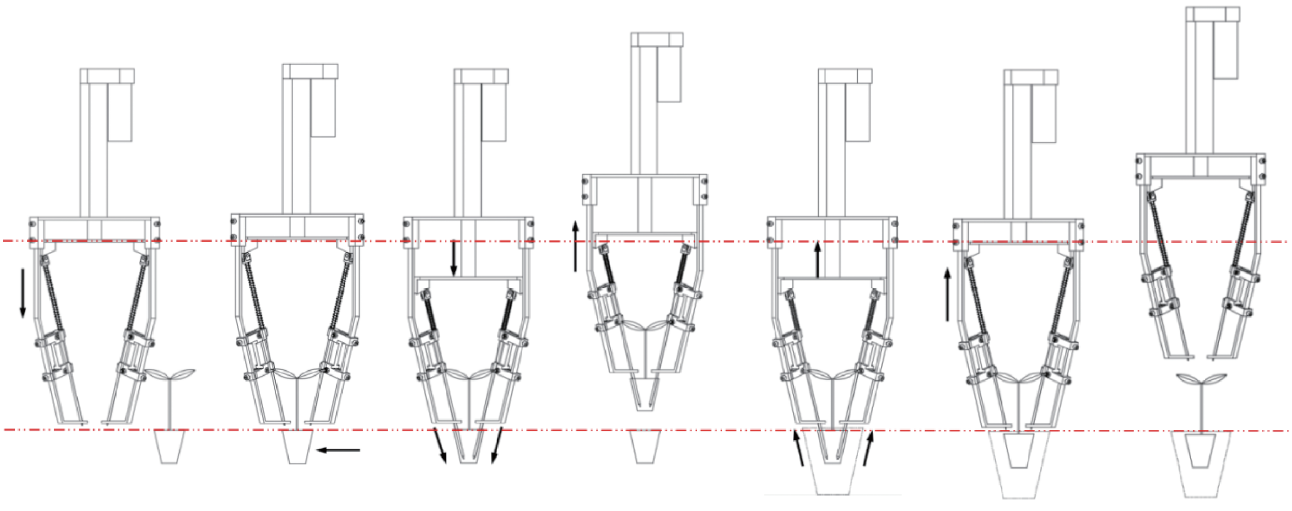


图 2　甘蓝钵苗取苗末端执行器取苗投苗过程示意图

Fig. 2　Schematics of seedling process of end-effector for cabbage seedlings

但控制方式单一，难以实现速度的准确控制和位置的精准定位，且不便于移动；电机驱动末端执行器可以实现位置和速度的精确控制，但控制相对复杂；电磁驱动末端执行器通过给线圈励磁使铁心做往复运动，其结构复杂，当前应用较少。本研究采用电机驱动的方式，以保证对取苗速度的准确控制。电机选用永磁直流电机驱动的电动推杆，额定功率 30 W，额定推力 150 N，行程 100 mm，速度 60 mm/s，自带机锁和限位开关，通过调节外部控制器来满足行程要求的正负极转换。

取苗针是末端执行器关键的部件。一般有 2 针、3 针、4 针，针数越多取苗越稳定[7, 13]，本研究选用 4 根取苗针。由于在取苗过程中根钵的四角阻力最大，则使取苗针采用向心式从根钵的四角插入，利用倾角取出钵苗。为确定取苗针的直径，选取 1 ~ 4 mm 不同直径的取苗针以 0.5 mm 为间隔分别对 72 穴、128 穴、200 穴钵苗进行探究试验。试验结果表明，1 ~ 2 mm 的取苗针直径较小，取苗针的刚性较差，易弯曲，且与基质接触受力面积较小，取苗稳定性差；3.5 mm 和 4 mm 的取苗针直径较大，取苗针在插入根钵过程中钵体容易破裂且增大对根系的损伤。综上所述，由于不同规格穴盘的钵苗质量与体积不同，72 穴钵苗选用直径 3 mm 取苗针，128 穴和 200 穴钵苗均选用直径 2.5 mm 取苗针。取苗针材料为不锈钢。

为减小末端执行器的质量，调节滑块与针座选用尼龙材料，固定板、推板和安装架均使用铝合金材料，取苗末端执行器的结构参数如图 3 所示。

(1) 取苗针插入倾角 α

取苗针从根钵四角插入，其在穴孔底面的投影与下口径边线的夹角呈 45°，为避免插入倾角过小而刺到孔壁，应使 α 略大于穴孔 4 条棱线的倾角，即

$$\alpha \geqslant \arctan\frac{b-c}{2h\sin 45°} \tag{1}$$

式中　b——穴孔上口径边长

c——穴孔下口径边长

h——穴孔高度

经测量 72 穴、128 穴和 200 穴 3 种规格穴盘穴孔棱线的倾角均约 17.5°，故本文对取苗针插入倾角取 18°。

(2) 取苗针入土长度 L_h

取苗针入土长度取决于伸缩杆伸出长度，即

$$L_h = D_p\cos\alpha - \frac{\varepsilon}{\cos\alpha} \tag{2}$$

其几何约束条件为

$$L_h \leqslant \frac{h}{\cos\alpha} \tag{3}$$

式中　D_p——伸缩杆伸出长度

ε——取苗针入土之前针尖与穴盘表面的初始距离，取 10 mm

(3) 伸缩杆行程[D_p]

伸缩杆的行程需满足取苗针在作业过程中的最大伸缩长度，即

$$[D_p] \geqslant \frac{h+\varepsilon}{\cos^2\alpha} \tag{4}$$

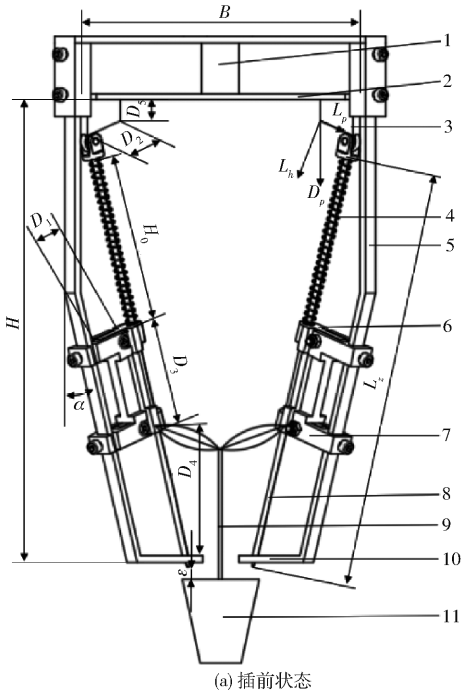
其中穴孔高度 h 为最大穴盘规格 72 穴盘尺寸，取 45 mm。故伸缩杆行程取 100 mm。

(4) 调节滑块卡槽长度 D_1

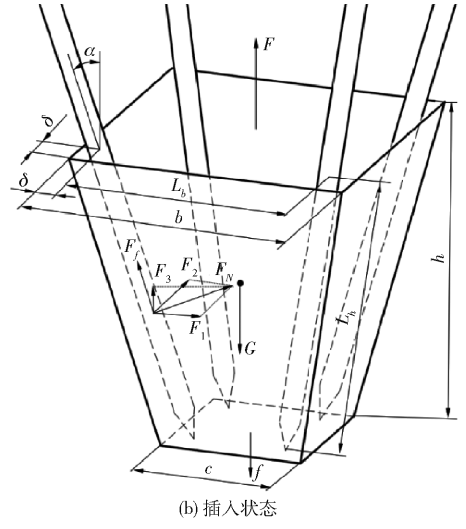
卡槽长度决定了取苗针间距调节范围，需同时满足 3 种规格穴盘的穴孔尺寸与插入边距。

$$D_1 \geqslant \frac{2\delta+\Delta b}{2\sin 45°\cos\alpha} + \eta \tag{5}$$

式中　δ——取苗针插入点到穴孔上边线的距离



(a) 插前状态



(b) 插入状态

图 3 取苗末端执行器结构简图

Fig. 3 Schematics of structure of end-effector

1. 伸缩杆 2. 推板 3. 滑轨 4. 弹簧 5. 安装架 6. 针座 7. 调节滑块 8. 取苗针 9. 甘蓝幼苗 10. 挡苗板 11. 钵体

Δb——不同穴盘规格之间最大与最小上口径边长之差,为 15 mm

η——安装架沿垂直方向调节安装位置时所造成沿卡槽方向位置变化的极限误差

(5)滑轨长度 D_2

伸缩杆下压位移通过转向轴承可分解为沿滑轨方向位移和沿取苗针方向位移,故

$$L_p = D_p \sin\alpha \tag{6}$$

$$D_2 \geqslant L_p + D_1 + \eta \tag{7}$$

式中 L_p——实际取苗过程中转向轴承沿滑轨运动位移

(6)取苗针长度 L_z

取苗针长度需同时满足弹簧自由长度、针座长度、针座到挡苗板的长度与取苗针入土长度,即

$$L_z = H_0 + D_3 + \frac{D_4}{\cos\alpha} \tag{8}$$

为了减轻调节滑块与针座对甘蓝幼苗茎叶的碰撞损伤,针座与挡苗板之间的垂直高度应高于甘蓝幼苗茎叶,即

$$D_4 \geqslant Z_h - \varepsilon \tag{9}$$

式中 H_0——弹簧自由长度,取 140 mm

D_3——针座长度

D_4——针座与挡苗板之间的垂直高度

Z_h——甘蓝钵苗株高

(7)取苗末端执行器内部空间高度 H

内部空间高度 H 取决于取苗针的安放高度、伸缩杆实际工作长度以及甘蓝钵苗株高,即

$$H = L_z \cos\alpha + D_2 \sin\alpha + D_5 \tag{10}$$

式中 D_5——滑轨末端高度

(8)推板宽度 B

推板的宽度决定了取苗末端执行器内部空间的大小,需同时满足取苗针、调节滑块及针座的正常工作需求和取苗作业空间要求,故

$$B = L_b + 2L_z \sin\alpha\cos45° + \varepsilon\tan\alpha\cos45° \tag{11}$$

式中 L_b——取苗针入土宽度

为了解取苗针对甘蓝钵苗取苗时的受力情况,对钵苗刚要脱离穴盘的瞬间进行受力分析,如图 3b 所示。G 为根钵自身重力,F_N 为根钵对单根取苗针的正压力,F_N 在空间上产生 3 个方向分力,其中 2 个水平方向分力为 F_1 和 F_2,1 个垂直方向分力为 F_3,F_1 和 F_2 分别作用于相邻取苗针之间,将根钵向中心挤压,F_3 将根钵向上提升。F_f 为取苗针与根钵之间的摩擦力,主要是由根钵与取苗针在提取瞬间的相对滑移趋势所引起的,其大小由根钵与取苗针之间的粘附力和摩擦因数所决定,由于根钵与取苗针实际接触受力面积很小,可以忽略不计[14]。F 为取苗针对根钵产生的瞬间冲击合力,由钵苗的质量与取苗加速度所决定。f 为穴孔壁对根钵的粘附力,其通常受穴盘与基质材料、接触面积、根钵含水率等因素影响[16]。当取苗针插入点到穴孔上边线的距离 δ 较大时,4 根取苗针包裹下的受力基质区域的体积较小,应力集中较大。

3 试验材料与分析

在育苗过程中不同的穴盘规格与苗龄对甘蓝幼苗的生长和生理状况有很大的影响[5],进而影响取苗效果。本文所用甘蓝品种为京丰一号,3 种育苗穴盘分别为 72 穴、128 穴、200 穴,穴盘外形尺寸均为 540 mm × 280 mm,穴孔横截面呈正方形,尺寸如

表 1 所示。育苗选用无土栽培育苗基质，主要成分为草炭、蛭石、珍珠岩、腐熟中药渣、腐熟蘑菇渣、酒渣等，其中草炭、蛭石、珍珠岩的配比为 6∶3∶1，N、P、K 总质量比大于等于 12 g/kg，有机质质量分数大于等于 40%，硅质量比大于等于 0.3 g/kg。

表 1　3 种穴盘规格穴孔尺寸

Tab.1　Hole size of three types of plugs

穴孔尺寸	穴盘规格/穴		
	72	128	200
上口径边长/mm	40	32	25
下口径边长/mm	20	13	7
高度/mm	45	42	40

为观察甘蓝种苗的大苗、中苗、小苗的几何参数，分别用 72 穴、128 穴、200 穴塑料穴盘进行育苗，并在苗龄 20、30、40 d 时分别抽取 3 盘随机取样研究，甘蓝穴盘育苗如图 4a 所示。根钵是一种根系-基质结合体，钵苗的根系对钵体有聚拢作用，其覆盖程度对取苗效果有较大影响[13,16]，本文通过根钵侧面根系覆盖面积与侧面总面积的比值计算根系覆盖率[13]，覆盖率超过 80% 以上定义为根钵形成，如图 4b 所示。

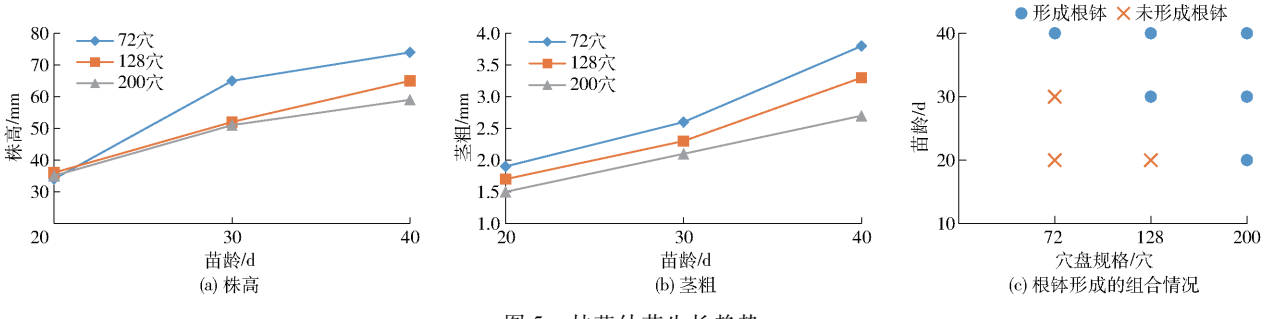


(a) 穴盘培育甘蓝苗　(b) 根钵

图 4　甘蓝钵苗

Fig. 4　Cabbage seedlings

如图 5 所示，各个穴盘规格的幼苗随着苗龄的增长，株高、茎粗均增大，根钵也是逐渐形成。对于 20 d 小苗，200 穴盘幼苗与其他穴盘幼苗相比，株高相差不大，茎粗较小，形成根钵；对于 30 d 中苗，128 穴盘与 200 穴盘幼苗均形成根钵，在株高与茎粗上差异不大，但与 72 穴盘幼苗差异较大；对于 40 d 大苗，各穴盘幼苗均已形成根钵，72 穴盘幼苗在株高与茎粗上远大于其他穴盘幼苗。由此可知，穴孔规格对幼苗生长有明显的限制作用，对根钵的形成程度也有很大的影响，大穴孔小苗龄不易形成根钵，小穴孔大苗龄根钵形成较好，但易出现盘外盘根现象而影响取苗效果[18]，且株高、茎粗较小。综上，本文选用试验用苗为 72 穴盘幼苗，苗龄 40 d；128 穴盘幼苗，苗龄 30 d；200 穴盘幼苗，苗龄 20 d，在均已形成根钵的前提下进行取苗试验研究。



(a) 株高　(b) 茎粗　(c) 根钵形成的组合情况

图 5　甘蓝幼苗生长趋势

Fig. 5　Growth trend of cabbage seedlings

4　试验指标与因素的确定

4.1　试验指标

甘蓝钵苗取苗试验从根钵完整率和取苗失败率两方面考察取苗效果[16,19]。

取苗针在提取出甘蓝根钵的过程中，会出现部分基质从根钵上脱落现象，脱落质量过多对甘蓝钵苗栽植效果和栽植成活率均有较大影响[16]，结合前期试验和参考文献[20]，根钵完整率小于 50% 时就会严重降低钵苗栽植的直立度与栽植成活率。故将从穴盘中取出的甘蓝钵苗的根钵完整率小于 50% 视为取苗失败。其计算公式为

$$R_s = \frac{m_r}{m_d + m_r} \times 100\% \tag{12}$$

式中　R_s——根钵完整率，%

m_r——取出根钵的质量，g

m_d——遗留和脱落的根钵质量，g

取苗结束后，剪去甘蓝幼苗，把遗留在穴孔和脱落在外的根钵收集后使用 JD1000－2 型电子天平进行称量。

取苗针在提取出甘蓝钵苗的过程中，将钵苗未被取出、中途掉落以及取出后的钵苗根钵完整率小于 50% 均视为取苗失败，取苗失败率 S_f 计算公式为

$$S_f = \frac{Y_{nf} + Y_{ni}}{Y_{nt} - Y_{nh}} \times 100\% \tag{13}$$

式中　Y_{nf}——钵苗未取出、中途掉落和根钵完整率小于 50% 的钵苗数量，个

Y_{ni}——主茎折断数，个

Y_{nt}——取苗穴孔总数,个

Y_{nh}——空穴数,个

对于甘蓝钵苗来说,苗叶的损伤或者单个苗叶折断脱落对于甘蓝的生长发育不会有明显的影响,而主茎的折断代表着甘蓝生长发育的停止[19],因此把主茎折断数 Y_{ni} 作为取苗失败的一个统计量。空穴数 Y_{nh} 是指穴盘中未生长甘蓝幼苗的穴孔数量,其与育苗过程中出苗率相关,与末端执行器作业性能无关,不作为取苗失败的统计量。

4.2 试验因素

4.2.1 取苗加速度

在取苗过程中,从根钵的力学角度进行考虑,根据牛顿第二定律取苗针对根钵的冲击合力 F 为

$$F = ma \tag{14}$$

式中 m——钵苗的质量,g

a——取苗加速度,m/s^2

由钵苗取苗瞬间受力分析可知,在取苗针的带动下,根钵刚要脱离穴孔的瞬间将会产生瞬时加速度,当钵苗的质量不变时,瞬时加速度越大,取苗针对根钵的冲击力也就越大。

4.2.2 穴盘规格

不同规格穴盘的甘蓝钵苗的质量不同,体积不同,由受力分析可知根钵与穴孔接触面积不同,则根钵与穴孔之间的粘附力不同。当取苗加速度一定时,因钵苗的质量不同,所受冲击合力 F 也有所不同。甘蓝根系呈放射状分布,对基质块具有聚拢作用,越靠近根源根系越密集,越向外放射根系密度越小,即穴盘规格不同的根钵根系分布密度不同,对基质的聚拢效果也不一样。选用穴盘 3 个水平为 72 穴、128 穴、200 穴。

4.2.3 根钵含水率

水是基质颗粒之间、根系与基质颗粒之间的一种介质,使根钵的内部产生一种粘结力,同时含水率对根钵与穴孔壁之间粘附力有影响[16]。由于根钵含水率是通过鼓风干燥箱将根钵干燥后进行测试,不能即时所得,于是采用先试验后测试的方法,提前把根钵浇透,然后控制间隔时间进行取苗试验,取苗后剪去甘蓝幼苗,只留根钵以干湿质量法进行测量,计算公式为

$$\theta_m = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \tag{15}$$

式中 θ_m——根钵含水率,%

m_1——干燥前根钵质量,g

m_2——干燥后根钵质量,g

以实际测量为准,对每种穴盘的钵苗分别测定根钵含水率取平均值,选取 3 个平均含水率水平为 42.3%、56.2%、69.1%。

4.2.4 插入边距比 λ_b

插入边距比 λ_b 为插入点到穴孔上边线的距离 δ 与穴孔上口径边长 b 的百分比,即

$$\lambda_b = \frac{\delta}{b} \times 100\% \tag{16}$$

由图 3 可知,为适应 3 种常用甘蓝穴盘取苗需要,取苗针入土宽度设计成可调,即插入边距 δ 可调节。而 δ 过大,4 根取苗针所包裹的受力范围内的基质体积过小,应力集中过大,且插入区域靠近根系密集区和甘蓝幼苗茎叶区,易造成幼苗损伤;δ 过小,取苗针离根钵边缘太近,易破坏根钵边缘区域,造成基质脱落,并且易发生取苗针与根钵的错位。

5 离散元模拟仿真

5.1 穴孔仿真模型

采用 72 穴、128 穴、200 穴盘尺寸数据,利用 SolidWorks 2016 对穴孔进行建模,并导入 EDEM 2.7 软件内,创建模块的几何体(Geometry),如图 6 所示,仿真参数如表 2 所示。

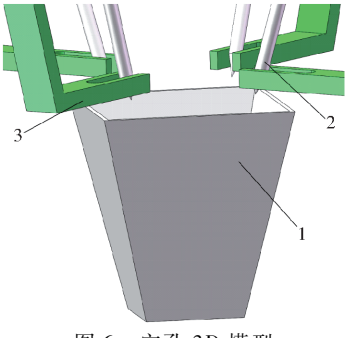


图 6 穴孔 3D 模型

Fig. 6 3D model of hole

1. 穴钵 2. 取苗针 3. 挡苗板

表 2 EDEM 仿真材料参数

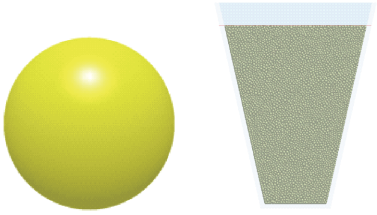
Tab. 2 Simulation parameter of EDEM materials

参数	材料		
	穴盘	基质	取苗针
泊松比	0.38	0.4	0.3
剪切模量/MPa	866	10	75 800
密度/(kg·m^{-3})	1 400	750	7 910

5.2 钵体颗粒模型

为方便模拟和减少计算量,钵体基质颗粒模型为球形,半径为 0.4 ~ 0.7 mm,根据不同的穴盘规格设置相适应的 Total Mass,由 Factory 生成钵体颗粒并使其在重力作用下达到稳定后,对模型进行压缩,最终得到钵体颗粒模型如图 7 所示。

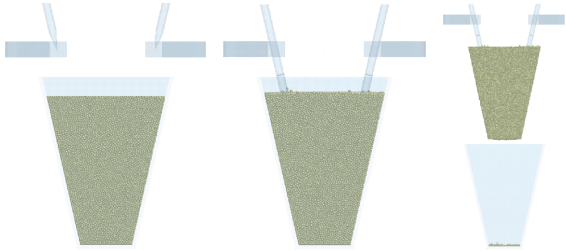
在取苗过程中,会产生基质部分脱落的现象,影响取苗效果。实际上是在取苗针的作用下基质颗粒



(a) 基质颗粒模型　(b) 钵体模型

图 7　钵体仿真模型

Fig. 7　Simulation model of bowl



(a) 插入前　(b) 插入中　(c) 提取后

图 8　模拟仿真试验

Fig. 8　Simulation experiment

间的粘结产生破裂，发生相对位移，造成颗粒下落。而接触模型 Hertz－Mindlin with bonding 用于模拟破碎、断裂等问题，采用小颗粒粘结成大块物料，外力作用下颗粒间粘结力会发生破坏，从而产生破碎及断裂效果[21]。

5.3　钵体模型提取仿真试验

为了分析加速度、穴盘规格、边距比对基质颗粒脱落的影响，利用 EDEM 求解器对建立的钵体模型进行提取仿真，在基质颗粒生成、压缩后，使颗粒间产生粘结，并使取苗针以固定角度插入钵体模型中，且对取苗针施加向上的加速度，完成对钵体的提取，如图 8 所示。在提取过程中伴随着颗粒的脱落，为了计算钵体模型的完整率，利用 EDEM 后处理模块中 Grid Bin Group 对脱落在穴孔内的颗粒进行质量统计，即

$$R_m = \frac{m_t - m_l}{m_t} \times 100\% \tag{17}$$

式中　R_m——钵体模型完整率，%

m_t——颗粒模型总质量，g

m_l——脱落颗粒质量，g

对穴盘规格 128 穴，插入边距比 15%，加速度 0.1、0.3、0.5、0.7、0.9 m/s^2 进行仿真模拟，试验结果如图 9a 所示，加速度 0.1、0.3 m/s^2 模型完整率差异不大，但随着加速度的逐渐增大，模型完整率迅速减小，最优加速度范围为 0.1～0.5 m/s^2。

对加速度 0.3 m/s^2，插入边距比 15%，穴盘规格 72、128、200 穴进行仿真模拟，试验结果如图 9b 所示，模型完整率优选顺序为 128、72、200 穴，128 穴最优，但总体水平差异不大。

对加速度 0.3 m/s^2，穴盘规格 128 穴，插入边距比 5%、10%、15%、20%、25% 进行仿真模拟，试验结果如图 9c 所示，随着插入边距比的增加，模型完整率先增大后减小，在边距比 15% 时达到最高，最优水平范围为 10%～20%。

6　试验设计与结果分析

6.1　正交试验设计

取苗试验在东北农业大学农机实验室内进行，设计取苗试验装置如图 10 所示，把取苗末端执行器挂接于丝杠滑台安装架上进行取苗试验，有效行程 800 mm，通过外接电机控制器对作业位移和速度进行控制，以满足对取苗加速度因素水平要求。

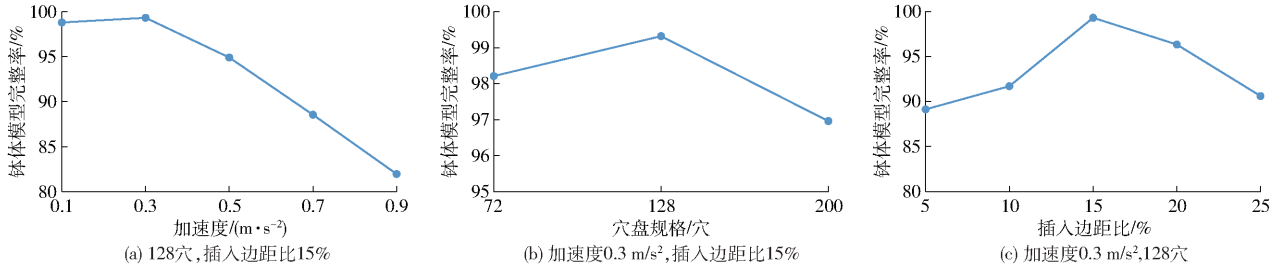
针对取苗效果，结合仿真分析结果，影响因素穴盘规格取 72 穴、128 穴、200 穴，加速度 a 取 0.1、0.3、0.5 m/s^2，取苗针插入边距比 λ_b 取 10%、15%、20%，根钵含水率取 42.3%、56.2%、69.1%。试验采用 $L_9(3^4)$ 正交表，对每个试验组合取 40 株甘蓝钵苗，试验重复 3 次，计算其平均值作为每组试验的数据，因素水平依次为 A、B、C、D，试验因素水平如表 3 所示。

6.2　试验结果与分析

6.2.1　试验因素对试验指标的影响

正交试验结果与极差分析如表 4 所示。

通过对试验结果极差分析，得到影响根钵完整率的主次顺序为 B、C、D、A，各因素的最优水平分别为 A_1、B_1、C_2、D_2，则最优组合为 $A_1B_1C_2D_2$。同理，影响取苗失败率因素的主次顺序为 A、B、D、C，各因素



(a) 128穴，插入边距比15%　(b) 加速度0.3 m/s^2，插入边距比15%　(c) 加速度0.3 m/s^2，128穴

图 9　各种试验条件下的仿真试验结果

Fig. 9　Simulation experiment results under various conditions

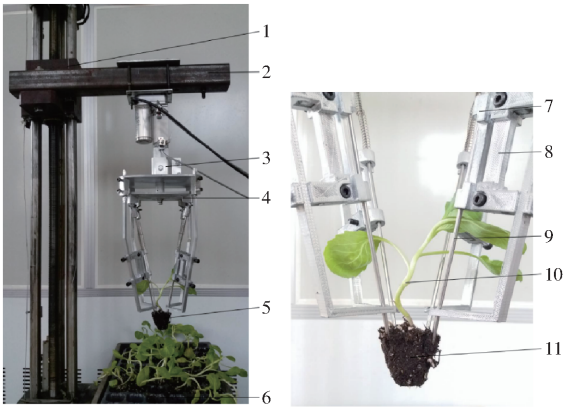


图 10 甘蓝钵苗取苗末端执行器试验装置

Fig. 10 Experiment device of end-effector picking up cabbage seedlings

1. 丝杠滑台 2. 安装架 3. 卡箍 4. 取苗末端执行器 5. 钵苗 6. 穴盘 7. 针座 8. 调节滑块 9. 取苗针 10. 甘蓝主茎 11. 甘蓝根钵

表 3 正交试验因素水平

Tab. 3 Orthogonal experiment factors and levels

水平	因素			
	穴盘规格/穴	加速度/($m \cdot s^{-2}$)	插入边距比/%	根钵含水率/%
1	72	0.1	10	42.3
2	128	0.3	15	56.2
3	200	0.5	20	69.1

表 4 正交试验结果与极差分析

Tab. 4 Results of orthography experiment and range analysis

试验号		因素				根钵完整率/%	取苗失败率/%
		A	B	C	D		
	1	1	1	1	1	94.59	3.37
	2	1	2	2	2	97.85	4.22
	3	1	3	3	3	90.62	9.32
	4	2	1	2	3	96.92	0.83
	5	2	2	3	1	92.27	2.58
	6	2	3	1	2	92.92	3.35
	7	3	1	3	2	95.30	2.56
	8	3	2	1	3	93.27	5.04
	9	3	3	2	1	91.65	10.19
根钵完整率	k_1	94.35	95.60	93.59	92.84		
	k_2	94.04	94.46	95.47	95.36		
	k_3	93.41	91.73	92.73	93.60		
	R	0.94	3.87	2.74	2.52		
	较优水平	A_1	B_1	C_2	D_2		
	主次因素	B、C、D、A					
取苗失败率	k_1	5.64	2.25	3.92	5.38		
	k_2	2.25	3.95	5.08	3.38		
	k_3	5.93	7.62	4.82	5.06		
	R	3.68	3.67	1.16	2.00		
	较优水平	A_2	B_1	C_1	D_2		
	主次因素	A、B、D、C					

的最优水平分别为 A_2、B_1、C_1、D_2，则最优组合为 $A_2B_1C_1D_2$。

通过方差分析，对各因素影响根钵完整率和取苗失败率进行显著性检验，结果如表 5 和表 6 所示。

表 5 根钵完整率方差分析

Tab. 5 Variance analysis of complete rate

方差来源	平方和	自由度	均方	F	F 临界值	显著性
A	4.155	2	2.077	1.872	6.0(α=0.01)	ns
B	71.375	2	35.687	32.152	3.6(α=0.05)	**
C	35.492	2	17.746	15.988	2.6(α=0.1)	**
D	30.072	2	15.036	13.546		**
误差	19.979	18	1.110			
总和	161.074	26				

注：** 代表极为显著，* 代表显著，ns 代表不显著，下同。

表 6 取苗失败率方差分析

Tab. 6 Variance analysis of seedling failure rate

方差来源	平方和	自由度	均方	F	F 临界值	显著性
A	75.091	2	37.545	19.574	6.0(α=0.01)	**
B	135.378	2	67.689	35.289	3.6(α=0.05)	**
C	6.652	2	3.326	1.734	2.6(α=0.1)	ns
D	20.882	2	10.441	5.443		*
误差	34.527	18	1.918			
总和	272.529	26				

由表 5、6 可知，取苗加速度对根钵完整率和取苗失败率影响均极为显著；根钵含水率对根钵完整率影响极为显著，而对取苗失败率影响显著；穴盘规格对根钵完整率影响不显著，而对取苗失败率影响极为显著；取苗针插入边距比对根钵完整率影响极为显著，而对取苗失败率影响不显著，这与极差分析的主次因素结论一致。因此，对于根钵完整率和取苗失败率而言，取苗加速度和根钵含水率的选择至关重要。

6.2.2 最优组合确定与验证

根据取苗末端执行器作业性能要求，各试验指标的优水平组合各不相同，为了兼顾平衡各项指标，采用综合加权评分法进行分析，尽可能选出令各项指标都能达到最优的组合[22]。考虑到 4 个因素对参数指标影响的重要程度，以 100 分作为总权重，根钵完整率与取苗失败率各为 50 分，试验的综合加权结果如表 7 所示。

通过表 7 分析得出各试验因素对试验指标（根钵完整率、取苗失败率）影响的最优组合，各因素主次顺序为 B、D、A、C，各因素最佳水平组合为 $B_1D_2A_2C_2$，即取苗加速度为 0.1 m/s^2，根钵含水率为 56.2%，穴盘规格为 128 穴，插入边距比为 15%。采用最优

表 7　综合加权结果

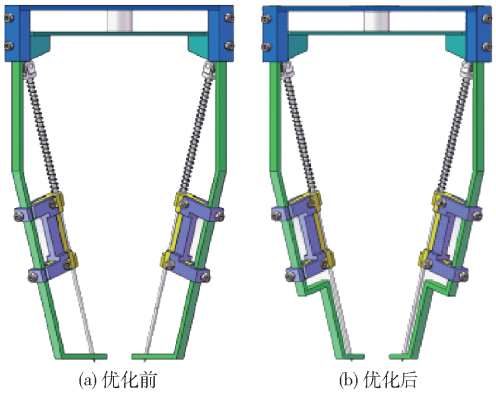
Tab. 7　Result of integrated weight

综合加权值	A	B	C	D
K_1	1 867. 21	1 947. 36	1 878. 95	1 839. 85
K_2	1 914. 85	1 896. 57	1 899. 36	1 924. 23
K_3	1 842. 86	1 780. 99	1 846. 61	1 860. 84
k_1	622. 40	649. 12	626. 32	613. 28
k_2	638. 28	632. 19	633. 12	641. 41
k_3	614. 29	593. 66	615. 54	620. 28
R	23. 99	55. 46	17. 58	28. 13
最优水平	A_2	B_1	C_2	D_2

组合，对取苗末端执行器进行验证试验，根钵完整率为 97. 93%，取苗失败率为 0. 81%，且试验验证结果与正交试验结果对比，取苗末端执行器的作业性能最优。并以末端执行器取苗放苗为一个工作流程，对取苗效率进行测试，测试结果为 12 株/min。

6.3　机构优化

通过试验发现，在末端执行器针对 200 穴规格钵苗取苗过程中，由于穴孔较小，位于安装架下部的挡苗板结构偏大，出现相邻甘蓝钵苗受压受损情况。为满足对多规格穴盘的适应性，避免挡苗板损伤幼苗，对机构进行优化设计，把安装架易对相邻钵苗碰撞区域进行折弯处理，以减少对作业空间的占用，优化结果如图 11 所示。



(a) 优化前　　(b) 优化后

图 11　机构优化

Fig. 11　Mechanism optimization

7　结论

(1)针对甘蓝钵苗的生理特性和 3 种常用穴盘结构，设计了一种可调节式四针取苗末端执行器，适用于 72 穴、128 穴、200 穴 3 种规格穴盘，通过调整安装架、调节滑块、针座的位置，可实现取苗针插入根钵边距的调节，以适应 3 种规格穴盘的取苗需要。

(2)在甘蓝钵苗根钵均形成的前提下，利用装置的可调节性提取相关试验因素，并运用 EDEM 对钵体提取进行单因素仿真模拟。采用 $L_9(3^4)$ 正交表进行取苗试验，通过极差分析、方差分析和综合加权法得到影响取苗效果因素的主次顺序为：取苗加速度、根钵含水率、穴盘规格、插入边距比；最优组合：取苗加速度为 0. 1 m/s^2，根钵含水率为 56. 2%，穴盘规格为 128 穴，插入边距比为 15%，此时根钵完整率为 97. 93%，取苗失败率为 0. 81%。

参　考　文　献

[1]　中华人民共和国农业部. 中国农业统计资料 2011[M]. 北京：农业出版社，2012.

[2]　梁喜凤，肖玺泽，朱宇豪，等. 子叶期钵苗补苗末端执行器设计与试验[J]. 农业工程学报，2018，34(9)：49 - 57.
LIANG Xifeng，XIAO Xize，ZHU Yuhao，et al. Design and experiment on pot-seedling supplementing end-effector for vegetables in cotyledon phase[J]. Transactions of the CSAE，2018，34(9)：49 - 57. (in Chinese)

[3]　金鑫，李树君，杨学军，等. 蔬菜钵苗取苗机构运动分析与参数优化[J]. 农机化研究，2014，36(7)：13 - 17.
JIN Xin，LI Shujun，YANG Xuejun，et al. Motion analysis for vegetable potted seedling pick-up mechanism with double crank geared linkages[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2014，36(7)：13 - 17. (in Chinese)

[4]　曹蓉，黄忠阳，李伟明，等. 不同育苗基质配方对羽衣甘蓝幼苗生长的影响[J]. 中国园艺文摘，2016，32(10)：21 - 23.
CAO Rong，HUANG Zhongyang，LI Weiming，et al. Effect of different media formulation on seedling growth of collard greens [J]. Chinese Horticulture Abstracts，2016，32(10)：21 - 23. (in Chinese)

[5]　闫联帮，赵瑞，陈俊琴，等. 苗龄和营养面积对甘蓝穴盘苗生长发育及品质的影响[J]. 西北农业学报，2013，22(3)：127 - 130.
YAN Lianbang，ZHAO Rui，CHEN Junqin，et al. The effects of seedling age and nutrition area of tray-soilless seedling cabbage on the growth and quality of seedling[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica，2013，22(3)：127 - 130. (in Chinese)

[6]　刘继展，李茂，李男，等. 草莓穴盘苗移栽末端执行器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报，2016，47(11)：49 - 58.
LIU Jizhan，LI Mao，LI Nan，et al. Design and test of end-effector for automatic transplanting of strawberry plug seedlings[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2016，47(11)：49 - 58. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20161107&journal_id = jcsam. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.007. (in Chinese)

[7]　刘炜，刘继展. 穴盘苗移栽机器人末端执行器综述[J]. 农机化研究，2013，35(7)：6 - 10.
LIU Wei，LIU Jizhan. Review of end-effectors in tray seedlings transplanting robot[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2013，35(7)：6 - 10. (in Chinese)

[8] 岳建魁,郭俊先,梁佳,等. 国内外移栽机械发展现状[J]. 新疆农机化,2016(5):30 - 32,36.
YUE Jiankui,GUO Junxian,LIANG Jia,et al. The development status of transplanting machinery at home and abroad[J]. Xinjiang Agricultural Mechanization,2016(5):30 - 32,36. (in Chinese)

[9] KANG D H,KIM D E,LEE G I,et al. Development of a vegetable transplanting robot[J]. Journal of Biosystems Engineering,2012,37(3):201 - 208.

[10] 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.

[11] YANG Y,TING K C,GIACOMELLI G A. Factors affecting performance of sliding-needles gripper during robotic transplanting of seedlings[J]. Applied Engineering in Agriculture,1991,7(4):493 - 498.

[12] TING K C,GIAOCOMELLI 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.

[13] 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 CSAE,2017,33(14):18 - 24. (in Chinese)

[14] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(7):23 - 30. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20150704&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.004. (in Chinese)

[15] 冯青春,王秀,姜凯,等. 花卉幼苗自动移栽机关键部件设计与试验[J]. 农业工程学报,2013,29(6):21 - 27.
FENG Qingchun,WANG Xiu,JIANG Kai,et al. Design and test of key parts on automatic transplanter for flower seedling[J]. Transactions of the CSAE,2013,29(6):21 - 27. (in Chinese)

[16] 王跃勇,于海业. 穴盘幼苗机械手取苗基质完整率影响因素试验与分析[J]. 农业工程学报,2015,31(14):65 - 71.
WANG Yueyong,YU Haiye. Experiment and analysis of impact factors for soil matrix intact rate of manipulator for picking-up plug seedlings[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(14):65 - 71. (in Chinese)

[17] 童俊华,蒋焕煜,蒋卓华,等. 钵苗自动移栽机器人抓取指针夹持苗坨参数优化试验[J]. 农业工程学报,2014,30(16):8 - 16.
TONG Junhua,JIANG Huanyu,JIANG Zhuohua,et al. Experiment on parameter optimization of gripper needles clamping seedling plug for automatic transplanter[J]. Transactions of the CSAE,2014,30(16):8 - 16. (in Chinese)

[18] 唐艳芹,王玉兴,姚庆伟,等. 钵体苗盘外盘根现象的试验研究[J]. 农机化研究,2007,29(11):164 - 166.
TANG Yanqin,WANG Yuxing,YAO Qingwei,et al. Experimental research on root intertwisting phenomena outside seedling plate[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2007,29(11):164 - 166. (in Chinese)

[19] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(11):59 - 67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20161108&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.008. (in Chinese)

[20] 韩绿化,毛罕平,缪小花,等. 基于穴盘苗力学特性的自动取苗末端执行器设计[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(11):260 - 265.
HAN Lühua,MAO Hanping,MIAO Xiaohua,et al. Design of automatic picking up seedling end-effector based on mechanical properties of plug seedlings[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(11):260 - 265. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20131144&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.11.044. (in Chinese)

[21] 黄令军,刘雪东,苏世卿. 基于离散单元法球形颗粒碰撞破碎行为的数值模拟[J]. 中国粉体技术,2014,20(3):60 - 63.
HUANG Lingjun,LIU Xundong,SU Shiqing. Numerical simulation on breaking behavior of spheroidal particles impact based on discrete element method[J]. China Powder Science and Technology,2014,20(3):60 - 63. (in Chinese)

[22] 赵淑红,刘宏俊,谭贺文,等. 丘陵地区双向仿形镇压装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(4):82 - 89.
ZHAO Shuhong,LIU Hongjun,TAN Hewen,et al. Design and experiment of bidirectional profiling press device for hilly area[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(4):82 - 89. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20170410&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.04.010. (in Chinese)