

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.008

油菜钵苗移栽机双五杆栽植机构多目标优化设计*

廖庆喜 刘明峰 张 照 胡先朋
(华中农业大学工学院, 武汉 430070)

摘要: 针对双五杆栽植机构结构复杂、参数多,用传统的解析法设计较为困难的实际问题,分析了油菜钵苗移栽机双五杆栽植机构的工作原理和运动特性,构建了该机构多目标优化设计模型,借助 Matlab 软件开展了多目标优化设计模型的求解和参数分析,并结合高速摄像技术开展了该机构多目标优化设计模型与实际轨迹一致性的验证。结果表明:机组前进速度为 0.3 m/s、栽植频率为 60 株/min 时,栽植株距和轨迹高度均为 300 mm,入土轨迹与出土轨迹具有较高垂直度和重合度,栽植轨迹最低点鸭嘴器水平方向速度为 0.04 m/s,接近零速栽植,满足油菜移栽要求。
关键词: 油菜 移栽机 双五杆栽植机构 多目标优化 高速摄像试验
中图分类号: S223.92 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)11-0049-08

Multi-objective Optimization Design of Double Five-bar Transplanting Mechanism for Rape Pot Seedling

Liao Qingxi Liu Mingfeng Zhang Zhao Hu Xianpeng
(College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: In order to overcome the shortages of complex structure and too much parameters of double five-bar transplanting which are difficult to be solved by traditional analytical method, the working principle and kinematics model of rape pot seedling were analyzed. Also a multi-objective optimization design model was established. The calculation and parameter analysis were carried out with Matlab software. And the kinematics characteristics of double five-bar transplanting mechanism were analyzed, which matched with the solving results of the multi-objective optimization design model. The consistency verification experiment was carried out by high speed photography system. The result showed that both of transplanting spacing and locus height of the rape pot seedling transplanter were 300 mm, with the forward speed of 0.3 m/s and transplanting frequency of 60 seedlings per minute. The displacement between buried locus and unearthed locus was less than 0.91 mm with the transplanting depth within the range of 60 ~ 100 mm, which revealed the good verticality and coincidence between them. The horizontal velocity of duckbill-type planting unit was 0.04 m/s at the lowest point of the transplanting locus, and the swinging angle was in the range of $-2.3^{\circ} \sim 2.3^{\circ}$ at planting stage, which were benefit for planting. In falling stage, the swinging angle of duckbill-type planting unit was in the range of $-2.4^{\circ} \sim 2.2^{\circ}$ and the vertical velocity was less than 0.7 m/s, so that the vertical displacement was too small to catch the seedling for duckbill-type planting unit. The demands of rapeseed mechanized transplanting could be met with proposed method.
Key words: Rape Transplanter Double five-bar transplanting mechanism Multi-objective optimization High speed photography experiment

收稿日期: 2015-04-17 修回日期: 2015-05-21
* 国家油菜产业技术体系专项资助项目(CARS-13)、中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2014PY033)和武汉市高新技术产业科技创新团队培养计划资助项目(2014070504020240)
作者简介: 廖庆喜,教授,博士生导师,主要从事油菜机械化生产技术与装备研究,E-mail: liaoxq@mail.hzau.edu.cn

引言

长江流域稻-油三熟制地区,油菜种植受晚稻收割较迟的影响,仍有一半左右的油菜需要育苗移栽来解决茬口矛盾。我国从 20 世纪 50 年代末开始移栽机械的研究^[1-3]。目前,国内成熟的机型主要有链夹式、导苗管式、挠性圆盘式、吊篮式和鸭嘴式移栽机。链夹式、导苗管式和挠性圆盘式移栽机均采用开沟器开沟后落苗并覆土完成栽植,其难以适应长江流域黏重土壤,易壅土堵塞。吊篮式和鸭嘴式移栽机依靠栽植机构保证鸭嘴器沿特定栽植轨迹运动,实现打孔移栽。吊篮式移栽机栽植过程鸭嘴器始终竖直向下,但栽植轨迹为余摆线,入土轨迹和出土轨迹重合度以及垂直度较差,栽植形成穴口受栽植深度影响较大^[3-14]。鸭嘴式移栽机通过设计双五杆串联机构的结构参数,在满足栽植轨迹高度的条件下,能实现鸭嘴器以较高垂直度入土和出土,并达到较高的入土和出土轨迹重合度。

双五杆栽植机构的结构参数直接影响栽植轨迹,其结构参数的确定是设计的关键问题。双五杆栽植机构结构复杂、参数多,待实现的运动轨迹为高次曲线,用传统的解析法设计较为困难。针对这一问题,本文根据油菜钵苗移栽机双五杆栽植机构的运动学模型和适合油菜移栽轨迹特征,确定设计变量和约束条件,构建油菜钵苗移栽机双五杆栽植机构多目标优化设计模型,运用 Matlab 软件进行求解,得出满足移栽要求的油菜钵苗移栽机双五杆栽植机构结构参数,通过油菜钵苗移栽机双五杆栽植机构栽植轨迹的高速摄像试验验证多目标优化设计模型的合理性。

1 油菜钵苗移栽机及双五杆栽植机构工作原理

油菜苗拔起后数小时内即脱水变蔫,易受损伤,不适于机械分苗和栽植,故以油菜钵苗为研究对象设计了一台油菜钵苗移栽机,其结构如图 1 所示,主要由输送带送苗装置、合页分苗装置、双五杆栽植机构和凸轮同步控制系统组成。油菜钵苗移栽机挂接于 2BFQ-6 型油菜精量联合直播机上使用,一次性完成旋耕、开沟、施肥和移栽等工序,直播机地轮提供动力,通过链传动和栽植换向装置传递给输送带送苗装置和双五杆栽植机构,由凸轮控制系统实现合页分苗装置分苗过程和双五杆栽植机构栽植过程的同步。

油菜钵苗移栽机双五杆栽植机构是承接送苗装置、实现油菜钵苗最后输送、并将其栽植入土的执行

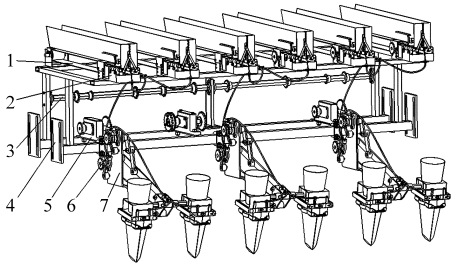


图 1 油菜钵苗移栽机结构示意图
Fig.1 Sketch of rape transplanter

1. 输送带送苗装置 2. 合页分苗装置 3. 送苗传动轴 4. 机架
5. 栽植换向装置 6. 凸轮同步控制系统 7. 双五杆栽植机构

终端,是移栽机的关键工作部件,其工作性能对油菜钵苗移栽机的栽植质量和效率有重大影响。

图 2 为双五杆栽植机构的简化示意图。其中机架 AB、曲柄 AD、曲柄 BF、连杆 EF 和连杆 DE 构成一个五杆机构,机架 AC、曲柄 AD、连杆 DG、连杆 GH 和摇杆 CH 构成另一五杆机构,两个五杆机构共用曲柄 AD,连杆 DE 与连杆 DG 于 D 点呈 α 角固定连接。PQ 为鸭嘴器中心对称线,P 为鸭嘴器底端点。双五杆栽植机构自由度为 2,曲柄 AD 和曲柄 BF 为原动件。工作时曲柄 AD 和曲柄 BF 以相同转速同向匀速转动,其转向与机组前进方向一致,栽植机构通过连杆 DE 和连杆 DG 将动力传递给连杆 GH,并带动鸭嘴器按一定轨迹做上下运动,当曲柄 BF 与连杆 EF 重合时,鸭嘴器运行至最高点处,凸轮控制系统控制合页分苗装置打开,钵苗落入鸭嘴器中,随后,苗钵随鸭嘴器向下运动;当曲柄 BF 与连杆 EF 延长线重合时,鸭嘴器运行至最低点处,凸轮控制系统控制鸭嘴器打开,苗钵落入鸭嘴器在地表打出的孔穴中完成栽植过程。

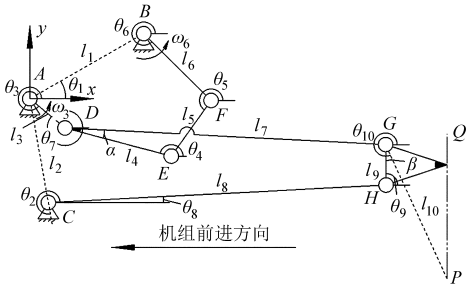


图 2 双五杆栽植机构简化示意图
Fig.2 Sketch of double five-bar transplanting mechanism

2 双五杆栽植机构运动学模型建立

以 A 为原点,建立如图 2 所示右手直角坐标系,各杆角位移以 x 轴正方向为基准,逆时针为正,机组前进方向为 x 轴负方向。油菜钵苗移栽机双五杆栽植机构各杆的结构参数如表 1 所示。

表 1 双五杆栽植机构结构参数

Tab. 1 Structural parameters of double five-bar transplanting mechanism

变量	含意	变量	含意
l_1/mm	机架 AB 的长度	$\theta_1/(\circ)$	机架 AB 的角度
l_2/mm	机架 AC 的长度	$\theta_2/(\circ)$	机架 AC 的角度
l_3/mm	曲柄 AD 的长度	$\theta_3/(\circ)$	曲柄 AD 的初始相位角
l_4/mm	连杆 DE 的长度	$\theta_4/(\circ)$	连杆 DE 的角位移
l_5/mm	连杆 EF 的长度	$\theta_5/(\circ)$	连杆 EF 的角位移
l_6/mm	曲柄 BF 的长度	$\theta_6/(\circ)$	曲柄 BF 的初始相位角
l_7/mm	连杆 DG 的长度	$\theta_7/(\circ)$	连杆 DG 的角位移
l_8/mm	摇杆 CH 的长度	$\theta_8/(\circ)$	摇杆 CH 的角位移
l_9/mm	连杆 GH 的长度	$\theta_9/(\circ)$	连杆 GH 的角位移
l_{10}/mm	杆 GP 的长度	$\theta_{10}/(\circ)$	杆 GP 的角位移
$\alpha/(\circ)$	连杆 DE 与连杆 DG 所呈夹角	$\beta/(\circ)$	连杆 GH 与杆 GP 所呈夹角

根据图 2 建立油菜钵苗移栽机双五杆栽植机构的封闭矢量方程

$$\boldsymbol{l}_{AD} = \boldsymbol{l}_{AB} + \boldsymbol{l}_{BF} + \boldsymbol{l}_{FE} + \boldsymbol{l}_{ED} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{l}_{AD} + \boldsymbol{l}_{DG} = \boldsymbol{l}_{AC} + \boldsymbol{l}_{CH} + \boldsymbol{l}_{HG} \tag{2}$$

将矢量方程转换为解析形式,得出各点位置方程

$$x_A = y_A = 0 \tag{3}$$

$$\begin{cases} x_B = x_A + l_1 \cos \theta_1 \\ y_B = y_A + l_1 \sin \theta_1 \end{cases} \tag{4}$$

$$\begin{cases} x_F = x_B + l_6 \cos \theta_6 \\ y_F = y_B + l_6 \sin \theta_6 \end{cases} \tag{5}$$

$$\begin{cases} x_E = x_F + l_5 \cos \theta_5 \\ y_E = y_F + l_5 \sin \theta_5 \end{cases} \tag{6}$$

$$\begin{cases} x_D = l_3 \cos \theta_3 = x_E + l_4 \cos \theta_4 \\ y_D = l_3 \sin \theta_3 = y_E + l_4 \sin \theta_4 \end{cases} \tag{7}$$

整理式(3)~(7)可得

$$\begin{cases} l_1 \cos \theta_1 - l_3 \cos \theta_3 + l_4 \cos \theta_4 + l_5 \cos \theta_5 + l_6 \cos \theta_6 = 0 \\ l_1 \sin \theta_1 - l_3 \sin \theta_3 + l_4 \sin \theta_4 + l_5 \sin \theta_5 + l_6 \sin \theta_6 = 0 \end{cases} \tag{8}$$

由于曲柄 AD 和曲柄 BF 以相同转速同向匀速转动,故设 $\theta_6 = \theta_3 + \gamma$, γ 为曲柄 AD 和曲柄 BF 初始安装相位角差。

整理得

$$\begin{cases} x_C = x_A + l_2 \cos \theta_2 \\ y_C = y_A + l_2 \sin \theta_2 \end{cases} \tag{9}$$

$$\begin{cases} x_H = x_C + l_8 \cos \theta_8 \\ y_H = y_C + l_8 \sin \theta_8 \end{cases} \tag{10}$$

$$\begin{cases} x_G = x_D + l_7 \cos \theta_7 = x_H + l_9 \cos \theta_9 \\ y_G = y_D + l_7 \sin \theta_7 = y_H + l_9 \sin \theta_9 \end{cases} \tag{11}$$

可得方程组

$$\begin{cases} l_2 \cos \theta_2 - l_3 \cos \theta_3 - l_7 \cos \theta_7 + l_8 \cos \theta_8 + l_9 \cos \theta_9 = 0 \\ l_2 \sin \theta_2 - l_3 \sin \theta_3 - l_7 \sin \theta_7 + l_8 \sin \theta_8 + l_9 \sin \theta_9 = 0 \end{cases} \tag{12}$$

其中

$$\theta_7 = \theta_4 + \pi + \alpha$$

鸭嘴器底端点 P 的位置方程为

$$\begin{cases} x_P = x_G + l_{10} \cos \theta_{10} \\ y_P = y_G + l_{10} \sin \theta_{10} \end{cases} \tag{13}$$

设机组前进速度为 v ,则鸭嘴器底端点 P 随时间 t 变化的动轨迹方程为

$$\begin{cases} X_P = l_3 \cos \theta_3 + l_7 \cos \theta_7 + l_{10} \cos \theta_{10} - vt \\ Y_P = l_3 \sin \theta_3 + l_7 \sin \theta_7 + l_{10} \sin \theta_{10} \end{cases} \tag{14}$$

其中

$$\theta_{10} = \theta_9 + \pi + \beta$$

对式(14)求一阶导数和二阶导数即可得鸭嘴器底端点 P 的速度和加速度方程。

3 双五杆栽植机构多目标优化设计模型

3.1 设计变量分析

根据式(8)和(12)可知中间变量 θ_4 和 θ_9 的值分别与 $l_1、l_2、l_3、l_4、l_5、\theta_1、\theta_3、\gamma$ 及 $l_1、l_2、l_3、l_4、l_5、l_6、l_7、l_8、l_9、\theta_1、\theta_2、\theta_3、\alpha、\gamma$ 有关,将 θ_4 和 θ_9 代入式(14)得

$$\begin{cases} X_P = l_3 \cos \theta_3 + l_7 \sin \theta_4 \sin \alpha - l_7 \cos \theta_4 \cos \alpha + l_{10} \sin \theta_9 \sin \beta - l_{10} \cos \theta_9 \cos \beta - vt \\ Y_P = l_3 \sin \theta_3 - l_7 \sin \theta_4 \cos \alpha - l_7 \cos \theta_4 \sin \alpha - l_{10} \sin \theta_9 \cos \beta - l_{10} \cos \theta_9 \sin \beta \end{cases} \tag{15}$$

由式(15)可以看出,鸭嘴器底端点 P 的动轨迹与双五杆栽植机构的结构参数 $l_1、l_2、l_3、l_4、l_5、l_6、l_7、l_8、l_9、l_{10}、\theta_1、\theta_2、\theta_3、\alpha、\beta、\gamma、v$ 以及时间 t 有关。 l_{10} 为鸭嘴器底端点 P 至 G 点的距离,取决于鸭嘴器结构,取 $l_{10} = 300\text{ mm}$;机组前进速度为 $v = 0.3\text{ m/s}$,曲柄 AD 和曲柄 BF 以 $2\pi\text{ rad/s}$ 速度匀速转动,则 $\theta_3 = 2\pi t$,时间 t 为过程控制变量,于是确定设计变量为

$$\boldsymbol{X} = (x(1), x(2), x(3), x(4), x(5), x(6), x(7), x(8), x(9), x(10), x(11), x(12), x(13), x(14)) = (l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6, l_7, l_8, l_9, \theta_1, \theta_2, \alpha, \beta, \gamma)$$

3.2 目标函数构建

油菜钵苗移栽机双五杆栽植机构的栽植轨迹对栽植效果有较大影响,直立度是衡量栽植效果的重要指标,要达到较高移栽直立度,首先鸭嘴器轨迹高度应大于苗体高度;其次苗体落地时水平方向的速度应尽量小,即零速移栽;其三苗体入土前后鸭嘴器动轨迹尽量垂直,且入土轨迹和出土轨迹重合度要好^[15-20]。机械化移栽适栽期内油菜苗长在 $150 \sim 250\text{ mm}$ 之间^[21],故取栽植轨迹高度为 300 mm 。为达到较高的移栽可靠性,移栽过程中鸭嘴器摆动角度变化应尽量小,同时栽植轨迹顶部曲线应尽量平

缓,减小接苗过程中鸭嘴器与合页分苗装置间的接苗间隙变化幅度,以提高接苗可靠性。鸭嘴器摆动角度变化与 θ_{10} 变化等效,取 θ_{10} 上限和下限分别为 315° 和 285° [17]。移栽过程中鸭嘴器动轨迹是以一定周期变化的曲线,故研究一个周期内鸭嘴器轨迹即可。将 θ_3 在一个周期 ($0 \sim 2\pi$) 范围内,以 $\pi/180$ 为间隔离散化,记为向量 $\theta_3(i)$ ($0 \leq i \leq 360$)。 $\theta_3(i)$ 中每一个元素对应一个 X_p 、 Y_p 和 θ_{10} 值,则函数 X_p 、 Y_p 和 θ_{10} 转化为向量 $X_p(i)$ 、 $Y_p(i)$ 和 $\theta_{10}(i)$ 。

图 3 为油菜钵苗移栽机双五杆栽植机构不同结构参数下鸭嘴器的栽植轨迹,从图中可以看出一个栽植周期内轨迹最低点以上 200 mm 处的水平线与栽植轨迹存在两个交点,轨迹最高点以下 25 mm 处

的水平线与栽植轨迹存在两个交点,那么向量 $Y_p(i)$ 中 $Y_p(j_1)$ 、 $Y_p(j_2)$ 与最小元素差为 200,最大元素与 $Y_p(k_1)$ 、 $Y_p(k_2)$ 差为 25。 j_1 至栽植轨迹最低点处曲线为入土轨迹,栽植轨迹最低点至 j_2 处曲线为出土轨迹, k_1 至 k_2 处曲线为栽植轨迹顶部曲线。从图中可以看出轨迹 I 和 III 的入土轨迹和出土轨迹间隔较大,栽植形成穴口大,不利于钵苗入土后稳定,顶部曲线呈尖顶状,接苗间隙变化幅度大。轨迹 II 的入土轨迹和出土轨迹重合度好,栽植形成穴口小,能满足较高移栽直立度的要求,顶部曲线较平缓,接苗间隙变化幅度小,接苗可靠性较高。因此为达到较好栽植效果,油菜钵苗移栽机双五杆栽植机构的栽植轨迹应趋于轨迹 II。

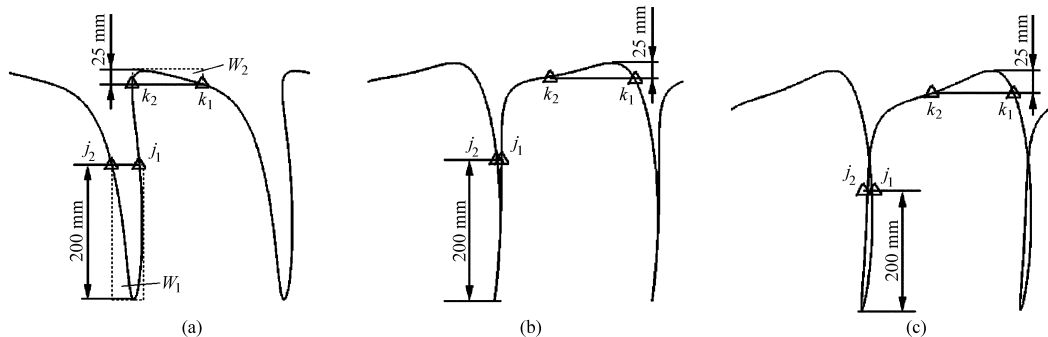


图 3 双五杆栽植机构不同栽植轨迹

Fig. 3 Transplanting locus of double five-bar transplanting mechanism

(a) 轨迹 I (b) 轨迹 II (c) 轨迹 III

油菜钵苗移栽机双五杆栽植机构栽植轨迹的入土轨迹和出土轨迹没有完全垂直和重合,顶部曲线没有完全水平,则存在包含 j_1 至 j_2 处曲线和 k_1 至 k_2 处曲线的最小矩形 W_1 和 W_2 ,如图 3a 所示。矩形 W_1 和 W_2 竖直方向长度分别为 200 mm 和 25 mm,设 W_1 和 W_2 水平方向长度分别为 d_1 和 d_2 , d_1 大小反映了入土轨迹和出土轨迹的垂直度和重合度, d_2 大小反映了栽植轨迹顶部曲线平缓程度, d_1 越小则入土轨迹和出土轨迹的垂直度和重合度越好, d_2 越大则栽植轨迹顶部曲线越平缓,根据肖名涛等 [20] 所做栽植轨迹对移栽质量影响的试验,确定 $d_1 = 20$ mm, $d_2 = 200$ mm。

根据分析建立油菜钵苗移栽机双五杆栽植机构多目标优化设计目标函数数学模型:

(1) 向量 $Y_p(i)$ 的最大值(轨迹最高点)与最小值(轨迹最低点)之差大于 300 mm。

(2) 向量 $Y_p(i)$ 取最小值(轨迹最低点)以上 200 mm 范围内,对应的向量 $X_p(i)$ 最大值与最小值之差小于 20 mm。

(3) 向量 $Y_p(i)$ 取最大值(轨迹最高点)以下 25 mm 范围内,对应的向量 $X_p(i)$ 最大值与最小值之差大于 200 mm。

(4) 向量 $\theta_{10}(i)$ 在 $285^\circ \sim 315^\circ$ 范围内变化。

采用 Matlab 程序语言描述上述数学模型

$$f(1) = \min(Y_p(i)) - \max(Y_p(i)) + 300$$

$$f(2) = \max(X_p(j_1:j_2)) - \min(X_p(j_1:j_2)) - 20$$

$$f(3) = 200 - \max(X_p(k_1:k_2)) + \min(X_p(k_1:k_2))$$

$$f(4) = \max(\theta_{10}(i)) - 315\pi/180$$

$$f(5) = 285\pi/180 - \min(\theta_{10}(i))$$

3.3 约束条件分析与建立

双五杆栽植机构应满足五杆机构运动条件,即五杆机构在运动过程中,不能出现死点位置,故双五杆栽植机构工作过程中有 $\triangle DEF$ 和 $\triangle DGH$ 存在,即 $|l_{DE} - l_{EF}| < l_{DF} < l_{DE} + l_{EF}$, $|l_{DG} - l_{GH}| < l_{DH} < l_{DG} + l_{GH}$,将 D 、 E 、 F 、 G 、 H 的位置坐标代入不等式得约束条件

$$\begin{cases} g(1) = (x(4) - x(5))^2 - (x(4)\cos\theta_4 + x(5)\cos\theta_5)^2 - \\ \quad (x(4)\sin\theta_4 + x(5)\sin\theta_5)^2 < 0 \\ g(2) = (x(4)\cos\theta_4 + x(5)\cos\theta_5)^2 + \\ \quad (x(4)\sin\theta_4 + x(5)\sin\theta_5)^2 - (x(4) + x(5))^2 < 0 \\ g(3) = (x(7) - x(9))^2 - (x(7)\cos\theta_7 - x(9)\cos\theta_9)^2 + \\ \quad (x(7)\sin\theta_7 - x(9)\sin\theta_9)^2 < 0 \\ g(4) = (x(7)\cos\theta_7 - x(9)\cos\theta_9)^2 + \\ \quad (x(7)\sin\theta_7 - x(9)\sin\theta_9)^2 - (x(7) + x(9))^2 < 0 \end{cases}$$

(16)

3.4 多目标优化模型求解

该油菜钵苗移栽机双五杆栽植机构优化设计为非线性多目标规划问题,调用 Matlab 求解多目标规划问题函数 fgoalattain 进行求解,调用格式为: $[x,fval,attainfactor,exitflag] = fgoalattain(@myfun,x0,goal,weight,A,b,Aeq,beq,lb,ub,@mycon)$ 。其中 x 为多目标优化模型最优解; $fval$ 为多目标函数在最优解 x 处的值; $attainfactor$ 为最优解 x 处的目标规划因子, $attainfactor > 0$ 表示目标值没有溢出; $exitflag$ 为多目标规划求解结束退出标志, $exitflag > 0$ 表示最优解 x 收敛。 $@myfun$ 和 $@mycon$ 分别是调用目标函数和约束条件的函数文件名。

$x0$ 为设计变量初始值向量,该模型中 $x0 = [200;100;30;200;150;60;400;400;75;\pi/3;3\pi/2;0;0;4\pi/3]$ 。

$goal$ 为设计的目标函数值向量,向量长度等于目标函数个数,该模型中 $goal = [0;0;0;0;0]$ 。

$weight$ 为各目标函数权重值向量,向量长度等于目标函数个数,该模型中 $weight = [0.2;0.2;0.2;0.2;0.2]$ 。

A 、 b 分别为线性不等式约束的系数和对应右端项; Aeq 、 beq 分别为线性方程约束的系数和对应的右端项;该模型中不存在线性不等式约束和方程约束,故 A 、 b 、 Aeq 和 beq 皆为空矩阵。

lb 、 ub 分别为设计变量下限和上限,该模型中 $lb = [150;50;20;150;100;30;350;350;50;0;4\pi/3;-\pi/6;-\pi/6;0]$; $ub = [250;150;50;250;200;80;450;450;100;\pi/2;5\pi/3;\pi/6;\pi/3;2\pi]$ 。

Matlab 求解工作界面如图 4 所示。经过迭代计算,得到最优解为

$X = (198.2, 50.7, 29.5, 196.2, 106.5, 52, 391.1, 410, 97, 0.789, 4.208, 0.059, 0.145, 3.012)$

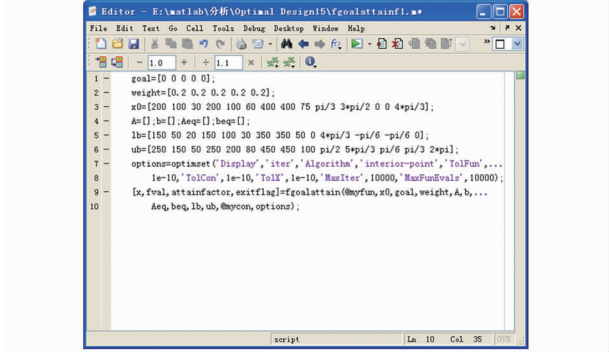


图 4 Matlab 求解工作界面

Fig.4 Solving workplace in Matlab

4 结果分析

根据最优解 X 确定油菜钵苗移栽机双五杆栽

植机构结构参数为: $l_1 = 198\text{ mm}$ 、 $l_2 = 50.5\text{ mm}$ 、 $l_3 = 29.5\text{ mm}$ 、 $l_4 = 196\text{ mm}$ 、 $l_5 = 106.5\text{ mm}$ 、 $l_6 = 52\text{ mm}$ 、 $l_7 = 391\text{ mm}$ 、 $l_8 = 410\text{ mm}$ 、 $l_9 = 97\text{ mm}$ 、 $\theta_1 = 45^\circ$ 、 $\theta_2 = 241^\circ$ 、 $\alpha = 3^\circ$ 、 $\beta = 8^\circ$ 、 $\gamma = 172.5^\circ$ 。根据前述的运动学方程,运用 Matlab 软件绘制前进速度为 0.3 m/s 、栽植频率为 60 株/min 时鸭嘴器底端点 P 的栽植轨迹、速度、加速度和鸭嘴器摆动角度变化曲线。

鸭嘴器底端点 P 的栽植轨迹如图 5 所示, a 为栽植轨迹最低点, b 为栽植轨迹最高点, c 为最佳接苗点。栽植株距为 300 mm , 轨迹高度为 300 mm , 满足油菜移栽农艺要求;栽植深度在 $60 \sim 100\text{ mm}$ 之间时,入土点和出土点间距在 $0.15 \sim 0.91\text{ mm}$ 之间,栽植形成穴口小,便于钵苗及时覆土固定;栽植轨迹高度在 200 mm 以下时,栽植轨迹竖直方向宽度为 12.8 mm ,入土轨迹和出土轨迹具有较好的垂直度和重合度,能有效减小栽植过程中鸭嘴器与钵苗干涉,确保了钵苗栽植直立度和姿态稳定性;栽植轨迹最高点以下 25 mm 范围内轨迹曲线水平方向宽度为 217 mm ,接苗过程中鸭嘴器与合页分苗装置间的接苗间隙变化幅度小,确保了接苗可靠性。

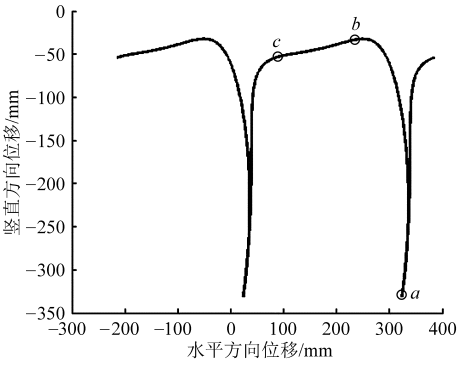


图 5 鸭嘴器底端点 P 的栽植轨迹曲线

Fig.5 Transplanting locus of endpoint P on duckbill-type planting unit

双五杆栽植机构在上述优化结构参数组合下一个栽植周期内栽植过程循环图如图 6 所示,其中曲柄 AD 初始位置曲柄转角为 0° ,鸭嘴器摆动角度变化如图 7 所示。曲柄 AD 转角为 $99^\circ \sim 117^\circ$ 时,鸭嘴器摆动角度在 $-2.3^\circ \sim 2.3^\circ$ 之间变化,处于栽植阶段,曲柄 AD 转角为 111° 时,鸭嘴器运动到最低点(位置 a),为最佳栽植点,此时鸭嘴器摆动角度为 0° ,保证了钵苗落入土壤的初始直立度;曲柄 AD 转角为 267° 时,鸭嘴器运动到最高点(位置 b),此时鸭嘴器摆动角度为 27.7° ,不利于接苗;曲柄 AD 转角为 $0^\circ \sim 18^\circ$ 时,此时鸭嘴器摆动角度在 $-2.4^\circ \sim 2.2^\circ$ 之间变化,处于接苗阶段,曲柄 AD 转角为 9° 时,鸭嘴器摆动角度为 0° ,为最佳接苗点(位置 c)。

一个周期内,鸭嘴器底端点 P 的速度和加速度

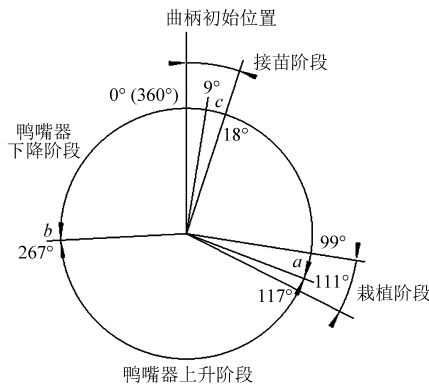


图6 优化结构参数下双五杆栽植机构栽植过程循环图
Fig.6 Transplanting cycle of double five-bar transplanting mechanism with optimized structure parameters

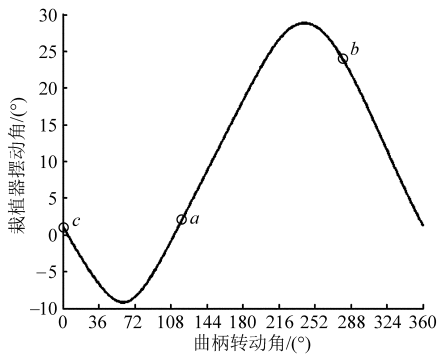


图7 鸭嘴器摆动角变化曲线

Fig.7 Swing angle change curve of duckbill-type planting unit

如图8和图9所示。曲柄AD转角为 $99^{\circ} \sim 117^{\circ}$ 时,鸭嘴器底端点P水平方向速度由 -0.144 m/s 增加至 0.114 m/s ,在此过程中加速度由 11.2 m/s^2 减小至 7.7 m/s^2 ;栽植轨迹最低点(位置a)鸭嘴器底端点P水平方向速度为 0.04 m/s ,接近零速,钵苗落地水平惯性小,有利于达到较高直立度,鸭嘴器底端点P竖直方向速度为 0.055 m/s ,加速度为 49.7 m/s^2 ,加速度大,有利于鸭嘴快速上升,提高栽植速度;曲柄AD转角为 $111^{\circ} \sim 267^{\circ}$ 时,鸭嘴器由栽植轨迹最低点(位置a)上升至栽植轨迹最高点(位置b),此过程中鸭嘴器先做加速度减小的加速上升运动,后做加速度先增后减的减速上升运动;此后鸭嘴器缓慢下降,鸭嘴器底端点P竖直方向速度和加速度稳定在零附近,曲柄AD转角为 $0^{\circ} \sim 18^{\circ}$ 时,鸭嘴器底端点P竖直方向速度在 $-0.27 \sim -0.7\text{ m/s}$ 之间变化,接苗阶段鸭嘴器竖直方向速度小,栽植轨迹高度变化幅度较小,有利于接苗。

5 高速摄像与轨迹分析

根据确定的油菜钵苗移栽机双五杆栽植机构结构参数,加工了一套双五杆栽植机构,如图10所示。该机构采用液压系统驱动并挂接于John Deere 284型拖拉机上,应用PCD. dimax HD、CamWare V3.09

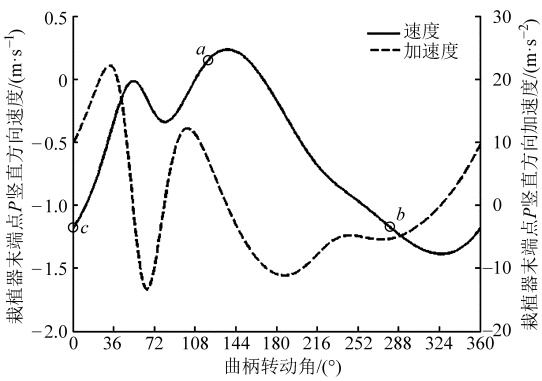


图8 鸭嘴器底端点P水平方向速度和加速度曲线
Fig.8 Horizontal velocity and acceleration curves of endpoint P in duckbill-type planting unit

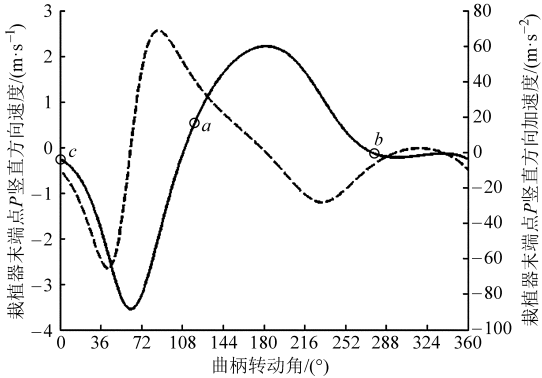


图9 鸭嘴器底端点P竖直方向速度和加速度曲线
Fig.9 Vertical velocity and acceleration curves of endpoint P in duckbill-type planting unit

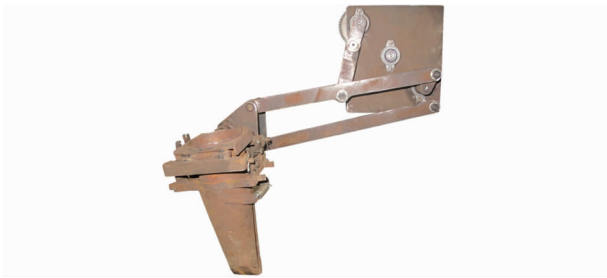


图10 双五杆栽植机构实物图
Fig.10 Double five-bar transplanting mechanism

高速摄像系统开展了双五杆栽植机构动轨迹高速摄像试验,如图11所示。试验过程中拖拉机前进速度为 0.3 m/s ,双五杆栽植机构转速为 60 r/min ,拍摄速度为 500 帧/s 。采用Startrails软件对所拍摄照片进行叠加处理,获得鸭嘴器底端标记点运动轨迹如图12所示。

高速摄像系统拍摄过程中投影板与鸭嘴器不处于同一平面,以致于读取的投影轨迹参数与实际参数之间存在一定的误差。拍摄时高速摄像系统、鸭嘴器和投影板布局图如图13所示,鸭嘴器实际运动距离为 l_{MN} ,通过投影板读取值为 l_{RT} ,根据相似三角形性质可知 $l_{MN} = l_{RT} S_1 / (S_1 + S_2)$,式中 $S_1 = 3\,070\text{ mm}$,

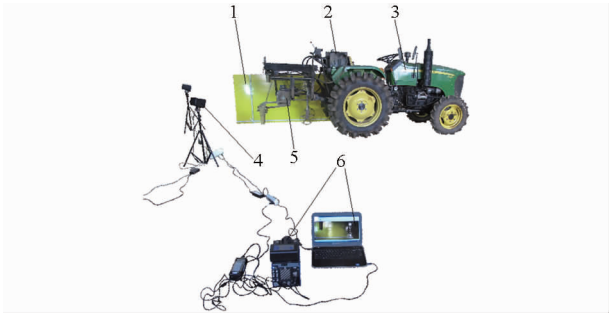


图 11 双五杆栽植机构高速摄像试验

Fig. 11 High speed photography experiment of double five-bar transplanting mechanism

1. 投影板 2. 液压系统 3. 拖拉机 4. 补光灯 5. 双五杆栽植机构 6. 高速摄像系统

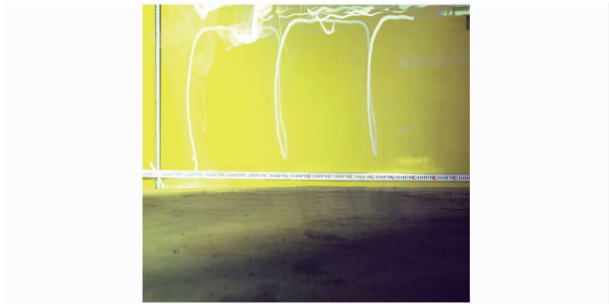


图 12 栽植轨迹高速摄像图

Fig. 12 High speed photography of transplanting locus

$S_2 = 1\,270\text{ mm}$ 。从图 12 中可以看出高速摄像栽植轨迹曲线与 Matlab 软件绘制的理论栽植轨迹(图 5)相符,图中投影栽植轨迹呈现轻微波浪形波动,主要原因在于拍摄过程中机具振动,以及拖拉机前进速度和栽植转速存在一定波动;从图中读取栽植株距为 430 mm ,轨迹高度为 420 mm ,经计算得实际栽植株距为 304.2 mm ,轨迹高度 291.1 mm ,与多目标优化结果理论值的误差均小于 3% ,说明构建的油菜钵苗移栽机双五杆栽植机构多目标优化设计模型

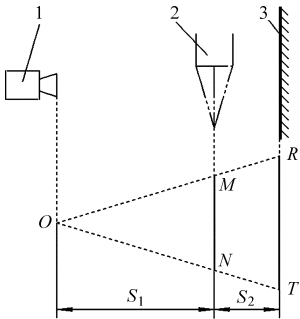


图 13 高速摄像布局图

Fig. 13 Layout of high speed photography

1. 高速摄像系统 2. 鸭嘴器 3. 投影板

合理。

6 结论

(1)设计了一种油菜钵苗移栽机双五杆栽植机构,开展了该机构的运动特性和轨迹分析,得出了不同参数组合下的栽植轨迹。

(2)建立了双五杆栽植机构多目标优化设计模型,并通过高速摄像实时在线拍摄提取其栽植轨迹,结果表明多目标优化设计模型合理。

(3)确定了栽植株距和栽植高度为 300 mm 时,油菜钵苗移栽机双五杆栽植机构结构参数为: $l_1 = 198\text{ mm}$ 、 $l_2 = 50.5\text{ mm}$ 、 $l_3 = 29.5\text{ mm}$ 、 $l_4 = 196\text{ mm}$ 、 $l_5 = 106.5\text{ mm}$ 、 $l_6 = 52\text{ mm}$ 、 $l_7 = 391\text{ mm}$ 、 $l_8 = 410\text{ mm}$ 、 $l_9 = 97\text{ mm}$ 、 $\theta_1 = 45^\circ$ 、 $\theta_2 = 241^\circ$ 、 $\alpha = 3^\circ$ 、 $\beta = 8^\circ$ 、 $\gamma = 172.5^\circ$ 。该组参数下,栽植穴口小,入土前后鸭嘴器轨迹垂直性好,重合度高;栽植阶段鸭嘴器摆动角度在 $-2.3^\circ \sim 2.3^\circ$ 之间变化,栽植轨迹最低点鸭嘴器水平方向速度为 0.04 m/s ;接苗阶段鸭嘴器摆动角度在 $-2.4^\circ \sim 2.2^\circ$ 之间变化,栽植轨迹高度变化幅度较小,满足移栽要求。

参 考 文 献

1 傅廷栋. 油菜高产优质栽培新技术[M]. 武汉:湖北科学技术出版社,1999.

2 袁文胜,吴崇友. 我国油菜移栽机械的现状和发展趋势分析[J]. 中国农机化,2007(6):61-63.

Yuan Wensheng, Wu Chongyou. Analysis of present situation and developing trend of the rape transplanter in China [J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2007(6):61-63. (in Chinese)

3 汤修映,侯书林,朱玉龙,等. 油菜移栽机械化技术研究进展[J]. 农机化研究,2010(4):224-227.

Tang Xiuying, Hou Shulin, Zhu Yulong, et al. Development of oilseed rape transplanting machine [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010(4):224-227. (in Chinese)

4 于晓旭,赵匀,陈宝成,等. 移栽机械发展现状与展望[J]. 农业机械学报,2014, 45(8):44-53.

Yu Xiaoxu, Zhao Yun, Chen Baocheng, et al. Current situation and prospect of transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8):44-53. (in Chinese)

5 Prasanna Kumar G V, Raheman H. Development of a walk-behind type hand tractor powered vegetable transplanter for paper pot seedlings [J]. Biosystems Engineering, 2011, 110(2):189-197.

6 Choi W C, Kim D C, Ryu I H, et al. Development of seedling pick-up device for vegetable transplanters [J]. Transactions of the ASAE, 2001, 45(1):13-19.

7 Konosuke Tsuga. Development of fully automatic vegetable transplanter [J]. JARQ, 2000, 34(1):21-28.

8 陈达,周丽萍,杨学军. 移栽机自动分钵式栽植器机构分析与运动仿真[J]. 农业机械学报,2011,42(8):54-57,69.

- Chen Da, Zhou Liping, Yang Xuejun. Mechanism analysis and motion simulation of planting apparatus with automatic distributing bowl mechanism for transplanter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(8): 54–57, 69. (in Chinese)
- 9 张祖立, 王君玲, 张为政, 等. 悬杯式蔬菜移栽机的运动分析与性能试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 21–25.
Zhang Zuli, Wang Junling, Zhang Weizheng, et al. Kinematic analysis and performance experiment of cantilever cup vegetable transplanter [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(11): 21–25. (in Chinese)
- 10 崔巍, 赵亮, 宋建农, 等. 吊杯式移栽机栽植器运动学分析与试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(增刊): 34–38.
Cui Wei, Zhao Liang, Song Jiannong, et al. Kinematic analysis and experiment of dibble-type planting devices [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 34–38. (in Chinese)
- 11 张国忠, 许绮川, 潘玉龙, 等. 影响机械移栽钵苗栽直率的因素分析[J]. 华中农业大学学报, 2004, 23(4): 463–466.
Zhang Guozhong, Xu Qichuan, Pan Yulong, et al. Experimental study of effect factors on standing seedling rate transplanted by machine [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2004, 23(4): 463–466. (in Chinese)
- 12 金诚谦, 吴崇友, 袁文胜. 链夹式移栽机栽植作业质量影响因素分析[J]. 农业机械学报, 2008, 39(9): 196–198.
- 13 王文明, 窦卫国, 王春光, 等. 2ZT-2 型甜菜移栽机栽植系统的参数分析[J]. 农业机械学报, 2009, 40(1): 69–73.
Wang Wenming, Dou Weiguo, Wang Chunguang, et al. Parameter analysis of the planting process of 2ZT-2 beet transplanter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1): 69–73. (in Chinese)
- 14 付晓明, 张伟, 牛钊军. 栽植机构的运动学建模与参数优化——基于夹持式玉米植质钵育苗全自动移栽机[J]. 农机化研究, 2013(10): 11–15.
Fu Xiaoming, Zhang Wei, Niu Zhaojun. Kinematics modeling and parameters optimization—based on clamping type planting mechanism for corn planting bowl-seedling [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013(10): 11–15. (in Chinese)
- 15 周福君, 芦杰, 杜佳兴. 玉米钵苗移栽机圆盘式栽植机构参数优化及试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(1): 18–24.
Zhou Fujun, Lu Jie, Du Jiaxing. Parameters optimization and experiment of corn-paper transplanting machine with seedling disk [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(1): 18–24. (in Chinese)
- 16 金鑫, 李树君, 杨学军, 等. 膜上移栽钵苗栽植机构运动分析与参数优化[J]. 农业机械学报, 2012, 43(增刊): 29–34.
Jin Xin, Li Shujun, Yang Xuejun, et al. Motion analysis and parameter optimization for pot seedling planting mechanism based on up-film transplanting [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 29–34. (in Chinese)
- 17 罗江河, 孙松林, 肖名涛, 等. 基于 Matlab 的油菜移栽机栽植机构运动学建模与分析[J]. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 2013, 39(6): 693–698.
Luo Jianghe, Sun Songlin, Xiao Mingtao, et al. Planting mechanism kinematics modeling and analysis of rapeseed transplanting machine based on Matlab [J]. Journal of Hunan Agricultural University: Natural Science, 2013, 39(6): 693–698. (in Chinese)
- 18 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)
- 19 吴畏, 孙松林, 肖名涛, 等. 2ZY-1 型烟草移栽机栽植器的优化设计[J]. 中国工程机械学报, 2012, 10(2): 167–170.
Wu Wei, Sun Songlin, Xiao Mingtao, et al. Optimization design for transplanter of 2ZY-1 tobacco transplanting machine [J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2012, 10(2): 167–170. (in Chinese)
- 20 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)
- 21 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(增刊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(Supp. 1): 79–88. (in Chinese)