doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.006

基于五杆机构的丹参膜上移栽机构设计与试验

徐高伟[1,2]　刘宏新[1]　荐世春[2]　史　嵩[2]　何腾飞[2]

(1. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 山东省农业机械科学研究院, 济南 250100)

摘要: 针对丹参人工移栽作业效率和质量较低、劳动强度较大、现有膜上移栽机不适合丹参裸苗移栽等问题,为保证丹参裸苗机械化移栽立苗率,结合"丹参大垄双行覆膜高效生产技术"提出的农艺要求,设计了一种五杆式丹参移栽机构,在建立五杆机构的工况约束条件和自由运动约束条件的基础上,结合机构运动学模型利用 Matlab 建立人机交互可视化辅助界面;借助辅助界面研究栽植器端点的区域轨迹分布特性和机构参数对栽植器端点运动轨迹的影响规律,根据机构运动轨迹要求,通过数值循环比较得到满足丹参膜上移栽要求的五杆机构各构件参数;运用 LA-S 系列植物图像分析系统测量丹参植株形态的特征参数并根据特征参数设计鸭嘴栽植器各参数。样机试验结果表明:基于五杆机构的丹参膜上移栽机构在满足丹参移栽农艺要求的同时能保证丹参裸苗移栽的大升程轨迹、立苗率要求和作业质量,丹参移栽机构的立苗合格率为 97.3%、立苗优良率为 94.0%、漏栽率为 2.5%、株距变异系数为 6.5%、栽植深度合格率为 94.6%。

关键词: 丹参; 膜上移栽; 五杆机构; 移栽机构

中图分类号: S223.94; TH112.1　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2018)09-0055-11

Design and Test of Transplanting Mechanism on Mulch-film of *Salvia miltiorrhiza* Based on Five-bar Mechanism

XU Gaowei[1,2]　LIU Hongxin[1]　JIAN Shichun[2]　SHI Song[2]　HE Tengfei[2]

(1. *College of Engineering*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*
2. *Shandong Academy of Agricultural Machinery Sciences*, *Ji'nan* 250100, *China*)

Abstract: In order to solve the problem that artificial transplanting of *Salvia miltiorrhiza* with disadvantage of low efficiency and quality, high labor intensity, and the existing transplanter is not suitable for transplanting nude-seedlings of *Salvia miltiorrhiza*, and to ensure the erectness rate of mechanized transplanting naked-seedlings of *Salvia miltiorrhiza*, a kind of five-bar *Salvia miltiorrhiza* transplanting mechanism was designed, on the basis of establishing the working-conditions constraint and free movement constraint condition of five-bar mechanism and combining the kinematic model, the visual auxiliary interface of the human-computer interaction was established by using Matlab (Matrix Laboratory). With the help of the auxiliary interface, trajectory location method was used to study the regional trajectory distribution characteristics of the implant endpoint and the influence of the mechanism parameters on the trajectory, according to the trajectory requirements of mechanism, the parameters of five-bar mechanism was got to meet the transplanting requirements of *Salvia miltiorrhiza* through the numerical cycle comparison method. LA-S series plant image analysis system was used to measure the morphological parameters of *Salvia miltiorrhiza*, the parameters of duckbill transplanter was designed according to it. Prototype test showed that the transplanting mechanism of *Salvia miltiorrhiza* based on the five-bar mechanism could meet the requirements of transplanting *Salvia miltiorrhiza* which can ensure the high-lift trajectory, the operation quality and seedling rate of *Salvia miltiorrhiza*, the seedling qualified rate was 97.3%, the excellent seedling rate was 94%, the leakage rate was 2.5%, the plant spacing variation coefficient was 6.5%, and the planting depth qualified rate was 94.6%.

Key words: *Salvia miltiorrhiza*; transplanting on mulch-film; five-bar mechanism; transplanting mechanism

收稿日期: 2018-05-03　修回日期: 2018-06-25

基金项目: 山东省重点研发计划项目(2016ZDJS07A22)和"十二五"国家科技支撑计划项目(2013BAD08B00)

作者简介: 徐高伟(1989—),男,博士生,山东省农业机械科学研究院工程师,主要从事农业机械化装备研究,E-mail: 476181684@qq.com

通信作者: 刘宏新(1971—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械化技术与装备研究,E-mail: Lcc98@neau.edu.cn

0 引言

丹参是我国常用大宗药材之一,年需求量5.2 万 t 且用量逐年增加[1-2]。在丹参种植过程中,移栽是其重要环节,丹参种植的劳动力成本占丹参种植总成本 50% 以上[3]。山东省丹参种植方式以山东省农业主推技术“丹参大垄双行覆膜高效生产技术”为基础,采用大垄膜上移栽的栽培模式,要求丹参种苗与垄面线的夹角不低于 80°,以增加丹参扎根深度,提高丹参产量[4]。然而,由于丹参移栽机械化配套工作起步较晚,针对上述种植模式的丹参移栽几乎全部由人工完成,不仅劳动强度大,生产效率和质量低,而且立苗率难以保证[5-7]。

目前,市面上膜上移栽机构主要以移栽蔬菜[8]、烟草[9]等作物的钵苗移栽为主,而丹参育苗方式采用传统的作畦越冬育苗,移栽方式为裸苗移栽,没有钵体支撑,移栽后在穴中姿态不确定,极易倒伏;另外,丹参种苗长度约为 200 mm,根茎长度约为 150 mm,质量较轻,根茎细长。由于丹参种苗的植株形态与蔬菜、烟草钵苗相差较大,蔬菜、烟草等膜上移栽机构的鸭嘴栽植器与丹参种苗的匹配程度较低,降低了丹参移栽质量[10];丹参种苗移栽深度为 150 mm,远超过蔬菜、烟草等作物,现有膜上移栽机的轨迹升程无法满足丹参移栽。而以丹参裸苗以及丹参栽培模式为移栽对象和农艺要求的丹参专用移栽机和移栽机构尚未见相关报道。

针对以上情况,本文结合“丹参大垄双行覆膜高效生产技术”提出的农艺要求,同时针对丹参种苗裸苗机械化移栽的立苗率问题设计一种五杆式丹参移栽机构,实现丹参移栽的农艺要求,提高鸭嘴栽植器与丹参种苗的匹配程度,保证丹参裸苗移栽的大升程轨迹、作业质量和立苗率要求,同时为五杆机构在特定约束条件下的参数优选探索有效的方法。

1 栽植器端点运动轨迹分析与机构选择

1.1 栽植器端点运动轨迹分析

为保证丹参种苗裸苗机械化移栽的立苗率,根据陈建能等[11]提出的保证立苗率的新思路,以鸭嘴栽植器为末端执行器的膜上移栽机构在移栽丹参种苗时,丹参种苗落入穴中时应保持与垄面的垂直状态。

为确保上述垂直状态,鸭嘴栽植器在退穴过程中应尽量与垄面垂直,在鸭嘴栽植器退穴后,丹参种苗与其完全脱离之前沿移栽机构作业速度前进方向略微倾斜,根据丹参种苗与垄面线不低于 80°的立苗率要求,倾斜角度不超过 10°,即这一过程中鸭嘴栽植器与垄面线夹角不低于 80°,以防止丹参种苗被栽植器推倒。这样在后续的覆土和镇压作用下,丹参种苗就会靠到沿移栽机前进方向一侧的穴口壁面,以保证立苗率。

相对和绝对运动轨迹如图 1 所示,绝对轨迹由鸭嘴栽植器端点相对机架的相对运动轨迹与机具水平方向运动轨迹合成。丹参种苗移栽深度为 150 mm,株距为 200 mm,为满足丹参移栽的农艺要求同时保证立苗率和升程要求,其绝对轨迹应满足:①绝对运动轨迹最低点与垄面线的垂直距离 h_1,即移栽深度为 150 mm。②鸭嘴栽植器在回程过程中端点轨迹与垄面线的夹角 β_1 尽量接近 90°。③单个运动周期内绝对运动轨迹与垄面线的交点距离 l,即入土、出土轨迹与垄面线的交点距离越小越好。④由于丹参植株在垄面线上露出的长度为 50 mm,出土轨迹从垄面线至竖直向上 50 mm 之间的轨迹与垄面线所呈夹角 α_1 不低于 80°。⑤绝对轨迹升程 h 不低于 300 mm。

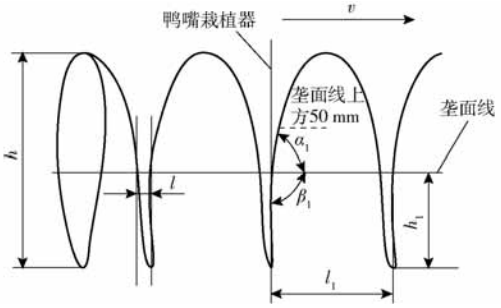

图 1 鸭嘴栽植器端点轨迹分析

Fig. 1 End point trajectory analysis of duckbill planting apparatus

1.2 机构选择

五杆机构是具有多自由度最简单的闭环机构,机构相对稳定,具有较多的尺寸和角度参数、不同的驱动方式及传动比,可实现丰富的曲线轨迹,因此采用五杆机构作为栽植器端点轨迹的形成机构[12]。

对于五杆机构参数的求解,当前主要采用解析法与软件相结合的方法。马良等[13]由 ADAMS 软件建立参数化模型,寻求连架杆输出轨迹的改变规律;方芳[14]借助于计算机辅助设计的方法,研制了齿轮五杆机构的轨迹曲线生成系统;陶军等[15]经过仿真和试验验证了图解法与解析法相结合是确定齿轮五杆机构实现预定轨迹的有效方法;何小晶等[16]对五杆式移栽机构建立了运动学模型,并进行了参数分析。

以上研究皆从单一机构角度对五杆机构进行理论研究,未考虑机构应用时所处的实际工况环境以及五杆机构自由运动的约束条件。而本文所面对的

工程实际问题中，在丹参移栽机构轨迹的大升程要求、移栽机构的空间约束条件以及五杆机构自由运动的基本约束条件下，如何得到满足丹参移栽农艺要求的机构参数组合是需要解决的首要问题。在建立约束条件和运动学模型的基础上，结合 Matlab 建立的辅助界面对机构进行运动学分析、轨迹绘制，寻求区域轨迹特性，并研究关键参数对轨迹的影响规律，根据机构轨迹的要求优选机构参数，以满足丹参移栽的农艺和大升程要求。

2　工作原理与模型建立

2.1　工作原理

五杆式丹参移栽机构示意图如图 2 所示，为便于机构的实际应用，设置双曲柄的传动比为 1，即本文主要针对等速双曲柄五杆机构进行研究。曲柄 *OD* 与 *AB* 为原动件，以相同转速同向转动，进而带动连杆 *BL* 和 *DE* 摆动，栽植器 *FG* 与连杆 *DE* 以一定角度固连并在 *DE* 带动下进行移栽。

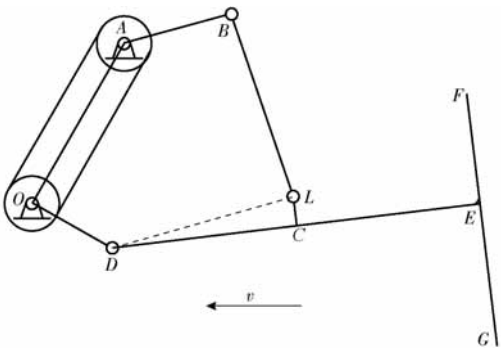

图 2　五杆式丹参移栽机构示意图

Fig. 2　Schematic diagram of five-bar transplanting mechanism of *Salvia miltiorrhiza*

2.2　数学模型建立

以 *O* 点为坐标原点，水平方向为 *x* 轴、竖直方向为 *y* 轴建立直角坐标系，如图 3 所示。

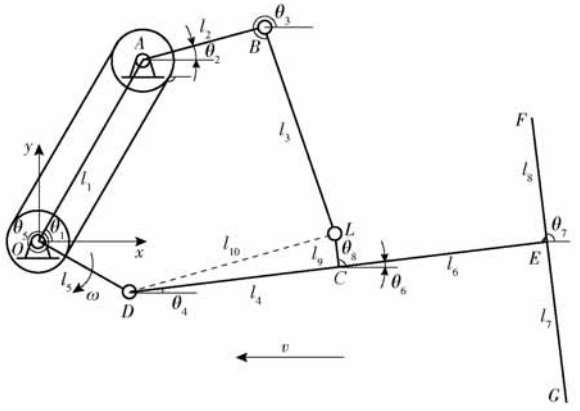

图 3　五杆式丹参移栽机构数学模型

Fig. 3　Mathematical model of five-bar transplanting mechanism of *Salvia miltiorrhiza*

2.2.1　运动学模型

D 点的位移方程为

$$\begin{cases} X_D = X_O + l_5\cos\theta_5 \\ Y_D = Y_O - l_5\sin\theta_5 \end{cases} \tag{1}$$

B 点的位移方程为

$$\begin{cases} X_B = X_A + l_2\cos\theta_2 \\ Y_B = Y_A + l_2\sin\theta_2 \end{cases} \tag{2}$$

根据矢量方程 $\boldsymbol{l}_{OA} + \boldsymbol{l}_{AB} + \boldsymbol{l}_{BL} = \boldsymbol{l}_{OD} + \boldsymbol{l}_{DL}$ 可得 *L* 点的位移方程为

$$\begin{cases} X_L = l_1\cos\theta_1 + l_2\cos\theta_2 + l_3\cos\theta_3 = l_5\cos\theta_5 + \\ \qquad \cos\left(\theta_4 + \arctan\dfrac{l_9}{l_4}\right)\sqrt{l_4^2 + l_9^2 - 2l_4l_9\cos\theta_8} \\ Y_L = l_1\sin\theta_1 + l_2\sin\theta_2 + l_3\sin\theta_3 = l_5\sin\theta_5 + \\ \qquad \sin\left(\theta_4 + \arctan\dfrac{l_9}{l_4}\right)\sqrt{l_4^2 + l_9^2 - 2l_4l_9\cos\theta_8} \end{cases} \tag{3}$$

令

$$\begin{cases} a = l_1\cos\theta_1 + l_2\cos\theta_2 - l_5\cos\theta_5 \\ b = l_1\sin\theta_1 + l_2\sin\theta_2 - l_5\sin\theta_5 \\ c = \dfrac{l_4^2 + l_9^2 - 2l_4l_9\cos\theta_8 - a^2 - b^2 - l_3^2}{2l_3} \end{cases} \tag{4}$$

求得

$$\theta_3 = 2\arctan\frac{b \pm \sqrt{a^2 + b^2 - c^2}}{a - c} \tag{5}$$

将 θ_3 代入式(3)可求出 θ_4。

C 点的位移方程为

$$\begin{cases} X_C = X_L + l_9\cos(\pi - \theta_8 + \theta_4) \\ Y_C = Y_L + l_9\sin(\pi - \theta_8 + \theta_4) \end{cases} \tag{6}$$

E 点的位移方程为

$$\begin{cases} X_E = X_D + (l_4 + l_6)\cos\theta_4 \\ Y_E = Y_D + (l_4 + l_6)\sin\theta_4 \end{cases} \tag{7}$$

F 点的位移方程为

$$\begin{cases} X_F = X_E - l_8\cos(\theta_7 - \theta_4) \\ Y_F = Y_E + l_8\sin(\theta_7 - \theta_4) \end{cases} \tag{8}$$

G 点的位移方程为

$$\begin{cases} X_G = X_E + l_7\cos(\theta_7 - \theta_4) \\ Y_G = Y_E - l_7\sin(\theta_7 - \theta_4) \end{cases} \tag{9}$$

对式(9)求一阶导数和二阶导数，即可得鸭嘴栽植器底端点 *G* 的速度和加速度方程[16]。

2.2.2　空间约束条件

为保证机构在整机安装及作业时与其他机构不发生干涉、碰撞，将机构布置为空间结构，其空间限制如图 4 所示。

(1)机架高度 H_1：为保证作业时丹参种苗顺利落入鸭嘴栽植器，要求机构所能达到的最高位置 *C′* 小于机架的高度，由图 4 可知，机架高度需满足

$$H_1 = H + l_2 + l_1\sin\theta_1 + \delta \tag{10}$$

式中 δ——机构最高点位置距离机架的高度,mm

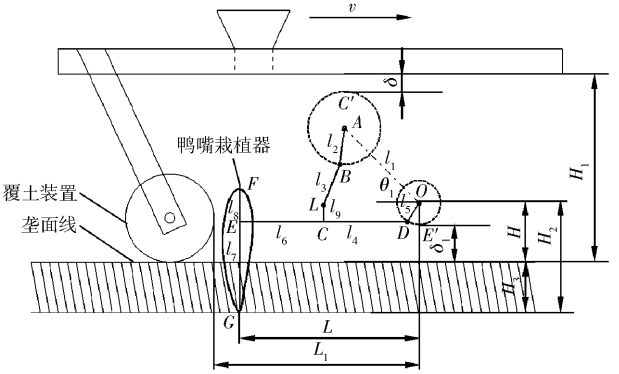

图 4 五杆式丹参移栽机构空间限制边界条件

Fig. 4 Boundary conditions of five-bar transplanting mechanism of *Salvia miltiorrhiza*

(2) O 点距离垄面线的高度 H:为保证机具具有良好的通过性,要求 H 大于 l_5 与 E' 距垄面线距离之和,即

$$H > l_5 + \delta_1 \tag{11}$$

式中 δ_1——E' 距离垄面线距离,mm

(3)移栽深度 H_3 取值为 150 mm。

(4) F 点相对轨迹可行域的长度与高度 L_1、H_2:本文设定 L_1 为 600 mm;H_2 为 O 点到移栽最深处的距离

$$H_2 = H + H_3 \tag{12}$$

(5)栽植器端点 G 与 O 点的初始水平距离 L:在移栽过程中,要求该值在一定范围内越小越好。在 l_2、l_5 不变的情况下,可通过调节 l_3、l_4 和 l_9 减小 L。

根据市场上一般移栽机机架的高度[17],设定 $H_1 = 720$ mm,而移栽机构最下端 E' 与垄面线的距离应大于 E 点与垄面线的距离,取 $\delta_1 > l_7 - H_3$,$0 < \delta < 10$ mm,经分析可得

$$\begin{cases} 430\text{ mm} \geqslant l_1\sin\theta_1 + l_5\sin\theta_5 + l_2\sin\theta_2 \geqslant 420\text{ mm} \\ l_1\sin\theta_1 < l_5\sin\theta_5 + l_2\sin\theta_2 \\ l_2 \geqslant l_5 \end{cases} \tag{13}$$

本文设定移栽机构机架初始长度 l_1 和安装角度为 290 mm 和 45°,根据机构轨迹升程不低于 300 mm 的要求,得到两曲柄以及初始安装角度的取值范围

$$\begin{cases} 95\text{ mm} \leqslant l_2 \leqslant 130\text{ mm} \\ 55\text{ mm} \leqslant l_5 \leqslant 80\text{ mm} \\ |\theta_2 - \theta_5| \leqslant 38° \end{cases} \tag{14}$$

2.2.3 基本约束条件

设计的五杆机构属于双曲柄型,双曲柄均为匀速转速,为使机构形成完整封闭的运动轨迹,五杆机构各尺寸参数需要满足双曲柄存在的必要条件,必要条件是指两原动件按一定运动规律作整周运动时,五杆机构在每一时刻都满足装配条件[18-23]。

(1)五杆机构装配条件

五杆式丹参移栽机构数学模型见图 3,其装配条件可表示为

$$\begin{cases} l_3 + l_{10} \geqslant l_{BD\max} \\ |l_3 - l_{10}| \leqslant l_{BD\min} \end{cases} \tag{15}$$

式中 $l_{BD\max}$、$l_{BD\min}$——铰接点 B 与 D 距离的最大值和最小值

令 $x = \max(l_3, l_{10})$,$y = \min(l_3, l_{10})$,则有

$$\begin{cases} x + y \geqslant l_{BD\max} \\ x - y \leqslant l_{BD\min} \end{cases} \tag{16}$$

化简可确定 l_3、l_{10} 取值范围为

$$\begin{cases} \min(l_3, l_{10}) \geqslant \dfrac{l_{BD\max} - l_{BD\min}}{2} \\ \max(l_{BD\max} - \min(l_3, l_{10}), \min(l_3, l_{10})) \leqslant \\ \quad \max(l_3, l_{10}) \leqslant \min(l_3, l_{10}) + l_{BD\min} \end{cases} \tag{17}$$

(2)双曲柄存在必要条件

由运动学模型可得机构 B 点和 D 点坐标,曲柄 AB 和 OD 以相同角速度 ω 转动时,BD 之间的距离 l_{BD} 的几何关系为

$$l_{BD}^2 = l_1^2 + l_2^2 + l_5^2 + 2l_1l_2\sin(\theta_1 - \theta_2 - \omega t) - 2l_1l_5\sin(\theta_1 - \theta_5 - \omega t) - 2l_2l_5\cos(\theta_2 - \theta_5) \tag{18}$$

由式(18)可知,l_{BD}^2 取得极值,即 l_{BD} 取得极值的必要条件是 $\dfrac{\partial l_{BD}^2}{\partial t} = 0$,对式(18)求导可得

$$\frac{\partial l_{BD}^2}{\partial t} = -2\omega l_1l_2\cos(\theta_1 - \theta_2 - \omega t) + 2\omega l_1l_5\cos(\theta_1 - \theta_5 - \omega t) = 0 \tag{19}$$

式(19)是对时间 t 的非线性方程,借助 Matlab 搜索极值可能出现的范围,再利用 $f_{\min}$ 函数求出 l_{BD} 的极值 $l_{BD\max}$ 和 $l_{BD\min}$。将 $l_{BD\max}$ 和 $l_{BD\min}$ 代入式(15)可得到 l_3 和 l_{10} 范围。

根据机构空间约束条件,初定 $l_1 = 290$ mm、$l_2 = 80$ mm、$l_5 = 70$ mm、$\theta_1 = 45°$、$\theta_2 = 97°$、$\theta_5 = 118°$,结合上述求解过程,得到 l_3 和 l_{10} 的取值范围

$$\begin{cases} \min(l_3, l_{10}) \geqslant 93\text{ mm} \\ 209\text{ mm} \leqslant \max(l_3, l_{10}) \leqslant 378\text{ mm} \end{cases} \tag{20}$$

初定五杆式丹参移栽机构参数值为:$l_1 = 290$ mm、$l_2 = 70$ mm、$l_3 = 120$ mm、$l_4 = 220$ mm、$l_5 = 60$ mm、$l_6 = 229$ mm、$l_7 = 243$ mm、$l_8 = 100$ mm、$l_9 = 45$ mm、$\theta_1 = 45°$、$\theta_2 = 97°$、$\theta_5 = 118°$、$\theta_7 = 90°$、$\theta_8 = 90°$。

2.3 人机交互可视化辅助界面

在上述建立的数学模型基础上,运用 Matlab 编写五杆式丹参移栽机构人机交互可视化辅助界面(软件著作权登记号:2017SR663379),如图 5 所示。

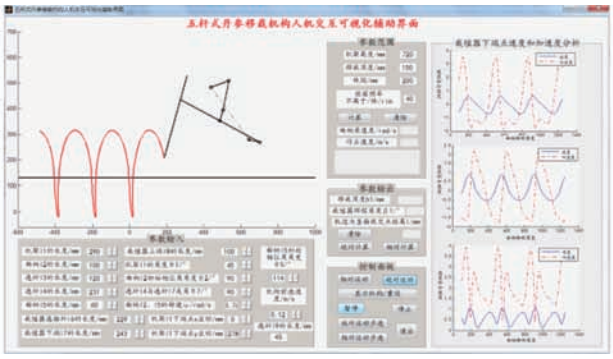

图 5　五杆式丹参移栽机构人机交互可视化辅助界面

Fig. 5　Human－computer visual interface of five-bar transplanting mechanism of *Salvia miltiorrhiza*

该界面包括图像显示区、参数范围确定区、参数输入区、控制面板区、速度和加速度分析区以及结果输出区。通过该界面可先确定机构参数的基本取值范围，根据参数取值范围调整各参数，在图像显示区中进行直观定性的识别判断，在结果输出区定量比较分析，对设计参数进行调整得到符合丹参移栽农艺要求的轨迹。

3　轨迹区域分布特性与变化规律分析

3.1　轨迹区域定位

通过辅助界面模拟仿真发现，在其他参数不变的前提下，当 DE 与 FG 的夹角 θ_7 取值不同时，轨迹的形状、大小及位置都会发生改变，图 6 为 θ_7 在[0°,180°]内变化的各位置轨迹特性。区域 1 为 θ_7 在[0°, 80°)的各位置轨迹特性；区域 2 为 θ_7 在[80°, 100°]的各位置轨迹特性；区域 3 为 θ_7 在(100°,180°]的各位置轨迹特性。

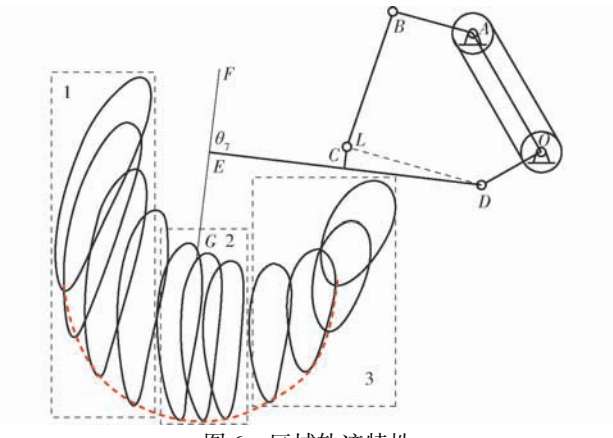

图 6　区域轨迹特性

Fig. 6　Regional trajectory characteristics

根据轨迹长轴与水平方向的夹角，将轨迹分为 3 个区域。区域轨迹的变化规律为，θ_7 从 0°到 180°轨迹先向左侧倾斜然后再向右侧倾斜；长短轴比值逐渐变小；轨迹下端点在竖直方向上的区域范围变化呈一开口向上的抛物线。以区域 2 中轨迹为基准进行分析，区域 1 中轨迹向左侧倾斜，且长短轴比值较大，另结合实际移栽位置，区域 1 中的轨迹区域不符合要求；区域 2 中轨迹长轴方向与水平方向近似垂直，在 θ_7 取 90°时垂直度最好，轨迹区域下端点在竖直方向达到最大且长短轴比值较大但低于区域 1；区域 3 中轨迹向右倾斜，轨迹区域向上方移动，长短轴比值逐渐缩小。

为满足丹参移栽的可行域要求，选择区域 2 中的轨迹特性作为目标。而对应 θ_7 取值需结合后续轨迹分析进行判断和验证。

3.2　栽植器端点轨迹的变化规律分析

运用人机交互可视化辅助界面，通过改变五杆机构的关键参数得到相应的栽植器端点轨迹，根据辅助界面输出的轨迹参数结果，分析关键参数对相对和绝对轨迹的影响。

3.2.1　l_2 与端点轨迹之间的关系

在初定的五杆式丹参移栽机构各参数中保持其余参数不变，改变曲柄 AB 的长度 l_2，l_2 与栽植器端点轨迹之间的关系如图 7 所示。

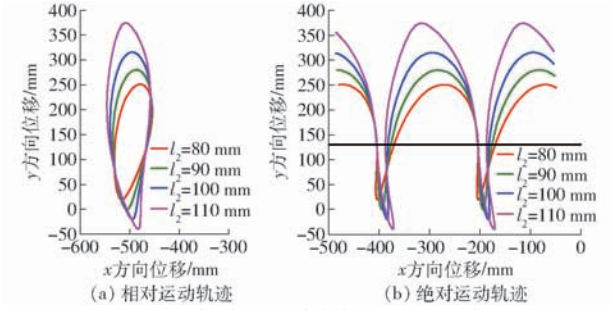

图 7　l_2 与栽植器端点轨迹之间的关系

Fig. 7　Relationship between l_2 and endpoint of trajectory

由图 7 可知，随着 l_2 逐渐增加，栽植器端点相对运动轨迹逐渐向左侧倾斜，长短轴比值逐渐增大；绝对运动轨迹最低点与垄面线的垂直距离 h_1 逐渐增大，鸭嘴栽植器在回程过程中端点绝对运动轨迹与垄面线的夹角 β_1 逐渐减小；单个运动周期内绝对运动轨迹与垄面线的交点距离 l 逐渐减小；出土轨迹从垄面线至竖直向上 50 mm 之间的轨迹与垄面线所呈夹角 α_1 逐渐增大。

3.2.2　l_5 与端点轨迹之间的关系

在初定的五杆式丹参移栽机构各参数中保持其余参数不变，改变曲柄 OD 的长度 l_5，l_5 与栽植器端点轨迹之间的关系如图 8 所示。

由图 8 可知，随着 l_5 逐渐增加，栽植器端点相对运动轨迹逐渐向右侧倾斜，长短轴比值逐渐减小；绝对运动轨迹最低点与垄面线的垂直距离 h_1 逐渐减小，鸭嘴栽植器在回程过程中端点绝对运动轨迹与垄面线的夹角 β_1 逐渐增大，单个运动周期内绝对运

动轨迹与垄面线的交点距离 l 逐渐减小;出土轨迹从垄面线至竖直向上 50 mm 之间的轨迹与垄面线所呈夹角 α_1 逐渐减小。

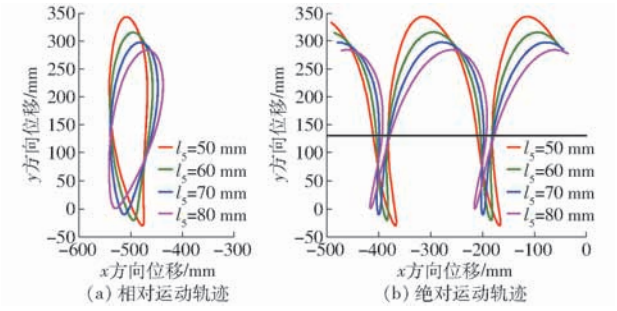

图 8 l_5 与栽植器端点轨迹之间的关系

Fig. 8 Relationship between l_5 and endpoint of trajectory

3.2.3 θ_2 与端点轨迹之间的关系

在初定的五杆式丹参移栽机构各参数中保持其余参数不变,改变曲柄 AB 的初始安装角度 θ_2,θ_2 与栽植器端点轨迹之间的关系如图 9 所示。

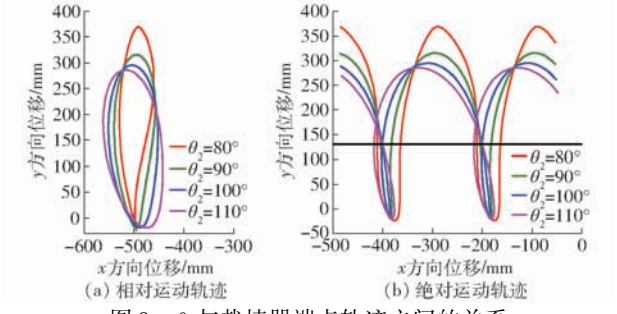

图 9 θ_2 与栽植器端点轨迹之间的关系

Fig. 9 Relationship between θ_2 and endpoint of trajectory

由图 9 可知,随着 θ_2 逐渐增加,栽植器端点相对运动轨迹逐渐向左侧倾斜,长短轴比值逐渐减小;绝对运动轨迹中入土和出土轨迹发生交叉,变为绕扣型轨迹,绝对运动轨迹最低点与垄面线的垂直距离 h_1 先减小后增大,但变化量较小;鸭嘴栽植器在回程过程中端点绝对运动轨迹与垄面线的夹角 β_1 逐渐减小;单个运动周期内绝对运动轨迹与垄面线的交点距离 l 先减小后增大;出土轨迹从垄面线至竖直向上 50 mm 之间的轨迹与垄面线所呈夹角 α_1 先减小后增大,但变化量较小。

3.2.4 θ_5 与端点轨迹之间的关系

在初定的五杆式丹参移栽机构各参数中保持其余参数不变,改变曲柄 OD 的初始安装角度 θ_5,θ_5 与栽植器端点轨迹之间的关系如图 10 所示。

由图 10 可知,随着 θ_5 逐渐增加,栽植器端点相对运动轨迹逐渐向右侧倾斜,长短轴比值逐渐增大;绝对运动轨迹中入土和出土轨迹发生交叉,变为绕扣型轨迹,绝对运动轨迹最低点与垄面线的垂直距离 h_1 先减小后增大,但变化量较小;鸭嘴栽植器在回程过程中端点绝对运动轨迹与垄面线的夹角 β_1 逐渐增大;单个运动周期内绝对运动轨迹与垄面线的交点距离 l 先减小后增大;出土轨迹从垄面线至竖直向上 50 mm 之间的轨迹与垄面线所呈夹角 α_1 先减小后增大。

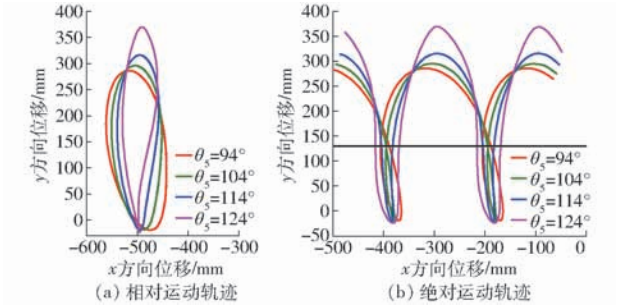

图 10 θ_5 与栽植器端点轨迹之间的关系

Fig. 10 Relationship between θ_5 and endpoint of trajectory

3.2.5 l_3 与端点轨迹之间的关系

在初定的五杆式丹参移栽机构各参数中保持其余参数不变,改变连杆 BL 的长度 l_3,l_3 与栽植器端点轨迹之间的关系如图 11 所示。

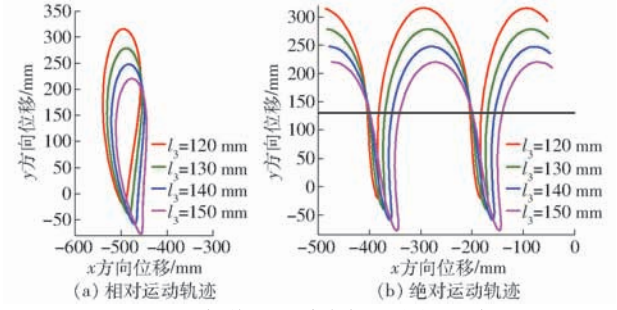

图 11 l_3 与栽植器端点轨迹之间的关系

Fig. 11 Relationship between l_3 and endpoint of trajectory

由图 11 可知,随着 l_3 逐渐增加,栽植器端点相对运动轨迹形状、大小都不变,仅位置发生变化;绝对运动轨迹最低点与垄面线的垂直距离 h_1 逐渐增大;鸭嘴栽植器在回程过程中端点绝对运动轨迹与垄面线的夹角 β_1 基本不变;单个运动周期内绝对运动轨迹与垄面线的交点距离 l 逐渐增大;出土轨迹从垄面线至竖直向上 50 mm 之间的轨迹与垄面线所呈夹角 α_1 逐渐减小。

3.2.6 l_{10} 与端点轨迹之间的关系

在初定的五杆式丹参移栽机构各参数中保持其余参数不变,改变铰接点 D 和 L 的距离 l_{10},l_{10} 与栽植器端点轨迹之间的关系如图 12 所示。

由图 12 可知,随着 l_{10} 逐渐增加,栽植器端点相对运动轨迹形状不变,轨迹大小和位置发生变化;绝对运动轨迹最低点与垄面线的垂直距离 h_1 逐渐减小;鸭嘴栽植器在回程过程中端点绝对运动轨迹与垄面线的夹角 β_1 逐渐增大;单个运动周期内绝对运动轨迹与垄面线的交点距离 l 逐渐增大;出土轨迹从垄面线至竖直向上 50 mm 之间的轨迹与垄面线

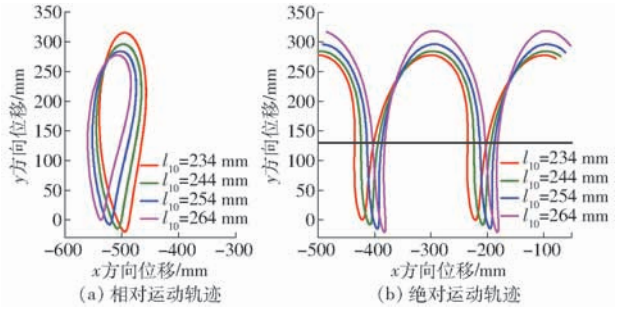

图 12　l_{10}与栽植器端点轨迹之间的关系

Fig. 12　Relationship between l_{10} and endpoint of trajectory

所呈夹角 α_1逐渐减小。

3.2.7　θ_1与端点轨迹之间的关系

在初定的五杆式丹参移栽机构各参数中保持其余参数不变，改变机架安装角度 θ_1，θ_1与栽植器端点轨迹之间的关系如图 13 所示。

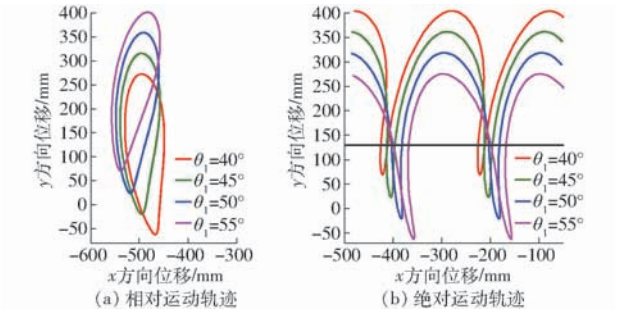

图 13　θ_1与栽植器端点轨迹之间的关系

Fig. 13　Relationship between θ_1 and endpoint of trajectory

由图 13 可知，随着 θ_1逐渐增加，栽植器端点相对运动轨迹形状、大小都不变，仅位置发生变化；绝对运动轨迹最低点与垄面线的垂直距离 h_1逐渐减小；鸭嘴栽植器在回程过程中端点绝对运动轨迹与垄面线的夹角 β_1逐渐增大；单个运动周期内绝对运动轨迹与垄面线的交点距离 l 逐渐减小；出土轨迹从垄面线至竖直向上 50 mm 之间的轨迹与垄面线所呈夹角 α_1先增大后减小。

3.2.8　θ_7与端点轨迹之间的关系

在初定的五杆式丹参移栽机构各参数中保持其余参数不变，改变栽植器 FG 与连杆 DE 的夹角 θ_7，θ_7与栽植器端点轨迹之间的关系如图 14 所示。

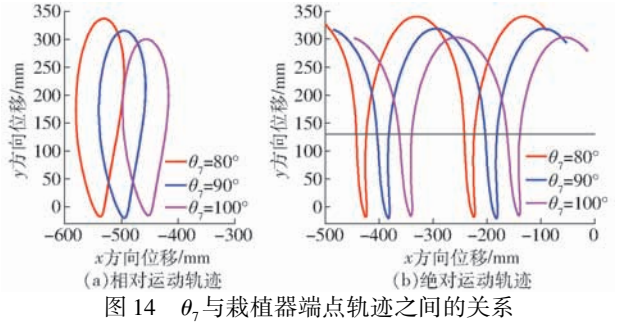

图 14　θ_7与栽植器端点轨迹之间的关系

Fig. 14　Relationship between θ_7 and endpoint of trajectory

由图 14 可知，随着 θ_7逐渐增加，栽植器端点相对运动轨迹形状不变，位置和大小发生变化；绝对运动轨迹最低点与垄面线的垂直距离 h_1先增加后减小，90°时 h_1达到最大；鸭嘴栽植器在回程过程中端点绝对运动轨迹与垄面线的夹角 β_1基本不变；单个运动周期内绝对运动轨迹与垄面线的交点距离 l 逐渐增大；出土轨迹从垄面线至竖直向上 50 mm 之间的轨迹与垄面线所呈夹角 α_1逐渐减小。

3.3　数值循环比较优选

上述机构参数对栽植器端点绝对轨迹参数 h_1、β_1、l、α_1的影响见表 2。

表 2　l_2、l_5、θ_2、θ_5、l_3、l_{10}、θ_1、θ_7对栽植器端点绝对运动轨迹参数的影响

Tab. 2　Influence of l_2, l_5, θ_2, θ_5, l_3, l_{10}, θ_1 and θ_7 on absolute motion trajectory parameters of planting apparatus endpoint

机构参数		运动轨迹参数			
		h_1/mm	β_1/(°)	l/mm	α_1/(°)
l_2/mm	80	110.3	106.2	34.1	67.5
	90	130.5	97.2	27.6	75.9
	100	150.3	90.2	22.3	82.3
	110	169.8	84.8	17.8	87.4
l_5/mm	50	160.1	84.6	28.8	87.7
	60	150.3	90.2	22.3	82.3
	70	140.0	97.2	17.5	76.1
	80	129.2	105.6	15.2	69.2
l_3/mm	120	150.3	90.2	22.3	82.3
	130	169.8	90.5	32.2	79.4
	140	188.9	90.8	44.1	75.3
	150	207.6	91.1	58.5	69.5
l_{10}/mm	234	150.3	90.2	22.3	82.3
	244	144.5	93.1	26.9	79.4
	254	137.5	95.7	30.7	76.7
	264	129.4	98.5	34.2	74.6
θ_2/(°)	80	154.1	93.6	46.7	84.6
	90	150.3	90.2	22.3	82.3
	100	148.7	84.4	0.35	82.0
	110	149.2	77.1	16.8	84.0
θ_5/(°)	94	149.2	77.1	16.8	84.0
	104	148.7	84.4	0.4	82.0
	114	150.3	90.2	22.3	82.3
	124	154.1	93.4	46.8	84.6
θ_1/(°)	40	192.3	86.9	32.1	81.5
	45	150.3	90.2	22.3	82.3
	50	106.6	94.1	17.1	82.3
	55	59.9	99.2	14.1	81.1
θ_7/(°)	80	147.7	90.3	18.9	83.1
	90	150.3	90.2	22.3	82.3
	100	145.6	90.5	24.1	81.8

条件约束及参数优选流程如图 15 所示,图中虚线框所示为数值循环比较进行参数优选的过程。优选的依据为:移栽深度 h_1 最接近 150 mm;鸭嘴栽植器在回程过程中端点绝对运动轨迹与垄面线的夹角 β_1 最接近 90°;出土轨迹从垄面线至竖直向上 50 mm 之间的轨迹与垄面线所呈夹角 α_1 不低于 80°,且越接近 90°越好;入土、出土轨迹与垄面线的交点距离 l 越小越好。

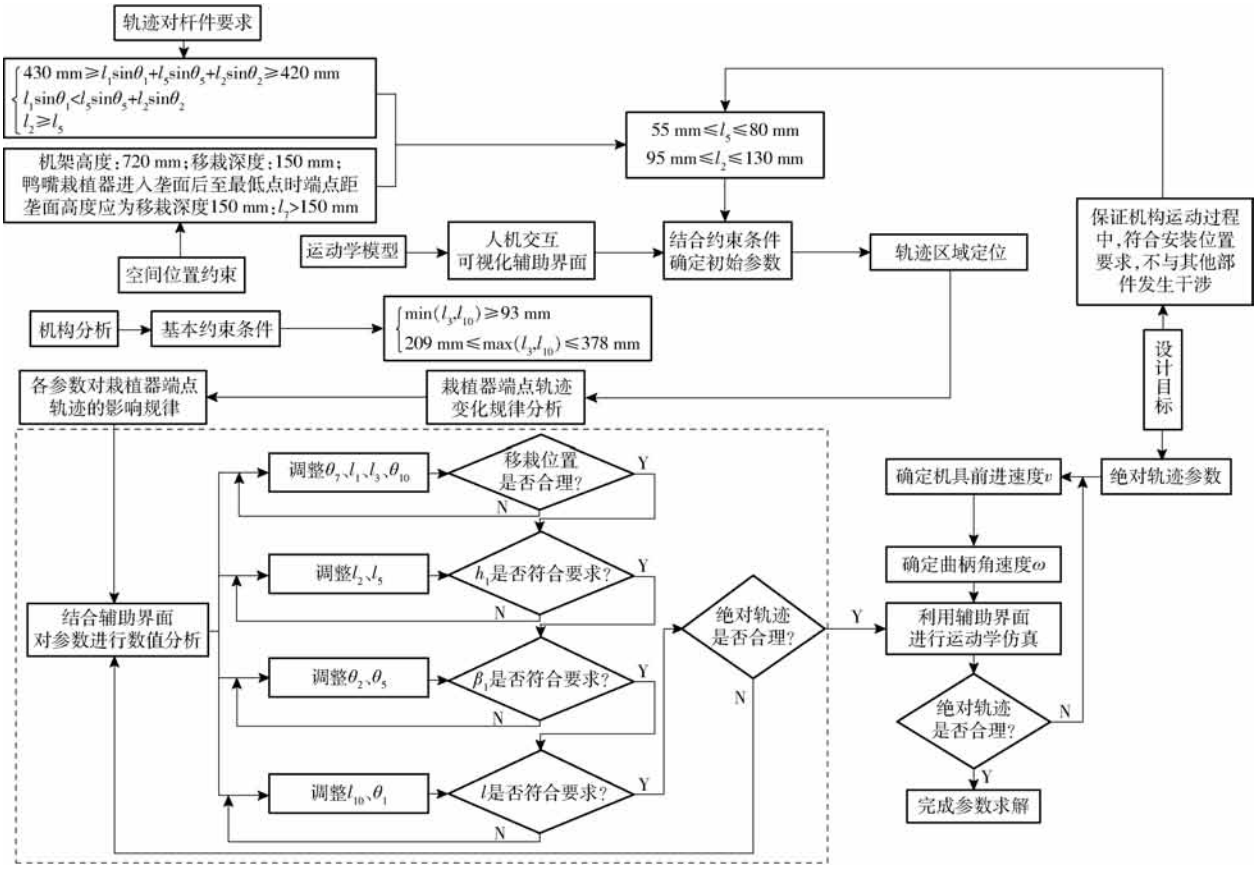

图 15 条件约束关系及参数优选流程

Fig. 15 Flow chart of conditions constraint and parameters solution

根据参数优选流程图,最终优选出一组满足丹参移栽农艺要求的五杆式移栽机构参数组合:l_1 = 290 mm、l_2 = 100 mm、l_3 = 120 mm、l_4 = 231 mm、l_5 = 60 mm、l_6 = 229 mm、l_7 = 243 mm、l_8 = 100 mm、l_9 = 45 mm、θ_1 = 45°、θ_2 = 90°、θ_5 = 114°、θ_7 = 90°、θ_8 = 90°,辅助界面输出的相对和绝对运动轨迹如图 16 所示,其对应的绝对轨迹参数为:h_1 为 150.3 mm、β_1 为 90.2°、l 为 22.3 mm、α_1 为 82.3°、h 为 345.6 mm。

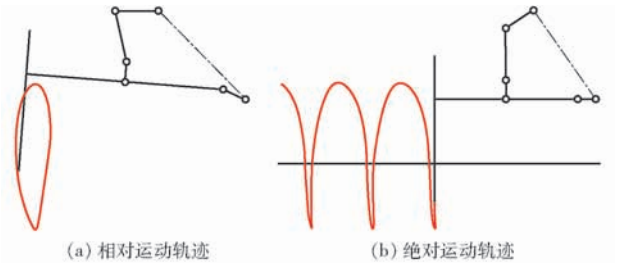

图 16 满足丹参农艺要求的栽植器端点轨迹

Fig. 16 Endpoint trajectories of planting apparatus to meet agronomic requirements of *Salvia miltiorrhiza*

4 机构设计与试验

4.1 机构结构设计

五杆式丹参移栽机构三维模型如图 17 所示,由双曲柄五杆机构、鸭嘴栽植器、凸轮控制机构和扇形平衡配重组成。

双曲柄五杆机构控制鸭嘴栽植器做往复运动进行接苗和移栽;鸭嘴栽植器是进行移栽的末端执行装置,负责将丹参种苗植入鸭嘴栽植器形成的穴中;凸轮控制机构控制鸭嘴栽植器开闭使丹参种苗由栽植器进入穴中;平衡配重用于平衡移栽机构的惯性力和惯性力矩。

为提高鸭嘴栽植器与丹参种苗的匹配度,鸭嘴栽植器的相关参数根据丹参种苗植株形态参数确定。随机选取 50 株同一适栽期内的紫花丹参种苗,运用 LA - S 系列植物图像分析仪依次测量其植株形态参数,如图 18 所示。

图中 θ_r——株形锥角,(°)

l_n——根长度,mm

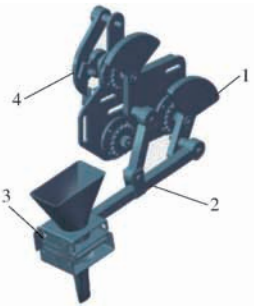

图 17　五杆式丹参移栽机构三维模型

Fig. 17　Three-dimensional model of five-bar transplanting mechanism of *Salvia miltiorrhiza*

1. 平衡配重　2. 双曲柄五杆机构　3. 鸭嘴栽植器　4. 凸轮控制机构

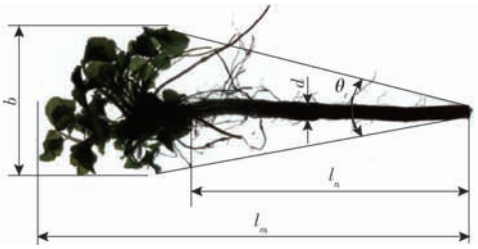

图 18　LA－S 系列植物图像分析仪系统提取的图像

Fig. 18　Picture extracted by LA－S image processing system for plant

d——根直径，mm

l_m——植株总长度，mm

b——植株幅宽，mm

测量结果如表 3 所示。

表 3　丹参植株形态测量数据

Tab. 3　Measurement data of plant morphology of *Salvia miltiorrhiza*

植株形态参数	最大值	最小值
株形锥角 θ_r/(°)	16. 7	11. 5
根长度 l_n/mm	156. 7	144. 5
根直径 d/mm	6. 3	4. 9
植株总长度 l_m/mm	211. 5	185. 4
植株幅宽 b/mm	81. 2	73. 8

由表 3 中的数据可得，栽植器鸭嘴总长度不低于植株总长度的最大值，选为 212 mm；栽植器鸭嘴的锥角角度不低于株形锥角的最大值 16. 7°，选为 17°；鸭嘴栽植器开口开度不低于植株幅宽的最大值 81. 2 mm，选为 82 mm。

4. 2　台架试验

台架试验是通过测量机构栽植器端点形成的实际轨迹情况，以验证数学模型的准确性以及人机交互可视化辅助界面的可靠性。

样机和试验平台如图 19 所示。试验平台由五杆式丹参移栽机构、YSJ－750 型调速电动机（减速比：1∶15）、JAC580N 型变频器（供电电压：380 V）、SJM12－10P1 型霍尔式转速传感器（最大检测距离：10 mm）、160K－C－8GB 型高速摄像机（2 000 f/s）、HHZ1 型数显转速表（供电电压：220 V）组成。

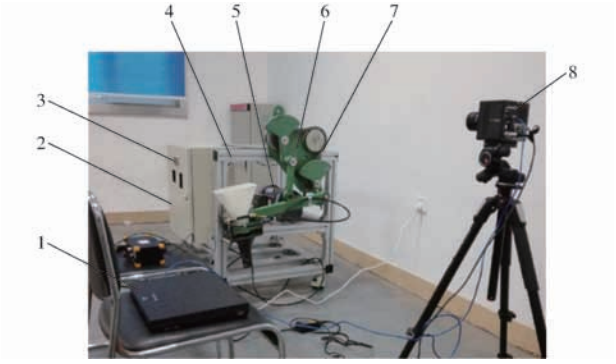

图 19　试验平台

Fig. 19　Test platform

1. 计算机　2. 变频柜　3. 数显转速表　4. 机架　5. 调速电动机　6. 移栽机构　7. 霍尔式转速传感器　8. 高速摄像机

通过高速摄像机测量五杆式丹参移栽机构样机实际相对运动轨迹，以便与软件仿真进行对比。利用高速摄像系统得到机构实际相对运动轨迹如图 20 所示。图 16a 理论相对运动轨迹与实际相对运动轨迹相比基本一致，验证了理论模型的准确性。

图 20　移栽机构实际测量的相对运动轨迹

Fig. 20　Actual measurement relative motion of transplanting mechanism

4. 3　田间试验

4. 3. 1　试验条件

为验证移栽机构理论设计的正确性，试制了搭载五杆式丹参移栽机构的丹参膜上移栽机样机。该机采用 25 kW 轮式拖拉机牵引，其作业速度为 0. 25 m/s，根据上述作业条件对移栽机进行重复性田间试验，试验在山东省农科院药用植物研究中心实验基地进行，如图 21 所示。

4. 3. 2　试验方法与设备

试验采用育苗基地培育的紫花丹参种苗进行大垄膜上移栽试验，按照我国旱地移栽机械作业标准（JB/T 10291—2013）进行，每次重复试验移栽 200 株丹参种苗，重复 3 次。丹参种苗平均长度约为 200 mm，主茎的平均长度约为 150 mm，记录并测定旱地移栽机械作业标准中的主要性能指标，其中丹参移栽的立苗程度以移栽后丹参种苗主茎与垄面的

(a) 样机试验现场 (b) 丹参种苗

图 21 田间移栽试验

Fig. 21 Field transplanting test

夹角 α 来判定:$\alpha \leqslant 45°$ 为倒伏,$\alpha > 45°$ 为合格,$\alpha > 80°$ 为优秀[23]。

试验设备及参数设置包括:187 - 101 型数显角尺(量程:0 ~ 360°)、卷尺(量程:1 ~ 3 m)、标杆和计时器等。

4.3.3 试验结果

田间试验结果如表 5 和表 6 所示。

表 5 丹参种苗立苗率测量数据

Tab. 5 Measurement data of seedling erectness rate of *Salvia miltiorrhiza*

序号	总株数	倒伏株数	合格株数	优良株数	合格率/%	优良率/%
1	200	6	194	185	97.0	92.5
2	200	7	193	188	96.5	94.0
3	200	3	197	191	98.5	95.5
平均值	200	5.3	194.7	188	97.3	94.0

表 6 主要移栽性能测量数据

Tab. 6 Measurement data of main transplanting performance

序号	总株数	漏栽率/%	倒伏率%	株距变异系数/%	栽植深度合格率/%
1	200	1.5	3.0	7.3	92.3
2	200	2.3	3.5	6.5	94.8
3	200	3.8	1.5	5.8	96.7
平均值	200	2.5	2.7	6.5	94.6

表 5 为丹参种苗田间立苗率测量数据,立苗合格率平均值为 97.3%,满足旱地移栽机械作业标准中规定的立苗率要求,立苗优良率平均值为 94%,满足丹参裸苗移栽的立苗率要求;表 6 为主要移栽性能测量数据,移栽性能满足旱地移栽机械作业标准中规定的性能指标,漏栽率平均值为 2.5%,倒伏率平均值为 2.7%,造成漏栽的原因是部分丹参种苗长有较多须根,在回程过程中鸭嘴栽植器闭合时夹住须根回带丹参种苗而引起了漏苗和倒伏;株距变异系数平均值为 6.5%,是由于机器作业速度发生波动而引起;栽植深度合格率平均值为 94.6%,究其原因是移栽试验田地形起伏以及起垄高度误差造成。

5 结论

(1)根据丹参移栽的农艺要求设计了一种五杆式丹参移栽机构,并建立了机构所处工况的约束条件、自由运动约束条件。结合机构运动学模型采用 Matlab 开发了人机交互可视化辅助界面,通过人机交互的方式进行轨迹区域定位分析,并获得了机构关键参数对鸭嘴栽植器相对和绝对运动轨迹特性的影响规律。

(2)借助辅助界面运用轨迹区域定位和数值循环比较法,优选出了一组满足丹参种苗移栽农艺要求,同时保证丹参立苗率的机构参数组合:$l_1 = 290$ mm、$l_2 = 100$ mm、$l_3 = 120$ mm、$l_4 = 231$ mm、$l_5 = 60$ mm、$l_6 = 229$ mm、$l_7 = 243$ mm、$l_8 = 100$ mm、$l_9 = 45$ mm、$\theta_1 = 45°$、$\theta_2 = 90°$、$\theta_5 = 114°$、$\theta_7 = 90°$、$\theta_8 = 90°$。

(3)运用 LA - S 系列植物图像分析系统对丹参种苗植株形态特征参数进行了测量,根据特征参数得到了栽植器鸭嘴的设计参数:鸭嘴总长度为 212 mm;鸭嘴锥形锥角为 17°;鸭嘴开口开度为 82 mm。

(4)研制样机进行了田间试验,结果表明五杆式丹参移栽机构立苗合格率为 97.3%、立苗优良率为 94.0%、漏栽率为 2.5%、株距变异系数为 6.5%、栽植深度合格率为 94.6%,满足丹参种苗裸苗膜上移栽的农艺要求、作业质量和立苗率要求。

参 考 文 献

1 蒋传中,卫新荣. 丹参种植地点的选择依据及标准研究[J]. 现代中药研究与实践,2004,18(1):15 - 17.
JIANG Chuanzhong, WEI Xinrong. Study on the choice of cultivation area of *Salvia miltiorrhiza* Bge. [J]. Research and Practice of Chinese Medicines, 2014, 18(1): 15 - 17. (in Chinese)

2 郭玉明,张弛,查青林,等. 复方丹参滴丸治疗冠心病的系统评价[J]. 上海中医药大学学报,2012,26(3):24 - 31.
GUO Yuming, ZHANG Chi, ZHA Qinglin, et al. "Compound salvia droplet pill" for treatment of coronary heart disease: a systematic review[J]. Journal of Shanghai University of Traditional Chinese Medicine, 2012, 26(3): 24 - 31. (in Chinese)

3 姜卫卫. 山东地区丹参规范化种植关键技术研究[D]. 济南:山东中医药大学,2008.
JIANG Weiwei. Study on the key technique for good agriculture practice of *Salvia miltiorrhiza* Bge. cultivated in Shandong[D]. Ji'nan: Shandong University of Traditional Chinese Medicine, 2008. (in Chinese)

4 孙华,张彦玲,高致明,等. 丹参种质与栽培技术研究现状及应用前景[J]. 山东农业科学,2005,28(6):73 - 74.

5 王志芬,刘喜民. 山东省丹参药材产业现状与发展策略[J]. 山东农业科学,2012,44(8):131 - 132.

6 DB13/T 758.7—2006　无公害中药材田间生产技术规程第 7 部分：丹参[S]. 2006.

7 张习文. 丹参特征特性及栽培技术[J]. 现代农业科技，2013，17(2)：138 - 139.

8 赵匀，樊福雷，宋志超，等. 反转式共轭凸轮蔬菜钵苗移栽机构的设计与仿真[J]. 农业工程学报，2014，30(14)：8 - 16.
ZHAO Yun，FAN Fulei，SONG Zhichao，et al. Design and simulation of inverted vegetable pot seedling transplanting mechanism with conjugate cam[J]. Transactions of the CSAE，2014，30(14)：8 - 16. (in Chinese)

9 崔崴，刘双喜，高丽娟，等. 2ZFS - 1A 型多功能烟草移栽机的研制[J]. 农业工程学报，2012，28(2)：36 - 41.
CUI Wei，LIU Shuangxi，GAO Lijuan，et al. Development of 2ZFS - 1A multifunctional tobacco transplanting machine[J]. Transactions of the CSAE，2012，28(2)：36 - 41. (in Chinese)

10 刘明峰，胡先朋，廖宜涛，等. 不同油菜品种适栽期机械化移栽植株形态特征研究[J]. 农业工程学报，2015，31(1)：79 - 88.
LIU Mingfeng，HU Xianpeng，LIAO Yitao，et al. Morphological parameters characteristics of mechanically transplanted plant in suitable transplanting period for different rape varieties[J]. Transactions of the CSAE，2015，31(1)：79 - 88. (in Chinese)

11 陈建能，王英，黄前泽，等. 钵苗移栽机变形椭圆齿轮行星系植苗机构优化与试验[J]. 农业工程学报，2013，44(10)：52 - 57.
CHEN Jianneng，WANG Ying，HUANG Qianze，et al. Optimization and test of transplanting mechanism with planetarydeformed elliptic gears for potted-seedling transplanter[J]. Transactions of the CSAE，2013，44(10)：52 - 57. (in Chinese)

12 孙桓，陈作模，葛文杰. 机械原理[M]. 7 版. 北京：高等教育出版社，2011.

13 马良，石宁. 齿轮-五杆组合机构运动学特征仿真分析[J]. 西安科技大学学报，2013，33(6)：727 - 730.
MA Liang，SHI Ning. Gear-5-bar combination mechanism's kinematics characteristic simulation[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology，2013，33(6)：727 - 730. (in Chinese)

14 方芳. 齿轮五杆机构轨迹曲线生成系统的研制[J]. 机械制造与研究，2006，35(1)：59 - 61.
FANG Fang. System of path generator for gear five-bar mechanism[J]. Machinery Manufacturing and Research，2006，35(1)：59 - 61. (in Chinese)

15 陶军，张蕊，刘迟. 齿轮五杆机构实现预定轨迹设计方法研究[J]. 科技创新导报，2014(19)：29 - 31.
TAO Jun，ZHANG Rui，LIU Chi. Study on the method of realizing preconceived track by geared five-bar mechanism[J]. Science and Technology Innovation Herald，2014(19)：29 - 31. (in Chinese)

16 何小晶，孙新城，陈建能，等. 双曲柄五杆栽植机构运动学分析[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版)，2016，35(2)：198 - 204.
HE Xiaojing，SUN Xincheng，CHEN Jianneng，et al. Kinematic analysis on double-crank five-bar planting mechanism[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University(Natural Sciences)，2016，35(2)：198 - 204. (in Chinese)

17 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(上册)[M]. 北京：中国农业科学技术出版社，2007.

18 李学刚，黄永强，冯丽艳. 平面五杆机构双曲柄存在的充要条件研究[J]. 机械科学与技术，2005，24(1)：51 - 53.
LI Xuegang，HUANG Yongqiang，FENG Liyan. Study of the sufficient and necessary conditions for existence of double crank of planar five-bar mechanism[J]. Mechanical Science and Technology，2005，24(1)：51 - 53. (in Chinese)

19 李团结，曹惟庆，褚金奎. 齿轮-五杆机构轨迹综合的连续法[J]. 西安理工大学学报，1999，15(14)：76 - 79.
LI Tuanjie，CAO Weiqing，CHU Jinkui. Synthesis of path generation of the geared five-bar mechanism by continuation method[J]. Journal of Xi'an University of Technology，1999，15(14)：76 - 79. (in Chinese)

20 PRIMROSE E J F，FREUDENSTEIN F. Geared five-bar motion，part 2-arbitrary commensurate gear ratio minus[J]. ASME Journal of Applied Mechanics，1963，30(2)：170 - 175.

21 YU H，YUAN Z，GLIMARTIN M J，et al. Modelling and control of a slider hybrid seven-bar system[C]// International Association of Science and Technology for Development (IASTED) International Conference on Robotice and Applications，1999：319 - 323.

22 YU H. Modelling and control of hybrid machine systems—a five-bar mechanism case[J]. International Journal of Automation and Computing，2006，3(3)：235 - 243.

23 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. 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.
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. (in Chinese)