

论过程控制系统的次优化方法*

(IV)线性规划的卡边方法

王永初

(华侨大学精密机械工程系, 泉州 362011)

摘要 数理规划是生产过程优化设计的常用方法. 文中提出利用变量卡边、系统结构分层、流程控制分区的方法, 使理论设计演变成工程设计; 并提出应用动态补偿的匹配方法, 使系统达到动态优化的目标.

关键词 线性规划, 分层控制, 动态补偿

分类号 TB 114. 2

线性规划是过程控制的一种常用静态优化方法, 但是生产过程模型多数是不符合或不适用线性规划的应用条件. 不符合是指模型或目标函数是非线性的, 人们发现若将生产过程变量进行一些预处理, 例如生长因素 $X_1 = e^{\theta}$ 或 $\theta = \frac{1}{2} \ln X_1$, $X_2 = Z^2$ 或 $Z = \sqrt{X_2}$ 均可以找到一个可引入模型或目标函数的线性替代变量. 用替代变量代替原变量并引入线性规划问题, “不符合”线性规划的限制条件就可转变成“符合”, 关键是按照线性规划的要求进行有关变量的预处理. 不适用是指要解决的问题变量太多, 按线性规划方法难以达到生产过程的实时控制, 一种可行的办法是将次要的变量卡边, 使求解问题大大简化. 这种部分变量设置在合适的数值上, 而其他变量按优化求解, 因此属于次优化的研究范畴. 生产过程中的 SPC 控制系统, 一般都是采用这种方法来设计其最优给定值.

1 线性规划与卡边控制^[1~2]

若记 Z_i 为生产过程变量, 经下列函数运算, 即 $X_i = f_i(Z_i)$ 或者 $X_i = f_i(Z_1, Z_2, \dots, Z_k)$, 加以预数据处理, 转化成线性规划变量 X_i . 于是可用目标函数 $J(X) = \sum_{i=1}^N C_i X_i$ 及限制条件式

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^N A_{ji} X_i &\geq B_j (\text{或} \leq B_j) \quad j = 1, 2, \dots, N, \\ X_i &\geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

的线性规划问题来决定 SPC 系统的给定值 X_i . 由于 N 往往是一个很大的整数, 要实时确定

* 本文 1995-09-06 收到; 福建省自然科学基金资助项目

$X_i (i=1, 2, \dots, N)$ 是很困难的, 因而按经验将某些 X_i 事先设定在合适的数值上, 从而使线性规划变量的个数由 N 减少至 n , 即

$$J(X) = \sum_{i=1}^N C_i X_i, \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^N A_{ji} X_i &\geq b_j (\text{或} \leq b_j) \quad j = 1, 2, \dots, n, \\ X_i &\geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, n. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

在此基础上按线性规划的单纯形算法进行求解. 为使不等式的约束条件演变成等式的约束条件, 在式(3)中加入 m 个称之为基变量的松弛变量, 从而使线性规划问题可构成一个凸集, 即

$$J(X) = \sum_{i=1}^n C_i X_i + \sum_{j=1}^m C_{n+j} X_{n+j}, \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^n A_{ji} X_i + X_{n+j} &= b_j \quad j = 1, 2, \dots, m, \\ X_i &\geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, n+m. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

最优解处在该凸集的顶点上, 求解过程就是不断用更优的新顶点替代旧顶点, 直至找到最优解为止. 由式(4)可知, 当 $X_i = 0 (i=1, 2, \dots, n)$ 时, 则有 $X_{n+i} = b_i$. 因此, 基变量构成一个顶点, $X = [0, 0, \dots, 0, b_1, b_2, \dots, b_m]^T$. 但这个顶点不一定是最优顶点, 尚需进行顶点的替代搜寻, 这个过程归纳如下:

(1) 由式(4)求出 X_{n+j} , 并代入目标函数 $J(x)$, 得到

$$\begin{aligned} J(X) &= \sum_{i=1}^n C_i X_i + \sum_{j=1}^m C_{n+j} (b_j - \sum_{i=1}^n a_{ji} X_i) \\ &= \sum_{j=1}^m C_{n+j} b_j + \sum_{i=1}^n X_i (C_i - \sum_{j=1}^m a_{ji} C_{n+j}). \end{aligned}$$

(2) 确定替换变量. 替换过程是选择一个非基变量(换入量)替代其中一个基变量(换出量), 使 $J(X)$ 更进一步趋向最优解. 如求最大函数值的场合, 可取 $X_i \geq 0 (i=1, 2, \dots, n)$, 使 $P_i > 0$, 就可使 $J(X)$ 的新值比旧值更大. P_i 有多种选择方法, 其中一种是取 $\max[P_1, P_2, \dots, P_n]$ 对应的那一个非基变量作换入量. 对于极小值问题, P_i 取值为

$$P_i = \max[|P_1|, |P_2|, \dots, |P_n|],$$

其中 $P_i = C_i - \sum_{j=1}^m Z_j C_{n+j}$. 换入变量取定以后, 换出变量 X_{n+j} 按下式选择, 也即 $Z_j = \min\{b_j / z_{ji}\} (i=1, 2, \dots, m)$. 这种问题求解方法已相当成熟并有专门的计算机软件可以采用. 因此, 其应用成败与效果取决于次要生产过程变量的选取和合理的卡边.

2 模型的分层与分区控制^[3]

一个工厂包含许多工序, 每一个工序的控制品质均会影响到全局的生产效益, 因此单纯按投入最小的效益最大, 其线性规划的变量便相当多. 即使部分变量卡边, 也难于实时控制, 因而分层与分区控制是很重要的^[4]. 这里以聚丙烯晴过程为例, 这个过程是由丙烯晴单体, 丙烯酸甲脂以及衣康酸单体在夹套反应釜里聚合完成的. 依照工艺生产的顺序与聚合反应有关的分区有 2 个(丙烯晴单体工序和丙烯酸甲脂工序)及 1 个添料工序(衣康酸单体), 并可构成二分层控制系统, 如图 1 所示. A 为上层次, B_1 与 B_2 为下层次, A 层次调节速度较慢, 仅起着修正 B_1 与 B_2 层次的 SPC 系统的给定值; B_1 与 B_2 层次是快速调节层次, 实时控制主要体现在这

个层次上. 过程分区为 I (丙稀腈单体工序)、II (丙烯酸甲脂工序)、III (独立供料工序, 如衣康酸单位) 与反应釜工序 IV. 图 1 中以 F_x 表示上游供料, W 为独立供料, Y 为聚合丙稀腈出料, W_s 为冷却水流量. 现以反应釜分区为例说明次优化的具体实施过程.

2.1 A 控制层次的决策⁽⁵⁾

A 控制层次的优化决策是保证对供料 F_x 的合理分配. 根据物料平衡关系, 可得

$$\alpha_1 \tilde{X}_1 + \alpha_2 \tilde{X}_2 = F_x, \quad (6)$$

其中 \tilde{X}_1, \tilde{X}_2 与 F_x 均表示相应物料流量计的统一仪表信号, α_1 与 α_2 为模型常数, 且 $\alpha_1 = 0.1667, \alpha_2 = 0.3333$. 若记 Y (流量代表统一的信号) 为反应釜的成品流出量, 显然 Y 为 $\tilde{X}_1, \tilde{X}_2, \tilde{X}_3$ 、反应釜控制压力 P 与温度 θ_1 的函数, 即 $y = f(\tilde{X}_1, \tilde{X}_2, \tilde{X}_3, \theta, P)$. 现对 \tilde{X}_3 实行单独的恒给定值流量控制, 即视 \tilde{X}_3

卡边. 我们可在生产现场进行数据实例, 找出 $y(i)$ 达到最大值时, $\tilde{X}_1, \tilde{X}_2, \theta_1$ 与 P 的对应函数关系, 再将 $y(i) (i=1, \dots, n)$ 的测试数据按回归分析方法, 拟合成一个条件方程式, 即

$$\bar{P} \leq \beta_1 \tilde{X}_1 + \beta_2 \tilde{X}_2 + \beta_3 \theta_1, \quad (7)$$

其中 \bar{P} 为压力变送器仪表信号的中间值, 且 $\bar{P} = 0.5, \beta_1 = 0.125, \beta_2 = 0.125, \beta_3 = -0.1667$. 由于 \tilde{X}_1 与 \tilde{X}_2 制作的代价不同, 希望控制的结果能使总成本达到最低. 记 $J(x)$ 为反应釜消耗 \tilde{X}_1 与 \tilde{X}_2 原料的成本, 则

$$J(X) = \tilde{C}_1 \tilde{X}_1 + \tilde{C}_2 \tilde{X}_2, \quad (8)$$

于是式(8), 式(6)与式(7)构成一个线性规划问题. 因此, A 控制决策层次是一个在线辨识 Y 优化模型. 在线实施 LP 运算, 并在线决定 \tilde{X}_1, \tilde{X}_2 与 θ_1 最优值的系统, 它是卡边条件下的次优化系统.

2.2 B₁ 与 B₂ 控制层次的实施

B₁ 与 B₂ 层次的控制功能是保证 A 层次决策的准确与可靠地实施. B₁ 有 3 个流量控制系统, 其中 \tilde{X}_3 是定值控制, 而 \tilde{X}_1 与 \tilde{X}_2 则是随动系统, 其给定由 A 层次决定. 因此, \tilde{X}_1 与 \tilde{X}_2 流量控制系统也是 SPC 系统. A 与 B₁ 层次的联系如图 2 所示, 其中 D 为 B₁ 的附加层次, 由独立调节器与恒给定值信号 \tilde{X}_3^* 组成 \tilde{X}_3 卡边控制系统; B₁ 包括 \tilde{X}_1 与 \tilde{X}_2 两个调节器, 它们均接 SPC 给定的信号. B₂ 层次同 B₁ 层次是并列且处于同等地位的, 它由控制冷却水流量 W_s 与加热蒸汽流量 Q_s 的分程调节器组成.

3 层次模型间的动态协调

卡边 LP 运算仅起着系统的静态优化作用而忽略了瞬间的动态关联, 实际在 \tilde{X}_1 与 \tilde{X}_2 变化的瞬间就会影响 Y 值及产品质量, 所以 B₁ 与 B₂ 两个层次不能严格分离. 从 SPC 优化控制

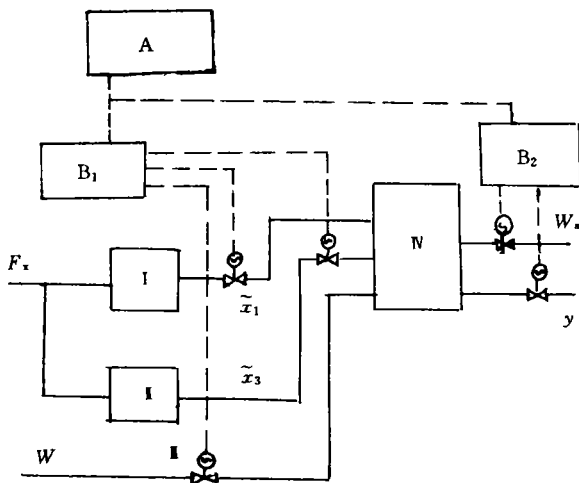


图1 设备分区与系统分层

的角度来分析,则反应釜内的聚合温度 θ_1 是需要控制的,也即使 θ_1 严格动态地跟踪 SPC 的设定数值,这就要求在总供料变化的同时对冷却水流量 W_c 也要加以控制. 图 3 表示 B_1 与 B_2 的动态关联设计. B_2 是以 SPC 系统 θ_1^* 设定 $\theta_1 \sim \theta_2$ 串级方程调节为主体,引入加减器与动态特性补偿器组成的关联部分,协调 B_1 与 B_2 的动态响应. $M_1(S)$ 与 $M_2(S)$ 由 X 至 θ_1 的传递函数 $G_X(S)$, θ_i (进料温度) 至 θ_1 (反应温度) 间的传递函数 $G_i(S)$, 以及 $\theta_1 \sim \theta_2$ 串级调节分程系统的控制通道特性 $G_u(S)$ 确定. 即

$$M_1(S) = -G_X(S)/G_u(S),$$

$$M_2(S) = -G_i(S)/G_u(S). \quad (9)$$

不同结构的反应釜和不同的环境条件, $G_X(S)$, $G_i(S)$ 及 $G_u(S)$ 均可能不同,但这 3 个特性很容易由现场测试求得. 加入 $M_1(S)$ 与 $M_2(S)$ 后, A 层次及 B_1 与 B_2 层次之间便达到最优的信号动态匹配.

4 结束语

系统变量多是现代控制理论发生“维数灾”的另一个原因,它比高阶系统的“维数灾”影响大. 多变量系统卡边可大大简化系统的设计及最优化运算的工作量. 作者认为对复杂生产过程控制系统的设计,欲进行整体动态优化是十分困难的;而本文提出的次优化设计方法具有工程的实用价值,这套方法包括如下步骤.

(1) 按工艺流程划分区,并按控制目标划分控制层次.

(2) 对大量的次要变量实行卡边,卡边方式有两种办法,一种是控制方式,即将次要变量纳入某些局部定值系统的回路内,以消除其变化造成的影响;另一种是恒值控制,即将其始终调整在一个合适的数值上.

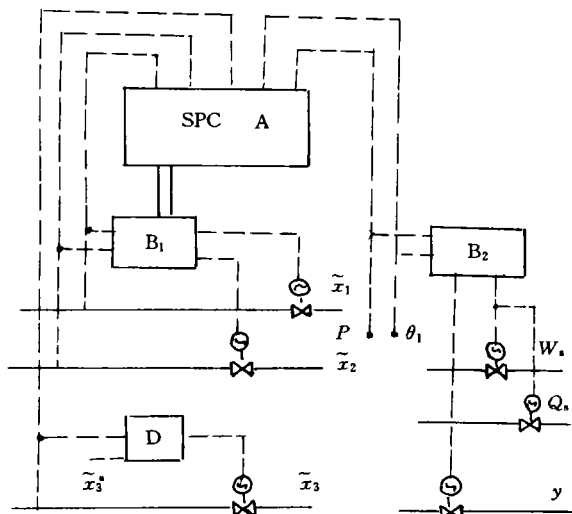


图 2 A 与 B_1 及 B_2 层次系统的联系

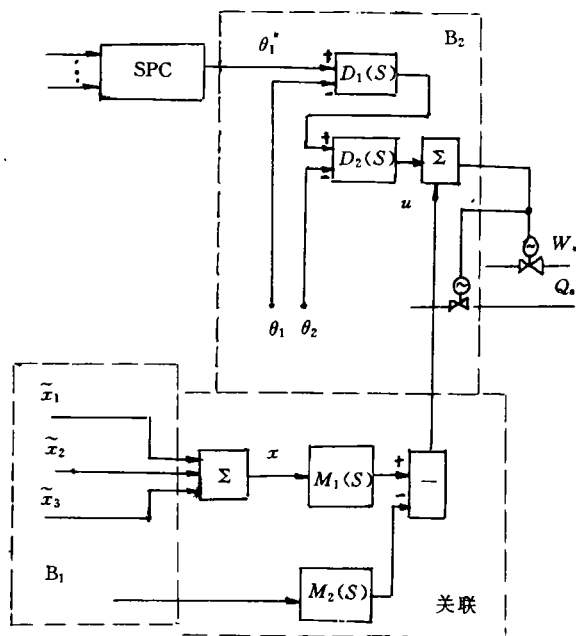


图 3 B_1 与 B_2 的动态关联

(3) 采用卡边线性规划,寻找主变量(不止一个)的最优静态值,并通过 SPC 系统直接操作(或修改)下一层次系统的设定值.

(4) 引入关联部份(或称关联网络),使各层次之间达到动态匹配.

这种设计方法看似静态优化,但实际上却可达到动态优化的目的.

参 考 文 献

- 1 Casti J. The linear quadratic control problem. SIAM Rev. ,1980,22(4):459~485
- 2 Elbert T T. Estimation and control of systems. New York:Van Nostrand Reinhold,1984. 377~403
- 3 Frank L L. Optimal control. New York:John Wiley & Sons,1986. 102~135
- 4 王永初. 数据资源与决策. 贵阳:贵州人民出版社,1988. 164~221
- 5 王永初,任秀珍. 节能控制系统. 北京:中国石化出版社,1994. 501~541

On the Suboptimal Method for the Process Control System (VI) Borderline Method of Linear Programming

Wang Yongchu

(Dept. of Prec. Mech. Eng. , Huaqiao Univ. , 362011, Quanzhou)

Abstract Mathematical programming is the method in common use for the optimal design of productive process. By applying such methods as variable on borderline, hierarchical system structure, and zoning flow control, theoretical design will be developed into engineering design. By applying matching method of dynamic compensation, the system will be able to attain the objective of dynamic optimization.

Keywords linear programming, hierarchical control, dynamic compensation