doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.06.012

椭圆-不完全非圆齿轮行星系取苗机构参数优化*

俞亚新　骆春晓　俞高红　赵　雄　俞腾飞
（浙江理工大学机械与自动控制学院，杭州 310018）

摘要：针对椭圆-不完全非圆齿轮行星系蔬菜钵苗取苗机构的参数优化是具有非线性、模糊性、强耦合性的多目标复杂优化问题，建立了该机构的运动学模型及优化目标函数，运用参数导引优化方法，通过 Visual Basic 可视化平台开发了取苗机构运动学优化软件。应用该优化软件可方便地获得的一组机构参数，通过虚拟仿真可以看出所优化的参数能够满足取苗工作轨迹要求。试验样机进行了取苗试验，验证了取苗机构参数的合理性和有效性。

关键词：自动移栽机　蔬菜钵苗　取苗机构　参数优化　参数导引
中图分类号：S223.94；TH112　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2013)06-0062-07

Parameters Optimization of Pick-up Mechanism of Planetary Gear Train with Ellipse Gears and Incomplete Non-circular Gear

Yu Yaxin　Luo Chunxiao　Yu Gaohong　Zhao Xiong　Yu Tengfei
(*School of Mechanical Engineering and Automation*, *Zhejiang Sci-Tech University*, *Hangzhou* 310018, *China*)

Abstract: Aiming at the problem of nonlinearity, fuzziness, strong coupling and multi-objective of the pick-up mechanism of planetary gear train with ellipse gears and incomplete non-circular gear in optimization process, firstly, the kinematical model and optimization objective function were established. Using parameter-guided optimization method, the kinematical optimization software was developed with Visual Basic visualization platform. A set of parameters were obtained and optimized which could meet the work trajectory requirements of pick-up mechanism. Finally, the fetching test was carried on experimental prototype to verify the rationality and effectiveness of the parameters of pick-up mechanism.

Key words: Auto transplanter　Vegetable pot seedling　Pick-up mechanism　Parameters optimization　Parameter guide

引言

取苗机构是蔬菜钵苗自动移栽机的核心工作部件，决定着移栽的效率和质量[1~2]。文献[3~5]提出了旋转式取苗机构，旋转一周取苗 2 次，可以有效地提高取苗效率与质量，该机构参数优化是一个复杂的多目标、多参数优化问题，具有强耦合性、非线性及模糊性，用传统的优化方法很难得到最佳的结构参数。遗传算法、模拟退火算法与神经网络是解决复杂优化问题的良好工具[6~8]，但是它们对问题的依赖性大，需根据不同问题采取不同的措施来调整惩罚函数（包括因子），实际中很难做到，当优化问题是复杂的多目标非线性优化模型时，各目标的加权值很难确定。文献[9~12]针对插秧机分插机构的多目标多参数优化问题，通过开发人机对话的可视化软件进行参数优化，采用试凑法调节参数。需要使用者对被优化机构的运动学特性、参数变量、优化目标有较深入的了解，不具有普遍适用性而且整个优化过程比较费时，效率较低。文献[13]针对插秧机分插机构复杂的优化问题，分析了参数导引

收稿日期：2012-10-31　修回日期：2013-01-23
*国家自然科学基金资助项目(51175477)、浙江省现代农业装备与设施产业创新团队资助项目(2009R50001)和浙江省自然科学基金资助项目(Y1110691、R1110502)
作者简介：俞亚新，副教授，博士，主要从事机构优化设计和机械动力学研究，E-mail：yyxin@zstu.edu.cn
通讯作者：俞高红，教授，博士，主要从事农业种植机械设计与机构学研究，E-mail：yugh@zstu.edu.cn

优化方法，通过建立目标函数和进行函数计算，自动寻求需改变的参数。根据软件界面提示，使用者可简单快速得到优化参数。目前对旋转式取苗机构的参数优化仍停留在人机交互试凑的优化方法研究[3~5]。本文在文献[5]的研究基础上，建立取苗机构优化目标的数学模型，提出一种参数导引与人机交互优化相结合的参数优化方法，可以方便有效地解决旋转式取苗机构复杂的多目标、多参数、强耦合、非线性优化问题。

1　椭圆-不完全非圆齿轮行星系蔬菜钵苗取苗机构运动分析

1.1　机构组成与工作原理

如图 1 所示，椭圆-不完全非圆齿轮行星系蔬菜钵苗取苗机构，由不完全非圆齿轮（太阳轮）、4 个全等的椭圆齿轮（1、2、6、8）、凸锁止弧、凹锁止弧、行星架和两个取苗爪组成。太阳轮和机架固定。

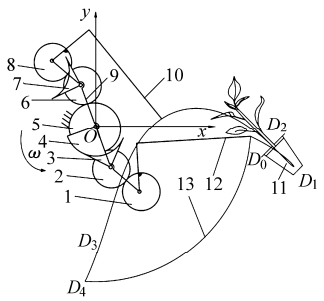

图 1　椭圆-不完全非圆齿轮行星系蔬菜钵苗取苗机构简图

Fig. 1　Diagram of vegetable seedling pick-up mechanism of planetary gear train with ellipse gears and incomplete non-circular gear

1. 行星椭圆齿轮Ⅰ　2. 中间椭圆齿轮Ⅰ　3. 凹锁止弧Ⅰ　4. 凸锁止弧　5. 不完全非圆齿轮　6. 中间椭圆齿轮Ⅱ　7. 凹锁止弧Ⅱ　8. 行星椭圆齿轮Ⅱ　9. 行星架　10、12. 取苗爪　11. 钵苗及钵苗盘　13. 取苗轨迹

该机构工作时（以一侧齿轮结构为例），中间椭圆齿轮Ⅰ在行星架的带动下与不完全非圆齿轮啮合，当中间椭圆齿轮Ⅰ转动到不完全非圆齿轮的无齿部分时，分别固结在齿轮上的凹锁止弧Ⅰ与凸锁止弧进入配合，此时中间椭圆齿轮Ⅰ和行星椭圆齿轮Ⅰ与行星架无相对转动，实现非匀速间歇齿轮传动，取苗爪尖部形成 D_4D_0 段圆弧轨迹。行星椭圆齿轮Ⅰ与中间椭圆齿轮Ⅰ啮合实现非匀速传动，使取苗爪尖部形成 $D_0D_1D_2D_3D_4$ 段轨迹。与行星轮固结的取苗爪一方面随行星架逆时针转动，另一方面相对行星架作非匀速转动，在这两种运动的合成下，取苗爪按要求的角位移和轨迹运动，通过选择合适的结构参数，就可以获得满足蔬菜钵苗取苗要求的工作轨迹和姿态。

1.2　运动学模型的建立

图 2 为行星架逆时针转过 φ_1 时机构的位置（由于机构是对称的，所以只给出一边的公式，另一边角度相差 180°）。

令 $\varphi=\varphi_0+\varphi_1$，其中 φ_0 为行星架初始角位移，φ_1 为行星架相对于初始位置转过的角位移（其相对于初始位置逆时针为正，顺时针为负）。

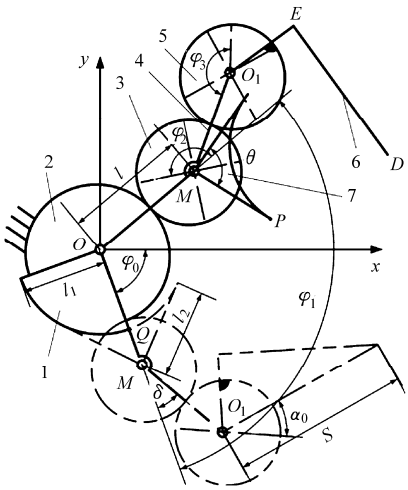

图 2　行星架转过一定角度后的位置示意图

Fig. 2　Planetary carrier position of rotating a certain angle

1. 凸锁止弧　2. 不完全非圆齿轮　3. 中间椭圆齿轮　4. 行星架　5. 行星椭圆齿轮　6. 取苗爪　7. 凹锁止弧

中间椭圆齿轮旋转中心 M 的位移方程为

$$\begin{cases} x_M = l\cos\varphi \\ y_M = l\sin\varphi \end{cases} \tag{1}$$

式中　l——不完全非圆齿轮与中间椭圆齿轮中心距

取苗爪旋转中心 O_1（即行星椭圆齿轮轴心）位移方程为

$$\begin{cases} x_{O_1} = l\cos\varphi + 2a\cos(\varphi+\delta) \\ y_{O_1} = l\sin\varphi + 2a\sin(\varphi+\delta) \end{cases} \tag{2}$$

式中　δ——行星架 MO_1 与 MO 的夹角

a——椭圆齿轮长半轴

取苗爪尖点 D 的相对位移方程[14]为

$$\begin{cases} x_D = x_{O_1} + S\cos(\alpha_0+\varphi+\varphi_3+\delta) \\ y_D = y_{O_1} + S\sin(\alpha_0+\varphi+\varphi_3+\delta) \end{cases} \tag{3}$$

式中　S——取苗爪旋转中心到取苗爪尖 D 的距离

α_0——取苗爪初始安装角

φ_3——行星椭圆齿轮相对行星架 MO_1 顺时针转过的角位移

锁止弧上的尖点 P、Q 位移方程为

$$\begin{cases} x_P = x_M - l_2\cos(\varphi_0-\varphi_1+\varphi_2-\theta/2) \\ y_P = y_M - l_2\sin(\varphi_0-\varphi_1+\varphi_2-\theta/2) \end{cases} \tag{4}$$

$$\begin{cases} x_Q = l_1\cos\varphi_0 \\ y_Q = l_1\sin\varphi_0 \end{cases} \tag{5}$$

式中 l_1——凸锁止弧边长

l_2——凹锁止弧边长

φ_2——中间椭圆齿轮相对于行星架 OM 逆时针转过的角度

θ —— 凹锁止弧两边夹角

取苗爪旋转中心 O_1 到夹苗板的垂线与夹苗板所在直线的交点 E 的位移方程为

$$\begin{cases} x_E = x_{O_1} + H\cos(\alpha_0 + \delta + \beta + \varphi + \varphi_3) \\ y_E = y_{O_1} + H\sin(\alpha_0 + \delta + \beta + \varphi + \varphi_3) \end{cases} \tag{6}$$

式中 H——取苗爪旋转中心到夹苗板所在直线的距离

β——取苗爪旋转中心到夹苗板的垂线与行星架的夹角

以上公式中的 l、φ_2、φ_3 求解方法见文献[5]。l_1、l_2、θ 求解方法见文献[14]。

2 取苗机构目标函数的分析与建立

为满足自动蔬菜钵苗移栽机的工作轨迹要求，设计出取苗效果良好的取苗机构，必须对取苗爪的姿态和尖端轨迹提出一系列的要求。由文献[5]可知，取苗机构需考虑 5 个目标要求和 7 个待优化参数：a、k(椭圆齿轮短轴与长轴比值)、ε(不完全非圆齿轮有齿部分节曲线所对应的圆心角)、φ_0、α_0、δ、S。

2.1 取苗机构在工作过程中不发生运动干涉

取苗机构在工作时，取苗爪在往复回转过程中存在运动干涉问题[15~17]，一旦部件间产生了运动干涉机构就无法工作，更无法实现取苗动作。因此在结构设计时应首先考虑工作部件的运动干涉问题。

(1)2 个取苗爪在运动中不发生干涉

取苗爪发生运动干涉是由于在旋转过程中取苗爪 A 的尖部 D 与取苗爪 B 的尾部 GH 相碰。如图 3 所示。

根据机构运动关系建立 G 点的位移方程为

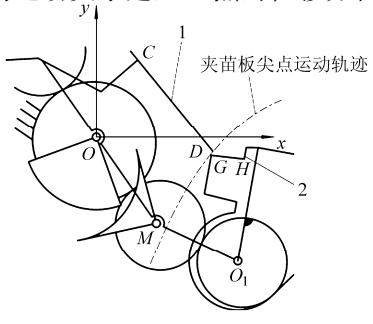

图 3 取苗爪运动干涉位置图

Fig. 3 Position of motive interference

1. 取苗爪 A 的夹苗板 2. 取苗爪 B 的尾部

$$\begin{cases} x_G = x_{O_1} + 51.36\cos(\alpha_0 + \varphi + \varphi_3 + \delta + 74\pi/180) \\ y_G = y_{O_1} + 51.36\sin(\alpha_0 + \varphi + \varphi_3 + \delta + 74\pi/180) \end{cases} \tag{7}$$

D、G 两点的距离为

$$d = \sqrt{(x_D - x_G)^2 + (y_D - y_G)^2} \tag{8}$$

第 1 目标函数为

$$Y_1 = \min(d) \tag{9}$$

通过分析，当 $Y_1 > 0$ 且 $x_G > x_D$ 时，2 个取苗爪不会发生干涉。但在实际取苗中，取苗爪不是夹住钵苗的最底部，在取苗爪 D 点外还有 5 ~ 7 mm 的钵苗基质，为避免钵苗的底部基质与取苗爪 B 的尾部相碰 d 要大于 7 mm，因此设定目标 1 的理想区间为 $Y_1 > 7$ 且 $x_G > x_D$，期望值为 10。

(2)凸锁止弧与凹锁止弧不干涉

凸锁止弧与凹锁止弧进入配合和脱离配合的过程中会产生干涉现象，由于锁止弧进入配合是脱离配合的逆运动，因此只需判定其中一种情况即可，本文判定锁止弧脱离配合的情况。

如图 4 所示，构造 OQ 方程

$$y = \frac{y_Q}{x_Q}x \tag{10}$$

当 $x_O < x_P < x_Q$ 时，过点 P 的竖直线与线段 OQ 的交点 K 的坐标为 $\left(x_P, \frac{y_Q}{x_Q}x_P\right)$。

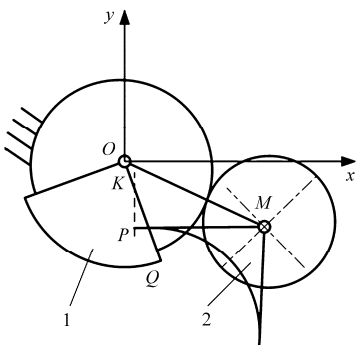

图 4 锁止弧干涉示意图

Fig. 4 Schematic diagram of locking arc interference

1. 凸锁止弧 2. 凹锁止弧

第 2 目标函数为

$$Y_2 = \min\left(y_P - \frac{y_Q}{x_Q}x_P\right) \tag{11}$$

通过分析当 $Y_2 > 0$ 时锁止弧脱离配合时不干涉。设定目标 2 的理想区间为 $Y_2 > 0$，期望值为 1。

(3)取苗爪与钵苗盘内壁不发生干涉

如图 5 所示，在取苗轨迹的 D_0D_1 段，取苗爪进入钵盘。在进入过程中取苗爪会转过一定角度，有可能与钵苗盘内壁下侧干涉，因此要对取苗爪进入钵苗盘的位置进行判定。

取苗爪上 ED 的方程为

$$y - y_D = \frac{y_E - y_D}{x_E - x_D}(x - x_D) \tag{12}$$

当 $x_I < x_D < x_{D_1}$ 时，过点 I 的竖直线与线段 ED 的交点 J 坐标为 $\left(\frac{y_E - y_D}{x_E - x_D}(x_I - x_D) + y_D, x_I\right)$。

第 3 目标函数为

$$Y_3 = \min(y_J - y_I) =$$

$$\min\left(\frac{y_E - y_D}{x_E - x_D}(x_I - x_D) + y_D - y_I\right) \tag{13}$$

因为取苗爪前端的夹苗板宽 8 ~ 12 mm，为避免取苗爪进入钵苗盘时不会与钵苗盘内壁下侧产生干涉，设定目标 3 的理想区间为 $Y_3 > 6$，期望值为 10。

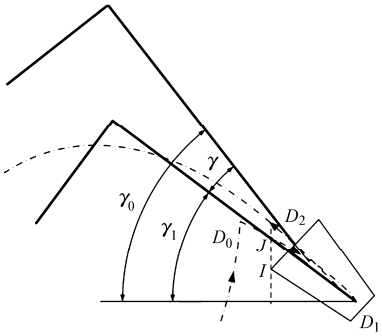

图 5　取苗爪进出钵苗盘位置示意图

Fig. 5　Schematic diagram of location of pick-up claw entering and exiting pot

在取苗爪尖部到达 D_1 点时刻即取苗位置，夹苗板完全夹紧钵苗，在 D_1D_2 段钵苗连同根部基质一起随取苗爪由钵盘往外运动。此过程中若取苗爪的摆动角 γ 过大，钵苗根部就会与钵盘上壁相碰，严重时会造成钵苗掉落导致取苗失败，甚至会造成取苗爪与钵盘内壁上侧干涉，造成钵苗盘损坏。因此要限制 γ 的大小。图 5 中 D_1 点为取苗爪深入钵盘的最深点，此位置时夹苗板所在直线与水平线的夹角为 γ_1。此时 E 点相对坐标为 $(x_E(\varphi_{D_1}), y_E(\varphi_{D_1}))$，$D$ 点相对坐标为 $(x_D(\varphi_{D_1}), y_D(\varphi_{D_1}))$。$D_2$ 点为取苗爪离开钵盘时尖端的位置，设定为从 D_1 位置行星架逆时针转过 30°后取苗爪尖点位置，此位置时夹苗板所在直线与水平线的夹角为 γ_0。此时 E 点相对坐标为 $(x_E(\varphi_{D_2}), y_E(\varphi_{D_2}))$，$D$ 点相对坐标为 $(x_D(\varphi_{D_2}), y_D(\varphi_{D_2}))$。

$$\gamma_0 = \arctan\frac{y_E(\varphi_{D_2}) - y_D(\varphi_{D_2})}{x_E(\varphi_{D_2}) - x_D(\varphi_{D_2})} \tag{14}$$

$$\gamma_1 = \arctan\frac{y_E(\varphi_{D_1}) - y_D(\varphi_{D_1})}{x_E(\varphi_{D_1}) - x_D(\varphi_{D_1})} \tag{15}$$

式中　φ_{D_1}——当取苗爪尖端到达取苗轨迹上 D_1 点时对应的行星架转角

φ_{D_2}——当取苗爪尖端到达取苗轨迹上 D_2 点时对应的行星架转角

$$\gamma = \gamma_0 - \gamma_1 \tag{16}$$

第 4 目标函数为

$$Y_4 = \gamma \tag{17}$$

由分析可得，当 $Y_4 < 20°$ 时取苗效果较好，取苗爪退出钵盘时不会与钵盘内壁上侧产生干涉。设定目标 4 的理想区间为 $Y_4 < 20°$，期望值为 10°。

2.2　取苗轨迹插入钵盘近似直线段长度

取苗爪要进入钵盘夹持钵苗，因此要求取苗爪取苗轨迹插入钵盘近似直线段要有一定长度。所选用钵苗盘穴深为 42 mm，试验证明当取苗爪进入钵盘 35 mm 左右时取苗效果较好，此外为保证在旋转过程中取苗爪不与送苗机构的边沿产生干涉要求该长度要大于 55 mm。取线段 D_0D_1 为近似线段（图 1）。D_1 点坐标为 $(x_D(\varphi_{D_1}), y_D(\varphi_{D_1}))$，$D_0$ 点坐标为 $(x_D(\varphi_{D_0}), y_D(\varphi_{D_0}))$。

第 5 目标函数为

$$Y_5 = \sqrt{(x_D(\varphi_{D_0}) - x_D(\varphi_{D_1}))^2 + (y_D(\varphi_{D_0}) - y_D(\varphi_{D_1}))^2} \tag{18}$$

式中　φ_{D_0}——当取苗爪尖端到达取苗轨迹上的 D_0 点时，对应的行星架转角

当 $Y_5 > 55$ 符合取苗要求。设定目标 5 的理想区间为 $Y_5 > 55$，期望值为 60。

2.3　推苗角与取苗角的角度差值与钵苗箱倾斜角关系

钵苗箱的放置倾斜角一般为 40° ~ 50°。为保证推苗后蔬菜钵苗的直立性，推苗角与取苗角的角度差值也要控制在 40° ~ 50°左右。

取苗角即取苗爪进入钵盘最深处夹苗板完全夹紧时刻，夹苗板与水平线的夹角，在目标 3 中已求出取苗角 $\varphi_q = \gamma_1$。

推苗角即夹苗板张开将钵苗推出时刻，取苗爪尖端到达 D_3 点时，夹苗板与水平线的夹角。此时 E 点相对坐标为 $(x_E(\varphi_{D_3}), y_E(\varphi_{D_3}))$，$D$ 点相对坐标为 $(x_D(\varphi_{D_3}), y_D(\varphi_{D_3}))$，则推苗角

$$\varphi_t = \arctan\frac{y_E(\varphi_{D_3}) - y_D(\varphi_{D_3})}{x_E(\varphi_{D_3}) - x_D(\varphi_{D_3})} \tag{19}$$

式中　φ_{D_3}——当取苗爪尖端到达取苗轨迹上的 D_3 点时，对应的行星架转角

第 6 目标函数为

$$Y_6 = |\varphi_t - \varphi_q| \tag{20}$$

当 $40° < Y_6 < 50°$ 时可保证蔬菜苗的直立性，符合取苗要求。设定目标 6 的理想区间为 $40° < Y_6 < 50°$，期望值为 45°。

推苗选择在取苗轨迹最低点位置提前 15°左右的位置,这样既能保证蔬菜钵苗近似竖直的落到栽植器中,又能避免高速旋转中自由下落的钵苗与的取苗爪相碰。因此推苗角 $70° < \varphi_t < 80°$。

第 7 目标函数为

$$Y_7 = \varphi_t \tag{21}$$

当 $70° < Y_7 < 80°$时符合取苗要求。设定目标 7 的理想区间为 $70° < Y_7 < 80°$,期望值为 75°。

为保证钵苗的直立性及满足目标 5 与目标 6 的要求,设置取苗角 $30° < \varphi_q < 40°$。

第 8 目标函数为

$$Y_8 = \varphi_q \tag{22}$$

当 $30° < Y_8 < 40°$时符合取苗要求。设定目标 8 的理想区间为 $30° < Y_8 < 40°$,期望值为 35°。

2.4 齿轮箱回转半径 R 尽可能小

在满足以上 8 个目标的前提下应尽量减小机构的体积,以增加机构的经济性和动力特性。

$$Y_9 = l + (3a + h_p + h_x)\cos\delta \tag{23}$$

式中 h_p——齿轮箱内壁与齿轮的最小间隙,一般为 2 ~ 3 mm

h_x——齿轮箱壁厚,一般为 5 ~ 8 mm

一般 $110 < Y_9 < 140$。设定目标 9 的理想区间为 $110 < Y_9 < 140$,期望值为 130。

3 参数优化

参数导引优化方法的核心是通过机构运动学分析,将机构多目标优化问题转换为各优化目标与设计变量之间的函数关系,即建立优化目标函数。根据优化目标的重要性进行排序,依次对各目标进行优化,根据各设计变量的单位长度变化对目标函数的影响大小来确定需要调整的设计变量。

3.1 参数优化软件

本文采用参数导引优化方法,利用 Visual Basic 可视化平台开发了蔬菜钵苗取苗机构参数优化软件。

如图 6 所示,1 区为菜单区,点击可选择软件的各种功能;2 区为动画显示区,可对机构进行虚拟试验;3 区为运动学目标区,目标依次按重要性由高到低排列,目标文字的下面是可改变颜色的进度条,进度条为红色时表示计算得出的目标函数值在该目标函数值的理想区间内,红色越长代表该目标函数值越接近期望值,反之黑色越长表明该目标函数值在理想区间之外且离期望值越远;4 区为重要数据显示区;5 区为参数输入区,可通过上下按钮改变每个参数的大小。

当优化开始后,计算机通过计算各个目标函数,自动寻出需要改变的参数并且通过闪烁步进按钮提示用户是选择正步进还是负步进。连续点击闪烁按钮直至闪烁停止,优化结束,得到一组满足各目标要求的参数。

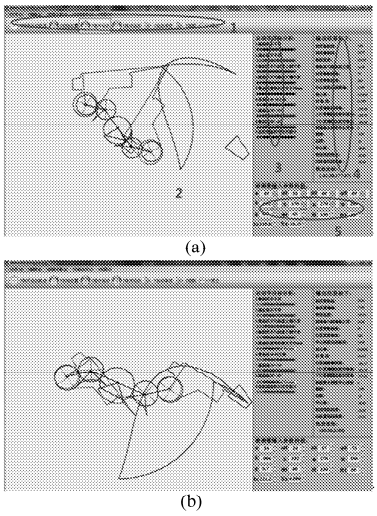

图 6 蔬菜钵苗取苗机构参数优化软件优化界面

Fig. 6 Interface of parameter-guided optimization software

(a) 输入初始参数后状态 (b) 优化后状态

表 1 蔬菜钵苗取苗机构参数优化的初始值和优化值

Tab. 1 Initial and optimized value of parameter optimization of vegetable plug seedling fetching mechanism

参数	a /mm	k	ε /(°)	φ_0 /(°)	α_0 /(°)	δ /(°)	S /mm
初始值	19	0.992	270	-59	51	40	170
优化值	24	0.994	270	-73	24	37	152

3.2 参数导引优化方法的具体步骤

(1)在运动学分析的基础之上,建立取苗机构的优化目标函数 $Y_i = f_i(a,k,\cdots,S)(i = 1,2,\cdots,9)$,并按照重要性由高到低将目标从 Y_1 至 Y_9 排列。设置各目标的理想区间及期望值 y_i。

(2)根据初始参数计算目标函数 $Y_1 \sim Y_9$,找出重要性最高且函数值不在理想区间内的目标 Y_i。

(3)分别计算参数 $x_j(j = 1,2,\cdots,7)$单位变化而其他参数不变时 Y_i的函数值 y_{ij},根据 y_{ij}与 y_i的差值由小到大,将 $x_j(j = 1,2,\cdots,7)$进行重新排序,将排序后的 7 个参数序列依次赋值给 $z_k(k = 1,2,\cdots,7)$,其中 z_1即为对 Y_i优化效果最显著的参数。

(4)根据该目标函数中参数的步进值、目标函数值和期望值的数学关系,把参数与目标近似的看成线性关系,求出新的参数步长。

(5)变步长改变参数 z_1,将该参数作为下一次优化的初始参数,其他参数不变,计算目标函数 Y_i。如果参数 z_1的调整使得比 Y_i更重要的目标远离理想区间,则选择 z_2代替 z_1,若 z_2也不满足,则用 z_3代替

z_2，即 $z_k = z_{k+1}$，直到满足为止。

(6)判断 Y_i 值是否在理想区间之内，如果不在则返回步骤(3)。

(7)判断 $Y_1 \sim Y_9$ 的函数值是否在理想区间内，是则运算停止，优化结束；否则转回步骤(3)，重复以上运算。

以上步骤的流程图如图 7 所示。

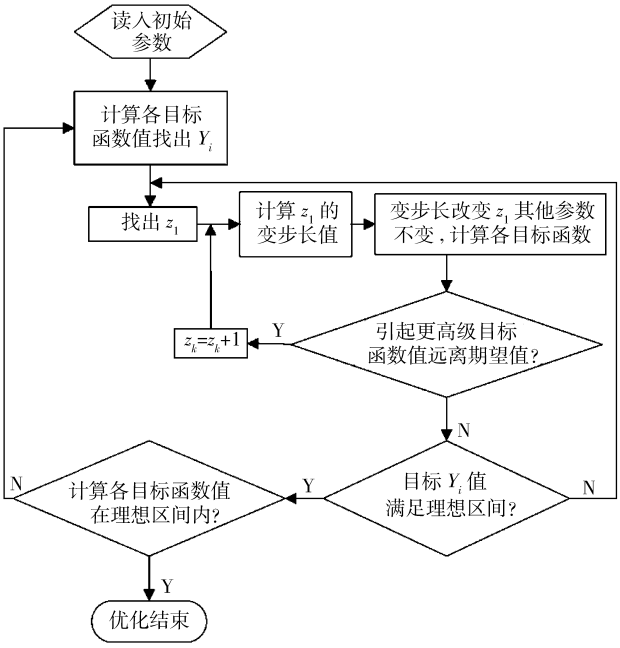

图 7　参数导引优化方法流程图

Fig. 7　Flow chart of parameter-guided optimization method

4　取苗试验

使用自主开发的参数优化软件，通过参数引导优化方法，可方便地获得一组较优的参数：a = 24 mm，k = 0.994，ε = 270°，φ_0 = −73°，α_0 = 24°，δ = 37°，S = 152 mm。通过机构的结构设计，并加工试验样机，安装在蔬菜钵苗自动送苗试验台上进行取苗试验。

其中蔬菜钵苗为辣椒苗，平均茎秆高度为 10 cm，育苗基质为 2/3 体积的泥炭加 1/3 体积的珍珠岩。钵盘规格为(8 × 16)穴，穴口为 32 mm × 32 mm，穴深 42 mm。试验转速为 35 r/min，取两盘钵苗，试验取苗成功率为 84%。

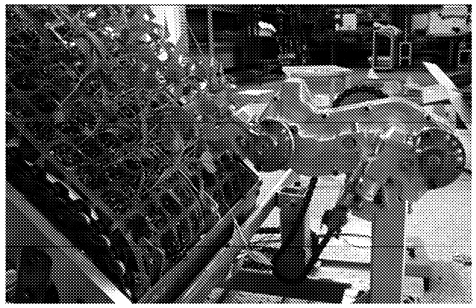

图 8　样机取苗试验

Fig. 8　Picking seedling test of prototype

分析取苗失败的原因如下：育苗的问题，当钵苗生长在钵穴的边沿位置容易造成取苗失败；钵苗过高，试验用的辣椒苗太高，上层叶片搭连在一起，高速取苗时会互相拉扯造成取苗失败；育苗基质问题，基质成分主要为泥炭和珍珠岩，当基质较为干燥时质地松散，易造成取苗失败。试验前半天浇水会改善基质松散情况。

通过取苗试验及试验分析可知，取苗机构的运动轨迹与工作姿态达到了设计要求，能够较好的取出蔬菜钵苗，并近似竖直地将其推出。

5　结论

(1)分析了取苗机构在运动过程中可能存在的干涉问题，以及蔬菜钵苗取苗在农艺上对取苗轨迹和取苗爪姿态的要求，提出了蔬菜钵苗取苗机构的 9 个运动学优化目标要求，并建立了相应的数学模型。

(2)提出了椭圆-不完全非圆齿轮行星系取苗机构的参数导引优化方法，基于 Visual Basic 可视化平台上开发了参数导引优化软件，确定了取苗机构参数，降低了对专家经验的依赖度，提高了优化效率。

(3)基于优化确定的机构参数，通过样机研制，并经取苗试验，验证了所设计的取苗机构能完成要求的取苗动作。

参　考　文　献

1　王君玲，高玉芝，李成华. 蔬菜移栽生产机械化的现状与发展方向[J]. 农机化研究，2004(2)：42 ~ 43.

2　Konosuke Tsuga. Development of fully automatic vegetable transplanter[J]. Japan Agricultural Research Quarterly, 2000, 34(1): 21 ~ 28.

3　俞高红，刘炳华，赵匀，等. 椭圆齿轮行星轮系蔬菜钵苗自动移栽机构的运动机理分析[J]. 农业机械学报，2011, 42(4)：53 ~ 57.
Yu Gaohong, Liu Binghua, Zhao Yun, et al. Kinematic principle analysis of transplanting mechanism with planetary elliptic gears in automatic vegetable transplanter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(4): 53 ~ 57. (in Chinese)

4　叶秉良，俞高红，陈志威，等. 偏心齿轮-非圆齿轮行星系取苗机构的运动学建模与参数优化[J]. 农业工程学报，2011, 27(12)：7 ~ 12.

Ye Bingliang, Yu Gaohong, Chen Zhiwei, et al. Kinematics modeling and parameters optimization of seedling pick-up mechanism of planetary gear train with eccentric gear and non-circular gear[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2011,27(12):7~12. (in Chinese)

5 俞高红,陈志威,赵匀,等. 椭圆-不完全非圆齿轮行星系蔬菜钵苗取苗机构的研究[J]. 机械工程学报,2012, 48(13):32~39.
Yu Gaohong, Chen Zhiwei, Zhao Yun, et al. Study on vegetable plug seedling pick-up mechanism of planetary gear train with ellipse gears and incomplete non-circular gear[J]. Journal of Mechanical Engineering,2012,48(13):32~39. (in Chinese)

6 吴志远, 邵惠鹤, 吴新余. 基于遗传算法的退火精确罚函数非线性约束优化方法[J]. 控制与决策, 1998,13(2): 136~140.
Wu Zhiyuan, Shao Huihe, Wu Xinyu. Annealing accuracy penalty function based nonlinear constrained optimization method with genetic algorithms[J]. Control and Decision, 1998,13(2):136~140. (in Chinese)

7 陈建明, 张仲义. 神经网络在优化计算中的应用[J]. 系统工程与电子技术, 1999,21(3):69~71.
Chen Jianming,Zhang Zhongyi. Application of artificial neural network in optimization computation[J]. Systems Engineering and Electronics, 1999,21(3):69~71. (in Chinese)

8 滕弘飞, 曾威, 梁大伟, 等. 演化设计方法及其应用[J]. 机械工程学报, 2004,40(1): 1~6.
Teng Hongfei, Zeng Wei, Liang Dawei, et al. Evolutionary design method and its application[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2004,40(1):1~6. (in Chinese)

9 俞高红,孙良,赵匀. 混合齿轮行星系分插机构的人机交互参数优化[J]. 农业机械学报,2008,39(2):47~50.
Yu Gaohong,Sun Liang,Zhao Yun. Parameters optimization based on human-computer conversation of transplanting mechanism with planetary spur gears and elliptical gears[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2008,39(2): 47~50. (in Chinese)

10 陈建能,赵匀. 高速插秧机椭圆齿轮行星系分插机构的参数优化[J]. 农业机械学报,2003,34(5):46~49.
Chen Jianneng, Zhao Yun. Parameters optimization of transplanting mechanism with planetary elliptic gears for high-speed transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2003,34(5):46~49. (in Chinese)

11 武传宇,赵匀,陈建能. 水稻插秧机分插机构人机交互可视化优化设计[J]. 农业机械学报,2008,39(1):46~49.
Wu Chuanyu, Zhao Yun, Chen Jianneng. Optimization design of rice transplanter separating-planting mechanism with visualization human-computer interaction method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(1):46~49. (in Chinese)

12 赵匀. 农机机械分析与综合[M]. 北京:机械工业出版社,2009.

13 赵匀,赵雄,张玮炜,等. 水稻插秧机现代设计理论与方法[J]. 农业机械学报, 2011,42(3): 65~68,43.
Zhao Yun, Zhao Xiong, Zhang Weiwei, et al. Modern design theory and method of rice transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(3): 65~68,43. (in Chinese)

14 陈志威. 基于椭圆-不完全非圆齿轮传动的蔬菜钵苗取苗机构的优化和设计 [D]. 杭州:浙江理工大学,2012.
Chen Zhiwei. Optimal and design of vegetable plug seedling pick-up mechanism of planetary gear train with ellipse gears and incomplete non-circular gear[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University,2012. (in Chinese)

15 俞高红,何琰,陈建能,等. 旋转式分插机构运动学多目标非劣解群自动寻求[J]. 农业机械学报, 2009,40(6) : 47~52.
Yu Gaohong, He Yan, Chen Jianneng, et al. Automatic search of pareto solutions of multi-objective for rotary transplanting mechanism kinematics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(6):47~52. (in Chinese)

16 代丽. 分插机构数字化优化和虚拟验证 [D]. 杭州:浙江大学,2011.
Dai Li. Digital optimization and virtual validation of the separating-planting mechanism[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011. (in Chinese)

17 李革,陈孝明,俞高红,等. 基于 VB 的旋转式分插机构运动干涉判别方法[J]. 农业机械学报,2007,38(11):44~47.
Li Ge,Chen Xiaoming,Yu Gaohong,et al. Distinguishing method for motion interference of rotary transplanting mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2007,38(11):44~47. (in Chinese)

18 严海军, 陈燕, 初晓一, 等. 文丘里施肥器结构参数优化对吸肥性能的影响[J]. 排灌机械工程学报,2013,31(2):162~166.
Yan Haijun, Chen Yan, Chu Xiaoyi, et al. Influence of optimization of structural parameters on injection performance of Venturi injector[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2013,31(2):162~166. (in Chinese)