

# 基于虚拟响应面分析的水稻插秧机分插机构参数优化与试验

张敏 张文毅\* 纪要 祁兵

(农业部南京农业机械化研究所,南京 210014)

**摘要** 针对现有高速分插机构参数优化方法盲目性较大或计算复杂的问题,以椭圆齿轮三插臂分插机构为例,采用虚拟中心组合响应面试验设计方法,以插秧株距 140 mm 时的插秧穴口宽度、推秧角度和轨迹高度 3 个指标为目标函数,以椭圆齿轮偏心率、齿数、行星架初始安装角度和插植臂安装角度 4 个参数为设计变量,构建响应面回归模型,采用优化算法求解响应面近似回归模型,直接求得一组满足多个约束条件的最佳参数组合。以求解的最佳参数组合:椭圆齿轮偏心率 0.18、齿数 23 齿、行星架安装角度 15°、插植臂安装角度 25°设计并试制三插臂分插机构。通过理论分析和台架试验,回归模型计算的目标函数值与理论计算值和台架试验实测值之间的最大相对误差为 0.668%。分析结果表明:采用虚拟响应面法优化可直接求得满足多个约束条件的参数组合,计算精度较高,提高了高速分插机构参数选择的针对性。

**关键词** 水稻插秧机;分插机构;响应面分析;参数优化

中图分类号 S 223.91

文章编号 1007-4333(2016)01-0114-08

文献标志码 A

## Parameter optimization and experiment of transplanting mechanism of rice transplanter based on virtual response surface analysis

ZHANG Min, ZHANG Wen-yi\*, JI Yao, QI Bing

(Nanjing Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture, Nanjing 210014, China)

**Abstract** The existing method to optimizing parameters of transplanting mechanism was usually blindness or computational complex. Taking three separating planting arms of elliptic gear transplanting mechanism as an example, a response surface regression model was built by adopting virtual central composite response surface experiment design, of which planting-hole width at the row spacing of 140 mm, push seedling angle and track height were adopted as objective functions, and centricity ratio of elliptical gear, teeth number, initial angle of planet carrier and initial angle of planting arm were taken as design variables. An optimum parameter combination, which meets multi-constraint conditions, was directly acquired by using optimization algorithm to solve the response surface regression model. The three separating planting arms of elliptic gear transplanting mechanism was designed and trial-produced according to the optimal portfolio parameters: centricity ratio of elliptical gear of 0.18, teeth number of 23, initial angle of planting arm of 15 and initial angle of planting arm of 25. The maximum relative error between the approximate value of regression model with the precise value of the theoretical analysis model and the measured value of test-bed was only 0.668% according to theoretical analysis and bench test. The result indicated that we could directly acquire the optimum parameter combination to meet multi-constraint conditions by adopting virtual response surface optimization method. Its computational accuracy was relatively high and it could improve the pertinence in selecting the parameters of transplanting mechanism.

**Keywords** rice transplanter; transplanting mechanism; response surface methodology (RSM); parameter optimization

收稿日期: 2015-01-27

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201203059)

第一作者: 张敏, 副研究员, 主要从事种植与收获机械研究, E-mail: zhm0912@126.com

通讯作者: 张文毅, 研究员, 主要从事耕作与种植机械研究, E-mail: zwy-yxkj@163.com

分插机构是水稻插秧机的核心工作部件之一<sup>[1-4]</sup>,其性能直接关系到立苗率、伤秧率和苗高的适应性等插秧性能指标,分插机构参数选择和优化是分插机构设计的重点。由于影响分插机构栽植质量和性能的目标参数和分插机构参数的参数个数多且存在强耦合性<sup>[5-8]</sup>,使得分插机构的参数选择和优化问题成为分插机构设计的一个难点。因此,选择快速、有针对性的分插机构参数选择和优化方法对分插机构设计具有重要的理论和工程意义。目前在分插机构参数选择和优化方法的研究中,浙江理工大学赵匀等<sup>[9-16]</sup>采用VB、MATLAB和VC等软件编制可视化人机交互软件,通过逐次调节各参数并结合人工参与的方式对偏心齿轮、椭圆齿轮、变形椭圆齿轮等多种结构形式的行星轮系高速分插机构的参数进行优化。李革等<sup>[17-18]</sup>通过测绘国外性能较好的分插机构的非圆齿轮并经曲线拟合重建非圆齿轮的节曲线,最后通过人机对话的方式检验并优化非圆齿轮节曲线和分插机构主要参数,针对节曲线不易用数学方程表达的非圆齿轮,采用傅里叶函数近似拟合形成可用数学公式描述的非圆齿轮节曲线方程,再采用编制人机交互对话软件的方法对节曲线参数和分插机构参数进行选择与优化。方明辉<sup>[19]</sup>指出,通过人机交互的方式结合人工参与选择和优化分插机构参数的方法一般只能对非圆齿轮节曲线可用数学方程式精确描述的非圆齿轮,且参数试凑过程存在一定的盲目性。俞高红等<sup>[20]</sup>应用模糊理论对分插机构工作特性进行数值化,采用虚拟正交试验得到综合隶属度的描述,最后通过多目标优化算法得到最优解,但该方法优化过程复杂,优化约束参数不易选择。Bae K Y<sup>[21]</sup>和方明辉等通过构建分插机构秧针静态轨迹的方法求解非圆齿轮的参数,该方法可由确定的静态轨迹直接求解分插机构参数和节曲线参数,但由于非圆齿轮传动和加工制造需要满足一定的压力角、模数等要求<sup>[22]</sup>,拟合的静态轨迹和分插机构参数之间需反复修正,计算量大且过程复杂。

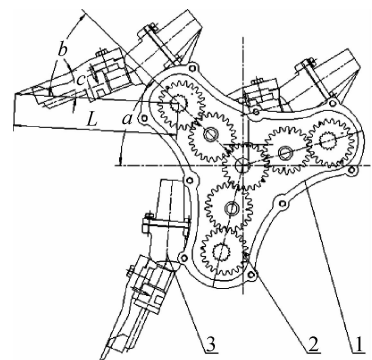
本研究针对高速分插机构参数优化过程中优化目标和分插机构参数之间数学关系复杂且不易理论推导出解析形式数学表达式这一特点,拟采用数值计算并结合虚拟响应面试验分析方法,建立分插机构优化目标与分插机构参数之间的回归数学模型,通过求解回归数学模型直接获得满足多个约束条件

的最优参数组合,以期为高速分插机构设计和参数优化提供简单、有针对性的参数优化方法。

## 1 虚拟响应面分析的优化原理及方案

在设计和优化水稻插秧机分插机构时,需优化的目标参数主要有推秧角度、插秧穴口宽度、轨迹高度、取秧角度和取秧速度等,影响分插机构栽植质量的参数主要有非圆齿轮节曲线类型、插植臂安装角度、回转箱体安装角度、回转箱体回转半径、插植臂的长度以及插植臂本身结构参数等参数。当前分插机构的优化目标参数与分插机构结构参数之间的关系一般采用数值计算的方法求解,待优化目标参数与分插机构结构参数之间的数学关系很难由理论分析和数学推导的形式得到解析形式的数学表达式。响应面设计方法(RSM)<sup>[23]</sup>可利用合理的试验设计方法,在已接近参数最优区域,采用多元回归方程来拟合因素与响应值之间的函数关系,形成解析形式的数学关系。

高速插秧机分插机构的种类和结构类型众多,有椭圆行星轮系分插机构、偏心齿轮行星轮系分插机构、差速椭圆行星轮系分插机构等,针对每种结构类型的分插机构均需编制相应的分插机构优化目标与分插机构结构参数之间的数值计算分析模型。本研究在已确定插植臂参数的基础上,对一种椭圆齿轮三插植臂分插机构采用虚拟响应面分析的方法进行分插机构结构参数优化研究,椭圆齿轮三插臂分插机构的结构见图1。



*a*, 行星架初始安装角度 Initial angle of planet carrier; *b*, 插植臂安装角度 Initial angle of planting arm  
1. 分插机构箱体 Transplanting mechanism box;  
2. 椭圆齿轮 Elliptical gear; 3. 插植臂 Planting arm

图1 椭圆齿轮三插臂分插机构结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of three separating planting arms of elliptical gear transplanting mechanism

该分插机构由7个大小相等的椭圆偏心齿轮组成,其中椭圆齿轮的模数为2,插植臂的结构尺寸已知,秧针尖至行星轴间距离 $L$ 为162 mm,插植臂原始角度 $c$ 为 $24^{\circ}35'$ 。

根据中心组合试验设计原理<sup>[24]</sup>,在插植臂参数已知条件下影响水稻插秧机高速分插机构栽植质量的结构因素为椭圆齿轮偏心率、椭圆齿轮齿数、行星架初始安装角度、插植臂安装角度这4个参数,以这

4个参数为自变量,分别用 $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$ 表示,以+1、0、-1分别代表自变量的水平,按 $x_i = (X_i - X_0) / \Delta X$ 对自变量进行编码。其中: $x_i$ 为自变量的编码值, $X_i$ 为自变量的真实值, $X_0$ 为虚拟试验中心点处自变量的真实值, $\Delta X$ 为自变量的变化步长。

综合考虑分插机构的回转半径、插植臂之间相互干涉、椭圆齿轮的齿数等因素,确定中心组合虚拟响应面试验的因素水平见表1。

表1 中心组合虚拟试验因素和水平编码

Table 1 Coding of factor and level on virtual central composite design

水平 Level	因素 Factors			
	$X_1$ , 椭圆齿轮偏心率 Centricity ratio of elliptical gear	$X_2$ , 椭圆齿轮齿数 Teeth number of elliptical gear	$X_3$ , 行星架初始安装角度/ $^{\circ}$ Initial angle of planet carrier	$X_4$ , 插植臂安装角度/ $^{\circ}$ Initial angle of planting arm
-2	0.05	19	7.5	12.5
-1	0.10	20	15.0	25.0
0	0.15	21	22.5	37.5
1	0.20	23	30.0	50.0
2	0.25	24	37.5	62.5

## 2 分插机构虚拟响应面试验结果及分析

### 2.1 虚拟响应面试验结果

评价分插机构栽植质量的指标有取秧角度、推秧角度、轨迹高度、插秧穴口宽度等,由于取秧角度需结合秧箱位置和角度确定,设计过程中一般以优化后的分插机构配置秧箱位置,故本研究以插秧株距140 mm时的插秧穴口宽度、推秧角度和轨迹高度3个评价指标优化椭圆齿轮三插臂分插机构的结构参数。采用数值计算方法,运用MATLAB编制椭圆齿轮三插植臂分插机构秧针的运动轨迹分析程序,插秧穴口宽度按插秧深度20 mm时秧针“绕扣”在距最低点20 mm高度水平方向上的长度来计算,轨迹高度按秧针尖的最低点与最高点差值计算,推秧角度按插植臂推秧时秧针与水平面之间的夹角计算。基于MATLAB已编制的椭圆齿轮三插臂分插机构秧针运动轨迹程序得到各参数与株距140 mm时插秧穴口宽度、轨迹高度和推秧角度之间的虚拟响应面试验结果见表2。

### 2.2 回归数学模型建立

利用Design-Expert 8.0软件,对虚拟仿真结果(表2)进行四元二次逐步回归拟合,得到株距

140 mm时插秧穴口宽度的回归方程为:

$$Y_1 = -83.9025 + 122.2982X_1 + 4.6226X_2 + 0.3577X_3 + 0.3799X_4 - 8.7393X_1X_2 - 5.9133X_1X_3 + 3.1500X_1X_4 - 0.0187X_2X_4 - 0.0139X_3X_4 + 613.8276X_1^2 + 0.0079X_3^2$$

对株距140 mm时椭圆齿轮三插植臂分插机构的插秧穴口宽度响应的预测(以参数的实际值为变量)回归模型进行方差分析,结果见表3。

株距140 mm时插秧穴口宽度的回归模型 $P < 0.0001$ ,可见回归方程的关系是极显著的,椭圆齿轮偏心率、椭圆齿轮的齿数、行星架初始安装角度和插植臂安装角度等参数的二次项和交互项对株距140 mm时插秧穴口宽度的影响也是很显著或极显著的,回归方程方差分析说明分插机构参数与推秧角度、轨迹高度等评价目标之间存在较强的耦合性(表3)。

采用与株距140 mm时插秧穴口宽度回归拟合相同的方法对虚拟仿真结果(表2)中的推秧角度和轨迹高度分别进行四元二次逐步回归拟合,得推秧角度的拟合回归方程为:

$$Y_2 = 7.8518 + 323.5250X_1 + 1.6462X_2 - 0.9705X_3 + 1.0018X_4 - 10.1705X_1X_2 + 0.1600X_1X_3 + 0.0880X_1X_4 - 0.0007X_3X_4 + 68.2500X_1^2 - 0.0406X_2^2 - 0.0015X_3^2 + 0.0048X_1X_3X_4 - 4.2096X_1^2X_2 - 0.7200X_1^2X_4 + 0.2667X_1X_2^2$$

轨迹高度的回归方程为：

$$Y_3 = 352.2996 - 882.4257X_1 - 29.1038X_2 + 1.1258X_3 + 1.6286X_4 + 242.1583X_1X_2 - 5.7067X_1X_3 - 10.9780X_1X_4 - 0.0089X_2X_3 +$$

$$0.0103X_3X_4 - 1501.7059X_1^2 + 0.8685X_2^2 - 0.0356X_3^2 - 0.0253X_4^2 + 0.2532X_1X_3X_4 - 5.6667X_1X_2^2$$

对推秧角度拟合回归方程和轨迹高度回归拟合方程分别进行  $F$  检验（分析方法与插秧株距 140 mm 时插秧穴口宽度回归模型的方差分析相同，分析过程省略），检验结果表明推秧角度和轨迹高度的回归方程关系均为极显著，参数的部分交互项对推秧角度和轨迹高度的影响也很显著或极显著。

表 2 虚拟响应面分析试验方案及结果

Table 2 Testing program and results of virtual response surface analysis

试验号 Number	因素 Factors				$Y_1$ , 插秧穴口宽度/mm	$Y_2$ , 推秧角度/(°)	$Y_3$ , 轨迹高度/mm
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	Planting-hole width	Push seedling angle	Track height
1	0.15	21	22.5	12.5	12.33	48.67	339.07
2	0.20	23	30.0	25.0	17.64	64.72	397.41
3	0.20	20	15.0	25.0	22.45	79.72	378.33
4	0.15	21	7.5	37.5	27.36	88.50	321.91
5	0.20	20	30.0	50.0	16.56	89.68	358.52
6	0.10	23	15.0	25.0	20.40	57.40	304.39
7	0.10	23	15.0	50.0	21.72	82.39	283.57
8	0.25	21	22.5	37.5	31.55	95.62	411.93
9	0.15	21	22.5	37.5	14.95	73.66	334.31
10	0.10	23	30.0	50.0	13.16	66.89	291.55
11	0.15	19	22.5	37.5	10.26	73.66	318.72
12	0.15	24	22.5	37.5	22.35	73.66	357.80
13	0.10	20	15.0	25.0	10.62	57.40	280.54
14	0.10	23	30.0	25.0	17.32	41.99	299.02
15	0.15	21	22.5	62.5	18.68	98.61	297.83
16	0.10	20	15.0	50.0	13.09	82.40	259.73
17	0.20	23	15.0	50.0	40.64	104.56	363.02
18	0.20	20	30.0	25.0	11.12	64.75	374.23
19	0.10	20	30.0	50.0	5.28	66.94	268.07
20	0.20	20	15.0	50.0	33.04	104.56	339.62
21	0.20	23	30.0	50.0	21.28	89.68	381.30
22	0.20	23	15.0	25.0	29.96	79.69	401.84
23	0.1	20	30.0	25.0	6.06	42.03	275.51
24	0.05	21	22.5	37.5	11.02	50.75	226.54
25	0.15	21	37.5	37.5	6.50	58.16	330.56

注：插秧穴口宽度为株距 140 mm 时的长度。

Note: The planting-hole width is the length when the row spacing is equal to 140 mm.

表3 株距140 mm插秧穴口宽度回归方程方差分析结果

Table 3 Variance analysis result of regression equation of the planting-hole width at 140 mm row spacing

变异来源 Source of variation	离均差平方和 SS	自由度 df	均方差 MS	F 检验值 F-test value	显著性 P P-value
模型 Model	1 952.82	11	177.53	316.29	<0.000 1***
$X_1$	633.01	1	633.01	1 127.78	<0.000 1***
$X_2$	338.77	1	338.77	603.56	<0.000 1***
$X_3$	653.34	1	653.34	1 164.00	<0.000 1***
$X_4$	68.70	1	68.70	122.39	<0.000 1***
$X_1 X_2$	7.13	1	7.13	12.70	0.003 5**
$X_1 X_3$	78.68	1	78.68	140.17	<0.000 1***
$X_1 X_4$	62.02	1	62.02	110.49	<0.000 1***
$X_2 X_4$	2.04	1	2.04	3.63	0.078 9
$X_3 X_4$	27.35	1	27.35	48.73	<0.000 1***
$X_1^2$	54.07	1	54.07	96.33	<0.000 1***
$X_3^2$	4.56	1	4.56	8.13	0.013 6*
残差 Residual	7.30	13	0.56		
总值 Total value	1 960.12	24			

注:\*\*\*表示极显著  $P<0.001$ , \*\*表示很显著  $P<0.01$ , \*表示显著  $P<0.05$ 。

Note:\*\*\* shows extremely significant at  $P<0.001$ , \*\* shows very significant at  $P<0.01$ , \* shows significant at  $P<0.05$ .

### 3 分插机构参数优化

水稻高速插秧机分插机构参数优化的理想结果是在多个约束条件范围内尽可能满足多个目标函数,为保证插秧时的立苗率,推秧时插植臂与水平面的夹角应在  $75^\circ$  左右;插秧穴口太大所插秧苗容易倒伏或漂秧,本研究以株距 140 mm 时插植臂栽插轨迹存在“绕扣”且插秧穴口宽度  $\geq 25$  mm 为优化目标;为避免“搭桥”现象,秧针轨迹高度  $\geq 260$  mm;以株距 140 mm 时插秧穴口宽度、推秧角度和轨迹高度 3 个评价目标作为优化的目标函数,建立优化数学模型。

目标函数:  $25 \text{ mm} \leq Y_1, 70^\circ \leq Y_2 \leq 75^\circ, 260 \text{ mm} \leq Y_3$

约束条件:  $0.1 \leq X_1 \leq 0.2, 20 \leq X_2 \leq 23, 15^\circ \leq X_3 \leq 30^\circ, 25^\circ \leq X_4 \leq 50^\circ$

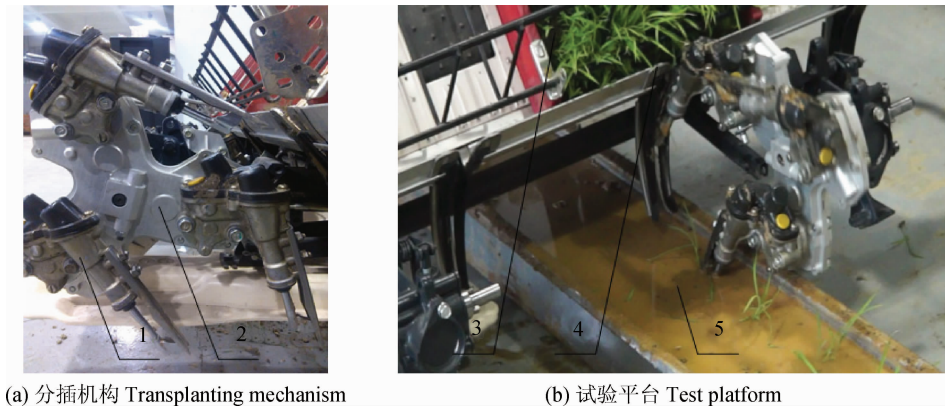
可运用 MATLAB 或 Excel 等软件对得到的回归数学模型,采用规划求解的方法得到符合约束条件、满足目标函数的优化解。本研究利用 Design-

Expert 8.0 自带的多约束条件的优化求解功能,设置约束条件和目标函数,得到满足株距 140 mm 时插秧穴口宽度、推秧角度和轨迹高度等目标函数要求的最佳椭圆齿轮三插植臂分插机构的参数组合为,椭圆齿轮偏心率 0.18、齿数 23 齿、行星架安装角度  $15^\circ$ 、插植臂安装角度  $25^\circ$ 。

### 4 分插机构对比分析

#### 4.1 试验平台

以洋马 VP6D 乘坐式插秧机为基础,对取秧回数、秧箱位置和角度等进行改造,通过调整移箱机构与分插机构的速比关系设置横向移箱次数为 18(横向取秧长度 15.6 mm)。再以回归数学模型在约束条件下求解的最佳椭圆齿轮三插植臂分插机构的参数组合(椭圆齿轮的偏心率 0.18,齿数 23 齿,行星架安装角度  $15^\circ$ ,插植臂安装角度  $25^\circ$ )设计椭圆齿轮三插植臂分插机构。椭圆齿轮采用线切割加工,三插臂分插机构采用铝板经数控加工中心加工。试制的三插臂分插机构与插秧试验平台见图 2。



1. 插植臂 Planting arm; 2. 分插机构箱体 Transplanting mechanism box;  
3. 秧箱 Seedling box; 4. 秧门 Seedling door; 5. 土槽 Soil-bin

图 2 三插臂分插机构与试验平台

Fig. 2 Transplanting mechanism with three separating planting arms and experimental platform

### 4.2 试验结果及分析

理论求解和试验台测量株距 140 mm 时插秧穴口宽度、推秧角度和轨迹高度等参数值,其中数值计算值通过 MATLAB 编制的椭圆齿轮三插植臂分插机构秧针运动分析程序以最佳椭圆齿轮三插植臂分插机构的参数组合值带入求解获得;回归模型计算值通过计算回归拟合数学模型求解获得;株距 140 mm 时插秧穴口宽度的实测值在试验平台上进行,首先设

定试验平台的移动速度和分插机构转速的关系,当株距达 140 mm 时再调节插秧深度至 20 mm,此时测量秧针在土槽中土壤表面形成的穴口宽度即为株距 140 mm 时插秧穴口宽度;当插植臂达推秧位置时测量秧针与水平面直接的夹角即为推秧角度的实测值;轨迹高度的实测值通过高度尺测量秧针尖最高与最低点之间的高度差。3 种方式求解得株距 140 mm 时插秧穴口宽度、推秧角度和轨迹高度等参数见表 4。

表 4 优化目标数值计算值、回归模型计算值及实测值

Table 4 Numerical calculation value,calculated value by regression model and measured value of optimal objects

优化目标 Optimal objects	理论模型数值计算值 Numerical calculation value by theoretical model	回归模型计算值 Calculated value by regression model	试验台实测值 Measured value by test-bed
插秧穴口宽度/mm Planting-hole width	27.039 3	26.822 1	26.9
推秧角度/(°) Push seedling angle	75.327 8	74.999 2	75.5
轨迹高度/mm Track height	385.047 8	383.422 0	384.8

理论模型数值计算的目标函数精确值与基于虚拟响应面分析的回归模型计算值相比,株距 140 mm 时插秧穴口宽度的相对误差为 0.803%,推秧角度的相对误差为 0.436%,轨迹高度的相对误差为 0.422%;实测值与回归模型计算值相比,株距 140 mm 时插秧穴口的相对误差为 0.290%,推秧角度的相对误差为 0.668%,轨迹高度的相对误差为

0.358%;回归模型计算值和理论模型数值计算值的相对误差均较小,试验台实测值与回归模型计算值相差也较小。因此,由虚拟响应分析建立的椭圆齿轮三插臂分插机构的插秧株距 140 mm 时的插秧穴口宽度、推秧角度和轨迹高度等 3 个评价指标的回归模型是准确的,与试验台实测对比表明基于该回归模型求解的分插机构参数组合符合约束条件。

## 5 结 论

针对现有高速分插机构参数优化方法盲目性较大或计算复杂的问题,本研究将响应面法引入分插机构参数优化研究中,以椭圆齿轮三插臂分插机构为例,选取椭圆齿轮的偏心率、齿数、行星架安装角和插植臂安装角度4个参数为影响因素,选取株距140 mm时的插秧穴口宽度、推秧角度和轨迹高度3个影响分插机构栽植质量的评价指标为目标函数,通过虚拟响应面中心组合试验构建了椭圆齿轮三插臂分插机构4个主要参数与3个目标函数之间的近似回归数学模型,再求解多约束条件下的回归数学模型直接获得了满足多个约束条件的分插机构参数最佳组合解。以基于该响应面法优化方法求解的椭圆齿轮三插臂分插机构参数的最佳组合,设计和试制了三插臂分插机构,通过对回归模型计算的近似值与理论分析模型计算的精确值和试验台实测值进行对比,其中相对误差值中最大值为0.668%。分析结果表明采用虚拟响应面法优化分插机构参数,计算精度较高,提高了分插机构参数选择的针对性。

本研究只对椭圆齿轮三插臂分插机构偏心率、齿数、行星架安装角和插植臂安装角度4个参数和株距140 mm时的插秧穴口宽度、推秧角度和轨迹高度3个评价目标建立了回归数学模型,应用相同的方法也可建立其他评价指标的目标函数与分插机构参数之间的近似回归模型。

## 参 考 文 献

- [1] 赵匀,赵雄,张玮炜,代丽. 水稻插秧机现代设计理论与方法[J]. 农业机械学报,2011,42(03):65-68  
Zhao Y, Zhao X, Zhang W W, Dai L. Modern design theory and method of rice transplanter. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2011, 42(3): 65-68 (in Chinese)
- [2] Thomas E V. Development of a mechanism for transplanting rice seedlings[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2002, 37(4):395-410
- [3] 陈建能,赵匀. 水稻插秧机分插机构的研究进展[J]. 农业工程学报,2003,19(2):23-27  
Chen J N, Zhao Y. Research advance in transplanting mechanism of rice transplanter[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2003, 19(2): 23-27 (in Chinese)
- [4] Khan A S, Gunkel W W. Design and development of a 6-row Korean transplanter[J]. *Agricultural Mechanization in Asia Africa And Latin America*, 1988, 19(1): 27-34
- [5] 赵匀,黄巨明,张国凤,赵雄. 变形椭圆齿轮分插机构运动分析与优化[J]. 农业机械学报,2011,42(4):48-61  
Zhao Y, Huang J M, Zhang G F, Zhao X. Kinematic analysis and optimization of transplanting mechanism with deformable elliptic gears transmission [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2011, 42(4): 48-52 (in Chinese)
- [6] 李革,赵匀,俞高红. 椭圆齿轮行星系分插机构的机理分析和计算机优化[J]. 农业工程学报,2000,16(4):78-81  
Li G, Zhao Y, Yu G H. Theoretical analysis and parameters optimizing of separating-planting mechanism with planetary elliptic gears [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2000, 16(4): 78-81 (in Chinese)
- [7] 赵匀. 农业机械分析与综合[M]. 北京:机械工业出版社,2009  
Zhao Y. Analysis and synthesis of agricultural machinery [M]. China Machine Press, 2009 (in Chinese)
- [8] Guo L S, Zhang W J. Kinematic analysis of a rice transplanting mechanism with eccentric planetary gear trains[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2001, 36(11-12):1175-1188
- [9] 李革,陈孝明,俞高红,朱建平,赵匀. 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 G, Chen X M, Yu G H, Zhu J P, Zhao Y. Distinguishing method for motion interference of rotary transplanting mechanism [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2007, 38(11): 44-47 (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 J N, Zhao Y. Parameters optimization of transplanting mechanism with planetary elliptic gears for high-speed transplanter [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2003, 34(5): 46-49 (in Chinese)
- [11] 俞高红,钱孟波,赵匀,武传宇. 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 G H, Qian M B, Zhao Y, Wu C Y. Analysis of kinematic principle of transplanting mechanism with eccentric gears and non-circular gears[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2009, 40(3): 81-84 (in Chinese)
- [12] 尹建军,赵匀,张际先. 高速插秧机差速分插机构的工作原理及其CAD/CAE[J]. 农业工程学报,2003,19(3):90-94  
Yin J J, Zhao Y, Zhang J X. Working principle and CAD/CAE of the separating-planting mechanism with differential elliptic gear system of high-performance rice transplanter [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2003, 19(3): 90-94 (in Chinese)
- [13] 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 C Y, Zhao Y, Chen J N. Optimization design of rice transplanter separating-planting mechanism with visualization human-computer interaction method[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2008, 39(1): 46-

- 49 (in Chinese)
- [14] 和丽,许纪倩,周娜,赵亮,颜华. 非圆齿轮行星轮系分插机构运动分析[J]. 农业机械学报,2007,38(12):74-77  
He L, Xu J Q, Zhou N, Zhao L, Yan H. Kinematics analysis of transplanting mechanism with non-circular planetary gears[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2007, 38(12): 74-77 (in Chinese)
- [15] 应义斌,赵匀. 偏心齿轮行星系水稻分插机构的分析研究[J]. 农业工程学报,1997,13(2):130-134  
Ying Y B, Zhao Y. Analysis and study of transplanting mechanism with planetary eccentric gears[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 1997, 13(2): 130-134 (in Chinese)
- [16] 赵凤芹,于文翠,赵匀. 偏心齿轮分插机构运动学分析与试验研究[J]. 沈阳农业大学学报,2005,36(2):238-240  
Zhao F Q, Yu W C, Zhao Y. Kinematics characteristic analysis and experimental study on separating planting mechanism with eccentric gears [J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2005, 36(2): 238-240 (in Chinese)
- [17] 李革,李辉,方明辉,牛石从. 旋转式分插机构非圆齿轮参数反求法求解[J]. 农业机械学报,2011,42(8):46-49  
Li G, Li H, Fang M H, Niu S C. Non-circular gear parameters of rotary transplanting mechanism[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2011, 42(8): 46-49 (in Chinese)
- [18] 李革,李辉,杨爱茜,方明辉. 傅立叶节曲线非圆齿轮系分插机构运动学分析[J]. 农业工程学报,2011,27(8):126-131  
Li G, Li H, Yang A Q, Fang M H. Kinematic analysis on Fourier curve non-circular gears transplanting mechanism[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(8): 126-131 (in Chinese)
- [19] 方明辉. 基于秧针静轨迹的非圆齿轮行星系分插机构设计及性能分析[D]. 杭州,浙江理工大学,2010  
Fang M H. Design and performance analysis of transplanting mechanism with planetary noncircular gears based on the seedling orbit [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2010 (in Chinese)
- [20] 俞高红,何琰,陈建能,赵匀. 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 G H, He Y, Chen J N, Zhao Y. Automatic search of pareto solutions of multi-objective for rotary transplanting mechanism kinematics [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2009, 40(6): 47-52 (in Chinese)
- [21] Bae K Y, Yang Y S. Design of a non-circular planetary-gear-train system to generate an optimal trajectory in a rice transplanter[J]. *Journal of Engineering Design*, 2007, 18(4): 361-372
- [22] 吴序堂,王贵海. 非圆齿轮及非匀速比传动[M]. 北京:机械工业出版社,1997  
Wu X T, Wang G H. *Non-circular Gear and Non-uniform Velocity Transmission* [M]. Beijing: China Machine Press, 1997 (in Chinese)
- [23] 王万中. 试验的设计与分析[M]. 北京:高等教育出版社,2004  
Wang W Z. *Experiment Design and Analysis* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004 (in Chinese)
- [24] 徐向宏,何明珠. 试验设计与 Design-Expert、SPSS 应用[M]. 北京:科学出版社,2010  
Xu X H, He M Z. *Experiment Design and Using Design-Expert and SPSS* [M]. Beijing: Science Press, 2010 (in Chinese)

责任编辑:刘迎春