

水稻插秧机现代设计理论与方法^{*}

赵 匀 赵 雄 张玮炜 代 丽

(浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018)

【摘要】 应用现代设计理论与方法对水稻插秧机核心工作部件分插机构进行优化,采用3种方法建立分插机构的理论模型。在建立模型过程中,用电路模拟解决机构冲击载荷引起的弹性动力学问题;对难以用理论演绎建立理论模型的取秧过程,通过试验测定建立数值模型,镶嵌到总的理论模型中;通过台架试验测定分插机构支座力,验证总的理论模型的可靠性;通过高速摄影,测得推秧杆的运动与行星架转角关系,验证推秧装置微分方程。提出了一种解决强耦合性、模糊性、非线性的多目标复杂优化问题的方法——参数导引优化方法,并建立了该方法的理论模型。在VB平台上设计了优化、虚拟制造、虚拟试验和测试软件。该软件在目标函数数值化基础上,增加了优化参数导引功能。

关键词: 水稻插秧机 分插机构 现代设计方法 参数导引优化方法 理论模型

中图分类号: S220.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)03-0065-04

Modern Design Theory and Method of Rice Transplanter

Zhao Yun Zhao Xiong Zhang Weiwei Dai Li

(Faculty of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract

Exploratory research on the optimization of transplanting mechanism, which is the key working component of the rice transplanter, three methods to establish the theoretical models have been proposed. In the process of building models, circuit simulation method is applied to solve the elastic dynamic problems which are caused by impact loads. As to the process of fetching seedlings which is difficult to build models by using theoretical deduction, firstly establish the numerical model by test measurement, then inlay this numerical model into the general theoretical model. The reliability of the general theoretical model is proved by measuring bearing force of transplanting mechanism in the test-bed experiment. Through high-speed camera, the relation between the motion of seedling-pushing rod and the rotation angle of planet carrier can be measured, and this relation can prove the correctness of differential equations of seedling-pushing mechanism. A method that can solve the complicated multiple object optimization problems which are strong coupled, dizzy and nonlinear has been proposed. It's called the method of optimization guided by parameters' modification. And the theoretical model of this method has been established. A software with functions of optimization, virtual manufacture, virtual trial and test has been compiled basing on VB platform. The function of parameters' modification guiding optimization has been added to this software on the foundation of numeralization of the objective function.

Key words Rice transplanter, Transplanting mechanism, Modern design method, Method of optimization guided by parameters' modification, Theoretical model

收稿日期: 2010-11-10 修回日期: 2011-01-06

^{*} 国家自然科学基金资助项目(50875244、51005214)、浙江理工大学科研启动基金资助项目(0903819-Y)和浙江省现代农业装备与实施产业创新团队资助项目(2009R50001)

作者简介: 赵匀,教授,博士生导师,主要从事农业机械创新与机构设计理论研究,E-mail: zhaoyun@zstu.edu.cn

引言

农业机械与其他机械设计有较大的不同。首先,农业机械的优劣取决于田间试验,而农业机械的田间试验时间短,季节性强;另外,农业机械处理的对象是农业物料,受季节和环境影响,物料之间的差异大;农产品的价格相对较低,如果农机具的价格过高,即便作业效果好,也很难进入市场。

传统的农机设计方法一般是通过经验的方法取得设计参数,进行整机设计。往往要经过多次修改参数和结构,费时费力^[1~11]。水稻插秧机旋转式分插机构的优化是复杂多目标优化问题。高速插秧机具有12个运动学目标和3个动力学目标。步行插秧机具有9个运动学目标和3个动力学目标。各参数和各目标之间具有强耦合性,各目标函数具有模糊性和非线性,用传统的优化方法很难获得精准的参数值。近年来,可参考的系统理论分析和优化参数相结合的农机现代设计案例并不多见^[12~14]。本文应用现代设计方法对水稻插秧机核心工作部件进行优化。

1 建立理论模型的方法

对分插机构建立模型采用了3种方法:理论演绎、理论演绎和试验研究结合、试验回归。

1.1 理论演绎

分插机构的研究是典型的机构学问题,可以通过运动学、动力学分析和理论演绎建立模型。运动学方程建立的理论模型,仿真性良好,可以真实地反映分插机构的运动状态。对刚性体进行动力学分析,问题相对简单;对弹性体或柔性体,建立模型较复杂,但模拟结果相对准确。通过试验台动力学测试与理论模拟结果比较发现:在周期的绝大部分时间内,由于分插机构的运动是处于中、低速状态,可以作为刚性体描述。但是在取秧和推秧结束的瞬时,在冲击载荷的影响下机构更趋近于弹性体。为了简化建模过程,将周期内的动力学分析分别处理。冲击载荷过程采用弹性动力学方法,其他过程则采用刚性动力学方法。本文用电路模拟解决了分插机构冲击载荷引起的弹性动力学问题^[1]。

1.2 理论演绎和试验研究结合

分插机构理论建模过程中,利用试验验证理论模型是试验研究的重要内容之一。为此研制了动力学试验台,并测得了行星架转角与分插机构y方向支座力的关系曲线(图1a)和验证理论计算结果(图1b)。通过验证的理论模型可以用来进行动力学优化和虚拟测试。笔者还应用高速摄影分析了分插机

构推秧杆的位移与时间关系,验证了推秧装置微分方程^[3](图2)。

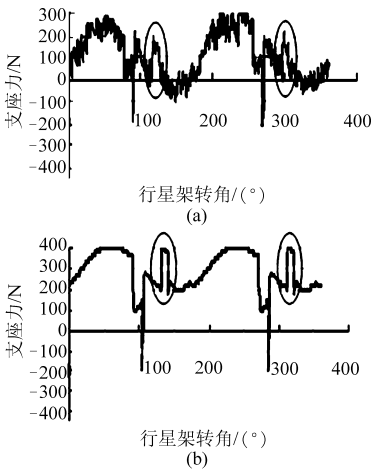


图1 取秧和推秧过程的弹性动力学分析
Fig.1 Elastic dynamics analysis of seeding-separating process and seeding-pushing process
(a) 试验测试结果 (b) 理论分析结果

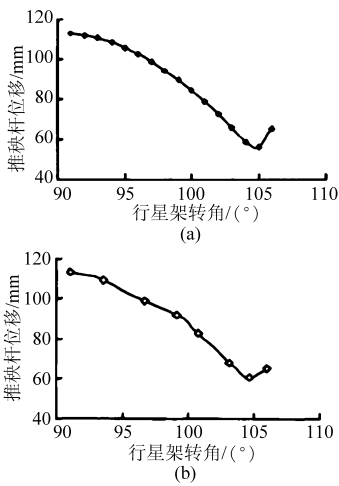


图2 推秧杆的位移分析
Fig.2 Displacement analysis of seeding-pushing rod
(a) 理论分析结果 (b) 高速摄影结果

1.3 试验回归分析

在分插机构建立理论模型中,取秧力是机构工作中秧爪作用于秧块的力,毯状苗土壤不同于一般土壤,水稻秧根盘根错节的程度,影响了撕取土壤的作用力大小,取秧过程难以精确模拟。为了精确地得到测试结果,选用常态毯状秧苗测得取秧力,建立其回归方程,并将其嵌入旋转式分插机构总的理论模型中,图1b圈内的曲线为利用嵌入模型计算得到的分插机构支座y(垂直地面)方向力,与试验获得的毯状秧苗对秧针的反作用力反映在支座上的作用力(图1a圈内)基本吻合。

2 人机对话导引和全自动优化的理论模型

通过运动学和动力学分析,最后转换为目标与

参数的函数关系,建立目标函数是设计过程中最关键的环节。假设有 n 个参数, m 个目标,建立的数学模型为

$$y_j = f_j(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

目标期望值为 Y_j , 目标函数为 y_j ($j = 1, 2, \dots, m$) 允许范围为 $[Y_j^n, Y_j^m]$, Y_j^n 为最小边界, Y_j^m 为最大边界, $Y_j = (Y_j^m - Y_j^n)/2$ 。

将任意参数向量 $\mathbf{X}^k = (x_1^k, x_2^k, \dots, x_n^k)^T$ 代入式(1)中得

$$y_j^k = f_j(x_1^k, x_2^k, \dots, x_n^k) \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

将目标的权重由大到小排列,假设通过目标函数计算未达到优化范围的各个目标中排在最前面(权重最大)的目标为 y_s , s 为该目标函数序号。

设参数的微小正向量 and 负向量为

$$\Delta \mathbf{x}_{11} = (\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n)^T$$

$$\Delta \mathbf{x}_{12} = (-\Delta x_1, -\Delta x_2, \dots, -\Delta x_n)^T$$

增加微小量的参数

$$X_{i1}^{k+1} = X_i^k + \Delta x_i \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

减小微小量的参数

$$X_{i2}^{k+1} = X_i^k - \Delta x_i \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

函数 y_s 的 n 个参数中,每次改变其中一个参数,即用 x_{i1}^{k+1} 或 x_{i2}^{k+1} 代替原来的 x_{i1}^k 或 x_{i2}^k ,其他参数不变, y_{sif} 为目标函数表达值, i 为该目标函数中所改变参数序号; $f = 1$ 时,参数变量为正步进, $f = 2$ 时,参数变量为负步进;共有 n 个参数,得到 $2n$ 个目标值为

$$\begin{cases} y_{s11}^{k+1} = f_s(x_{11}^{k+1}, x_2^k, \dots, x_i^k, \dots, x_n^k) \\ y_{s12}^{k+1} = f_s(x_{12}^{k+1}, x_2^k, \dots, x_i^k, \dots, x_n^k) \\ y_{s21}^{k+1} = f_s(x_1^k, x_{21}^{k+1}, \dots, x_i^k, \dots, x_n^k) \\ y_{s22}^{k+1} = f_s(x_1^k, x_{22}^{k+1}, \dots, x_i^k, \dots, x_n^k) \\ \vdots \\ y_{si1}^{k+1} = f_s(x_1^k, x_2^k, \dots, x_{i1}^{k+1}, \dots, x_n^k) \\ y_{si2}^{k+1} = f_s(x_1^k, x_2^k, \dots, x_{i2}^{k+1}, \dots, x_n^k) \\ \vdots \\ y_{sn1}^{k+1} = f_s(x_1^k, x_2^k, \dots, x_i^k, \dots, x_{n1}^{k+1}) \\ y_{sn2}^{k+1} = f_s(x_1^k, x_2^k, \dots, x_i^k, \dots, x_{n2}^{k+1}) \end{cases} \quad (3)$$

通过比较找出最接近 Y_s 的 y_{sif} 值。

图3表达了优化过程中参数变化和目标函数的关系。图3横坐标为参数 x_i , 纵坐标为目标函数 y_i 。为了表达清楚,将 $x_1^k, x_2^k, \dots, x_n^k$ 平移到横坐标一点上,图中只表示 $\pm \Delta x_1, \pm \Delta x_i, \pm \Delta x_n$ 。

在优化过程中,当目标函数序号 $j = s$ 时, Y_s 为未达目标且权重最大的目标期望值, y_s^k 为 k 点该目标的计算值。

其对应的参数值 x_{i1}^{k+1} 或 x_{i2}^{k+1} ($i = 1, 2, \dots, n$) 作为下一次 ($k + 1$ 点) 优化的初始值,其他参数不变。

$$\begin{cases} x_1^{k+1} = x_1^k \\ x_2^{k+1} = x_2^k \\ \vdots \\ x_i^{k+1} = x_{i1}^{k+1} \text{ or } x_{i2}^{k+1} \\ \vdots \\ x_n^{k+1} = x_n^k \end{cases} \quad (4)$$

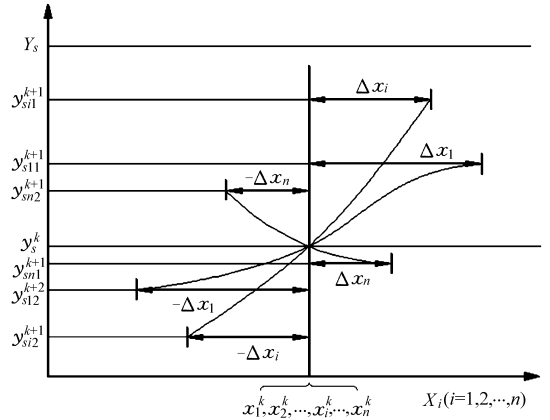


图3 各参数步进对目标的影响

Fig. 3 Each parameter's effect on object by step advance

将以上参变量代入该目标函数

$$y_{sif}^{k+1} = f_j(x_1^{k+1}, x_2^{k+1}, \dots, x_{i1}^{k+1} \text{ or } x_{i2}^{k+1}, \dots, x_n^{k+1})$$

重复以上运算,直到

$$|y_{sif} - Y_s| < \varepsilon_s \quad (5)$$

式中 ε_s ——目标期望值与优化目标最大允许范围

寻找下一个最差目标,重复以上运算,直至所有目标达到以下要求

$$|y_j - Y_j| < \varepsilon_j \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (6)$$

式中 ε_j ——优化后得到的各目标计算值与期望值所允许的最大差值

优化过程是一个 y_j 逐次逼近 Y_j ($j = 1, 2, \dots, m$) 的过程,最后所得到的参数 x_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 就是优化参数,可以用来作为设计参数。

3 分插机构软件开发

3.1 参数导引优化

图4为在VB平台上建立的优化、虚拟制造、虚拟试验和测试软件。软件利用了VB平台的可视性功能。通过点击界面的最上部分,可以进入不同页面,通过计算得到相对和绝对运动轨迹、速度、加速度和动力学曲线。界面的左下区域为参数输入区,可以步进式或跳跃式地改变各参数。图形右部区域的左边为运动学目标,右边为重要目标和数据输出区。目标依据权重排列,最重要的设计目标排在前面,相对不重要的目标排在后面。目标文字的下面

是由连续红色或黑色(软件界面为彩色)方块组成的显示条。红色的显示条越长,表明目标越接近最佳值;黑色的显示条显示该目标未达到要求,显示条越长,表明离达到要求的目标值越远。数据输出区给出该组参数计算得到的重要目标和与目标相关的重要数据。

在软件中建立各参数和各目标的系列函数关系,通过计算比较找到未达到要求且权重最大的目标,以及对该目标影响最大的参数;通过界面指示操作者改变(增大或减少)该参数,每改变一次后,软件系统对目标函数进行大量的运算,根据计算结果提示下一步应该改变的参数,直至所有的目标满足工作要求。该软件具有提示所需改变参数的功能(图4)。

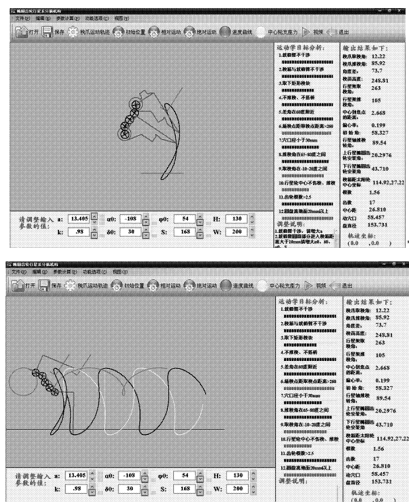


图4 软件界面

Fig.4 Aided analysis software

3.2 全自动软件

通过对以上软件稍作改动,将人机对话软件发

展为全自动软件。操作者只要输入所有的目标函数的期望值,并且给出达到系列目标期望值的最大允许范围值即可通过计算自动得到所有的优化参数。任何操作者都可以独立、快速、精准地完成参数优化并做虚拟试验和测试。与人机对话软件界面不同之处在于:目标函数右边留有空格,可以输入目标数据;界面下方各参数右侧留有空格,计算结束后空格内会显示优化后的参数值。

3.3 插秧机设计方法流程

设计方法的流程如图5所示。

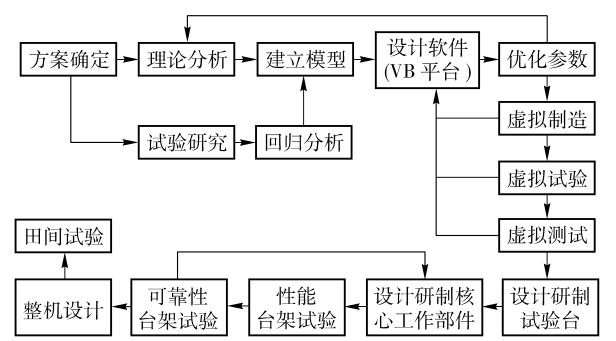


图5 设计方法流程

Fig.5 Flow chart of design method

4 结束语

参数导引优化是一种新的优化方法,通过每次改变一个参数逐次达到所有目标要求,该方法成功应用于分插机构的设计中,大大缩短了其研究周期,该方法对可以建立理论模型的农业机械,特别是可以归纳为机构学领域的农业机械优化设计,具有借鉴和参考价值。

参考文献

1 赵匀. 农机机械分析与综合[M]. 北京:机械工业出版社,2008.

2 应义斌,赵匀,张强. 悬挂犁传统受力分析方法的质疑和计算机辅助分析[J]. 农业机械学报,1994,25(3):61~65.

Ying Yibin,Zhao Yun,Zhang Qiang. Querying of traditional method to analyze the forces acted on three hitch plough and computer aided analyzing the forces[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,1994,25(3):61~65. (in Chinese)

3 陈建能,赵匀,俞高红,等. 椭圆齿轮行星分插机构推秧装置的动力学模型的建立及验证[J]. 农业工程学报,2003,19(5):71~76.

Chen Jianneng,Zhao Yun,Yu Gaohong, et al. Establishment and verification of dynamics model of seedling-pushing device in transplanting mechanism with planetary elliptic gears[J]. Transactions of the CSAE,2003,19(5):71~76. (in Chinese)

4 李建平,赵匀,应义斌. 振动输送板上物料移动速度和位移的计算机模拟与试验验证[J]. 农业工程学报,1998,14(2):213~216.

Li Jianping,Zhao Yun,Ying Yibin. Experiment and computer simulation of displacement and traveling speed of agricultural materials on vibrating board[J]. Transactions of the CSAE,1998,14(2):213~216. (in Chinese)

5 赵匀. 水稻插秧机分插机构的动力学分析[J]. 农业机械学报,1991,22(3):20~24.

Zhao Yun. The research on dynamics analyses and testing of four linkage rice transplanting mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,1991,22(3):20~24. (in Chinese)

57 ~ 60. (in Chinese)

- 11 Zheng M G, Cai Q G, Cheng Q J. Modeling the runoff-sediment yield relationship using a proportional function in hilly areas of the Loess Plateau, north China [J]. *Geomorphology*, 2008, 93(3~4): 288 ~ 301.
- 12 王国庆, 兰跃东, 张云, 等. 黄土丘陵沟壑区小流域水土保持措施的水文效应[J]. *水土保持学报*, 2002, 16(5): 87 ~ 89.
Wang Guoqing, Lan Yuedong, Zhang Yun, et al. Hydrological effects of water and soil conservation measures of small watershed in loess gully and hilly area [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(5): 87 ~ 89. (in Chinese)
- 13 王瑞芳, 黄成志, 董雨亭. 甘肃天水市对比小流域暴雨洪水侵蚀产沙特征[J]. *中国水土保持科学*, 2006, 4(4): 78 ~ 81.
Wang Ruifang, Huang Chengzhi, Dong Yuting. Comparison of storm runoff and sediment yield between two different managed small watersheds in the Loess Plateau [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2006, 4(4): 78 ~ 81. (in Chinese)
- 14 郑明国, 蔡强国, 王彩峰, 等. 黄土丘陵沟壑区坡面水保措施及植被对流域尺度水沙关系的影响[J]. *水利学报*, 2007, 38(1): 47 ~ 53.
Zheng Mingguo, Cai Qiangguo, Wang Caifeng, et al. Effect of vegetation and other measures for soil and water conservation on runoff-sediment relationship in watershed scale [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(1): 47 ~ 53. (in Chinese)
- 15 段青松, 吴伯志, 字淑慧. 滇中地区小流域治理前后水土流失变化规律的研究[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(5): 42 ~ 46.
Duan Qingsong, Wu Bozhi, Zi Shuhui. Change law in runoff and soil erosion from a watershed in the central Yunnan Province after conservation implementation [J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(5): 42 ~ 46. (in Chinese)
- 16 张晓明, 余新晓, 武思洪, 等. 黄土丘陵沟壑区典型流域土地利用/土地覆被变化对径流泥沙的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2007, 29(6): 115 ~ 122.
Zhang Xiaoming, Yu Xinxiao, Wu Sihong, et al. Effects of land-use/land-cover change on sediment production of runoff in typical watershed in the loess gully-hilly region of China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2007, 29(6): 115 ~ 122. (in Chinese)
- 17 王兮之, 索安宁, 洪军, 等. 黄土高原泾河流域水沙特征分析[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(2): 22 ~ 25.
Wang Xizhi, Suo Anning, Hong Jun, et al. Analysis of runoff and sediment variation in Jinghe river watershed of Loess Plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(2): 22 ~ 25. (in Chinese)

(上接第 68 页)

- 6 赵匀, 应义斌, 李建平. 农机计算机辅助分析和设计初探[J]. *农业工程学报*, 1996, 12(4): 177 ~ 180.
Zhao Yun, Ying Yibin, Li Jianping. Study on computer aid design and analysis of agricultural machinery[J]. *Transactions of the CSAE*, 1996, 12(4): 177 ~ 180. (in Chinese)
- 7 Zhao Yun, Yu Gaohong, Chen Jianneng, et al. Mechanism dynamics sequence-solution method and its application[J]. *ASME*, 2007, 2: 105 ~ 113.
- 8 Zhao Yun, Chen Jianneng, Yu Yaxin, et al. Quadratic optimization method and its application on optimizing mechanism parameter [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 19(4): 519 ~ 523.
- 9 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): 48 ~ 51.
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): 48 ~ 51. (in Chinese)
- 10 赵匀. 机构数值分析与综合[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- 11 赵匀. 农业机械计算机辅助分析和设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.
- 12 蒋恩臣, 蒋亦元. 气吸式割前摘脱装置的研究[J]. *农业机械学报*, 2000, 31(3): 46 ~ 48.
Jiang Enchen, Jiang Yiyuan. Studies on the stripping unit with air suction [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2000, 31(3): 46 ~ 48. (in Chinese)
- 13 张兰星, 何月娥. 谷物收割机械理论与计算[M]. 长春: 吉林人民出版社, 1980.
- 14 连政国, 曹崇文. 过热蒸汽干燥特性的试验研究[J]. *农业机械学报*, 2000, 31(1): 66 ~ 68.
Lian Zhengguo, Cao Chongwen. Experimental research on the characteristics of superheated steam drying[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2000, 31(1): 66 ~ 68. (in Chinese)