

文章编号 1000-5013(2001) 04-0422-06

制浆生产蒸煮过程多目标优化控制

金 福 江

(华侨大学信息科学与工程学院, 泉州 362011)

摘要 蒸煮过程是制浆造纸生产过程实施清洁生产的关键工段. 详细分析对连续蒸煮过程的工艺和模型, 提出一个对蒸煮过程进行的多目标决策. 然后, 将决策的结果转化成最优化控制参数的两级控制方案, 给出该优化方案应用的实例.

关键词 清洁生产, 硫酸盐法制浆, 连续蒸煮, 卡伯值, 多目标模糊决策

中图分类号 TS 743⁺. 12 : X 793 : TB 114. 2

文献标识码 A

制浆造纸工业是环境污染最严重的行业之一, 我国制浆造纸企业每年排放30亿 t 工业废水^[1]. 在制浆工业中, 蒸煮过程中产生的废液是造成污染的主要原因. 因此, 在制浆生产过程实施清洁生产策略, 是保护的重要措施^[2]. 文献 [3] 将蒸煮过程的各个控制目标经过加权, 转化为一个目标表达式, 再应用蒸煮过程的数学模型进行非线性规划, 从而达到优化控制的目的. 本文应用多目标模糊决策的方法, 将多目标模糊决策和过程控制技术相结合, 以硫酸盐法制浆的 Kamyr 连续蒸煮器为研究对象, 研究蒸煮过程的多目标优化控制.

1 蒸煮清洁生产多目标优化问题

1.1 Kamyr 连续蒸煮器的模型

蒸煮过程成浆的质量指标主要是指纸浆中木素的含量, 通常用卡伯值(Kappa)来表示. 它的大小不仅关系到纸浆的产率和硬度, 还直接影响到后续漂白工段氯化物的用量(即与漂白过程生产的废水的污染程度有关). 根据文献 [4, 5], 卡伯值的大小主要是由 H 因子和蒸煮液中的有效碱浓度决定. 即

$$\left. \begin{aligned} K &= A \cdot (H_n - H_s)^{\alpha} \cdot E_s^{\beta}, \\ H_n - H_s &= e^{B - S/TR} \cdot t, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 H_n 表示蒸煮终点的 H 因子, H_s 表示取样点 H 因子. H 因子的定义为

$$H = \int_0^t k \cdot dt, \quad (2)$$

式中 k 是脱木素反应的相对反应速率, t 是反应时间(min).

收稿日期 2001-07-13

作者简介 金福江(1965-), 男, 讲师

基金项目 国家自然科学基金资助项目

根据 Arrhenius 方程⁶⁾, k 由下式算得. 即

$$k = e^{B - \frac{S}{TR}}, \tag{3}$$

式中 S 是脱木素反应的活化能($\text{kJ} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$), R 是气体常数, 其值为 $8.32 \text{ J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$, B 是常数. 目前, 尚没有一个完善的理论来描述制浆过程碱消耗的机理. 但根据文献⁶⁾, 在大量脱木素阶段, 卡伯值与蒸煮液中碱浓度成线性关系. 其常数项与初始碱浓度有关, 可以用下面的经验公式来拟合. 即

$$K = a \cdot E_n + b \cdot E_s + c. \tag{4}$$

式(1)~(4)中, K 是纸浆卡伯值, E_n, E_s 是蒸煮区活性碱浓度和残碱浓度($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$), H 是 H 因子, T 蒸煮区的平均温度(K), t 是浆料经过蒸煮区的时间(min). 而 A, α, β, a, b 和 c 是由实验确定的常数, 其值要受到树种、硫化度、木片大小等条件的影响. 根据以上 Kamyr 连续蒸煮器的模型, 设计的控制系统只要完成对卡伯值的控制, 即完成对蒸煮过程黑液中残碱含量的控制, 达到减少蒸煮用碱量的目标.

1.2 蒸煮过程优化方法

由于清洁生产对蒸煮过程不仅有减少污染的要求, 还有降低能耗、提高纸浆质量和降低生产成本的多目标要求. 只是简单的控制卡伯值, 一味强调控制纸浆质量, 或者减少黑液中残碱含量, 都不能真正达到清洁生产的目的. 在实际对蒸煮过程的控制中, 为了达到清洁生产的要求, 应该将影响蒸煮过程的纸浆质量、用碱量、能耗、蒸煮时间等众多因素作为目标, 对蒸煮过程进行多目标优化决策, 得到最优的卡伯值. 然后, 再由控制系统根据最优卡伯值, 控制蒸煮过程. 优化过程如图1所示.

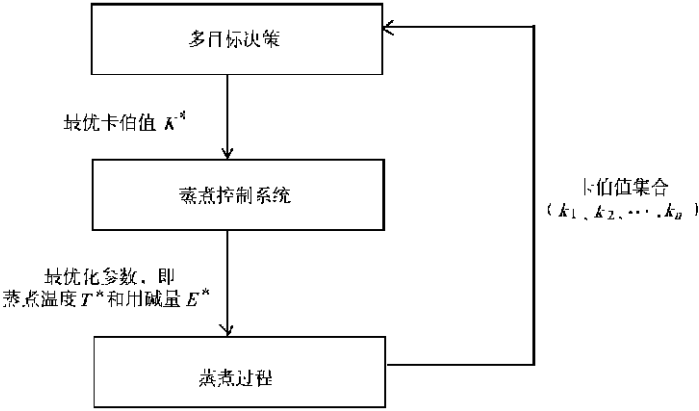


图1 蒸煮过程优化方法示意图

2 多目标模糊决策的原理⁷⁾

设决策论域 U 是评价方案集合

$$U = \{\text{方案 1, 方案 2, } \dots, \text{方案 } m\} = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}.$$

对所研究问题起重要影响作用的目标函数, 或者因素指标的集合为 $V = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$. 因此, 各个方案的因素指标向量为

$$u_j = (f_{1j}, f_{2j}, \dots, f_{mj})^T, \quad j = 1, 2, \dots, m.$$

把第 j 个方案的第 i 个因素指标, 记为 f_{ij} , 得到 m 个方案的 n 个因素. 即

$$F = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \dots & f_{1m} \\ f_{21} & f_{22} & \dots & f_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{n1} & f_{n2} & \dots & f_{nm} \end{bmatrix}.$$

对 F 采用加权相对偏差距离最小法^[7]. 当第 j 个方案的 i 个因素指标 f_{ij} 为定量指标时, 令

$$\delta_{ij} = \frac{|f_{ij}^0 - f_{ij}|}{f_{i\max} - f_{i\min}}, \quad i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m,$$

式中 $f_{i\max}$ 为各个方案第 i 项因素指标中最大指标值. 即

$$f_{i\max} = \max(f_{i1}, f_{i2}, \dots, f_{im}),$$

而 $f_{i\min}$ 为各方案第 i 项因素指标中最小指标值, 即 $f_{i\min} = \min(f_{i1}, f_{i2}, \dots, f_{im})$.

$$f_i^0 = \begin{cases} f_{i\max}, & \text{当因素指标 } f_i \text{ 为正指标时,} \\ f_{i\min}, & \text{当因素指标 } f_i \text{ 为负指标时.} \end{cases}$$

正指标是指因素指标越大, 方案越优的因素指标; 负指标是指因素指标越大, 方案越小的因素指标. 这里, δ_{ij} 称为相对偏差值, f_{i0} 称为标准值. 于是, $n \times m$ 个相对偏差值 δ_{ij} 就构成了一个模糊矩阵, 即

$$\Delta = \begin{bmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \dots & \delta_{1m} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \dots & \delta_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \delta_{n1} & \delta_{n2} & \dots & \delta_{nm} \end{bmatrix}.$$

设已经给出的因素重要程度模糊子集 $A = (a^1, a^2, \dots, a^n)$.

计算各方案因素指标向量 u_j , 其与 m 个方案中的 n 个指标的标准向量 $f^0 = (f_1^0, f_2^0, \dots, f_n^0)$ 的加权相对偏差距离为

$$d_j = d_j(u_j, f^0) = \frac{1}{a} \sqrt{\sum_{i=1}^n (a^i \cdot \delta_{ij})^2}, \quad j = 1, 2, \dots, m,$$

式中, $a = \sum_{i=1}^n a_i / n$ 为 n 项指标的平均值.

将 m 个标准向量 $f^0 = (f_1^0, f_2^0, \dots, f_n^0)$ 构成方案, 拟订为最理想的方案. 因此, m 个评价方案中, 最理想方案之间加权相对偏差距离 d_j 最小者相对应的方案 u_i , 应被选为最优方案, 即当

$$d_j = d_j(u_j, f^0) = \min(d_j), \quad 1 \leq j \leq m$$

时, 方案 u_j 为最优方案. 由最优的 u_j 确定蒸煮过程最优控制参数蒸煮温度 T^* 和用碱量 E^* .

3 实例分析

3.1 影响蒸煮过程因素分析

3.1.1 H 因子 这是蒸煮温度与蒸煮时间两个因素结合而成的一个变量, 用以控制蒸煮的终点. 通过对 H 因子的控制, 可以控制纸浆的质量.

3.1.2 初始碱浓度 E_s 蒸煮液初始的有效碱浓度. 对蒸煮过程的 H 因子、用碱量及卡伯值有

较大影响.

3. 1. 3 碱损失 M_r $M_r = M E_s(1 - n) W_1$. M 是黑液的总体积($L \cdot \min^{-1}$), W_1 为碱的价格, n 为回收率.

3. 1. 4 蒸汽消耗 Q 蒸煮过程所消耗蒸汽的热量, 是由蒸煮过程所加热的温度决定, 与蒸煮过程初始和终点温度差成正比. 即

$$Q = (G + L)(T - T_0)\lambda$$

其中 G 是进入蒸煮器的木片量($kg \cdot \min^{-1}$), L 是进入蒸煮器蒸煮液的量($kg \cdot \min^{-1}$), λ 为比热, T_0 是加热前的温度. 由于热量值比较大, 在优化过程中将热量值转化成产生蒸汽所需能源的价值.

3. 1. 5 碱回收花费 W 后续碱回收工段, 对一定残碱浓度的黑液进行回收处理的成本(W). W 和蒸煮终点蒸煮液碱含量有直接关系. 残碱浓度(C) 越大, 碱回收工段的负荷越大, 成本也就越高. 即

$$M_h = M \cdot E_s n W_r,$$

其中 M_h 是碱回收的成本, W_r 是回收碱的价格.

3. 2 控制方案初步选择

由蒸煮过程的卡伯值 k 决定控制方案. 根据实际蒸煮工艺要求控制过程, 卡伯值取大量脱木素阶段{ 25. 6, 26. 5, 28. 3, 29. 8} 集体的值.

3. 3 确定因素重要程度模糊子集

在对蒸煮过程实施清洁生产策略中, 蒸煮过程产生黑液中碱含量和碱回收成本是重点考虑的因素. 而纸浆质量和蒸汽消耗两个因素, 只要保持原控制指标即可. 最终经计算, 因素重要程度模糊子集为

$$A = (0. 17, 0. 34, 0. 23, 0. 11, 0. 15).$$

3. 4 确定因素指标矩阵 F

5个因素指标对各个方案的主要技术经济指标, 如表1所示. 根据技术指标, 可得出因素指标矩阵 F .

表1 5个因素指标对各个方案的主要技术经济指标表

指标	方案1 ($k = 25. 6$)	方案2 ($k = 26. 5$)	方案3 ($k = 28. 3$)	方案4 ($k = 29. 0$)	方案5 ($k = 29. 8$)
H 因子	372	344	271	237	232
$E_s/g \cdot L^{-1}$	9. 27	9. 92	10. 82	11. 26	11. 45
$M_r/\text{元} \cdot d^{-1}$	2 312	2 079	2 604	2 137	2 443
$Q/\text{元} \cdot d^{-1}$	223	201	158	121	108
$M_h/\text{元} \cdot d^{-1}$	7 344	6 604	8 270	6 787	7 641

3. 5 方案评价

应用加权相对偏差距离最小进行决策. 由各个方案的因素指标矩阵 F 得知, 各因素指标的指标值向量为

$$f^0 = (232, 9. 27, 2 079, 108, 6 604).$$

其相对偏差模糊矩阵

$$\Delta = \begin{bmatrix} 1 & 0.800\,0 & 0.238\,6 & 0.035\,7 & 0 \\ 0 & 0.298\,2 & 0.711\,1 & 0.9128 & 1 \\ 0.443\,8 & 0 & 1 & 0.110\,5 & 0.693\,3 \\ 1 & 0.808\,7 & 0.434\,8 & 0.113\,0 & 0 \\ 0.414\,2 & 0 & 1 & 0.109\,8 & 0.624\,4 \end{bmatrix}.$$

根据加权相对偏差距离公式, 经计算可得

$$d = (1.463\,5, 1.052\,6, 1.899\,4, 0.979\,1, 1.599\,5).$$

由此可以看出, 方案4($k=29.0$)是最优方案.

3.6 根据多目标决策得到最优卡伯值 K^*

由公式(1)~(4)分别算出蒸煮温度、蒸煮时间、初始碱浓度和用碱量最优控制参数. 将该最优控制参数送至蒸煮过程控制系统, 完成对蒸煮过程的多目标优化控制.

3.7 操作条件

以日产380 t 风干浆的 Kamyr 连续蒸煮器为例, 其操作条件如表2所示. 表中 $\rho_{\text{木}}$ 为木片密度, $\lambda_{\text{木}}$ 为木片比热, U 为液比, θ 为蒸煮温度, θ_0 为进入加热区物料的温度. 计算中, 系数值 A , α , β , a , b 和 c 分别为388 480, $-0.381\,8$, -1.25 , $2.153\,0$, $-2.062\,0$ 和159.473 6.

表2 Kamyr 连续蒸煮器操作条件表

$\rho_{\text{木}}/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	160	$\lambda_{\text{木}}/\text{kJ}\cdot(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$	1.34
K	30	$W_r/\text{元}\cdot\text{t}^{-1}$	600
$U/\text{kg}\cdot\text{L}^{-1}$	1~3.2	$W_l/\text{元}\cdot\text{t}^{-1}$	1700
$C/\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	5~10	$Q_u/\text{kJ}\cdot\text{t}^{-1}$	29 307 600
$n/(\%)$	90	$R/\text{J}\cdot(\text{mol}\cdot\text{K})^{-1}$	500
$\theta(^{\circ}\text{C})$	150~165	$W/\text{元}\cdot\text{t}^{-1}$	500
$v/\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$	330	B	8.32
$\theta_0(^{\circ}\text{C})$	120	$F/\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$	133.76

3.8 优化前后卡伯值的影响

优化前后不同卡伯值下, 蒸煮过程控制的温度和 H 因子对比, 如表3所示.

表3 优化前后用蒸煮温度、碱量对比表

K	优化前参数		优化后参数		$H/(\%)$
	$\theta(^{\circ}\text{C})$	$H/(\%)$	$\theta(^{\circ}\text{C})$	$H/(\%)$	
29.8	155	18.0	156	17.77	-1.3
29.0	155	18.0	157	17.12	-5.2
28.3	156	18.0	158	17.48	-2.9
26.5	159	18.0	161	17.63	-3.6
25.6	158	18.5	160	17.86	-3.5

4 结束语

本文基于过程建模和优化技术, 提出了一种多目标决策与过程控制优化技术相结合的清洁生产策略. 优化结果如表3所示. 从表中可以看出, 优化后碱的用量减少5.2%. 如果以1台日产风干浆380 t、硫化度为27%~30%的 Kamyr 连续蒸煮器为例, 并假设碱回收工段的碱回收

率为90%。通过优化后,每天在蒸煮过程中少用碱0.804 t,每年少用碱289.31 t。它不仅明显减轻了蒸煮废液对环境的污染,而且仅节约用碱一项的年收益可达49万元。优化结果同时说明,由于蒸煮温度提高,耗电量比实施优化前略有提高。但电量增加的生产成本,远小于用碱量减少和碱回收装置负荷减少节约的成本,总体的优化效果还是满意的。因此,本项研究的结果既符合实情又是合理的。多目标决策与过程控制优化技术相结合的优化方法,对制浆清洁生产的研究具有普遍意义。该方法在实际制浆造纸生产过程中,如果进一步推广,将会带来更大的经济效益。

参 考 文 献

- 1 曹朴芳.我国造纸工业污染防治概况[J].中国造纸,1994,(5):60~65
- 2 任 欣.我国草浆造纸行业清洁生产机会[J].环境科学,1997,18(2):82~86
- 3 肖 兰.基于建模优化技术的清洁生产策略[J].浙江大学学报(工学版),1998,32(增刊):777~781
- 4 Mortimer R D, Fleming B I. The interrelationship of residual and initial alkali concentrations for kraft and soda pulping at constant H -factor[J]. Tappi., 1984, 167(4):120~134
- 5 Vlado M. A mathematical model for kraft pulping expressed by a logarithmic straight-line equation[J]. Tappi., 1993, 176(11):105~125
- 6 赵觉生.麦草浆蒸煮过程控制数学模型的研究[J].中国造纸,1992,(6):19~24
- 7 张 跃,邹寿平,宿 芬等.模糊数学方法及其应用[M].北京:煤炭工业出版社,1992.266~274

Multiple-Target Optimizing Control of Cooking Process in Pulping Production

Jin Fujiang

(College of Info. Sci. & Eng., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

Abstract Cooking process is the key work section for pulping and papermaking to carry out clean production. Starting from a detailed analysis of the technology and the model of continuous cooking process, a multiple-target decision on cooking process is advanced. And then, the result of decision is changed into parameters of optimizing control, and a two-level optimizing control plan which implements control on cooking process by control system. And finally, examples of applying this optimizing plan are given.

Keywords clean production, pulping by sulfate method, continuous cooking, kappa value, multiple-target fuzzy decision