

# 基于混合遗传算法的染色优化模型与仿真

汪 岚

(黎明职业大学机电工程系, 泉州 362000)

**摘要:**为解决染色工艺优化设计问题,以生产成本最小化为优化目标,构造染色工艺优化设计的数学模型。针对模型非线性约束的特点,采用具有自适应惩罚函数和交叉率的混合遗传算法,对模型进行优化计算及仿真。实验结果表明,该方法优化后的生产成本节约了8.8%,证明该优化模型及算法的有效性及其实用性,对生产成本的预测以及染色工艺参数的制定具有实际意义。

**关键词:**染色工艺;优化设计;混合遗传算法;自适应惩罚函数;自适应交叉率

## Model and Simulation of Dyeing Optimization Based on Hybrid Genetic Algorithm

WANG Lan

(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Liming Vocational University, Quanzhou 362000)

**【Abstract】**In order to solve the problems of the design and optimization of dyeing technology, a mathematic model is established based on the objective function of minimum cost. Considering the characteristic of nonlinearity of model, a hybrid genetic algorithm combined with self-adaptive penalty function and crossover are applied to conduct the optimization calculation and simulation. Experimental result shows that the productive cost is reduced 8.8% based on the optimal parameters. The effectiveness and the good performance of the optimal model and algorithm are demonstrated, and it is very useful for prediction of the cost and the selection of dyeing parameters.

**【Key words】**dyeing technology; optimization design; hybrid genetic algorithm; self-adaptive penalty function; self-adaptive crossover

### 1 概述

染色工艺参数设定的合理与否,决定着产品质量好坏和成本的高低。因此,对染色过程的工艺参数进行优化设计具有重要意义,对提高产品质量,降低成本起重要作用。现阶段,国内许多染整企业是通过实验或经验实现染色工艺的优化设计<sup>[1-2]</sup>,这种方法存在周期长、成本高的问题。如果能够利用某一数学模型<sup>[3]</sup>,模拟染色过程,通过对模型的优化计算及分析,正确、合理地对现场工艺进行适当调整,就可以达到对现场工艺优化设计的目的。而目前国内利用数学模型实现对染色工艺优化控制的文献相对较少。

本文以活性染料染棉织物的染色过程为例,以生产成本最小为优化目标,构造染色过程工艺优化模型。鉴于模型非线性约束的特点,可采用如遗传算法、罚函数、模拟退火法等智能算法求解,但其求解过程分别存在过程复杂、精度较低以及算法过早收敛、容易陷入局部最优等缺陷。因此,本文提出一种新算法,利用遗传算法的全局寻优性搜索和罚函数易于求解非线性约束问题的优点,将两者结合构成混合遗传算法,用 Matlab 语言实现优化计算程序。仿真实验和实践结果表明,利用模型和算法,获得成本最小化时的工艺优化值,可作为现场对工艺设定和成本预测的依据,具有很强的实用性。

### 2 染色过程数学模型的建立

根据活性染料染棉织物的染色过程,以工艺参数及色差为约束变量、以产品的生产成本最小为优化目标,建立染色过程优化问题的数学模型,该模型包括目标函数和约束条件2部分。

#### 2.1 目标函数

染色过程的优化目标是在整个染色周期内,产品的生产成本最小。整个过程的生产成本包括水、电、染料、元明粉、纯碱5部分成本,分别用  $f_1, f_2, f_3, f_4, f_5$  表示,则目标函数为

$$f_{\min} = f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5$$

#### 2.2 约束条件

分析染色机理,发现染料浓度、染色温度、染色时间、助剂浓度、染机升降温速率是影响染色结果最严重的因素,将其确定为约束条件,分别用  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7$  表示。除此之外,由于色差  $\Delta E$  是作为产品质量评定的一个重要指标,因此也引入色差作为约束条件之一。

##### (1)约束 1

染料浓度限制:  $0.1\% \leq x_1 \leq 0.5\%$

##### (2)约束 2

染色时间限制:  $40 \text{ min} \leq x_2 \leq 120 \text{ min}$

##### (3)约束 3

染色温度限制:  $40^\circ\text{C} \leq x_3 \leq 70^\circ\text{C}$

##### (4)约束 4

助剂用量限制:  $0 \leq x_4 \leq 60\%; 0 \leq x_5 \leq 40\%$

**基金项目:**泉州市科技计划基金资助重点项目“双极性变频技术研究”(2007G13)

**作者简介:**汪 岚(1978-),女,讲师、硕士研究生,主研方向:控制过程智能建模

**收稿日期:**2009-06-16 **E-mail:** yqing\_chen@163.com

(5)约束 5

色差约束：

$$g_1 = 0.2 - \Delta E = 0 \quad (1)$$

根据实验表明色差约束为一个非线性不等式约束问题。

(6)约束 6

升温、降温时间约束：

$$g_2 = -x_3 + 3x_6 + 20 = 0 \quad (2)$$

$$g_3 = x_3 - 1.5x_6 - 20 = 0 \quad (3)$$

$$g_4 = -x_3 + 3x_7 + 25 = 0 \quad (4)$$

$$g_5 = x_3 - 1.5x_7 - 25 = 0 \quad (5)$$

### 2.3 数学模型

根据前面各约束条件分析及成本目标函数的确定，则整个染色过程的工艺参数优化模型为

$$\min f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5$$

$$0.1\% \leq x_1 \leq 0.5\%$$

$$s.t. \quad 40 \leq x_2 \leq 120$$

$$40^\circ\text{C} \leq x_3 \leq 70^\circ\text{C}$$

$$0 \leq x_4 \leq 60\%$$

$$0 \leq x_5 \leq 40\%$$

$$g_1 = 0.2 - \Delta E = 0$$

$$g_2 = -x_3 + 3x_6 + 20 = 0$$

$$g_3 = x_3 - 1.5x_6 - 20 = 0$$

$$g_4 = -x_3 + 3x_7 + 25 = 0$$

$$g_5 = x_3 - 1.5x_7 - 25 = 0$$

### 3 基于混合遗传优化算法的模型求解

由于染色工艺优化模型是一个包含线性与非线性约束的问题，常用方法是罚函数法，将约束极值问题转化为无约束问题求解，但罚函数法存在计算复杂、精度低的缺点。而遗传算法(GA)<sup>[4-5]</sup>是模拟生物进化过程中优胜劣汰规则与群体内部染色体信息交换机制的一类处理复杂优化问题的新方法，它不受问题本身的限制，仅在目标函数的概率准则引导下即可进行全局自适应搜索，具有算法简单、解决非线性问题鲁棒性强等优点，但是传统的遗传算法求解时容易出现早熟和局部收敛现象。因此，本文提出一种改进算法，在传统遗传算法的基础上，将罚函数包含到适应度评价中，构造带有能随解的可行性变化而变化的自适应罚因子的适值函数和自适应交叉率，从而使每代的种群中保持部分非可行解，使遗传搜索可以在可行解和非可行解两边进行，从而获得全局最优解。

#### 3.1 种群规模和编码选择

初始种群是在变量寻优空间中随机选取，种群数量应设定为一个合理的整数  $N$ ，其值大小对算法收敛具有重要作用， $N$  太小，优化性能不好，容易陷入局部最优； $N$  太大则计算复杂性及工作量猛增，影响进化效率。根据经验，种群规模  $N$  一般取值范围为 20~100。

选择二进制对每个变量进行编码，组成一个串，即遗传算法的操作对象——染色体。在精度要求下选择适当串长  $m$ ，以减小遗传算法计算量。

#### 3.2 带自适应惩罚项的适值函数

在遗传算法中，适值大小是分辨个体的优劣，决定其能否进入下一代进化的依据。为了防止在种群中出现个别或者极少数适值极高的个体而导致这些个体在种群中迅速繁殖，致使算法过早收敛，必须合理设置适值函数，以提高算法的

整体性能。本文以生产成本作为目标函数求解其极小值，将之前分析的各约束条件以惩罚函数的形式引入优化目标中，构造遗传算法的适值函数，表达式如下： $F(x) = f(x) + p(x)$ ，其中， $x$  代表染色体； $F(x)$  是适值函数； $f(x)$  是目标函数； $p(x)$  是惩罚函数，其表达式如下：

$$p(x) = \begin{cases} 0; & \text{当 } x \text{ 可行} \\ r(t) \sum_{i=1}^m g_i(x); & \text{当 } lb_i \leq g_i(x) \leq ub_i \\ r(t) \sum_{i=1}^m (g_i(x) - lb_i)^2; & \text{当 } g_i(x) < lb_i \\ r(t) \sum_{i=1}^m (g_i(x) - ub_i)^2; & \text{当 } g_i(x) > ub_i \end{cases} \quad (6)$$

其中， $ub_i$ 、 $lb_i$  为第  $i$  个未被满足的约束上、下界。在式(6)中，传统罚因子  $r$  一般设置为常数，当  $r$  取值较大时，则算法在搜索前期收敛较快，而在搜索后期由于精度低、容易丢失最优解；当  $r$  取值较小时，则容易使搜索陷入局部最优解，不利于全局搜索。因此，为了合理设置  $r(t)$ ，提高算法性能，本文构造出能自适应调整的罚因子  $r(t)$ ，使其与传统的惩罚因子有所不同，而取决于进化次数  $t$ ，两者关系由下式决定：

$$r(t+1) = \begin{cases} \alpha \cdot r(t), \alpha < 1 \\ r(t) \\ \beta \cdot r(t), \beta > 1 \end{cases} \quad (7)$$

式(7)表明，若在前  $t$  代，最好的个体都是可行解时，则设置  $\alpha < 1$ ，减小惩罚因子；若在前  $t$  代，最好个体都是非可行解时，则设置  $\beta > 1$ ，增大惩罚因子；若既有可行解又有非可行解，则保持上一代惩罚因子不变。采用自适应罚函数，能使惩罚因子随着解的可行性变化而变化，既保留可行解又保留部分的非可行解，从而有效地避免早熟或局部最优，而获得全局最优。

#### 3.3 遗传算子操作

(1)选择。是建立在对个体的适应度进行评价的基础上，选择操作的目的是把优化的个体直接遗传到下一代，或通过配对交叉产生新的个体再遗传到下一代。采用轮盘赌法，设种群规模为  $N$ ，个体适值为  $f_i$ ，则个体被选中的概率为

$$P_i = f_i / \sum_{k=1}^N f_k$$

适值越高，则染色体被选中的机会越大。

(2)自适应交叉率。交叉算子从总体中随机抽取  $\eta$  ( $2 \leq \eta \leq 24$ ) 个父代个体，将其重组形成  $\eta$  个子代个体插入新群体中，通常  $\eta$  取值 2。交叉概率  $P_c$  决定后代个体的数量，为提高搜索能力，设置让交叉率随遗传迭代自适应地进行变化，从而提高算法的全局最优性。其表达式如下：

$$P_c(t+1) = \begin{cases} P_c(t) \cdot \frac{(f_{\max} - f)}{(f_{\max} - f_{\text{avg}})}, f > f_{\text{avg}} \\ P_c(t), f < f_{\text{avg}} \end{cases}$$

其中， $f_{\max}$  为种群中最小适值； $f_{\text{avg}}$  为没代种群中的平均适值； $f$  为 2 个父代中较大的适值； $P_c(t)$  为第  $t$  代交叉率。对于适值高于种群平均适值的个体，可减小上一代的  $P_c$ ，使具有优秀基因的个体顺利进入下一代，对于适值低于种群平均适值的个体，保持上一代交叉率。

(3)变异率。对种群中的个体逐一进行扫描，扫描过程中以变异概率  $P_m$  对基因进行变异。在遗传算法中，变异过程可有效防止非成熟收敛的出现，因此，变异概率  $P_m$  的取值不能过大，一般取值范围为 0.000 1~0.100 0。

### 3.4 算法具体步骤

本文改进遗传算法具体步骤如下：(1)求解问题描述和抽象。(2)种群初始化，确定变量及其上下限，随机产生父代种群，设定算法基本参数。(3)构造带自适应惩罚项的适值函数，设置惩罚因子初始值  $r(1) = 1$ ，进行个体适值计算。(4)判断前  $t$  代的解的可行性，若既有可行解也有非可行解，保持惩罚因子不变；若都为可行解，则设置  $\alpha = \frac{1}{2}$ ，从而减小惩罚因子；若都为不可行解，则设置  $\beta = 2$ ，从而增大惩罚因子。(5)遗传操作，进行选择，设置交叉率，变异率。(6)判别是否满足停止条件，否则  $t = t + 1$ ，转步骤(2)。(7)输出最优解。

### 4 算法仿真及分析

根据染色过程的实际情况，设定遗传算法的种群个体数为 100，最大遗传代数为 100，变异概率  $P_m$  为 0.07，交叉概率  $P_{c1}$  为 0.95。利用 Matlab 软件中的 GA 工具箱<sup>[6]</sup>编程实现优化计算，得到一组优化参数： $(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7) = (0.296, 5.56, 20.2, 8, 48.83, 22.186, 9.328, 4, 11.553, 3, 8.656, 2)$ 。根据式(1)~式(5)， $g_1 = 0.13$ ， $g_2 = 8.83$ ， $g_3 = 11.50$ ， $g_4 = 2.14$ ， $g_5 = 10.85$ ，其值满足约束条件。图 1 为优化过程中种群的适值随遗传进化代数变化的曲线图。

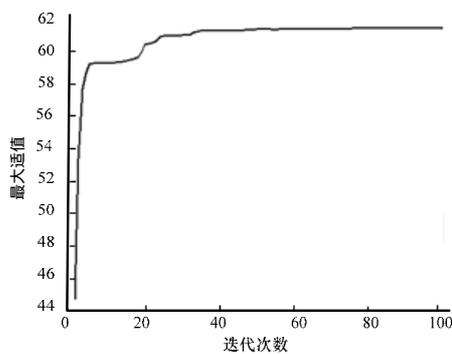


图 1 适值与进化代数关系曲线

由图 1 可以看出，最优个体适值的走势是朝着适值更优的方向发展，在代数允许范围内变量的取值是渐渐趋于稳定，说明其解收敛于全局最优解，算法是合理的。

表 1 为当前工艺参数、罚函数优化、传统 GA 及混合 GA 优化后的生产成本。

表 1 当前工艺、罚函数优化、传统 GA 及混合 GA 优化结果对比

工艺参数	染料浓度/(%)	保温时间/min	保温温度/(°C)	元明粉浓度/(%)	纯碱浓度/(%)	升温时间/min	降温时间/min	成本/元							
实际	0.300	0	60.000	0	20.000	0	10.000	67.20							
罚函数	0.300	0	46.001	0	56.201	4	16.463	3	15.192	9	12.067	1	10.400	5	64.60
传统 GA	0.300	1	48.010	0	56.200	0	22.190	0	9.330	0	11.890	0	10.850	0	62.50
混合 GA	0.296	5	56.202	8	48.830	9	22.186	6	9.328	4	11.553	3	8.656	2	61.30

根据表 1 数据可知，在产品质量即色差满足要求的条件下，采用混合 GA 计算得到的工艺参数对应的成本比实际成本降低了 8.8%，比罚函数优化后的参数对应的成本降低了 5.1%，比传统 GA 成本降低了 1.9%，充分说明该算法用于染色工艺优化的有效性及优越性。

### 5 结束语

本文以生产成本最小化为优化目标，以工艺参数及色差为约束条件，构建了染色过程工艺优化设计的数学模型。针对模型非线性的特点，提出了一种混合的遗传算法，在遗传算法的基础上，构造带自适应惩罚因子的适值函数和自适应交叉率，使其能随迭代在可行解和非可行解之间进行全局搜索，从而使算法跳出早熟和局部最优。仿真及实际实验表明，改进后的算法表现良好的收敛性和全局寻优性，说明该算法应用于染色工艺优化的有效性及优越性，对应的生产成本节约了 8.8%，所得优化结果可用于预测生产成本和对现有染色工艺优化提供理论依据与操作依据，具有较好的指导意义。

#### 参考文献

- [1] 王宗乾, 孙瑞霞, 王 澜, 等. 羊毛氧化还原体系低温染色工艺优化及性能分析[J]. 染料与染色, 2008, 45(1): 28-32.
- [2] 刘俊英, 孙 臣, 王 娜. 深咖啡色纯棉贡缎宽幅织物的染色工艺[J]. 印染, 2008, 34(2): 12-14.
- [3] 陈瑞华, 杨志奇. 纺织最优化方法与应用[M]. 北京: 中国纺织出版社, 1994: 4-5.
- [4] 周建兴, 朴 英, 曹志松. 基于混合遗传算法的进气道性能设计与优化[J]. 计算机工程, 2008, 34(12): 233-235.
- [5] 陈 群, 姚加林, 晏克非. 基于遗传算法的通道上停车换乘量确定方法[J]. 计算机工程, 2008, 34(4): 201-203, 206.
- [6] 飞思科技产品研发中心. MATLAB6.5 辅助优化计算与设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003: 173-181.

编辑 索书志

(上接第 217 页)

的规则准确率较高。如果迭代次数足够大，规则的准确率几乎达到 100%。HGCA 算法的克隆算子依据抗体与抗原的亲度函数，将解空间中的一个点分裂成多个相同的点，从而扩大解空间搜索范围，采取对父代进行克隆复制的策略，其解空间变大是以计算时间增长为代价的，但有利于在更大范围内搜索最优解；同时 HGCA 算法采用自适应方式动态选取交叉和变异概率，有效地克服了遗传算法容易陷入局部最优的缺点。

### 5 结束语

本文利用混合遗传克隆算法构造了数据挖掘中的关联规则挖掘的模型，通过支持度和可信度的对比，发现隐藏在数据库中的规律。通过实验显示该算法可以有效、快速地解决关联规则挖掘问题。目前国内的关联规则挖掘尚处于探索阶段，下一步工作将研究和深化遗传算法和免疫克隆算法。

#### 参考文献

- [1] 印 莹, 张 斌, 赵宇海. 基于中医疗效评价的交互式数据挖掘框架[J]. 计算机工程, 2008, 34(23): 34-35.
- [2] Stakovie J. Misconceptions About Real-time Computing: A Serious Problem for Next Generation System[J]. IEEE Computer, 1998, 21(10): 10-19.
- [3] 许国艳, 史宇清. 遗传算法在关联规则挖掘中的应用[J]. 计算机工程, 2002, 28(7): 122-124.
- [4] 贾兆红, 倪志伟, 赵 鹏. 改进型遗传算法及其在数据挖掘中的应用[J]. 计算机应用, 2002, 22(9): 31-33.
- [5] 李阳阳, 焦李成. 求解 SAT 问题的量子免疫克隆算法[J]. 计算机学报, 2007, 30(2): 176-183.

编辑 金胡考