

旋转式分插机构运动学多目标非劣解群自动寻求^{*}

俞高红 何 琰 陈建能 赵 匀

(浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018)

【摘要】 针对水稻插秧机分插机构优化过程中的多目标、非线性、交互性、模糊性以及优化结果不唯一等问题,建立了运动学参数的计算模型,通过对插秧性能各要求的模糊化得出各要求的隶属度,同时提出了对干涉的判定方法。在以各隶属度最大化为目标,运用优化算法求得一组较优解的基础上对该组解进行了区间扩张,将区间搜索转换为多目标优化问题,再次运用优化算法并通过 Visual Basic 6.0 软件编程实现了自动搜索非劣解群的目的。结果表明:利用该方法可以迅速搜索得到运动学参数的范围,较人机交互优化方法更为快捷、方便,提高优化效率。

关键词: 旋转式分插机构 复优化 多目标 数值化 区间搜索

中图分类号: S223.91

文献标识码: A

Automatic Search of Pareto Solutions of Multi-objective for Rotary Transplanting Mechanism Kinematics

Yu Gaohong He Yan Chen Jianneng Zhao Yun

(College of Machine and Automation Controlling, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract

Aiming at the problem of multi-objective, nonlinearity, interaction and fuzziness of transplanting mechanism of rice transplanter in optimization process, calculation model of kinematical parameter that could satisfy the performance requirements for transplanting seedlings was established. Firstly, by blurring the performance requirement, the membership was obtained and interference judgment method was put forward. Then the optimization model was built up, which took the maximum of every membership as the object function, and adopted motion non-interference as the restrictive condition. Based on the optimal result, the solution was expanded as an interval and the interval reaching was converted as multi-objective optimization. Then automatic search of the non-inferior solution was realized by coding the optimization program with Visual Basic 6.0. The results showed that by using the method it could quickly search the interval that could meet the kinematical performance requirement and it was easier and more efficient to manipulate than human-computer conversation.

Key words Rotary transplanting mechanism, Duplicate optimization, Multi-objective, Numeric, Interval searching

引言

旋转式分插机构作为高速水稻插秧机的核心工作部件,其机理复杂,性能要求多,且优化目标存在

模糊性,运用传统优化方法很难得到全局最优解。文献[1~2]提出了复优化方法,其基本方法是将运动学和动力学优化分两步完成,以运动学优化结果的参数范围作为动力学优化的约束条件,以动力学

收稿日期: 2008-08-18 修回日期: 2008-10-20

^{*} 国家自然科学基金资助项目(50605057)、“十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAD28B01)和浙江省自然科学基金资助项目(Y107361)

作者简介: 俞高红,副教授,主要从事农业机械设计、机构运动学与动力学研究,E-mail: yugh@zstu.edu.cn

通讯作者: 赵匀,教授,博士生导师,主要从事农业机械设计、机构运动学与动力学研究,E-mail: zhaoyun@zstu.edu.cn

特性最佳作为目标函数,建立动力学优化模型,采用传统优化方法获得最佳的机构参数。显然,运动学优化结果的获得是该方法的关键。文献[3~6]通过开发人机对话的可视化交互软件对分插机构运动学参数进行优化,该方法在优化目标少时相对容易获得运动学的优化结果。但是,对于分插机构这一复杂的多目标优化问题,软件使用者需了解优化变量、优化目标以及约束条件间的交互关系,才能得到运动学优化结果,而且所获得的区间任意组合是否都满足要求,也未进行验证。

本文以椭圆齿轮行星系分插机构为例,对众多性能要求进行分析处理,实现运动学目标非劣解群的自动寻优,降低对优化工作者的要求,为动力学优化提供可行的约束条件。

1 椭圆齿轮行星系分插机构运动分析

1.1 机构组成和工作原理

椭圆齿轮行星系分插机构简图如图 1 所示,其由 5 个全等椭圆齿轮、1 个行星架和 2 个栽植臂组成,椭圆齿轮的初始安装相位相同,太阳轮与机架固定。工作时,随着行星架转动,2 个中间椭圆齿轮绕太阳轮转动,带动 2 个行星椭圆齿轮在周期内摆动。与行星轮固结的栽植臂,一方面随行星架顺时针转动,另一方面相对于行星架作非匀速转动,构成了秧针尖的特殊运动轨迹和姿态。图 1b 中,双点划线所示位置为初始安装位置,实线位置为机架转过 φ 时的位置,并在图中建立坐标系 XOY 。

1.2 数学模型的建立

分插机构优化可以归纳为八项运动学目标^[1],在建立目标方程时,将其数字化之前首先要建立轨迹和角位移方程,限于文章篇幅,本文重点介绍几个

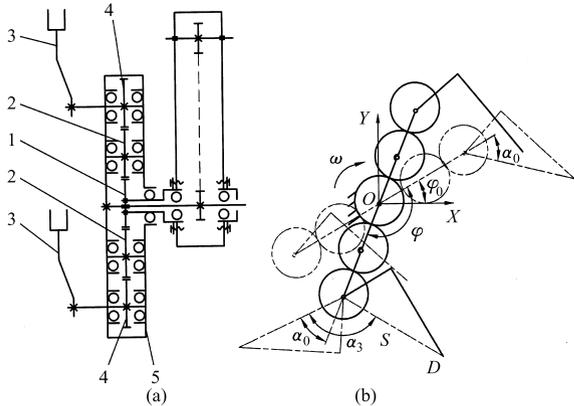


图 1 椭圆齿轮行星系分插机构简图

Fig. 1 Diagram of transplanting mechanism with planetary elliptical gears
(a) 传动图 (b) 结构示意图

- 1. 中心椭圆齿轮(太阳轮) 2. 中间椭圆齿轮 3. 秧爪(栽植臂)
- 4. 行星椭圆齿轮 5. 行星架

主要的目标方程。

秧针尖 D 的定轨迹方程为

$$\begin{cases} X_D = 4a \cos(\varphi + \varphi_0) + S \cos(\varphi + \varphi_0 + \alpha_3 + \alpha_0) \\ Y_D = 4a \sin(\varphi + \varphi_0) + S \sin(\varphi + \varphi_0 + \alpha_3 + \alpha_0) \end{cases} \quad (1)$$

式中 a ——椭圆齿轮长半轴

φ ——行星架转角

φ_0 ——机架初始安装角

α_3 ——行星轮相对机架转角

α_0 ——栽植臂初始安装角

S ——秧针尖 D 与栽植臂旋转中心的距离

栽植臂旋转中心(即行星轮轴心)轨迹为

$$\begin{cases} X_O = 4a \cos(\varphi_0 + \varphi) \\ Y_O = 4a \sin(\varphi_0 + \varphi) \end{cases} \quad (2)$$

栽植臂旋转中心到秧针的垂线与秧针所在直线交点的相对坐标为

$$\begin{cases} X_{yz} = X_O + H \cos(\varphi_0 + \alpha_0 + \beta_0 + \alpha_3 + \varphi) \\ Y_{yz} = Y_O + H \sin(\varphi_0 + \alpha_0 + \beta_0 + \alpha_3 + \varphi) \end{cases} \quad (3)$$

式中 β_0 ——栽植臂旋转中心到秧针的垂线与行星架的夹角

H ——栽植臂旋转中心到秧针所在直线的距离

秧针取秧时与水平线的夹角为取秧角,此时栽植臂旋转中心到秧针的垂线与秧针所在直线交点的相对坐标为 (X'_{yz}, Y'_{yz}) ,秧针尖 D 的定轨迹为 (X'_D, Y'_D) ,则取秧角为

$$\theta = \arctan \frac{Y'_{yz} - Y'_D}{X'_{yz} - X'_D} \quad (4)$$

秧针推秧时与水平线的夹角为推秧角,此时栽植臂旋转中心到秧针的垂线与秧针所在直线交点的相对坐标为 (X''_{yz}, Y''_{yz}) ,秧针尖 D 的定轨迹为 (X''_D, Y''_D) ,则推秧角为

$$\delta = \arctan \frac{Y''_{yz} - Y''_D}{X''_{yz} - X''_D} \quad (5)$$

运动干涉是分插机构在工作过程中一个栽植臂的秧针尖部 CD 与另一个栽植臂的尾部 GH 相碰,如图 2 所示。运动干涉点的轨迹方程为

$$\begin{cases} X_G = X_O + 73.4 \cos(\varphi_0 + \alpha_0 + 130.4\pi/180 + \alpha_3 + \varphi) \\ Y_G = Y_O + 73.4 \sin(\varphi_0 + \alpha_0 + 130.4\pi/180 + \alpha_3 + \varphi) \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} X_H = X_O + 50.5 \cos(\varphi_0 + \alpha_0 + 125.3\pi/180 + \alpha_3 + \varphi) \\ Y_H = Y_O + 50.5 \sin(\varphi_0 + \alpha_0 + 125.3\pi/180 + \alpha_3 + \varphi) \end{cases} \quad (7)$$

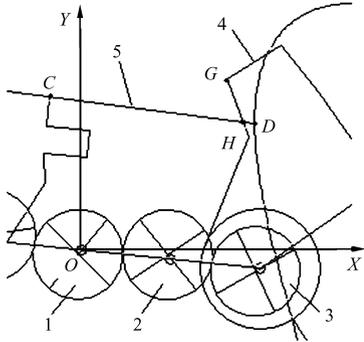


图2 运动干涉位置图

Fig.2 Position of motive interference

1. 太阳轮 2. 中间轮 3. 行星轮 4. 栽植臂后壳 5. 秧针

1.3 分插机构数值化建模及参数优化

要得到良好的插秧质量,达到不伤秧、不钩秧、不漂秧、立苗好和返青快,对分插机构秧针尖D的轨迹和姿态提出了一系列的要求。这些要求是根据长期的经验积累而得,具有很大的模糊性,采用隶属函数加以描述。模糊上、下限用扩增系数法确定^[7],扩增系数的一般取值为上限 $\beta_H = 1.05 \sim 1.30$,下限 $\beta_L = 0.70 \sim 0.95$,为确保模糊边界的可靠度,取 $\beta_H = 1.05, \beta_L = 0.95$ 。椭圆齿轮行星系分插机构轨迹如图3所示。

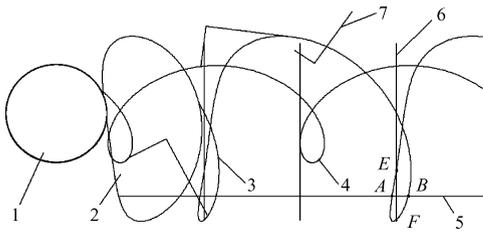


图3 椭圆齿轮行星系分插机构轨迹

Fig.3 Locus of transplanting mechanism with planetary elliptic gears

1. 行星轮轴心静轨迹 2. 秧针静轨迹 3. 秧针动轨迹 4. 行星轮轴心动轨迹 5. 地平面 6. 秧苗 7. 秧门

(1) 为使设计的分插机构能同时适合南方双季稻和北方单季稻栽插,既能插大苗又能插小苗,并保证插大苗时不出现搭桥现象,则秧针尖轨迹必须达到260 mm以上(轨迹最高点和最低点的高度差)。对该性能要求采用升半梯形分布隶属函数,即

$$\mu_1 = \begin{cases} 0 & (h < 247) \\ \frac{h - 247}{260 - 247} & (247 \leq h \leq 260) \\ 1 & (h > 260) \end{cases} \quad (8)$$

其中 $h = \max Y_D - \min Y_D$

式中 h ——插秧轨迹高度

(2) 插秧后秧针回程应避免与秧苗的中下部相碰,以免秧针碰伤已插好的秧苗(大苗高度一般为200~250 mm)。采用升半梯形分布隶属函数,即

$$\mu_2 = \begin{cases} 0 & (L_{EF} < 118.75) \\ \frac{L_{EF} - 118.75}{125 - 118.75} & (118.75 \leq L_{EF} \leq 125) \\ 1 & (L_{EF} > 125) \end{cases} \quad (9)$$

式中 L_{EF} ——秧苗根部距秧针回程与秧苗交点处的高度

(3) 为保证插后秧苗直立,秧针取秧角 θ 应在 $5^\circ \sim 25^\circ$ 之间,而推秧角 δ 应在 $60^\circ \sim 80^\circ$ 之间。对该性能要求采用梯形分布隶属函数,即

$$\mu_3 = \begin{cases} 0 & (\theta < 4.75) \\ \frac{\theta - 4.75}{5 - 4.75} & (4.75 \leq \theta < 5) \\ 1 & (5 \leq \theta < 25) \\ \frac{26.25 - \theta}{26.25 - 25} & (25 \leq \theta < 26.25) \\ 0 & (\theta \geq 26.25) \end{cases} \quad (10)$$

$$\mu_4 = \begin{cases} 0 & (\delta < 57) \\ \frac{\delta - 57}{60 - 57} & (57 \leq \delta < 60) \\ 1 & (60 \leq \delta < 80) \\ \frac{84 - \delta}{84 - 80} & (80 \leq \delta < 84) \\ 0 & (\delta \geq 84) \end{cases} \quad (11)$$

(4) 推秧角和取秧角之差为 $55^\circ \sim 60^\circ$,应等于秧箱的倾斜角,以保证秧苗的直立性。采用梯形分布隶属函数,即

$$\mu_5 = \begin{cases} 0 & (\delta - \theta < 52.25) \\ \frac{\delta - \theta - 52.25}{55 - 52.25} & (52.25 \leq \delta - \theta < 55) \\ 1 & (55 \leq \delta - \theta < 60) \\ \frac{63 - (\delta - \theta)}{63 - 60} & (60 \leq \delta - \theta < 63) \\ 0 & (\delta - \theta \geq 63) \end{cases} \quad (12)$$

(5) 轨迹的穴口长度(秧针尖D动轨迹与地平线交点AB的距离)要小于30 mm,太大会导致所插秧苗倒伏或漂秧。对该性能采用降半梯形分布隶属函数,即

$$\mu_6 = \begin{cases} 1 & (L_{AB} < 30) \\ \frac{31.5 - L_{AB}}{31.5 - 30} & (30 \leq L_{AB} \leq 31.5) \\ 0 & (L_{AB} > 31.5) \end{cases} \quad (13)$$

(6) 栽植臂的旋转中心轨迹不能与已插秧苗的中底部接触,以免碰伤已插的秧苗,即应保证中心轨迹的最低点的高度高于已插秧苗的中部。对该性能采用升半梯形分布隶属函数,即

$$\mu_7 = \begin{cases} 0 & (h' < 118.75) \\ \frac{h' - 118.75}{125 - 118.75} & (118.75 \leq h' \leq 125) \\ 1 & (h' > 125) \end{cases} \quad (14)$$

其中 $h' = \min Y_O$

式中 h' ——栽植臂旋转中心轨迹最低点高度

(7) 圆盘直径 d 应尽可能小(一般不超过 230 mm), 过大会显得笨重, 即

$$d = f(m, Z, k) \rightarrow \min$$

式中, 齿轮模数 $m = 2$, 以保证齿轮强度; k 为椭圆齿轮短、长轴之比; $Z = 4as/\pi m$, s 为椭圆的四分之一弧长再除以 a , 由微分方法求得

$$s = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi} d\varphi$$

对该性能要求采用降半正态分布隶属函数, 即

$$\mu_8 = \begin{cases} 1 & (d \leq 0) \\ e^{-\left(\frac{d}{200}\right)^2} & (d > 0) \end{cases}$$

(8) 两栽植臂在插秧过程中不能发生运动干涉。

该性能不存在模糊性, 运用交点位置判别法判定。简化干涉位置图如图 4 所示, 直线 GH 方程为

$$Y = \frac{Y_G - Y_H}{X_G - X_H} X + \frac{Y_H Y_G - Y_G X_H}{X_G - X_H} \quad (15)$$

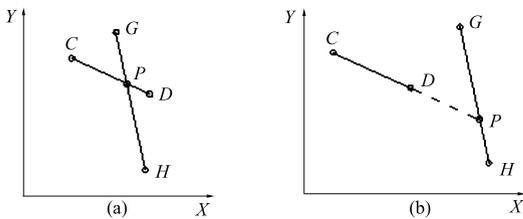


图 4 干涉判定示意图

Fig. 4 Diagram of judging motive interference

(a) 干涉 (b) 不干涉

直线 CD 方程为

$$Y = \frac{Y_C - Y_D}{X_C - X_D} X + \frac{Y_D X_C - Y_C X_D}{X_C - X_D} \quad (16)$$

由式(15)、(16)联立解方程得交点 P 为

$$X_P = \frac{\frac{Y_D X_C - Y_C X_D}{X_C - X_D} - \frac{Y_H X_G - Y_G X_H}{X_G - X_H}}{\frac{Y_G - Y_H}{X_G - X_H} - \frac{Y_C - Y_D}{X_C - X_D}} \quad (17)$$

由干涉的定义, 通过分析可知, 当满足 $(X_D - X_P)(X_C - X_P) < 0$ 且 $(X_G - X_P)(X_H - X_P) < 0$ 时, 可判定为干涉, 否则不干涉。

发生干涉时, 以交点 P 与秧针尖 D 的距离作为干涉量, 即

$$L_{PD} = \sqrt{(X_D - X_P)^2 + (Y_D - Y_P)^2}$$

上述模型中, 以影响秧针轨迹和栽植臂运动的各变量: 椭圆齿轮长半轴 a 、椭圆齿轮短轴和长轴之比 k 、秧针尖和行星轮心连线与行星架初始安装位置的夹角 α_0 、行星架初始安装角, 即初始安装位置与水平线的夹角 φ_0 以及秧针尖与行星轮轴心的距离 S 为设计变量, 在不发生干涉的前提下, 以各性能要求的隶属度尽可能大为目标函数, 运用多目标优化方法进行运动学优化, 得到一系列非劣最优解。其中一组较优的机构参数为: $a = 19.11$ mm, $k = 0.991$, $\alpha_0 = -53^\circ$, $\varphi_0 = 42^\circ$, $S = 140$ mm。得到的各个性能要求的隶属度如表 1 所示, 优化轨迹如图 5 所示。

表 1 较优参数的隶属度

Tab.1 Membership degree of the better parameter

隶属度	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4	μ_5	μ_6	μ_7	μ_8
数值	1.00	1.00	1.00	1.00	0.64	1.00	0.84	0.42

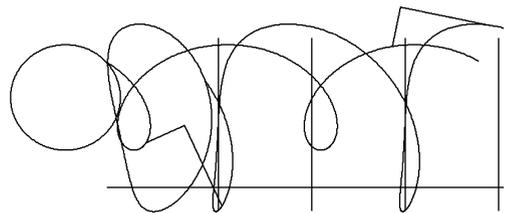


图 5 椭圆齿轮行星系分插机构优化轨迹

Fig.5 Optimization results of transplanting mechanism with planetary elliptic gears parameters

2 运动学区间搜索

区间是指一个集合, 对于任何一个连续区间, 由包含在 2 个特定实数(即上限和下限)之间的所有实数所组成, 也可以包括这 2 个实数。在区间问题的求解上, 如果能找到区间的上限和下限, 则该区间就可以确定。因此, 对区间的求解可以转换为对区间的上、下限求解。

2.1 单点到区间的扩张

给上述优化得到的较优解中各参数设定一个上限 Δx_H 和一个下限 Δx_L , 则由该组解分别向两边扩展所组成的参数范围为

$$a = 19.11 + \Delta x_{1H} \sim 19.11 + \Delta x_{1L}$$

$$k = 0.991 + \Delta x_{2H} \sim 0.991 + \Delta x_{2L}$$

$$\alpha_0 = -53 + \Delta x_{3H} \sim -53 + \Delta x_{3L}$$

$$\varphi_0 = 42 + \Delta x_{4H} \sim 42 + \Delta x_{4L}$$

$$S = 140 + \Delta x_{5H} \sim 140 + \Delta x_{5L}$$

2.2 优化模型的建立

设计变量: 以各参数的上、下限为设计变量

$$\{\Delta x\} = \{\Delta x_{1H}, \Delta x_{1L}, \Delta x_{2H}, \Delta x_{2L}, \dots, \Delta x_{5H}, \Delta x_{5L}\}$$

目标函数: 在满足运动学要求条件下, 各参数的取值范围尽可能大, 即

$$\max F(x) = \{(\Delta x_{1H} - \Delta x_{1L}), (\Delta x_{2H} - \Delta x_{2L}), \dots, (\Delta x_{5H} - \Delta x_{5L})\}$$

约束条件: $\mu_i > \lambda_i (i = 1, 2, \dots, 8)$, 式中 λ_i 为水平截集, 满足 $0 \leq \lambda_i \leq 1$ 。

2.3 约束处理及优化流程

上述约束条件是在一组运动学参数情况下对各个性能要求隶属度的约束, 而上述优化问题求解的结果是一个区间, 该约束条件无法直接代入进行运算, 需对其进行处理。

正交试验设计是一种安排和分析多因素试验的科学方法, 它利用正交表来安排试验方案和进行结果分析, 任意一对因素的任一水平组合必在试验中出现, 且出现次数相同, 总试验次数大大减少^[8]。本文利用该方法, 对构造的区间进行试验, 以得到的综合隶属度 R_i 对 μ_i 进行描述。

以运动学优化中影响插秧轨迹的 5 个设计变量 $a, k, \alpha_0, \varphi_0$ 和 S 为正交试验的试验因子。试验水平越多, 被验证的可信程度就越高, 但安排的试验次数就越多, 计算量就越大。将扩展得到的机构参数范围采用均分法, 等分成 3 等份, 即每个因素有 4 个试验水平, 选用 $L_{16}(4^5)$ 正交表, 进行 16 次试验, 并利用分插机构运动学优化软件对正交试验中的每次试验进行一次运动学分析, 得到各性能要求的综合

$$\text{隶属度 } R_i = \frac{\sum_{j=1}^{16} \mu_{ji}}{16} \quad (i = 1, 2, \dots, 8)$$

由上述目标函数及约束条件, 采用带约束的多目标优化算法^[9]得到新种群, 并重新构造区间进行正交试验, 循环直至最大代数。整体的优化流程图如图 6 所示。

3 结果比较分析

根据表 1 得到的隶属度, 并适当降低要求, 对水平截集 λ_i 设置如表 2 所示。

表 2 水平截集的设置

Tab.2 Level cut sets λ_i setting

水平截集	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7	λ_8
数值	0.70	0.50	0.70	0.70	0.50	0.70	0.50	0.35

利用 Visual Basic 6.0 编写优化分析软件 (图 7), 通过优化搜索得到其中一较优区间如表 3 所示。

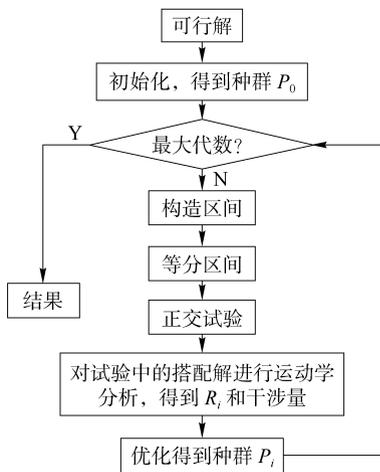


图 6 优化流程图

Fig.6 Optimization flow chart

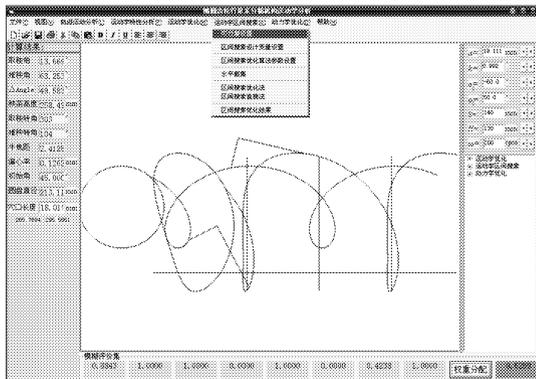


图 7 运动学非劣解自动搜索软件界面

Fig.7 Software interface of automatic search of the non-inferior solution

表 3 优化得到的运动学区间

Tab.3 Kinematics interval of optimization

界限	a/mm	k	$\alpha_0/(\text{°})$	$\varphi_0/(\text{°})$	S/mm
上限	19.101	0.989 9	-53.47	40.44	136.06
下限	19.372	0.991 0	-49.85	45.15	141.31

任意选取该区间内一组参数组合: $a = 19.20 \text{ mm}$, $k = 0.990 7$, $\alpha_0 = -54^\circ$, $\varphi_0 = 43^\circ$, $S = 141 \text{ mm}$, 得到的运动学轨迹如图 8a 所示; 若选取的参数为: $a = 19.11 \text{ mm}$, $k = 0.991 0$, $\alpha_0 = -50.00^\circ$, $\varphi_0 = 41.00^\circ$, $S = 141 \text{ mm}$, 得到如图 8b 的轨迹。由这两组任意组合的参数得到的轨迹, 均能满足运动学要求。

若 λ_i 的取值如表 4 所示, 则得到的区间为表 5 所示。

表 4 不同的水平截集设置

Tab.4 Different setting of level cut sets

水平截集	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7	λ_8
数值	1.0	0.6	1.0	1.0	0.6	1.0	0.6	0.4

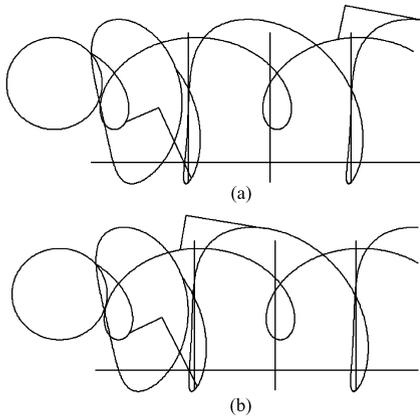


图8 不同参数下的分插机构轨迹

Fig.8 Locus of transplanting mechanism in the case of different parameters

(a) $a = 19.20 \text{ mm}$, $k = 0.9907$, $\alpha_0 = -54^\circ$, $\varphi_0 = 43^\circ$, $S = 141 \text{ mm}$

(b) $a = 19.11 \text{ mm}$, $k = 0.9910$, $\alpha_0 = -50^\circ$, $\varphi_0 = 41^\circ$, $S = 141 \text{ mm}$

显然,给定不同的水平截集,区间也将有所不同,且随着 λ_i 的增大,区间长度有所缩短,但区间的

表5 不同水平截集下得到的区间

Tab.5 Kinematics interval in different level cut sets

界限	a/mm	k	$\alpha_0/(\text{^\circ})$	$\varphi_0/(\text{^\circ})$	S/mm
上限	19.065	0.9902	-53.64	41.94	139.93
下限	19.569	0.9910	-51.46	43.49	141.95

精度将有所提高。

4 结论

(1) 应用模糊理论对分插机构众多模糊工作特性数值化,经单点到区间的扩张,把区间搜索问题转换为优化问题,用户可以根据需要,在优化软件上通过设置不同的水平截集得到不同的运动学参数范围。

(2) 利用本文的方法,可以较好地实现对多运动学目标非劣解群的自动寻优,降低优化过程中对优化工作者的要求,提高优化效率,为实现复优化方法打下基础。

参 考 文 献

- 赵匀. 机构数值分析与综合[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- Zhao Yun, Chen Jianneng, Yu Yaxin, et al. Research on quadratic optimization method and its application on optimizing mechanism parameter[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 19(4): 519~523.
- 陈建能. 椭圆齿轮行星系分插机构的动力性能分析、参数优化及实验验证[D]. 杭州:浙江大学,2004.
Chen Jianneng. Dynamics performance analysis, parameters optimization and proof for transplanting mechanism with planetary elliptic gears[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. (in Chinese)
- 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)
- 武传宇, 赵匀, 蒋焕煜. 行星轮齿柄摇杆分插机构的运动特性和优化分析[J]. 机械设计, 2002, 19(11): 37~38.
Wu Chuanyu, Zhao Yun, Jiang Huanyu. Kinematical properties and optimal analysis of separate planting mechanism with crank-rocker epicyclic gear[J]. Journal of Machine Design, 2002, 19(11): 37~38. (in Chinese)
- 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)
- 谢庆生, 罗延科, 李屹. 机械工程模糊优化方法[M]. 北京:机械工业出版社,2002.
- 耿站立,姜汉桥,李杰,等. 正交试验设计法在优化注聚参数研究中的应用[J]. 西南石油大学学报, 2007, 29(5): 119~121.
Ge Zhanli, Jiang Hanqiao, Li Jie, et al. Application of orthogonal test design methodology in optimal parameters of polymer flooding[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2007, 29(5): 119~121. (in Chinese)
- 陈建能,赵雄,张国凤,等. 基于改进 NSGA-II 算法的新型引纬机构的参数优化[J]. 纺织学报, 2008, 29(1): 110~113.
Chen Jianneng, Zhao Xiong, Zhang Guofeng, et al. Parameter optimization of a new weft insertion mechanism based on improved NSGA-II [J]. Journal of Textile Research, 2008, 29(1): 110~113. (in Chinese)
- 俞高红,钱孟波,赵匀,等. 偏心齿轮-非圆齿轮行星系分插机构运动机理分析[J]. 农业机械学报, 2009, 40(3): 81~84.
Yu Gaohong, Qian Mengbo, Zhao Yun, et al. Analysis of kinematic principle of transplanting mechanism with eccentric gears and non-circular gears[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3): 81~84. (in Chinese)