

论过程控制系统的次优化方法*

(Ⅲ)极值卡边次优化系统

王永初

(华侨大学精密机械工程系, 泉州 362011)

摘要 提出次要变量卡边的极值搜寻控制系统的两种方法:一种是两个主变量的中的一个实行最优估值,另一个试探搜寻,另一种是直接卡边搜寻.文中还对其实现时的鲁棒性进行比较.

关键词 极值控制,系统估值,鲁棒性

分类号 TB 114.2

生产过程控制的目标是投入的原材料和能耗最小,而生产出的产品数量最多、品质最好.这个任务就不是一个控制系统所能完成的,而需要在总体目标布局下,由分散的各个系统共同协调来实现.最优化理论与大系统理论就是为解决此类问题而提出并逐渐完善的.然而采用这种完善的理论来解决生产过程的问题,至今仍微乎其微.原因在于描述生产过程的数学模型异常复杂,往往变参数、非线性与大滞后,而且目标函数不止一个.因此,卡边控制被认为是现实的优化设计方法^[1].所谓卡边就是事先根据经验将模型中的某些待定参数或变量设计在合适的数值,而将求解的问题大大地简化.用通俗的话来说,卡边控制就是保留一些主要的变量(或参数),去掉一些次要的变量(或参数),预设一些可凭经验确定的变量(或参数).

1 单变量极值卡边系统

一个单变量有极值的目标函数 $J(x)$, 其极值点 (J^*, x^*) 由极值条件决定, 极值条件可分为 2 种情况: (1) 最大值条件: $\partial J(x)/\partial x = 0$ 且 $\partial^2 J(x)/\partial x^2 \leq 0$; (2) 最小值条件: $\partial J(x)/\partial x = 0$ 且 $\partial^2 J(x)/\partial x^2 \geq 0$. 但 x 变量要限制在 (x_{\min}, x_{\max}) 内运行. 在此范围内 $J(x)$ 仅有一个峰值, 因而一个比较复杂的多峰极点问题就转变成单峰极值的简单问题.

在很多场合下 $J(x)$ 是一个泛函数^[2], 因为 x 可能是一系列可测与不可测变量的函数^[3], 记为

$$\begin{aligned} x &= f(u_1, u_2, \dots, u_n) \\ &= f(u_1, u_2, \dots, u_k, u_{k+1}, \dots, u_n), \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $u_1 \sim u_k$ 为可测变量; $u_{k+1} \sim u_n$ 为不可测变量. 通常可根据生产过程的知识、物理与化学的基本关系式、物质与能量守恒定律, 对某些 $u_i (i=1, 2, \dots, n)$ 卡边如下

* 本文 1994-09-06 收到

(1) u_i 选在其定义域的边界上 $u_{i \min}$ 或 $u_{i \max}$, 若 J 与 u_i 是单调上升函数, 则取

$$u_i^* = \begin{cases} u_{i \max} & (\text{求极大值的情况}), \\ u_{i \min} & (\text{求极小值的情况}); \end{cases}$$

反之, 则取 $u_i^* = u_{i \min}$ (求极大值时) 或 $u_i^* = u_{i \max}$ (求极小值时)。

(2) u_i 的最优值不在 $[u_{i \min}, u_{i \max}]$ 边界上, 而在边界 i 内. 例如, 化工生产过程中的一氧化碳转化炉, 转化率 η 为炉温 θ_1 和汽/气比值 α 的函数. 因此, η 是 θ_1 与 α_2 的双变量函数, 即 $\eta(x) = \eta(\theta_1, \alpha)$. 不同的一氧化碳转化炉, 均可以由实验作出如图 1 所示的转化率曲线图. 由图 1 可以看出, 只要 α 卡在 α_2 或者 θ_1 卡在 θ_1^* 上, 则 η 就可以变成一个单变量极值控制系统.

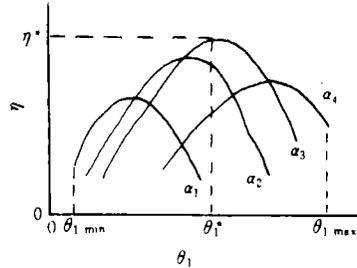


图 1 η 与 α 及 θ_1 的关系示意图

作者曾在上海吴泾化工厂对一氧化碳转化率控制进行试验研究, 结果发现 α 与 θ_1 在调节过程中有关联作用⁽⁴⁾. 在调整水蒸量的时候会同时影响 α 值与 θ_1 的变化, 而 α 值受影响的因素, 按以往的 θ_1^* 与 α 的串级控制方式, 不仅能保证同时达到 $\eta(\theta_1^*, \alpha^*)$ 点, 还会造成大量补充水蒸汽的能源损失. 一种办法是 θ_1^* 与 α^* 分别进行控制, 但这需要引入补充水蒸汽流量的在线估计系统 $\hat{\theta}_s$, 于是对 α 的控制就演变成对 $\hat{\theta}_s$ 的控制. 修改后的控制方案为两个独立的子系统, 如图 2 所示. 其中 (a) 为 $\hat{\theta}_s$ 估值的 SPC 系统; (b) 为 $\Delta\theta_1^*$ 搜寻的 η^* 极值系统.

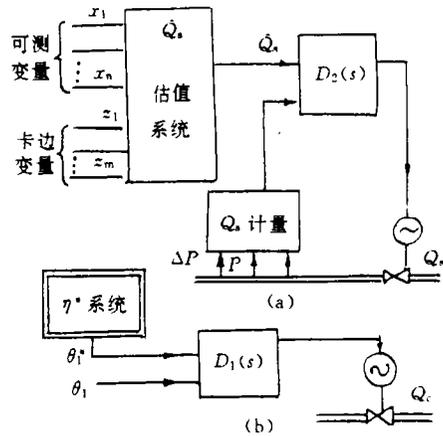


图 2 θ_1^* 与 α^* 分解卡边系统

2 模型化处理

将一个复杂多变量的极值控制系统演变为单变量简单的极值控制系统, 模型化处理是绝对必要的. 它是对许多次要因素实行卡边的先决条件. 这里仍以一氧化碳转化率 η 的极值控制为例来加以说明.

变换炉的转化关系为



由此可知各组成气体分压 p_i 有如下平衡关系 ($i = \text{CO}, \text{H}_2\text{O}, \text{CO}_2, \text{H}_2$), 即

$$K \cdot P_{\text{CO}} \cdot P_{\text{H}_2\text{O}} = P_{\text{CO}_2} \cdot P_{\text{H}_2}.$$

若用干湿基体积百分浓度 r_i 与 y_i 表示, 并引入转化率 η , 则有⁽⁴⁾

$$\eta = \frac{100(Y_{\text{CO}} - Z_{\text{CO}})}{Y_{\text{CO}}(100 - Z_{\text{CO}})} \times 100\%, \tag{2}$$

以及

$$\theta_s = \frac{(Z_{CO} + Y_{CO}\eta)(Z_{H_2} + Y_{CO}\eta)}{KY_{CO}(1-\eta)}Q_g + Y_{CO}\eta Q_g - n_s Q_g, \quad (3)$$

$$n_s = \varphi P_H / (P - \varphi P_H), \quad (4)$$

式中 Q_g 为半水煤气的体积流量; n_s 为饱和塔出口的半水煤气中的汽/气比, 且 $n_s = P_{H_2O} / (P - P_{H_2O})$; P 为混合气压力; φ 为混合气的水蒸汽饱和度, 且 $\varphi = P_{H_2O} / P_H \times 100\%$; k 为化学反应常数.

只要式(2)至式(4)的有关变量可测, 对 η 及 θ_s 的计算与估计是不会有困难的. 但是, 目前检测技术与传感器在线实时检测成份量 Z_{CO} , Z_{CO_2} , Z_{H_2} , 以及化学反应常数 k 等均有较大的难度, 需根据工厂长期积累的数据, 对这些变量取常数卡边, 如取 $k=8.4$; $Z_{CO}=3.4$; $Z_{CO_2}=14$; $Z_{H_2}=38$. 于是 η , n_s 及 θ_s 的计算式可简化为

$$\left. \begin{aligned} \eta &= f_1(Y_{CO}), \\ n_s &= f_2(P \cdot P_{H_2O}), \\ \theta_s &= f_3(Y_{CO}, \eta, n_s, Q_g), \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

系统需要在线检测的变量减少到 4 个 Y_{CO} , P , P_{H_2O} 与 Q_g , 并按下列程序计算 θ_s , 即 \rightarrow 采样并读入 Y_{CO} , P , P_{H_2O} 与 $Q_g \rightarrow$ 计算转化率 $\eta \rightarrow$ 计算汽/气比 $n_s \rightarrow$ 计算并输出 $\hat{Q}_s \rightarrow \hat{Q}_s$ (\hat{Q}_s 作为 Q_s 系统的 SPC 设定值).

3 修正 θ_1^* 使 η 值优化

一氧化碳转化炉的控制目标是使 η 达到最大值, Q_s 的消耗量达到最小值. 但上述次优化设计仅使 η 值浮游在最优值 η^* 的迫旁^[5]. 在 Q_s 实行按需供应以后, 影响 η 值的变量是 θ_1 的给定值设置. 因此, 图 2 b 的给定值不是常规的不变量设置, 而是由单变量极值调节器不断沿着最优化的变化方向搜寻确定的变量. 基于方向搜寻的单变量极值调节器, 每次使 θ_1^* 改变一个微小的数, 然后判断 θ_1^* 沿此方向变化是否有利, 即 η 值是否增加. 若 η 值增加, 则继续向 θ_1^* 的变化方向改变一个微小的量; 反之, 则改变 θ_1^* 的变化方向, 直至 $\partial\eta/\partial\theta_1^* \approx 0$ 时, θ_1^* 才停止变化.

这种变量卡边与子系统分离的极值控制系统具有很高的鲁棒性. 从系统的稳定性分析, \hat{Q}_s 估值 SPC 回路与 η 极值搜寻 θ_1^* 回路均属于长操作周期的回路; 而 Q_s 与 Q_c 回路均属于短操作周期的回路. 长与短操作周期回路的振荡周期之比至少在 4 倍以上. 所以, 两个串级调节系统均不会有干涉影响, 从而保证了系统的稳定性. 从自适性的角度分析, 即使转化炉老化, 设备参数变化, 或者环境条件变化, 导致 θ_1 的最优值变化, 终因 η 极值搜寻的作用, 使 θ_1 可及时跟随着变化到迁移后的 θ_1 的最优值 θ_1^* 附近.

4 结束语

次要变量卡边, 使系统的目标函数 $J(x)$ 中的自变量 x 成为单变量或双变量. 这类系统一般都有两个主操作变量(如 Q_s 与 Q_c), 为了使 $J(x)$ 仅受 Q_c 的调整, 要求 Q_s 能按需供应卡边. 如果按需供应量 \hat{Q}_s 无法预估, 单变量极值控制就无法实现. 因此本例应用的成功, 首先是 \hat{Q}_s 估值的成功. 这种系统设计的方法可以推广到 3 个甚至更多主操变量的系统, 例如, $J(x) =$

$J(x_1, x_2, x_3)$, 可以使其中 2 个变量预估卡边. 同样, 可将多变量极值问题转化成单变量极值问题.

但是若某些按需供应(或调整)量难于估计, 则只要一组次要变量卡边, $J(x)$ 中自变量的个数就会大大减少. 即使 x 中的主变量均无法在线实时估计, 其求解问题也会大大简化. 例如, 假设一氧化碳转化炉的 \hat{Q}_s 无法估计, 则仍可按双变量函数求极值的成熟方法, 对 Q_c 与 Q_s 进行调整寻优. 因为在 k, Z_{CO}, Z_{CO_2} 与 Z_{H_2} 卡边情况下, 有

$$\begin{aligned} \eta &= J(\theta_2, \alpha) = J[f_1(Q_c), f_2(Q_s)] \\ &= J_\eta(Q_c, Q_s) \triangleq J_\eta(x_1, x_2) \rightarrow \max \\ &= J_\eta(x), \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $x_1 \triangleq Q_c, x_2 \triangleq Q_s$. 根据优化原理, x 的增量 Δx 应设置为

$$\Delta x = \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \end{bmatrix} = L \left[\frac{\partial J(x)}{\partial x} \right]_{x^{(0)}}^T \left[\left(\frac{\partial J(x)}{\partial x} \right)_{x^{(0)}} \left(\frac{\partial J(x)}{\partial x} \right)_{x^{(0)}}^T \right]^{-1/2},$$

其中 $L^2 = (\Delta x)^T (\Delta x)$, L 为新与旧状态点的限定距离. 显然每改变一次 Δx , 就必须观测 Δx 对 $J(x)$ 所产生的影响; 然后再计算下一个新的状态点, 直至 $\partial J(x)/\partial x \approx 0$ 为止. 这种方法虽然省去 \hat{Q}_s 估值, 但也造成了降低系统稳定性的损失. 因为一个目标函数同时直接操作两个变量, 容易造成系统的谐振. 为此, 工程上将不得不降低调节速度, 以维持系统的稳定性.

参 考 文 献

- 1 王永初, 任秀珍. 节能控制系统. 北京: 中国石化出版社, 1994. 442~463
- 2 王永初. 预测学及其应用. 重庆: 科技文献出版社重庆分社, 1986. 122~145
- 3 Wolovich W A. Linear multivariable systems. New York: Spring-Verlagm, 1974. 132~143
- 4 王永初. 工业过程控制系统设计范例. 北京: 科学出版社, 1986. 55~61
- 5 Powell J D. Digital control of dynamic systems. New York: Addison-Wesley, 1980. 201~236

On the Suboptimal Method for the Process Control System

(III) Suboptimal System with Extreme Value on Borderline

Wang Yongchu

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

Abstract Two methods are presented for searching extreme value of control system by putting minor variable on borderline. In the first method, one of two major variable will be submitted for optimal estimate; while another one, for exploratory searching. The second method is direct borderline searching. Their robustness during implementation are compared.

Keywords extreme value control, system estimate, robustness