

# 基于人机一体优化的手套编织机构的参数设计

张国凤<sup>1,2</sup>, 李革<sup>2</sup>, 俞高红<sup>2</sup>, 赵匀<sup>2</sup>

(1. 浙江大学 生物系统工程与食品科学学院, 浙江 杭州 310029;

2. 浙江理工大学 机械与自动控制学院, 浙江 杭州 310018)

**摘要** 根据对手套编织机主运动机构的运动分析和建立的数学模型, 在 Visual Basic 6.0 上编写具有良好人机对话的分析软件。利用该软件根据人的直觉思维、逻辑思维 and 问题的优化目标, 找出一系列能满足机构运动要求的参数, 并对每个参数的 4 个较好水平作正交试验, 最后用 SAS 软件进行正交分析, 找到一组最佳参数, 通过运动仿真与分析证明这组参数优于原来的参数。

**关键词** 人机一体优化; 手套编织机; 正交分析; SAS 软件

中图分类号: TS 183.6 文献标识码: A 文章编号: 0253-9721(2005)03-0069-04

## Parameters designing of glove knitting mechanism based on human computer interactions in collaboration

ZHANG Guo-feng<sup>1,2</sup>, LI Ge<sup>2</sup>, YU Gao-hong<sup>2</sup>, ZHAO Yun<sup>2</sup>

(1. College of Biosystem Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310029, China; 2. College of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

**Abstract** According to the movement analysis and mathematical models of glove knitting mechanism, a analytical software was programmed by Visual Basic 6.0. This software has good human-computer interactions in collaboration. By the intuitive and logical thought of human and the target of optimization, many groups of parameters which could satisfy the quest of transplanting were found with the software. Orthogonal experiment had been made with four better levels of every parameter. A best group of parameters had been easily found by SAS, which proved that it is better than those of original by dynamic simulation and analysis.

**Key words** human-computer interactions in collaboration; glove knitting machines; orthogonal analysis; SAS software

手套编织机的主运动为针头板的往复直线运动, 该机构一般采用由一个曲柄滑块机构和一个五连杆串联而成的串联机构。为减小针头板在高速往复运动中的冲击、噪声, 设计该机构时, 应在满足针头板一定的运动行程和运动速度前提下, 使针头板的加速度变化越小越好。

机构常用的设计方法是传统试凑法和优化方法。传统试凑法得到的参数可以满足运动要求, 但不一定是最好的, 因此, 优化设计方法成为人们研究的热点。但对于复杂的非线性约束优化问题, 无论是惩罚函数法, 还是遗传算法 (Genetic Algorithms, 简称 GA)、模拟退火算法 (Simulation Algorithms, 简称 SA) 与神经网络 (Neural Networks, 简称 NN) 等其它现代优化方法, 若惩罚函数 (因子) 选择不当, 优化结果

也不理想, 常常会陷入局部最优解或者花费的时间代价太大<sup>[1,2]</sup>。笔者曾经利用遗传算法对该机构的参数进行优化, 但效果不佳。

本文利用人机一体优化的方法对该机构的主要参数进行了优化。

### 1 主运动机构的运动分析及数学模型建立

图 1 为手套机主运动机构简图。以点 O 为坐标原点, 建立如图 1 所示的坐标系  $xOy$ , 对机构进行运动学分析, 推得机构的位移、速度和加速度方程。限于篇幅, 这里仅给出铰点 E 的位移、速度和加速度方程。

#### 1.1 主运动机构的位移方程

铰点 E (即针头板) 的位移方程为

基金项目: 国家重大基础研究前期研究专项资助项目 (2004CCA050700)

作者简介: 张国凤 (1970 - ), 女, 讲师, 在读博士。主要研究领域为机构计算机辅助分析与设计, 机构动力学, 优化设计等。赵匀, 教授, 博士生导师, 通讯作者。

$$\left. \begin{aligned} x_E &= l_1 \cos \alpha_1 + l_2 \cos \alpha_2 + x_{CB} + \\ & \quad l_{CD} \cos \alpha_3 + l_3 \cos \alpha_5 \\ y_E &= K \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中,  $l_i$  为杆件  $i$  的长度;  $l_{CD}$  为杆件 3 上  $C$ 、 $D$  两铰点间的长度;  $\alpha_i$  为杆件  $i$  与  $x$  轴正向的夹角;  $x_{CB}$  为铰点  $C$ 、 $D$  间的水平距离, 为常量;  $K$  为位置常量。 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$ 、 $\alpha_5$  的方程略去, 求解方法见文献[3]。

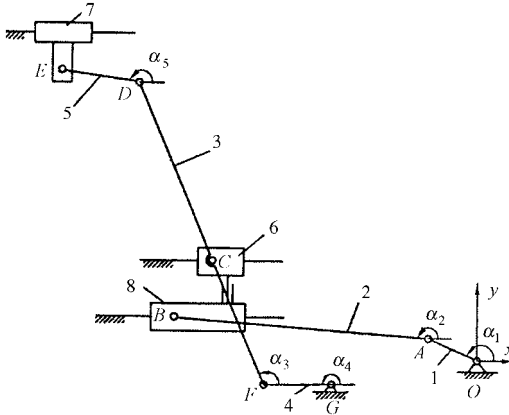


图 1 手套机主运动机构运动简图

### 1.2 手套编织机构的速度方程和加速度方程

根据位移、速度和加速度之间的关系, 把式(1)对时间进行一阶和二阶求导, 分别得到速度方程和加速度方程。

铰点  $E$  的速度方程为

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_E &= -l_1 \dot{\alpha}_1 \sin \alpha_1 - l_2 \dot{\alpha}_2 \sin \alpha_2 - \\ & \quad l_{CD} \dot{\alpha}_3 \sin \alpha_3 - l_3 \dot{\alpha}_5 \sin \alpha_5 \\ \dot{y}_E &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中,  $\dot{\alpha}_1$  为曲柄的角速度;  $\dot{\alpha}_2 = -\frac{\dot{\alpha}_1 l_1 \cos \alpha_1}{l_2 \cos \alpha_2}$

$\dot{\alpha}_3 = -\frac{(l_1 \dot{\alpha}_1 \sin \alpha_1 + l_2 \dot{\alpha}_2 \sin \alpha_2) \cos \alpha_4}{l_{FC} \sin(\alpha_3 - \alpha_4)}$  ( $l_{FC}$  为杆件 3

上  $F$ 、 $C$  两铰点间的长度);  $\dot{\alpha}_5 = -\frac{\dot{\alpha}_3 l_{CD} \cos \alpha_3}{l_3 \cos \alpha_5}$ 。

铰点  $E$  的加速度方程为

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x}_E &= -l_1 \ddot{\alpha}_1 \cos \alpha_1 - l_2 \ddot{\alpha}_2 \cos \alpha_2 - l_2 \dot{\alpha}_2' \sin \alpha_2 - \\ & \quad l_{CD} \ddot{\alpha}_3 \sin \alpha_3 - l_{CD} \dot{\alpha}_3' \cos \alpha_3 - \\ & \quad l_3 \dot{\alpha}_5' \sin \alpha_5 - l_3 \ddot{\alpha}_5 \cos \alpha_5 \\ \ddot{y}_E &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中,  $\ddot{\alpha}_2 = \frac{\ddot{\alpha}_1 l_1 \sin \alpha_1 + \dot{\alpha}_1^2 l_2 \sin \alpha_2}{l_2 \cos \alpha_2}$

$$\ddot{\alpha}_3 = \frac{-\ddot{\alpha}_1 l_4 - \dot{\alpha}_1^2 l_{FC} \cos(\alpha_3 - \alpha_4)}{l_{FC} \sin(\alpha_3 - \alpha_4)} + \frac{(\dot{\alpha}_1^2 l_1 \cos(\alpha_1 - \alpha_2) + \dot{\alpha}_2^2 l_2) \cos \alpha_4}{l_{FC} \sin(\alpha_3 - \alpha_4) \cos \alpha_2}$$

$$\ddot{\alpha}_5 = \frac{\dot{\alpha}_3^2 l_{CD} \sin \alpha_3 + \dot{\alpha}_3^2 l_3 \sin \alpha_5 - \dot{\alpha}_3' l_{CD} \cos \alpha_3}{l_3 \cos \alpha_5}$$

### 1.3 主运动机构的设计要求

在手套编织机主运动机构的设计过程中, 除满足机构设计的一般条件外, 还要满足如下要求: 1) 针头板在极限位置时的加速度要尽量小, 以减小振动和噪声; 2) 针头板在往复直线运动过程中, 速度变化要尽量平缓, 以保证纱线编织的均匀性; 3) 针头板的速度不能太低; 4) 为使机器小型化, 针头板的行程也要控制在一定范围内。

由此, 可以建立优化数学模型: 目标函数取为  $F(X) = \dot{x}_{E\max} \rightarrow \min$ , 设计变量取  $X = [l_1 \quad l_2 \quad l_3 \quad l_4 \quad l_5]^T$ , 上面的其余 3 个约束条件可以根据前述的数学模型写出它们的约束方程, 限于篇幅这里不再列出。从前述的数学模型及约束方程看, 目标函数和约束方程都是复杂的混合变量非线性函数, 是复杂的约束优化问题。

## 2 基于人机一体优化的方法

人机一体优化就是采取以人为中心、人机一体的技术路线, 使人与机器各自执行自己最擅长的工 作, 充分发挥各自的特点和优势, 取长补短, 从而设计出最优方案<sup>[4-6]</sup>。

要构建一个人机一体优化系统, 必须构建一个合适的人机接口——交互式用户界面, 使整个优化过程可视化, 以使用户对复杂模型进行直观的判断, 从而及时有效地对设计参数进行调整。

### 2.1 人机接口的仿真软件

利用前述对该机构的运动分析和建立的数学模型, 在 Visual Basic 6.0 上编写具有良好的人机对话分析软件。该软件的输入参数包括  $l_1$ 、 $l_2$ 、 $x_G$ 、 $y_G$ 、 $y_E$  等机构各杆件长度和固定铰点的位置参数。它能够根据机构参数的变化实时地计算输出各关注点位移、速度、加速度的极值, 同时也可进行机构的运动模拟。

利用该软件, 也可以进行人机交互设计。用户根据经验输入一组参数, 由计算机实时计算结果并显示轨迹和进行运动模拟, 再根据这些结果, 用户就可根据人的直觉思维、逻辑思维直接判断这组参数的优良与否, 从而实现人机一体优化。由于目标函数和约束函数都是强非线性函数, 很难掌握 5 个输入参数与它们的相关性, 若只用该软件来优化, 很难得到最佳结果或要花很大的时间代价, 因此本文运用正交分析的理论来快速得到最优解。

### 2.2 基于软件的正交试验及优化结果

2.2.1 因素的选择 将 5 个输入参数  $l_1$ 、 $l_2$ 、 $l_3$ 、 $l_4$ 、

$l_5$  选定为正交试验的因素,考察的目标是  $S_E$ 、 $\bar{v}_E$ 、 $a_{E\max}$  和  $\alpha_{5\min}$  4 个指标,  $S_E$  为针头板的行程,  $\bar{v}_E$ 、 $a_{E\max}$ 、 $\alpha_{5\min}$  分别为针头板的平均速度、最大加速度、杆件 5 与  $x$  轴正向的最小夹角。根据经验,各选取 4 个较佳的水平进行实验。表 1 中列出了所选取的 5 个因素的 4 个水平值。

表 1 因素和水平信息表

水平	$l_1$	$l_2$	$l_3$	$l_4$	$l_5$
1	0.048	0.320	0.359	0.060	0.06
2	0.050	0.330	0.365	0.065	0.07
3	0.055	0.340	0.370	0.070	0.08
4	0.060	0.350	0.375	0.075	0.09

2.2.2 基于软件的正交试验设计 利用正交表  $L_{32}(4^5)$  基于该软件上做正交试验,结果如表 2 所示。

表 2  $L_{32}(4^5)$  正交试验结果

序号	$l_1$	$l_2$	$l_3$	$l_4$	$l_5$	$S_E/m$	$\bar{v}_E/(m \cdot s^{-1})$	$a_{E\max}/(m \cdot s^{-2})$	$\alpha_{5\min}/(^{\circ})$
1	1	1	4	3	2	0.223 1	1.487 1	52.683 4	177.528 9
2	2	1	1	1	3	0.244 0	1.626 4	59.555 6	177.311 6
3	3	1	3	4	1	0.262 5	1.749 7	63.525 1	167.504 6
4	4	1	2	2	4	0.287 8	1.918 9	70.572 2	172.687 2
5	1	2	3	2	3	0.222 4	1.482 5	52.757 5	178.422 7
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
31	3	1	2	4	1	0.266 9	1.779 0	65.326 4	165.377 9
32	4	1	1	3	2	0.295 7	1.971 1	73.802 5	165.396 7

表 4 因素各水平对  $a_{E\max}$  指标的影响分析结果

因素	水平	$N$	$a_{E\max}$ 均值	标准差 $SD$	$t$ 分组
$l_1$	1	8	53.284 075 0	1.567 448 86	A
	2	8	55.772 950 0	2.749 753 70	B
	3	8	61.623 500 0	3.247 449 70	C
	4	8	67.868 700 0	3.937 522 95	D
$l_2$	1	8	61.611 600 0	8.114 216 38	A
	2	8	60.423 837 5	7.382 454 86	B
	3	8	58.902 150 0	4.898 507 96	C
	4	8	57.611 637 5	5.138 364 23	D
$l_3$	1	8	62.567 862 5	7.505 390 67	A
	2	8	60.635 650 0	7.067 886 84	B
	3	8	58.592 862 5	5.304 441 59	C
	4	8	56.752 850 0	5.007 562 02	D
$l_4$	1	8	58.567 575 0	5.920 242 61	A
	2	8	59.144 625 0	7.301 541 76	A
	3	8	60.300 150 0	8.490 889 28	B
	4	8	60.536 875 0	4.211 772 35	B
$l_5$	1	8	59.465 525 0	7.823 670 91	A
	2	8	59.546 487 5	7.200 004 11	A
	3	8	59.667 937 5	5.459 865 98	A
	4	8	59.869 275 0	6.184 046 92	A

说明:  $N$  为实验次数

由表 5 看出,在针头板行程  $S_E$ 、平均速度  $\bar{v}_E$  基本相同的情况下,优化组的最大加速度值却小于原机构;且从优化前后针头板  $E$  位移、速度、加速度曲

表 5 优化结果与原有机构参数和目标值的比较

结果	$l_1/m$	$l_2/m$	$l_3/m$	$l_4/m$	$l_5/m$	$S_E/m$	$\bar{v}_E/(m \cdot s^{-1})$	$a_{E\max}/(m \cdot s^{-2})$	$\alpha_{5\min}/(^{\circ})$
优化结果	0.060	0.350	0.360	0.070	0.08	0.282 6	1.884 0	65.437 8	157.893 2
原有结果	0.065	0.330	0.365	0.060	0.085	0.290 0	1.872 7	69.611 8	169.447 7

2.2.3 基于 SAS 软件的正交试验结果分析与比较 根据表 3 的正交试验结果,下面用 SAS 统计分析软件的正交分析功能对各因素及其各水平对目标值的影响进行分析<sup>[7]</sup>。限于篇幅,这里仅列出对目标  $a_{E\max}$  指标的分析结果,对其它目标的详细分析过程略去。

1)  $a_{E\max}$  与各因素显著性分析(一般认为  $Pr > F$  的概率小于 0.05 时为显著)。由表 3 可看出  $a_{E\max}$  与  $l_1$ 、 $l_2$ 、 $l_3$  和  $l_4$  相关。

表 3  $a_{E\max}$  与各因素显著性分析结果

因素	DF	均方值	$F$ 值	$Pr > F$
$l_1$	3	338.660 281	1 002.93	< 0.000 1
$l_2$	3	24.427 349	72.34	< 0.000 1
$l_3$	3	50.655 469	150.01	< 0.000 1
$l_4$	3	7.028 388	20.81	< 0.000 1
$l_5$	3	0.246 679	0.73	0.548 7

2) 因素  $l_1$ 、 $l_2$ 、 $l_3$ 、 $l_4$ 、 $l_5$  各水平对  $a_{E\max}$  指标的影响情况见表 4,  $t$  分组中字母相同者表示因素各水平对目标值的影响无显著差异。由表 4 看出  $l_1$ 、 $l_2$ 、 $l_3$  的各水平对  $a_{E\max}$  影响有显著差异。

综合上面的分析,可以得出各指标与各因子之间的相关性。这样可以根据需要的目标快速地选择参数。本文最后得到的最佳机构参数和目标结果见表 5。

线图 2-3 看,原机构在曲柄位置为  $175^{\circ}$  左右时,针头板加速度变化较大,而优化组的加速度变化相对较平缓,这将使机构的动力学性能有所改进。

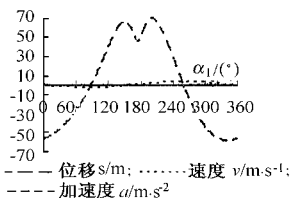


图2 原机构针头板 E 位移、  
速度和加速度曲线

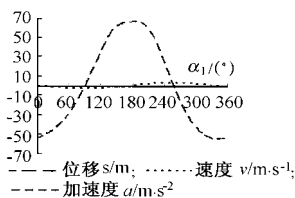


图3 优化后针头板 E 位移、  
速度和加速度曲线

### 3 结 论

1) 人机一体优化系统是利用人和计算机结合, 实现智能互补, 以充分发挥人与计算机各自的优势, 利用人定性认识的整体效应及计算机定量表达的逻辑推理能力, 实现定性与定量表达的有机结合, 从而取得人机一体优化的良好效果。它是未来复杂优化问题求解的发展方向之一。

2) 本文在优化中, 是把 5 个杆件长度作为优化参数, 利用前述人机接口仿真软件可以方便地把其它任何有关机构参数作为优化参数, 但在进行正交试验和正交分析时, 要根据优化参数和水平情况, 适当选取正交表, 以保证在做较少次实验的前提下得

到最好结果。

3) 本文的方法同样适合于其它机构参数优化和其它复杂约束问题的优化, 结合 SAS 软件的正交分析功能, 可快速求得变量和目标之间的相关性, 从而更快找到问题的最优解。

### 参考文献:

- [ 1 ] 王国夫, 孙尧, 王景敏, 等. 混合 GA 与 SA 求解非线性约束优化[ J ]. 哈尔滨工程大学学报, 2002, 23(6) : 73 - 76.
- [ 2 ] 王蕾. 非线性约束优化问题[ J ]. 辽宁工学院学报, 2003, 23(1) : 13 - 15.
- [ 3 ] 赵启. 农业机械计算机辅助分析与设计[ M ]. 北京: 清华大学出版社, 1998. 56.
- [ 4 ] 杨灿军, 陈鹰. 人机一体化智能系统理论及应用研究探索[ J ]. 机械工程学报, 2000, 36(6) : 42 - 47.
- [ 5 ] Shahroudi K E. Design by continuous collaboration between manual and automation optimization[ J ]. Computer Modeling & Simulation in Engineering, 1998, 124 - 139.
- [ 6 ] Sun Tarr-ming, Yu Guo-yan, Li Di, et al. Optimization design for the flexible assembly systems incorporated with human and machines[ J ]. Journal of South China University of Technology ( Natural Science Edition ), 2001, 29(10) : 23 - 27.
- [ 7 ] 胡良平. 现代统计学与 SAS 应用[ M ]. 北京: 军事医学科学出版社, 2000. 107.