doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.006

油菜钵苗开沟槽水平推苗栽植机构设计与试验

肖名涛[1,2]　肖仕雄[1]　陈　斌[1]　孙松林[1,2]　熊　力[1]

(1.湖南农业大学工学院,长沙 410128;2.湖南省现代农业机械装备工程技术研究中心,长沙 410128)

摘要:为了提高油菜钵苗移栽效率与质量,设计了一种适合厢面开沟槽水平推苗移栽的栽植机构。为了分析和优化该机构的结构参数,建立了数学模型和运动学方程,并编写了基于 Matlab 的人机交互式程序。结合油菜钵苗水平推苗移栽的农艺要求,探讨了栽植机构运动轨迹与幼苗移栽直立度合格率的关系。研究了水平推苗移栽的运动机理,优选了栽植机构杆件长度、安装位置和初始角度等参数,并根据该参数设计了油菜钵苗幼苗移栽试验装置。进行了栽植机构运动静、动轨迹验证试验和栽苗试验,轨迹验证试验表明,样机实际运动规律符合仿真设计要求,栽苗试验表明,在行驶速度 0.4 ~ 0.6 m/s、栽植机构循环频率在 1 ~ 1.5 Hz 之间,移栽株距 0.2 ~ 0.3 m,移栽深度 0.04 ~ 0.06 m 时,水平推苗栽植合格率不低于 90%,说明水平推苗移栽满足油菜钵苗移栽要求。

关键词:油菜;钵苗;移栽;水平推苗;栽植机构

中图分类号:S223.9　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2019)10-0056-08

Design and Experiment of Horizontal Push Seedling Transplanting Mechanism for Rapeseed Seedling Opening Groove

XIAO Mingtao[1,2]　XIAO Shixiong[1]　CHEN Bin[1]　SUN Songlin[1,2]　XIONG Li[1]

(1. *School of Engineering*, *Hunan Agricultural University*, *Changsha* 410128, *China*

2. *Hunan Modern Agricultural Machinery Engineering and Technology Research Center*, *Changsha* 410128, *China*)

Abstract: In order to improve the efficiency and quality of rapeseed seedling transplanting, and reduce planting cost, improve planting efficiency, realize rapeseed seedling high-speed transplanting, a set of transplanting mechanism which suitable for horizontal push seedling transplanting in grooves was designed. In order to analyze and optimize the structural parameters of the mechanism, the mathematical model and kinematics equations of the mechanism were established, and a human-computer interactive program based on Matlab was prepared. Based on the agronomic requirements of horizontal push seedling transplanting in rapeseed, the relationship between the movement trajectory of planting mechanism and the yield of vertical transplanting of seedlings was established. According to the simulation results, a group of parameters such as length, installation position and initial angle of the mechanism were optimized, and a transplanting test device for rapeseed seedlings was designed and manufactured. The static and dynamic trajectory curves of the transplanting mechanism were tested by sensors, it was proved that the actual motion law of the prototype met the requirements of simulation design, and the mechanism design, mathematical model, software program and relational model were accurate. The laboratory seedling test showed that the pass rate of horizontal push seedling planting was not less than 90%, under the conditions of the transplanting plant distance was 0.2 ~ 0.3 m at mechanical driving speed of about 0.4 ~ 0.6 m/s, and the frequency of the planting mechanism was between 1 Hz and 1.5 Hz, the transplanting depth was about 0.04 ~ 0.06 m. The experimental results showed that the transplanting of horizontal push seedlings can meet the requirements and high efficiency of the transplanting of rape seedlings, the research result had certain guiding significance for horizontal seedling transplanting.

Key words: rapeseed; seedling; transplanting; horizontal push seedlings; planting institutions

收稿日期:2019-04-27　修回日期:2019-08-10

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0700800)和湖南省科技厅重点研发计划项目(2016NK2111)

作者简介:肖名涛(1981—),男,副教授,博士,主要从事农业机械创新设计研究,E-mail:13975855132@163.com

通信作者:孙松林(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械创新设计研究,E-mail:hnndssl@163.com

0　引言

油菜种植过程包括耕整地、育苗、移栽、收割等多个环节，其成本高、收益低。采用机械化浅耕直播种植油菜的方法，作业简单，综合收益比较高，已成为主要的种植方法。在南方冬油菜主产区，由于温光条件好，复种指数高，多采用秧田育秧、适龄期移栽种植并配合机械化插秧的方法。在南方大部分双季稻区均可实现稻-稻-油三熟种植。移栽种植油菜能实现粮油种植整体收益最大化，具有广阔的市场环境[1-3]。

油菜的种植密度大，平均 20 万株/hm^2 以上，密植油菜分蘖少，植株不易交叉缠绕，适合机械化收割。油菜喜水怕渍，冬油菜在晚稻收割后种植，其种植方法与水稻种植差异很大。水稻种植在水田中，泥浆阻力小，幼苗可在无保护情况下高速栽插；而油菜种植需要整理厢面，开沟排水，打穴孔后移栽，移栽阻力大，栽植器与栽植装置结构复杂，很难实现高速移栽种植[4-6]。

目前，用于旱地作物移栽的机械很多，如意大利 Ferrari 公司 FPC 覆膜移栽一体化全自动移栽机，日本井关 PVHR2 - E18 移栽机，中国南通富来威农业装备有限公司的 2ZQ - 4 型半自动油菜移栽机等。根据移栽机栽植器的结构可以分为链夹式移栽机、吊杯式移栽机和导苗管式移栽机等[7-9]。链夹式移栽机采用循环式链夹，实现接苗、送苗、栽苗一体化作业，效率高，但南方水田土壤含水率高、粘性强，苗夹易堵塞，链夹式栽植器对投苗的准确性要求特别高，难以适合自动化作业。吊杯式移栽机采用往复式或循环式驱动装置驱动，其中，往复式移栽机构结构简单、重量轻，但其效率低，高速运动时振动大。循环式驱动装置结构复杂、质量大，循环转盘直径大，难以适应南方水田小田块的作业环境。导苗管式移栽机依靠幼苗重力移栽，结构简单，配合高效的移栽机构，可实现高速高效作业。本文在导苗管式移栽机的基础上，配合厢面开沟槽和多杆式水平推苗装置，在导苗下落末端采用水平推苗的方式实现移栽。

1　机构原理与运动学分析

1.1　结构原理

油菜钵苗开沟槽水平推苗栽植机构主要由动力驱动装置、曲柄、连杆、摇杆、推苗板及开沟器等组成，如图 1 所示。曲柄 2、连杆 9 和摇杆 3 组成一套曲柄摇杆机构，在动力装置的驱动作用下，摇杆 3 按照一定的运动规律左右摆动。摇杆 3、摇杆 4 和连杆 8 组成一套平行四边形机构，在连杆 9 的作用下，摇杆 3 和摇杆 4 的运动规律相同，连杆 8 在平行四边形机构的作用下，做水平和垂直平移运动。摇杆 3、连杆 10 和摇杆 1 组成一套双摇杆机构，此时摇杆 3 为主动摇杆，摇杆 1 为从动摇杆。在连杆 10 的延长线上连接有推苗板。连杆 8、10、6 和推苗板组成另一套平行四边形机构。动力驱动装置和摇杆 1、3、4 通过销轴安装在开沟护板上。

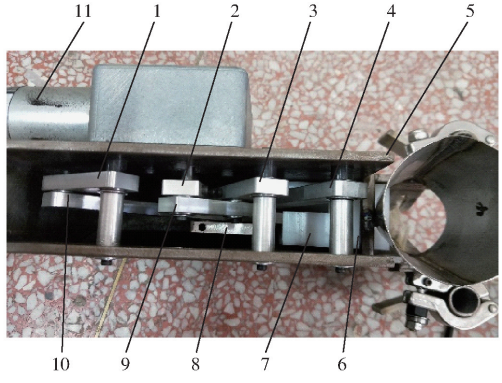

图 1　移栽机构实物图

Fig. 1　Transplant mechanism structure diagram

1、3、4. 摇杆　2. 曲柄　5. 开沟护板　6、8、9、10. 连杆　7. 推苗板　11. 电机

1.2　工作原理

在推苗初始位置，曲柄与连杆重叠，推苗板位于初始位置，当曲柄继续旋转，将推苗板从初始位置逐步推出；当曲柄、连杆共线而不重叠时，推苗板处于推苗终了位置。由于曲柄连杆机构的作用是使得摆杆 3 产生左右摆动，在第 1 套平行四边形机构的作用下，连杆 8 的主要运动为水平平移运动。双摇杆机构的作用是通过控制连杆 10 的运动规律，控制第 2 套平行四边形机构在垂直方向上抵消第一套平行四边形机构的位移，进而控制推苗板在推苗的过程中以水平运动为主，在水平运动过程中仅产生微量的垂直运动，从而保证推苗移栽质量，其结构图如图 2 所示。

1.3　运动学建模

根据结构图绘制油菜钵苗开沟槽水平推苗移栽机构的模型图，如图 3 所示。详细模型图如图 4、5 所示。

1.4　位移方程求解

根据图 3 ~ 5，建立模型的矢量方程

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

$$\boldsymbol{l}_{CF}+\boldsymbol{l}_{JF}=\boldsymbol{l}_{CK}+\boldsymbol{l}_{JK} \tag{2}$$

将方程(1)转化为解析形式，求解 A、B 点的动态坐标(x_A,y_A)、(x_B,y_B)，即

$$\begin{cases} x_A=x_O+l_1\cos\alpha_1 \\ y_A=y_O+l_1\sin\alpha_1 \end{cases} \tag{3}$$

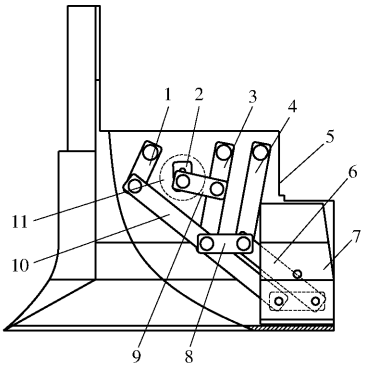

图 2 移栽机构结构简图

Fig. 2 Transplant mechanism structure diagram

1、3、4. 摇杆 2. 曲柄 5. 开沟护板 6、8、9、10. 连杆 7. 推苗板 11. 电机

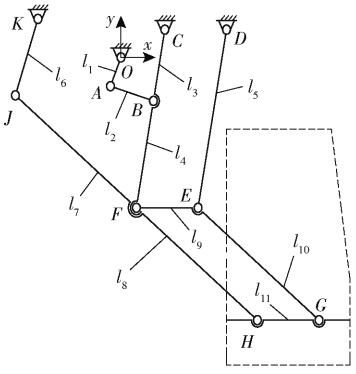

图 3 双平行多杆式栽植机构模型

Fig. 3 Model diagram of parallel multi-bar planting mechanism

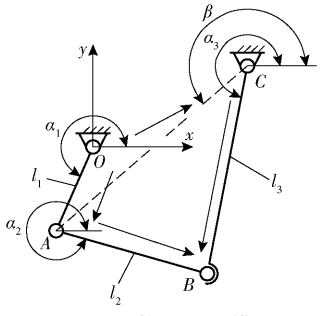

图 4 机构 *OABC* 模型

Fig. 4 Diagram of mechanism *OABC*

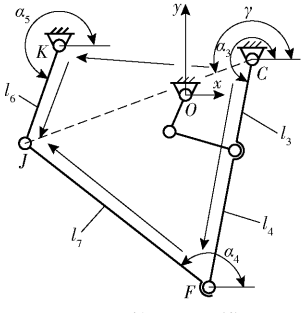

图 5 机构 *CFJK* 模型

Fig. 5 Diagram of mechanism *CFJK*

式中 α_1——曲柄 OA 与 x 轴的初始夹角

l_1——曲柄 OA 的长度

(x_O, y_O)——原点坐标

$$\begin{cases} x_B = x_A + l_2\cos\alpha_2 = x_C + l_3\cos\alpha_3 \\ y_B = y_A + l_2\sin\alpha_2 = y_C + l_3\sin\alpha_3 \end{cases} \tag{4}$$

式中 α_2——连杆 AB 与 x 轴的夹角

α_3——摇杆 BC 与 x 轴的夹角

l_2——连杆 AB 的长度

l_3——摇杆 BC 的长度

方程(4)两端平方后消除 α_2 得

$$(x_C - x_A)^2 + (y_C - y_A)^2 - l_2^2 + l_3^2 + 2l_3[(x_C - x_A)\cos\alpha_3 + (y_C - y_A)\sin\alpha_3] = 0 \tag{5}$$

设 AC 连线与 x 轴的夹角为 β,则

$$\tan\beta = (y_A - y_C)/(x_A - x_C) \tag{6}$$

将式(4)、(6)化简后,可得

$$\cos(\alpha_3 - \beta) = \frac{l_3^2 + (x_A - x_C)^2 + (y_A - y_C)^2 - l_2^2}{2l_3\sqrt{(x_A - x_C)^2 + (y_A - y_C)^2}} \tag{7}$$

因为 $\alpha_3 - \beta$ 为三角形 ABC 的内角,所以 $\alpha_3 - \beta$ 在 0 ~ π 之间。β、$\alpha_3 - \beta$、α_3 可求解。

通过式(4)可求解 α_2。

因为 $CFJK$ 组成了一套双摇杆机构。其主动摇杆为第一套曲柄连杆机构的摇杆 BC,从动摇杆为摇杆 JK,由于 F 点位于摇杆 BC 的延长线上,因此

$$\begin{cases} x_F = x_B + l_4\cos\alpha_3 \\ y_F = y_B + l_4\sin\alpha_3 \end{cases} \tag{8}$$

式中 l_4——摇杆 BF 的长度

$$\begin{cases} x_J = x_F + l_7\cos\alpha_4 = x_K + l_6\cos\alpha_5 \\ y_J = y_F + l_7\sin\alpha_4 = y_K + l_6\sin\alpha_5 \end{cases} \tag{9}$$

式中 l_6——摇杆 JK 的长度

l_7——连杆 FJ 的长度

α_4——FJ 与 x 轴的夹角

α_5——摇杆 JK 与 x 轴的初始角

方程(9)两端平方后消除 α_4 得

$$(x_K - x_F)^2 + (y_K - y_F)^2 - l_7^2 + l_6^2 + 2l_6[(x_K - x_F)\cos\alpha_5 + (y_K - y_F)\sin\alpha_5] = 0 \tag{10}$$

设 CK 连线与 x 轴的夹角为 γ,则

$$\tan\gamma = (y_C - y_K)/(x_C - x_K) \tag{11}$$

将式(9)、(11)化简后,可得

$$\cos(\alpha_5 - \gamma) = \frac{l_6^2 + (x_F - x_K)^2 + (y_F - y_K)^2 - l_7^2}{2l_6\sqrt{(x_F - x_K)^2 + (y_F - y_K)^2}} \tag{12}$$

因为 $\alpha_5 - \gamma$ 为三角形 KJF 的内角,所以 $\alpha_5 - \gamma$ 在 0 ~ π 之间。γ、$\alpha_5 - \gamma$、α_5 可求解。

通过式(9)得到 $\tan\alpha_4 = (y_J - y_F)/(x_J - x_F)$,$\alpha_4$ 可求解。

因为 $CDEF$ 组成一套平行四边形机构,E 点与

F 点具有同样的运动规律，故

$$\begin{cases} x_E = x_F + l_9 \\ y_E = y_F \end{cases} \tag{13}$$

式中　l_9——连杆 EF 的长度

因点 H 在杆 JF 的延长线上，$FEGH$ 组成另一套平行四边形机构。因此 H、G 点的坐标方程分别为

$$\begin{cases} x_H = x_F + l_8\cos\alpha_4 \\ y_H = y_F + l_8\sin\alpha_4 \end{cases} \tag{14}$$

式中　l_8——连杆 FH 的长度

$$\begin{cases} x_G = x_H + l_{11} \\ y_G = y_H \end{cases} \tag{15}$$

式中　l_{11}——连杆 GH 的长度

根据位移方程，可求解各点的数据，通过编写图形程序，可显示各点的运动轨迹，求解框图如图 6 所示。

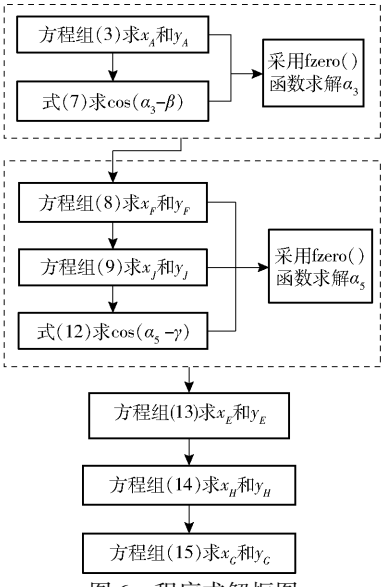

图 6　程序求解框图

Fig. 6　Program solution diagram

2　栽植机构运动规律分析

根据移栽农艺要求，油菜钵苗移栽质量的关键指标主要包括直立度、栽深一致性系数、伤苗率、行株距均匀性系数等[10]。在机械化垂直移栽时，由于机械匀速行驶，而整个栽植过程需要消耗一定的时间，因此，为了保证在整个油菜钵苗与土壤接触到完成移栽的整个时间段里，油菜钵苗相对于地面做垂直栽插运动，实现“零速”移栽，需要设计专用的栽植机构，实现在机械不停驶的条件下“零速”移栽[11-14]。同时对于垂直移栽的移栽机构，还需要保证栽植机构中的栽植器在插入和退出厢面土壤的栽植深度时都垂直于地面，提高移栽幼苗直立度效果，图 7 所示为一种垂直式移栽机的栽植轨迹[15-16]。

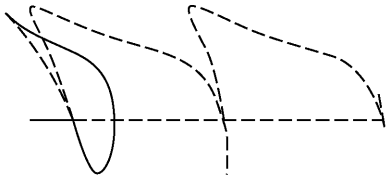

图 7　垂直式油菜移栽机栽植器运动轨迹

Fig. 7　Motion trajectory of vertical rapeseed transplanter

对于水平移栽，由于油菜钵苗已经被投放在植苗沟槽中，无垂直栽插的过程，其运动规律主要是使水平推苗的运动与机械前进的运动抵消，实现在水平方向上的“零速”移栽，其理想的运动规律特征是栽植装置在推苗栽植的过程中，栽植装置相对地面为“零速”，由于水平栽植机构的运动轨迹在水平方向上重叠，难以分析其运动过程。为了轨迹分析的需要，将机械在前进方向上行驶的位移（或对应的行驶时间）设为 x 轴，将栽植装置的行驶位移设为 y 轴，其理想的运动规律如图 8 所示[17-19]。

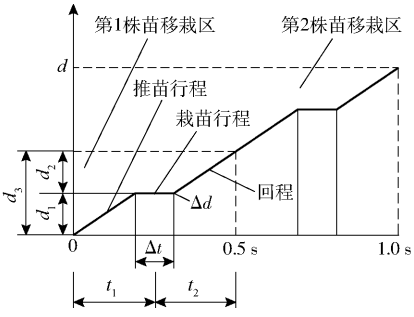

图 8　水平式移栽的理想运动曲线

Fig. 8　Ideal motion curve for horizontal transplant

水平式移栽主要具有 3 个特点：①在图 8 中对应的时间 t_x 内（t_x 的长度与油菜钵苗钵体直径对应的移栽机行驶时间相关），推苗板相对地面静止，即随着机械向前行驶，而栽植装置相对地面不运动，如图 8 所示。②图 8 的 t_1 时间段是栽植机构的推苗行程，t_2 时间段是栽植机构的返回行程。③线段 2 对应的长度越长，表面栽植装置相对地面“零速”运动的时间越长，栽植装置对栽植启停位置的敏感性越低。图 8 表示的仅仅是完全理想的移栽曲线，在栽植机构优选过程中，最关键的指标是在 t_x 时间段内，d 的增量越小越好，而且，对于移栽直立度要求高的作物，d 对应的增量越小越好，对于移栽直立度要求不高的作物，d 对应的增量可以稍微增大。同时，对应移栽质量的稳定性，满足“零速”移栽的条件所对应的时间 t_x 越长，说明栽植机构在栽苗的过程中与油菜钵苗相对“零速”接触的时间越长，越有利于幼苗的生长。

3　运动学仿真与数据优选

为了分析栽植机构的运动轨迹是否满足理想运

动特性的要求,针对栽植机构的运动方程,设计计算机仿真程序。基于 Matlab 矩阵运算、数据求解、算法优化以及 Gui 的图形编程等功能,采用 Matlab 的 Gui 编写程序,可实现图形界面的运动轨迹优选[20-23]。

3.1 基于 Matlab 的优选模型

图 9 为基于 Matlab 的油菜钵苗开沟槽水平推苗移栽机构仿真程序的动轨迹模拟图,并编写了基于图形界面的计算机仿真程序,仿真程序界面如图 9 所示。包括数据输出区(Ⅰ)、命令栏区(Ⅱ)、数据输入区(Ⅲ)。

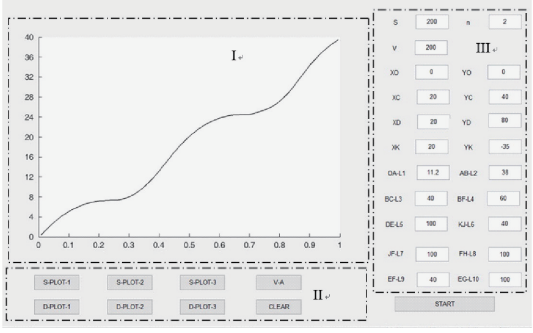

图 9 基于 Matlab 的图形编程界面

Fig. 9 Graphics programming interface based on Matlab

3.2 优选依据

基于油菜移栽密度大,栽植机构运转速度快,以目前高速移栽机平均每秒栽植两株(120 株/min)为目标,移栽密度为 20 万株/hm^2(20 株/m^2),行距 200 mm,株距 250 mm 为关键参数。以育苗 32 d 的油菜钵苗为基本依据,其关键尺寸参数为:钵苗的高度小于 12 cm,钵苗的叶冠直径 35 mm,钵苗钵体直径 15 mm,开沟槽宽度 25 mm。为了保证油菜钵苗从栽植机构中顺利栽出,栽植机构需要满足如下特征:

(1)在推苗移栽过程中,推苗板伸出护沟板的最小距离能保证钵苗钵体与覆土区土壤接触,且不小于钵苗钵体直径,实测空间不小于 20 mm。

(2)推苗装置的极限回退行程对应的空间,能满足 1 株幼苗直立,护沟板末端具有安装防倒伏毛刷空间,实测空间不小于 50 mm。

(3)受护沟板长度影响,栽植机构的最大横向长度不大于 300 mm,高度不小于 160 mm,不大于 200 mm。

(4)为了设计、加工、计算方便,优选数值取整数值。

3.3 机构优选参数

机构的优选参数主要包括固定点安装位置、杆件长度等指标。

根据图 8 的理想栽植曲线,通过 Matlab 的 Gui 程序,改变不同的移栽机构参数,观察移栽机构运动的动轨迹特征与理想栽植曲线的相似度,优选移栽机构的各种参数,其中以 O 点为坐标原点,坐标系如图 3 所示,C、D、K 点的坐标分别是(45,20)、(85,20)、(-35,20)。杆件长度 l_1、l_2、l_3、l_4、l_5、l_6、l_7、l_8、l_9、l_{10}、l_{11} 分别为 11.2、38、40、60、100、40、100、100、40 100、40 mm。

3.4 优选方案特点

根据上述优选方案,通过 Matlab 运动仿真,输出机构的动轨迹与静轨迹图形,其动轨迹如图 10 所示。

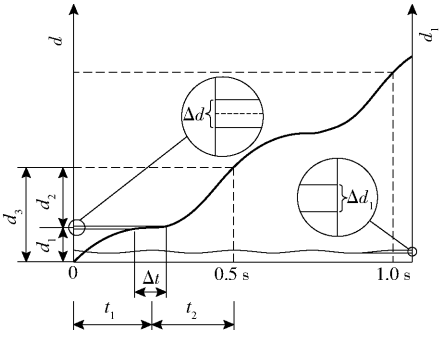

图 10 优选后的机构运动特性图

Fig. 10 Motion characteristics of mechanism after optimization

其主要特征为当 $\Delta t \leqslant 0.2$ s,推苗板运动距离 d 的变化量 Δd 不大于 1 mm,可以近似认为在推苗行程中有 0.2 s 时间,推苗板相对于地面“零速运动”,其行程占整个推苗行程的 80%,远大于推苗过程中幼苗与土壤的接触时间,有利于提高移栽质量。在整个运动行程中,其静轨迹在 y 轴上的最大偏差 Δd_1 小于 0.35 mm。相对于机构的运动来说,其静轨迹接近一条直线,说明栽植装置在水平推苗移栽过程中几乎无垂直运动,也有利于提高移栽质量。

4 试验与分析

4.1 试验装置

为了验证移栽机构的运动特性,进行了移栽机构动轨迹与静轨迹的验证试验,试验装置如图 11 所示,在推苗板的顶部安装传感器,通过数传模块将数据传入计算机,得到油菜钵苗开沟槽水平推苗移栽

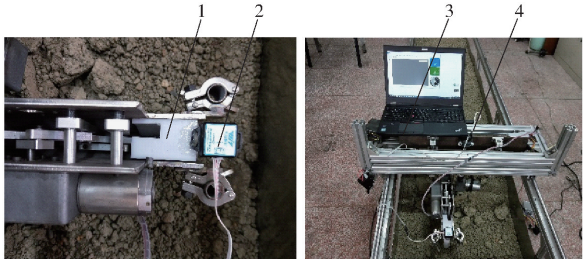

图 11 轨迹测试过程

Fig. 11 Trajectory test process

1. 推苗板 2. 传感器 3. 计算机 4. 数传模块

机构实际运动的动轨迹与静轨迹参数，通过叠加运动数据后其图形如图 12 所示。

4.2　试验方案与结果

针对移栽性能关键指标，设计在相同速度条件下的轨迹验证试验和不同速度条件下的轨迹验证试验。

试验设备包括：室内土槽（宽 0.6 m、长 4 m）。试验小车：行驶速度 0 ~ 0.6 m/s（无级可调），栽植机构可调节升降高度 0.25 m，运行时机架振动最大振幅不超过 0.1 mm，具有限位自动停车装置和急停装置；JY901 - 9 型轴姿态角度传感器，加速度 3 维，角速度 3 维，角度 3 维；Thinkpad P50 计算机，Windows 7 操作系统，上位机软件 MiniIMU；秒表（准确度 0.01 s）。

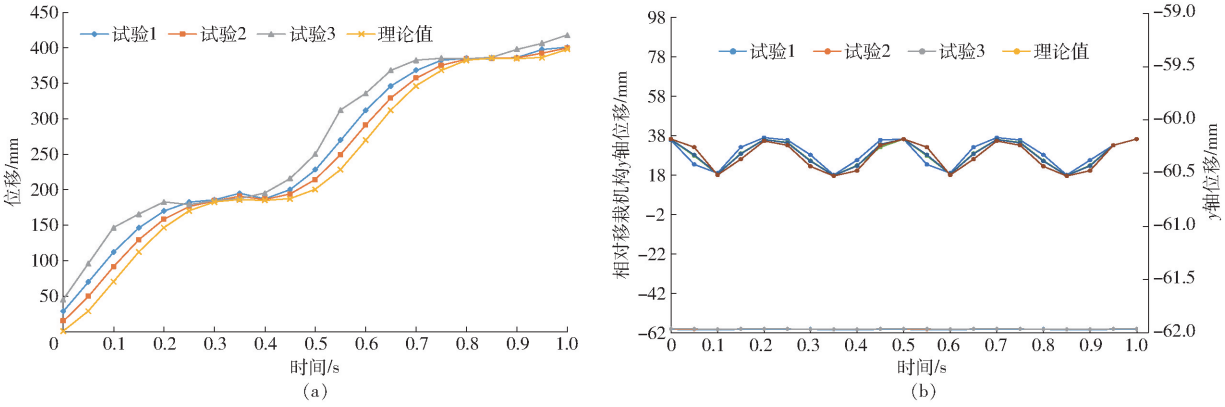

图 12　相同速度条件下的试验轨迹

Fig. 12　Test tracks at same speed

4.2.1　相同速度条件下的轨迹验证试验

推苗板相对于地面的动轨迹曲线主要体现在水平方向上的位移变化，推苗板相对机械的静轨迹曲线主要体现在垂直方向上的位移变化，为此，需要测试实际在水平方向上的动轨迹曲线和垂直方向上的静轨迹曲线是否与理论设计相符合。

（1）小车车速确定方法：调节小车行驶速度，测试小车行驶 2 m 所用的时间，将小车行驶时间控制在（5 ±0.1）s 的范围内，连续测试 3 次，记录车速为 0.4 m/s。

（2）移栽机构推苗频率的确定方法：调节驱动曲柄的电动机转速，记录曲柄推苗 20 次所用的时间，将所用时间控制在（5 ±0.1）s 的范围内，连续测试 3 次，记录移栽推苗频率为 2 Hz。

（3）试验数据零点确认方法：由于机械在不停运动，无法像仿真一样直接赋初值确定开始条件，要准确知道每次取值的初值很难，只能根据所测的数据，预估初值。当测量在连续 10 步长范围内，平移位移变化很小时，确定为开始移栽推苗的始点。为了分析方便，对应动态轨迹，在水平位移的基础上通过增加理论垂直位移进行修正，得到修正后的动轨迹曲线，如图 12a 所示。

从图 12a 分析得知，3 条实际动轨迹曲线和理论轨迹曲线的线条形状相似，可认为实际动轨迹运动规律与理论设计比较符合，同时也可以发现，4 条数据线并不重合，主要是因为，测试的数据片段是整个移栽过程中的片段，要找到对应的原点位置很难，由于取值精度的问题，出现了一定的偏差，另外，在试验装置的土槽上，由于导杆是由两段拼接而成，行驶过程中有轻微的冲击，导致数据会发生轻微的变化。从图 12b 分析得知，在静轨迹测试试验中，由于整机不在导轨上运动，因此，可消除由于试验小车行驶产生的误差，因而数据的准确性更好。同时，由于栽植机构与整机都在水平面运动，因此，静轨迹以移栽频率重复出现，因此也比较容易选中初值。在垂直方向上的实际静轨迹曲线与理论曲线非常相似，可认为实际静轨迹运动规律与理论设计相符合。

4.2.2　不同速度条件下的动轨迹验证试验

为了探索移栽机构在偏离实际行驶速度后，移栽机构的运动过程，设计了不同速度条件下的动轨迹验证试验。寻找移栽机构在移栽机械行驶速度变化过程中的轨迹变形特征，探索移栽机构与作业速度的敏感关系。

小车车速确定方法、移栽机构推苗频率的确定方法、试验数据零点确认方法与相同速度条件下的轨迹验证试验方法相同。

采用固定移栽机构推苗频率，进行小车行驶速度的单因素试验。移栽机构的推苗频率为 2 Hz，移栽速度分别为 0.3、0.35、0.45、0.5、0.55、0.6 m/s 6 个水平，0.4 m/s 为理论移栽速度，以仿真数据替代，试验每次进行 3 组，试验结果如图 13 所示。

试验数据表明，随着移栽行驶速度的降低，很难找到一段 Δt 对应的小增量 Δd，说明降低移栽速度，会使得移栽质量变差。在移栽行驶速度提高至

0.55 m/s 时,在大于 0.1 s 的 Δt 范围内,Δd 的增量变化很小,与理论的效果曲线十分接近。当移栽速度提高至 0.6 m/s 后,很难找到一段 Δt 对应的小增量 Δd。试验结果表明,移栽机构的动轨迹变化对速度降低十分敏感,对速度提高不太敏感,实际行驶速度在理论速度上增加 37.5% 后,移栽规律无明显变化。

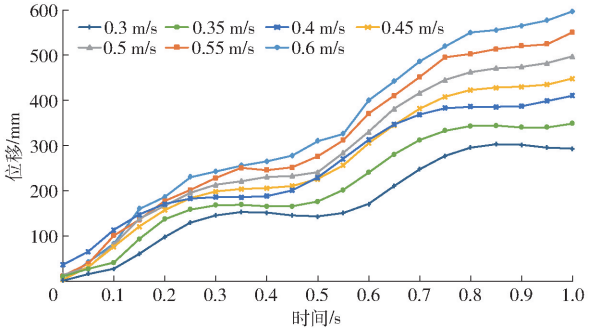

图 13 实测动轨迹曲线

Fig. 13 Measured dynamic trajectory curves

4.2.3 植苗试验

以仿真优选结构参数对应的理论株距(即行驶速度与移栽频率的比值为 0.2)开展移栽合格率试验。如移栽速度为 0.4 m/s,则对应的移栽频率为 2 Hz,移栽速度为 0.6 m/s,移栽频率对应为 3 Hz,分别测试 1、1.5、2、2.5、3 Hz 的栽苗情况,每次测试 10 株,统计合格率。试验结果如图 14 所示。

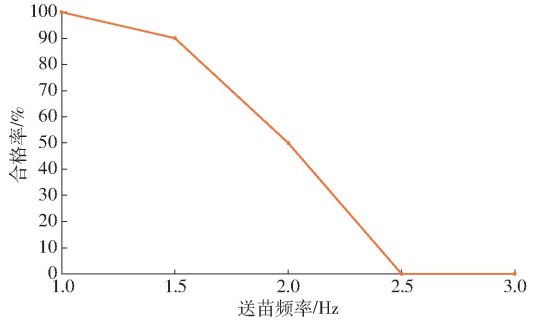

图 14 植苗合格率变化曲线

Fig. 14 Changing curve of seedling qualification rate

由图 14 分析可知,随着移栽频率的提高,栽植合格率急剧下降,当超过 2.5 Hz 后,栽植合格率为零,主要表现在,移栽装置接苗的准确性变差,幼苗无法准落入移栽机构,完成植苗。在栽植频率为 1 Hz 时合格率为 100%,植苗频率在 1.5 Hz 时合格率为 90%。

综上分析,试验小车行驶速度在 0.4 ~ 0.6 m/s,栽植机构循环频率在 1.0 ~ 1.5 Hz,移载株距 0.2 ~ 0.3 m,移栽深度 0.04 ~ 0.06 m 时,水平推苗栽植合格率不低于 90%。

4.3 对比分析

目前主流的移栽机,虽然各栽植机构的移栽速度不一样,但由于移栽密度的影响,其移栽效率比较接近,集中在 0.1 ~ 0.28 hm^2/h 之间。各移栽机构对幼苗的损伤小于 8%,其中挠性圆盘式的最低,在 1% ~ 3% 之间。吊杯式移栽机和挠性圆盘式移栽机由于位置空间大小问题不适合密植移栽。链夹式、吊杯式、挠性圆盘式移栽机对输送苗的要求高,较难应用在全自动化移栽场合。链夹式和挠性圆盘式移栽机对幼苗类型适应性比较好,导苗管式和吊杯式移栽机只适合移栽钵苗。

综上分析,本文研制的开沟槽水平推苗栽植机构其特征为在导苗管式移栽机的基础上,设置了特殊的推苗机构,其工作原理及特性与导苗管式移栽机具有相似性。其关键特征是通过设置推苗机构,能够适应南方油菜种植的粘性土壤环境。

5 结论

(1)移栽机构的位移特征使水平推苗移栽的运动轨迹在水平方向上重叠,为了便于直观分析其曲线轨迹,在机构运动参数的垂直方向上需加权行驶速度。机构仿真图形随着栽植循环而重复出现,但机构仿真图形不能形成闭合图形。

(2)根据农艺要求,通过 Matlab 仿真分析可以直观地优选结构参数,即使在相同的农艺要求情况下,也可以优选出多组不同参数的杆件。

(3)通过建立运动学方程,并设计基于 Matlab 的仿真计算程序,可准确表达栽植机构的运动特征。

(4)栽植试验表明,试验小车行驶速度在 0.4 ~ 0.6 m/s,栽植机构循环频率在 1.0 ~ 1.5 Hz,移载株距在 0.2 ~ 0.3 m,移栽深度 0.04 ~ 0.06 m 时,水平推苗栽植合格率不低于 90%。

(5)随着移栽频率提高,输送苗的准确性变差,影响了栽植质量。为了进一步提高移栽效率和速度,应开发基于水平移栽的高速精准输送苗装置。

参 考 文 献

[1] 熊秋芳,文静,李兴华,等. 中国油菜科技创新与产业发展[J]. 中国农业科技导报,2014,16(3):14 - 22.
XIONG Qiufang, WEN Jing, LI Xinghua, et al. Technological innovation and industrial development of rapeseed in China[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2014, 16(3): 14 - 22. (in Chinese)

[2] 吴明亮. 南方稻田油菜全程生产机械化的思考[C]//作物多熟种植与国家粮油安全高峰论坛论文集,2015.

[3] 程媛媛. 油-稻-稻轮作系统三免三抛栽培技术对作物生长与产量的影响[D]. 武汉:华中农业大学,2012.
CHENG Yuanyuan. Effects of seeding broadcasting with no-tillage cultication on crop growth and grain yield under rapeseed-rice-

rice rotation[D]. Wuhan: Huazhong Agricultral University, 2012. (in Chinese)
[4] 胡茂辉. 不同播种期、移栽密度与施氮量对稻田油菜生长发育和产量的影响[D]. 长沙:湖南农业大学,2012.
HU Maohui. Effects of differrent sowing date stransplanting densities and nitrogen fertilizer application on growth and development and yield of rape in paddy field[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2012. (in Chinese)
[5] 袁文胜,吴崇友,于修刚,等. 粘重土壤条件下油菜移栽机械化研究前景初探[J]. 中国农机化,2011,32(1):69-71,77.
YUAN Wensheng, WU Chongyou, YU Xiugang, et al. Preliminary study on the researching prospect of rape transplanter in heavy soil conditions[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2011, 32(1): 69-71, 77. (in Chinese)
[6] 汤云龙. 移栽方式与时期对饲用油用油菜产量品质的影响[D]. 扬州:扬州大学,2018.
TANG Yunlong. Effects of transplanting methods and period on the yield and quality of forage and oilseed rape[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2018. (in Chinese)
[7] 崔巍,徐盼,王海峰,等. 旱地自动移栽技术发展现状及分析[J]. 农机化研究,2015,37(6):1-5,28.
CUI Wei, XU Pan, WANG Haifeng, et al. Present status and analysis of dry-land auto-transplanting seedling technique[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(6): 1-5, 28. (in Chinese)
[8] 张冕,姬江涛,杜新武. 国内外移栽机研究现状与展望[J]. 农业工程,2012,2(2):21-23.
ZHANG Mian, JI Jiangtao, DU Xinwu. Status and prospect of transplanter at home and abroad[J]. Agricultural Engineering, 2012, 2(2): 21-23. (in Chinese)
[9] 韩长杰,张学军,杨宛章,等. 旱地钵苗自动移栽技术现状与分析[J]. 农机化研究,2011,33(11):238-240.
HAN Changjie, ZHANG Xuejun, YANG Wanzhang, et al. Present status and analysis of dry-land auto-transplanting seedling technique[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(11): 238-240. (in Chinese)
[10] 刘明峰. 油菜钵苗移栽机双五杆栽植机构设计与试验[D]. 武汉:华中农业大学,2015.
LIU Mingfeng. Design and experimental study on double five-bar transplanting mechanism of rape pot seeding transplanter[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015. (in Chinese)
[11] 肖名涛,孙松林,罗海峰,等. 双平行多杆栽植机构运动学分析与试验[J]. 农业工程学报,2014,30(17): 25-33.
XIAO Mingtao, SUN Songlin, LUO Haifeng, et al. Kinematic analysis and experiment of dual parallelogram multi-pole planting mechanism[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(17): 25-33. (in Chinese)
[12] 廖庆喜,刘明峰,张照,等. 油菜钵苗移栽机双五杆栽植机构多目标优化设计[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(11):49-56.
LIAO Qingxi, LIU Mingfeng, ZHANG Zhao, et al. Multi-objective optimization design of double five-bar transplanting mechanism for rape pot seedling[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 49-56. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20151108&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.008. (in Chinese)
[13] 向伟,吴明亮,官春云,等. 油菜钵体苗移栽栽植孔成型机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(10):40-48,58.
XIANG Wei, WU Mingliang, GUAN Chunyun, et al. Design and test of transplanting hole-forming machine for rapeseed potted seedlings[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10): 40-48, 58. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20171005&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.005. (in Chinese)
[14] 陈建能,王伯鸿,张翔,等. 多杆式零速度钵苗移栽机植苗机构运动学模型与参数分析[J]. 农业工程学报,2011,27(9):7-12.
CHEN Jianneng, WANG Bohong, ZHANG Xiang, et al. Kinematics modeling and characteristic analysis of multi-linkage transplanting mechanism of pot seeding transplanter with zero speed[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(9): 7-12. (in Chinese)
[15] 赵匀,张卫星,辛亮,等. 探入式番茄钵苗移栽机构设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(1):105-112.
ZHAO Yun, ZHANG Weixing, XIN Liang, et al. Design and experiment of extensible potted tomatoes seedling transplanting mechanism[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 105-112. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190111&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.011. (in Chinese)
[16] 金鑫,杜新武,杨传华,等. 移栽机曲柄滑槽式栽植机构设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(5):83-90.
JIN Xin, DU Xinwu, YANG Chuanhua, et al. Design and experiment on crank-chute planting mechanism of transplanting machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 83-90. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160512&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.012. (in Chinese)
[17] 徐高伟,刘宏新,荐世春,等. 基于五杆机构的丹参膜上移栽机构设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(9):55-65.
XU Gaowei, LIU Hongxin, JIAN Shichun, et al. Design and test of transplanting mechanism on mulch-film of *Salvia miltiorrhiza* based on five-bar mechanism [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 55-65. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20180906&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.006. (in Chinese)

(下转第 71 页)

1000-1298.2019.01.011.(in Chinese)

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

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

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

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

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

[24] 赵匀.农业机械分析与综合[M].北京:机械工业出版社,2009.

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

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

(上接第 63 页)

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

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

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

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

[22] 陈科,杨学军,颜华,等.基于 Matlab 的全自动移栽机取苗机构设计与参数优化[J/OL].农业机械学报,2013,44(增刊1):24-26,32.
CHEN Ke,YANG Xuejun,YAN Hua,et al. Design and parameter optimization of seedling pick-up mechanism based on Matlab [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(Supp.1):24-26,32. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=2013s105&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S1.005.(in Chinese)

[23] 王永维,何焯亮,王俊,等.旱地蔬菜钵苗自动移栽机栽植性能试验[J].农业工程学报,2018,34(3):19-25.
WANG Yongwei,HE Zhuoliang,WANG Jun,et al. Experiment on transplanting performance of automatic vegetable pot seedling transplanter for dry land[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(3):19-25.(in Chinese)