

文章编号: 1001-0920(2008)10-1168-05

## 基于满意优化的氧化铝生料浆调配方法

阳春华, 温丽敏, 朱红求, 桂卫华  
(中南大学 信息科学与工程学院, 长沙 410083)

**摘要:** 提出了基于多目标满意优化的生料浆调配智能优化方法. 该方法以满意度函数反映决策者对性能指标的评价, 以综合满意度函数反映决策者对多目标协调的要求, 构建氧化铝生料浆调配的满意优化模型, 并通过自适应调整交叉概率和变异概率的改进遗传算法求解满意优化问题. 所得优化结果更能反映决策者对实际工艺指标的评价, 大幅度提高计算效率, 减少生料浆质量指标的波动. 基于工业运行数据的计算结果表明了该方法的有效性和实用性.

**关键词:** 生料浆调配; 满意优化; 满意度函数; 改进遗传算法

中图分类号: TP393

文献标识码: A

## Satisfactory optimization of raw slurry arrangement for process of alumina production

YANG Chun-hua, WEN Li-min, ZHU Hong-qiu, GUI Wei-hua

(School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China. Correspondent: WEN Li-min, E-mail: wenlimin@gmail.com)

**Abstract:** A satisfactory optimization approach is proposed for the raw slurry arrangement in the process of alumina production. A satisfactory degree function based on the satisfaction degree of the decision-maker is defined to evaluate the performance of optimal objectives, and a synthesis satisfactory degree function is constructed to evaluate optimization results. The satisfactory optimization problem is solved by an improved genetic algorithm where the crossover rate and mutation rate are adjusted according to fitness function. The optimization results show that the computational efficiency is increased greatly, the composition fluctuation in mixed raw slurry is decreased a lot, and more satisfactory performances are achieved than that of traditional methods. The computation results based on the industrial data show the effectiveness and practicality of the proposed approach.

**Key words:** Raw slurry arrangement; Satisfactory optimization; Satisfactory degree function; Improved genetic algorithm

### 1 引言

在烧结法氧化铝生产过程中,由铝土矿、石灰石、烧碱、生料煤、碳分母液、硅渣等原料配置所得的合格生料浆,要送往熟料窑进行烧结,供后道工序使用.配制的生料浆质量直接影响熟料质量<sup>[1]</sup>,甚至影响到整个生产系统的平衡稳定.在实际工业过程中,受供矿来源不确定、返回液成分不确定、料浆成分检测滞后等因素的影响,所得生料浆难以满足生产指标要求,需要通过倒槽混合的方式来获得合格的料浆液.即从当前一批满槽的料浆槽中抽取若干槽,相互混合平衡质量指标后,倒入另一批空槽以得到合格的生料浆.在工业流程中,将碱比、钙比、铝硅比视

为主要参考指标,调配中若以 1 和 0 表示倒槽和不倒槽,则可视作组合优化问题.

组合优化问题通常可采用枚举法、回溯法等传统优化方法进行求解.将枚举法应用于生料浆调配过程,通过递归逐一比较求解最优值,在满槽数目较少时是可行的,但当满槽数量达到一定值时,则存在时间复杂度大、效率低、难以全面考虑实际生产中多目标多约束等问题.回溯法是求解约束问题的经典算法,实际应用证明,在料浆槽数目较少时,回溯法能快速得到问题的最优解,但在数目过多时,其时间复杂度与枚举法相当.因此,对于获得最优解代价太大的多目标优化问题,传统最优化方法遇到了挑战.

收稿日期: 2007-07-13; 修回日期: 2007-11-13.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60634020, 60574030, 60804037); 教育部博士点基金项目(20050533016).

作者简介: 阳春华(1965—),女,湖南双峰人,教授,博士生导师,从事复杂工业过程建模与优化、智能自动化系统与装置等研究; 温丽敏(1979—),女,河北邢台人,硕士生,从事工业过程优化与控制的研究.

同时,由于过程数学模型的不精确性、约束的模糊性以及干扰与环境的不确定性,难以获得最优解.实际工业过程往往不必追求单一指标的最优,在多项性能指标下,一定程度的满意即可满足工艺要求.

满意优化本质上是一种多目标优化方法,它摒弃了传统的最优概念,强调的是满意而不是最优.它将优化问题的约束与目标融为一体,将性能指标要求的满意设计与参数优化融为一体,具有更大的灵活性和适用性<sup>[2-4]</sup>.本文应用满意优化的思想,提出了采用多目标满意优化方法对氧化铝生料浆进行优化调配,并应用改进遗传算法自动搜索优化调配方案,明显减少了优化计算时间.基于工业运行数据的实验结果表明,所得优化结果更能反映决策者对工艺实际性能指标的评价,获得比传统优化方法更满意的综合性能指标.

### 2 氧化铝配料倒槽过程数学模型

生料浆质量指标主要包括碱比 [Na/R], 钙比 [Ca/R] 和铝硅比 [Al/R]. 氧化铝配料倒槽过程就是根据当前一批满槽生料浆的质量指标和工艺要求指标,从中选出最优的组合进行混合,以配制满足熟料烧结要求的生料浆.

#### 2.1 优化变量

设当前批次满槽数为  $n$ , 第  $i$  槽状态为元素  $x_i$ , 取值 1 或 0, 则生料浆优化调配过程模型中  $n$  维向量  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  便为待优化变量.

#### 2.2 优化目标

氧化铝生料浆调配的主要目标是使生料浆的各个主要指标值符合工艺要求.即优化调配后,选槽组合的平均碱比  $F_{(Na/R)}$ , 钙比  $F_{(Ca/R)}$  和铝硅比  $F_{(Al/R)}$  应尽量接近工艺设定值. 设第  $i$  槽的  $Na_2O, CaO, Al_2O_3, Fe_2O_3$  和  $SiO_2$  的体积百分含量为  $K_{i(Na_2O)}, K_{i(CaO)}, K_{i(Al_2O_3)}, K_{i(Fe_2O_3)}$  和  $K_{i(SiO_2)}$ , 用  $S_{Na/R}, S_{Ca/R}$  和  $S_{Al/R}$  分别表示碱比、钙比和铝硅比的工艺设定值, 则优化目标为

$$F_{obj} = \min [ | F_{(Na/R)} - S_{Na/R} |, | F_{(Ca/R)} - S_{Ca/R} |, | F_{(Al/R)} - S_{Al/R} | ], \tag{1}$$

$$F_{(Na/R)} = f_{(Na/R)}(X) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i v_i K_{i(Na_2O)}}{\sum_{i=1}^n x_i v_i K_{i(Al_2O_3)} + \sum_{i=1}^n x_i v_i K_{i(Fe_2O_3)}}, \tag{2}$$

$$F_{(Ca/R)} = f_{(Ca/R)}(X) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i v_i K_{i(CaO)}}{\sum_{i=1}^n x_i v_i K_{i(SiO_2)}}, \tag{3}$$

$$F_{(Al/R)} = f_{(Al/R)}(X) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i v_i K_{i(Al_2O_3)}}{\sum_{i=1}^n x_i v_i K_{i(SiO_2)}}. \tag{4}$$

其中:  $v_i$  表示第  $i$  槽体积;  $a, b, c$  为体积与摩尔转换系数.

### 2.3 工艺约束

为保证工艺的连续性,倒槽后不允许满槽滞留,要求剩余各槽平均质量指标和所选倒槽数目符合工艺要求,则有

$$\begin{cases} L_{Na} & R_{(Na/R)} & U_{Na}, L_{Ca} & R_{(Ca/R)} & U_{Ca}, \\ L_{Al/R} & R_{(Al/R)} & U_{Al/R}, N_{min} & N & N_{max}. \end{cases} \tag{5}$$

其中:  $R_{(Na/R)}, R_{(Ca/R)}$  和  $R_{(Al/R)}$  为剩余槽的平均碱比、钙比和铝硅比;  $U_{Na}, L_{Na}, U_{Ca}, L_{Ca}$  和  $U_{Al}, L_{Al}$  为剩余槽平均碱比、钙比和铝硅比的上下限;  $N_{max}$  和  $N_{min}$  为选槽数目的上下限. 于是有

$$R_{(Na/R)} = R_{(Na/R)}(X) = \frac{\sum_{i=1}^n (1 - x_i) v_i K_{i(Na_2O)}}{\sum_{i=1}^n (1 - x_i) v_i K_{i(Al_2O_3)} + \sum_{i=1}^n (1 - x_i) v_i K_{i(Fe_2O_3)}}, \tag{6}$$

$$R_{(Ca/R)} = R_{(Ca/R)}(X) = \frac{\sum_{i=1}^n (1 - x_i) v_i K_{i(CaO)}}{\sum_{i=1}^n (1 - x_i) v_i K_{i(SiO_2)}}, \tag{7}$$

$$R_{(Al/R)} = R_{(Al/R)}(X) = \frac{\sum_{i=1}^n (1 - x_i) v_i K_{i(Al_2O_3)}}{\sum_{i=1}^n (1 - x_i) v_i K_{i(SiO_2)}}. \tag{8}$$

## 3 基于满意优化原理的氧化铝生料浆调配

### 3.1 目标满意度函数的确定

在氧化铝配料过程中,考虑到环境复杂性的影响,系统和目标约束往往具有一定的可调整性,对于系统可行域远离期望目标点一定范围内的值,可认为是满意的.根据氧化铝配料各指标的要求,定义区间性指标的决策要求为

$$| f_{Na/R}(X) - S_{Na/R} | \leq \Delta_{Na/R}, \tag{9}$$

$$| f_{Ca/R}(X) - S_{Ca/R} | \leq \Delta_{Ca/R}, \tag{10}$$

$$| f_{Al/R}(X) - S_{Al/R} | \leq \Delta_{Al/R}, \tag{11}$$

其中  $\Delta_{Na/R}, \Delta_{Ca/R}$  和  $\Delta_{Al/R}$  分别为碱比、钙比和铝硅比与设定值的允许偏差.

在环境和工艺制约下,当实际工艺指标无法满足要求时,可对约束进行适当调整,以达到一定程度的满意.用  $m_{Na/R}, M_{Na/R}, m_{Ca/R}, M_{Ca/R}, m_{Al/R}$  和  $M_{Al/R}$  分别表示各指标扩大的约束范围,则式(9)~(11)可调整为

$$\begin{aligned} S_{Na/R} - \Delta_{Na/R} - m_{Na/R} & \leq f_{Na/R} \leq S_{Na/R} + \Delta_{Na/R} + M_{Na/R}, \\ S_{Ca/R} - \Delta_{Ca/R} - m_{Ca/R} & \leq f_{Ca/R} \leq S_{Ca/R} + \Delta_{Ca/R} + M_{Ca/R}, \\ S_{Al/R} - \Delta_{Al/R} - m_{Al/R} & \leq f_{Al/R} \leq S_{Al/R} + \Delta_{Al/R} + M_{Al/R}. \end{aligned} \tag{12}$$

$$f_{Ca/R} = S_{Ca/R} + Ca/R + M_{Ca/R}, \quad (13)$$

$$S_{Al/R} = Al/R - m_{Al/R}$$

$$f_{Al/R} = S_{Al/R} + Al/R + M_{Al/R}. \quad (14)$$

令

$$\begin{cases} f_{Na/R}(\min) = S_{Na/R} - Na/R, \\ f_{Na/R}(\max) = S_{Na/R} + Na/R, \\ f_{Ca/R}(\min) = S_{Ca/R} - Ca/R, \\ f_{Ca/R}(\max) = S_{Ca/R} + Ca/R, \\ f_{Al/R}(\min) = S_{Al/R} - Al/R, \\ f_{Al/R}(\max) = S_{Al/R} + Al/R. \end{cases} \quad (15)$$

定义满意度为 $[0, 1]$ , 其中1表示最满意, 0表示最不满意. 据此可定义各个性能指标的满意度函数如下:

$$\begin{cases} Na/R = \\ 0, f_{Na/R} < f_{Na/R}(\min) - m_{Na/R}; \\ 1 - \frac{f_{Na/R}(\min) - f_{Na/R}}{m_{Na/R}}, \\ f_{Na/R}(\min) - m_{Na/R} < f_{Na/R} < f_{Na/R}(\min); \\ 1, f_{Na/R}(\min) < f_{Na/R} < f_{Na/R}(\max); \\ 1 - \frac{f_{Na/R} - f_{Na/R}(\max)}{M_{Na/R}}, \\ f_{Na/R}(\max) < f_{Na/R} < f_{Na/R}(\max) + M_{Na/R}; \\ 0, f_{Na/R} < f_{Na/R}(\max) + M_{Na/R}. \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} Ca/R = \\ 0, f_{Ca/R} < f_{Ca/R}(\min) - m_{Ca/R}; \\ 1 - \frac{f_{Ca/R}(\min) - f_{Ca/R}}{m_{Ca/R}}, \\ f_{Ca/R}(\min) - m_{Ca/R} < f_{Ca/R} < f_{Ca/R}(\min); \\ 1, f_{Ca/R}(\min) < f_{Ca/R} < f_{Ca/R}(\max); \\ 1 - \frac{f_{Ca/R} - f_{Ca/R}(\max)}{M_{Ca/R}}, \\ f_{Ca/R}(\max) < f_{Ca/R} < f_{Ca/R}(\max) + M_{Ca/R}; \\ 0, f_{Ca/R} < f_{Ca/R}(\max) + M_{Ca/R}. \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} Al/R = \\ 0, f_{Al/R} < f_{Al/R}(\min) - m_{Al/R}; \\ 1 - \frac{f_{Al/R}(\min) - f_{Al/R}}{m_{Al/R}}, \\ f_{Al/R}(\min) - m_{Al/R} < f_{Al/R} < f_{Al/R}(\min); \\ 1, f_{Al/R}(\min) < f_{Al/R} < f_{Al/R}(\max); \\ 1 - \frac{f_{Al/R} - f_{Al/R}(\max)}{M_{Al/R}}, \\ f_{Al/R}(\max) < f_{Al/R} < f_{Al/R}(\max) + M_{Al/R}; \\ 0, f_{Al/R} < f_{Al/R}(\max) + M_{Al/R}. \end{cases} \quad (18)$$

### 3.2 综合满意度函数的确定

用线性加权的方式设计综合满意度函数, 使问题转化为综合反映全体优化目标的单目标优化问题, 有

$$\max F = \frac{\sum_{i=1}^3 w_i F_i(X)}{\sum_{i=1}^3 w_i}. \quad (19)$$

其中:  $F_i(X)$  为目标函数  $F_{(Na/R)}$ ,  $F_{(Ca/R)}$  和  $F_{(Al/R)}$  对应的规一化满意函数;  $w_i$  为相应权重, 用于反映设计者对性能指标  $F_i(X)$  的重视程度(一般根据已配制好的生料浆各个指标的满意程度, 自适应调整当前配制过程中相应指标的重视程度).

### 3.3 基于改进遗传算法的满意优化算法

遗传算法是一种高效并行搜索算法, 具有算法简单、解决非线性问题鲁棒性强等优点<sup>[5,6]</sup>, 但传统遗传算法存在局部搜索能力较弱、易早熟收敛等问题. 本文应用自适应交叉概率和变异概率的遗传算法求解倒槽满意优化问题. 该算法选用二进制编码表示倒槽和不倒槽, 染色体编码长度为当前满槽总数, 每个染色体就是问题的一个解. 以式(19)的综合满意度函数值进行适应值计算, 适应值最大的染色体即为优化结果.

为避免优化问题收敛于局部最优解, 根据适应度函数自适应调整交叉概率和变异概率<sup>[7-10]</sup>, 如下式所示:

$$\begin{cases} P_c^{(k)} = P_c^{(0)} - (P_c^{(0)} - P_{c\min}) \exp(-u/N_c), \\ P_m^{(k)} = P_m^{(0)} - (P_m^{(0)} - P_{m\max}) \exp(-u/N_m). \end{cases} \quad (20)$$

其中:  $k$  为迭代次数;  $u$  为  $k-1$  次迭代时, 种群中适应度函数的最大值与最小值之差;  $P_c^{(0)}$  和  $P_c^{(k)}$  为交叉率的初始值和第  $k$  次迭代时的取值;  $P_m^{(0)}$  和  $P_m^{(k)}$  为变异率的初始值和第  $k$  次迭代时的取值;  $P_{c\min}$  和  $P_{m\max}$  为交叉概率的最小值和变异概率的最大值. 取  $P_c^{(0)} = 0.9$ ,  $P_m^{(0)} = 0.001$ ;  $P_{c\min} = 0.6$ ,  $P_{m\max} = 0.1$ ;  $N_c$  和  $N_m$  为给定常数, 用于模拟交叉概率和变异概率随适应度函数分散情况变化的快慢程度, 取  $N_c = N_m = 20$ .

这样在遗传迭代初期, 交叉概率大, 变异概率小, 确保计算过程平稳进行; 在迭代末期, 交叉概率减小, 变异概率增大, 确保优化问题跳出局部最优解.

### 4 工业应用实例

以一氧化铝厂2005年9月8日14:00的数据为例进行优化调度. 总槽数30个, 满槽数18个, 各满槽检测成分含量如表1所示.

表 1 当前满槽各成分检测含量值

槽号	CaO	Na <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
B6	11.00	18.73	5.22	3.25	25.93
B7	10.20	17.62	5.84	3.34	27.07
B8	11.28	17.02	5.77	3.36	27.75
B10	10.60	17.18	5.45	3.19	28.26
B11	10.38	16.92	5.80	3.41	27.23
B12	10.90	16.74	5.39	3.49	27.97
B13	10.50	18.43	5.05	3.22	26.84
B14	10.80	16.76	6.14	3.44	27.91
B15	10.10	19.63	5.12	3.26	26.42
B16	11.00	17.23	6.04	3.31	27.69
B17	11.35	18.25	5.36	3.21	25.91
B20	10.65	17.98	5.56	3.41	27.23
B21	10.75	17.91	5.94	3.36	26.95
B22	10.85	17.36	6.11	3.22	27.02
B24	11.00	16.83	6.11	3.38	28.00
B25	11.02	17.11	6.18	3.21	27.55
B27	10.10	17.53	5.77	3.42	27.46
B28	10.00	17.21	5.63	3.16	26.18

根据实际工艺状态,取  $N_{min} = 3, N_{max} = 8; L_N = 0.99, U_N = 1.10; L_C = 2.02, U_C = 2.15; L_A = 4.65, U_A = 4.83$ ; 各槽体积为  $311 \text{ m}^3$ ; 工艺设定  $[Na/R] [Ca/R] [Al/R] = 0.98 \ 2.075 \ 4.9$ .

遗传算法初始参数为:种群 pop-size = 100, 遗传代数  $T = 200, \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 1$ . 优化结果如表 2 所示.

表 2 给出了不同倒槽数目下的倒槽组合及其相应的满意度. 由运行结果知,该倒槽结果完全符合工艺要求. 应用满意优化方法可使多个目标向着最优解进化,最终达到以某一满意程度为标准的满意解. 采用满意优化方法可大幅度减少获取满意解的时间复杂度,极大地提高了操作效率.

为说明该方法的有效性,将它与枚举法和基本遗传算法的时间复杂度进行比较. 结果表明,该算法能快速有效地找到符合决策者要求的倒槽组合;采

用枚举和基本遗传算法,在满槽总数超过一定值时,计算时间不能满足现场工艺要求. 例如:当满槽总数超过 25 时,采用枚举法寻优时间超过 12 min,且随着满槽数目的增加,其寻优时间成指数增长;当满槽总数超过 46 时,遗传算法因为本身的局限性,寻优时间大多需用 10 min 以上,且会发生算法陷于局部最优,难以找到合适解的情况.

取该氧化铝厂 2005 年 9 月的满槽数据,运用满意优化方法进行调配计算,并与该月人工调配进行比较,结果如图 1 ~ 图 3 所示.

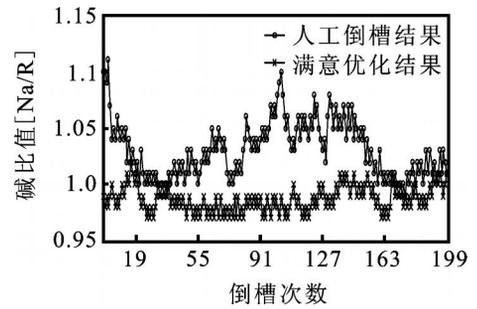


图 1 人工倒槽与满意优化算法倒槽碱比指标比较

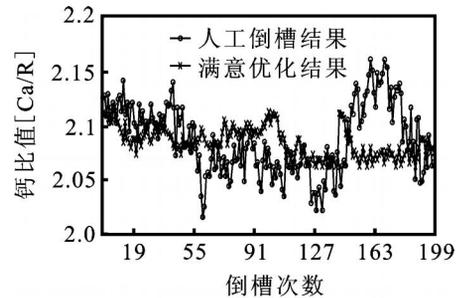


图 2 人工倒槽与满意优化算法倒槽钙比指标比较

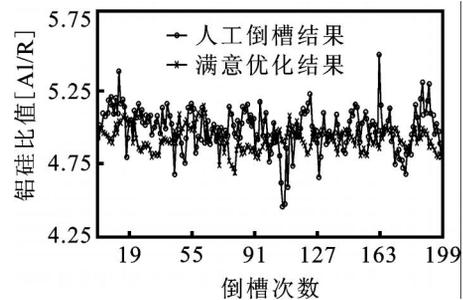


图 3 人工倒槽与满意优化算法铝硅比倒槽指标比较

表 2 智能倒槽满意优化结果

选槽数目要求	优化组合	选槽组合质量指标	剩余槽质量指标	满意度 / %
3	B11, B15, B25	0.99 2.075 4.93	0.99 2.093 4.75	80
4	B9, B13, B22, B27	0.98 2.081 4.91	0.97 2.002 4.84	75
5	B8, B10, B13, B21, B27	0.99 2.056 4.83	0.99 2.075 4.72	72
6	B6, B10, B11, B14, B15, B27	0.98 2.032 4.93	0.99 2.021 4.71	90
7	B6, B8, B10, B11, B12, B16, B22	0.97 2.031 4.84	0.99 2.097 4.69	68
8	B6, B7, B10, B11, B14, B19, B22, B26	0.98 2.021 4.98	0.99 2.018 4.67	85

由图中曲线可以看出,采用人工调度所得生料浆的各个主要指标值波动幅度较大,碱比、钙比和铝硅比分别达到 12.5%,10% 和 12%。这主要是因为采用人工调度方式,需要现场操作人员根据当前批槽的满槽情况以及质量指标,凭经验选择若干槽进行组合,经过反复多次计算,直到所选组合的平均指标值符合工艺要求;由于经验的局限性,难以系统考虑各个指标的综合要求,致使调配结果指标值波动严重,倒槽质量差,直接影响后续氧化铝工序的稳定生产。

采用满意优化算法可综合考虑各指标的协调要求,所得优化结果更能反映决策者对工艺实际性能指标的评价,使碱比指标平均合格率提高 13.6%,钙比指标平均合格率提高 1.2%,铝硅比指标平均合格率提高 0.8%。从而大幅度减少料浆指标的波动,且使倒槽后混合料浆的各项主要指标值更加接近指标设定值,稳定了生料浆质量。

## 5 结 论

氧化铝生料浆调配的倒槽优化问题是一个多目标多约束的组合优化问题,本文提出一种基于改进遗传算法的氧化铝倒槽过程满意优化方法。该方法采用性能指标满意度函数来体现优化过程对各性能指标的要求,而综合满意度函数体现了决策者在综合考虑系统各因素后作出的决策要求,更接近生产实际。计算结果显示,该方法应用于氧化铝配料倒槽过程优化,可以提高工作效率,减少生料浆指标值波动,使各项主要指标值更符合工艺要求,从而达到简化工艺、降低能耗、提高熟料质量和氧化铝产能的目的。

## 参考文献(References)

- [1] 阳春华,段小刚,王雅琳,等. 烧结法生产氧化铝生料浆的配料专家系统设计[J]. 中南大学学报, 2005, 36(4): 648-652.  
(Yang C H, Duan X G, Wang Y L, et al. Blending expert system for raw mix slurry in production of alumina with sintering process[J]. J of Central South University, 2005, 36(4): 648-652.)
- [2] 张葛祥,金炜东,胡来招. 多变量系统中多参数多目标满意优化研究[J]. 信息与控制, 2003, 12(6): 481-485.  
(Zhang G X, Jin W D, Hu L Z. Satisfactory optimization of multi-parameters and multi-objectives in multivariable system [J]. Information and Control, 2003, 12(6): 481-485.)
- [3] 冯惕,李少远. 一种新的模糊约束满意优化控制算法[J]. 控制与决策, 2004, 19(2): 187-190.  
(Feng T, Li S Y. New satisfying optimal control algorithm based on fuzzy constraints handling [J]. Control and Decision, 2004, 19(2): 187-190.)
- [4] 赵舵,金炜东. 多目标满意优化在模糊控制器设计中的应用[J]. 电力系统及自动化学报, 2003, 15(5): 64-69.  
(Zhao D, Jin W D. The application of multi-criterion satisfactory optimization in fuzzy controller design[J]. J of Electric Power System and Automation, 2003, 15(5): 64-69.)
- [5] Gareth R Beddoe, Sanja Petrovic. Selecting and weighting features using a genetic algorithm in a case-based reasoning approach to personnel rostering [J]. European J of Operational Research, 2006, 175(1): 649-671.
- [6] Fulya Altiparmak, Mitsuo Gen, Lin Lin, et al. A genetic algorithm approach for multi-objective optimization of supply chain networks[J]. Computers & Industrial Engineering, 2006, 51(1): 196-215.
- [7] Jong-bae Park, Young-moon Park, Jong-ryul Won, et al. An improved genetic algorithm for generation expansion planning[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(3): 916-922.
- [8] Frank H F Leung, Lam H K, Ling S H, et al. Tuning of the structure and parameters of a neural network using an improved genetic algorithm[J]. IEEE Trans on Neural Networks, 2003, 14(1): 79-88.
- [9] Akrami B, Karimi B, Moattar S M. Two metaheuristic methods for the common cycle economic lot sizing and scheduling in flexible flow shops with limited intermediate buffers: The finite horizon case [J]. Applied Mathematics and Computation, 2006, 183(1): 634-645.
- [10] Romeo M Marian, Lee H Luong, Kazem Abhary. A genetic algorithm for the optimisation of assembly sequences[J]. Computers & Industrial Engineering, 2006, 50(4): 503-527.