

多变量系统解耦内模控制及其 PID 转化应用方法的研究

王全良 甄新平 潘立登 闻光辉
(北京化工大学信息科学与技术学院, 北京 100029)

摘要: 文中针对不同回路具有不同时滞的多变量稳定过程, 提出了一种多变量解耦内模控制设计及其常规 PID 转化应用方法。所设计的多变量内模控制器能使系统稳定解耦, 所得到的闭环系统根据开环系统时滞来描述。该方法为精馏等化工装置的复杂控制系统提供了一种新的优化和先进控制方案。

关键词: 多变量系统; NLJ 随机搜索算法; 解耦; 内模控制; 时滞

中图分类号: TP273.5

为了有效控制多时滞多变量稳定过程, 本文讨论一种多变量系统解耦内模控制^[1]方法, 在系统模型精确时, 可以精确解耦; 即使在系统模型失配时, 也可以取得满意的控制效果。对于模型辨识或降阶简化处理, 本文采用 NLJ 算法^[2-3]能同时辨识时滞和其他模型参数, 操作简便, 大大节约了计算时间。

1 多变量系统解耦内模控制设计

下图为多变量内模控制结构图, 其中 $R = [r_1, r_2, \dots, r_n]^T$ 为 n 维输入向量, $Y = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T$ 为 n 维输出向量, K , G_p 和 G_m 分别表示 $n \times n$ 维多变量内模控制器、被控对象和被控对象模型的传递函数矩阵, T 为转置。

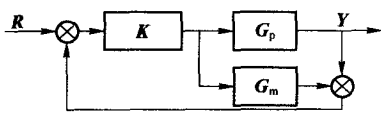


图 1 多变量内模控制系统方框图

Fig. 1 Block diagram of multivariable IMC system

如果多变量稳定过程的函数矩阵 $G_p(s)$ 能被分解成 $G_p(s) = G_+(s) G_-(s)$, $G_+(s)$ 包含 $G_p(s)$ 中的所有时滞, $G_-(s)$ 为 $G_p(s)$ 中的最小相位部分, 那么其内模控制器可以象单变量过程一样来设计。而对于具有不同时滞的多变量传递函数矩阵, 这个因式分解相当困难, 因为这个因式分解不仅受矩阵

各元素的时滞项所影响, 而且受各时滞在矩阵中的位置所影响。

如果模型精确, 即有 $G_p(s) = G_m(s)$ 成立, 那么多变量系统闭环传递函数矩阵 $H(s)$ 简化为 $H(s) = \text{diag}\{h_{ii}(s)\} = \text{diag}\{g_{ii}(s) \cdot k_{ii}(s)\}$, ($i = 1, 2, \dots, n$, $\text{diag}\{ \cdot \}$ 表示对角矩阵)。因此设计关键在于确定 n 个解耦回路传递函数 $h_{ii}(s)$ 。对多时滞多变量稳定过程^[4], 给出 $h_{ii}(s) = f_i(s) \exp(-[(|G|) - i]s)$, ... (1) 其中 $f_i(s) = 1/(s+1)$ 是第 i 个回路 IMC 滤波器 (s 为拉普拉斯算子, 为滤波常数, 为滤波器阶次, 与对象阶次相对应, 为了简单起见, 本文取 $= 1$), $(|G|)$ 和 i 分别为模型传递函数矩阵行列式 $|G|$ 的时滞和余子式矩阵各列 G^{ij} 的最小时滞。控制器对角元素 $k_{ii}(s) = h_{ii}(s)/g_{ii}(s)$... (2); 非对角元素 $k_{ji}(s) = G^{ji}/k_{ii}(s)$, ($j \neq i$) ... (3)。

理论上, 由方程 (1) 确定的 $h_{ii}(s)$ 设计出的 $K(s)$ 中每一列至少有一个元素时滞为零, 而模型简化后可能含有非零时滞, 不过通常很小。在这种情况下, 应该从该列的所有元素中减去它, 这不会影响解耦稳定性, 因为该时滞如果为正, 减去后会加速回路响应; 如果为负, 减去后控制器才能实现。

解耦内模控制设计步骤

第一回路 $i = 1, j = 1, 2, \dots, n$, 计算行列式 $|G|$ 和余子式 G^{ij} , 对于高于二阶有理函数加纯滞后形式的 $|G|$ 和所有非零 G^{ij} 用 NLJ 算法进行降阶简化, 并计算时滞 $(|G|)$ 和 i ;

按方程 (1) 给出 $h_{ii}(s)$, 由方程 (2) 计算控制

器对角元素 $k_{ii}(s)$, 并用 NLJ 算法降阶简化;

由方程 (3) 计算控制器非对角元素 $k_{ji}(s)$, 并用 NLJ 算法降阶简化;

分别计算控制器各列元素中的最小时滞, 如果不为零, 在各列元素中减去;

对其他回路重复上述步骤。

2 解耦内模控制器的 IMC-PID 转化应用

在实际 DCS 装置中, PID 控制器传递函数基本形式为 $C(s) = P + I/s + Ds$, (其中 P 为比例常数矩阵, 无量纲; I 为积分时间倒数构成的矩阵, 单位为 $1/s$; D 为微分时间构成的矩阵, 单位为 s), 不是标准的二阶有理传递函数加时滞的形式, 因此, 上面设计出来的控制器并不能直接应用。其次, 纯滞后也不能直接用于常规 PID 控制器; 第三, 根据上述解耦过程可知, 对二变量系统需要四个控制器, 而实际应用中通常只有两个控制器。因此上面设计出来的内模控制器必须经过 IMC-PID 转化^[5]并增加控制器后才能实际应用。

根据 $K(s) = H(s)/G_m(s)$ 及 IMC 与 PID 反馈控制关系 $C(s) = K(s)/[E(s) - G_m(s)K(s)]$, 得 $C(s) = (G_m(s))^{-1}H(s)/[E(s) - H(s)]$, E 为单位阵。设 $Q(s) = s(G_m(s))^{-1}H(s)/[E(s) - H(s)]$, 上式化为 $C(s) = s^{-1}Q(s)$, 将 $Q(s)$ 在 $s=0$ 点按麦克劳林级数展开得: $C(s) = s^{-1}[Q(0) + sQ(0) + s^2Q(0)/2 + \dots] = P + I/s + Ds + \dots$, 由于理想 PID 不能实现, 选择实际 PID 形式为 $C(s) = P + I/s + Ds/(s+1) \dots(4)$, 取时间常数 = $\{0.05D/P(i,j)\}_{\max}$ 简化计算。

3 仿真

使用下面的二变量蒸馏塔模型:

$$G_p(s) = G_m(s) = \begin{bmatrix} \frac{12.8e^{-s}}{16.7s+1} & \frac{-18.9e^{-3s}}{21s+1} \\ \frac{6.6e^{-7s}}{10.9s+1} & \frac{-19.4e^{-3s}}{14.4s+1} \end{bmatrix}$$

3.1 多变量解耦内模控制器设计

根据第 1 节, 内模控制器设计过程如下:

计算行列式 $|G|$ 并用 NLJ 算法简化得

$$|G| = \frac{-0.1197s^2 - 4.3902s - 0.1958}{s^2 + 0.0671s + 0.0016} e^{-6.2s}$$

显然 $(|G|) = 6.2$, $(G^{11}) = 3$, $(G^{12}) = 7$, $\tau_1 = 3$;

根据方程 (1), 选择滤波器函数 $1/(s+1)$, 得

$$h_{11} = e^{-3.2s}/(s+1), \text{ 由方程 (2) 得 } k_{11} = h_{11}/g_{11},$$

$$k_{11} = \frac{0.00395s^2 + 0.3054s + 0.0192}{s^2 + 1.03745s + 0.1238};$$

由方程 (3) 计算 k_{21} , 得,

$$k_{21} = \frac{0.0147s^2 + 0.1209s + 0.0064}{s^2 + 0.9163s + 0.1213} e^{-4s};$$

比较 k_{11} 和 k_{21} 可得最小时滞为 0;

重复上述步骤, 对第二个回路按相同的方法处理, 选择 $h_{11} = e^{-5.2s}/(s+1)$, 得

$$k_{22} = \frac{-0.0009s^2 - 0.1743s - 0.0130}{s^2 + 1.0355s + 0.1270}$$

$$k_{12} = \frac{-0.0034s^2 - 0.1992s - 0.0286}{s^2 + 1.0168s + 0.1915} e^{-2s}$$

$$\text{完整 IMC 控制器结果函数 } K = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix}.$$

仿真结果如图 2 所示。曲线中 r_1, r_2 表示单位阶跃输入量, 开始加入时间 t 分别为 10 和 50 s, y_{1i}, y_{2i} 和 y_{1n}, y_{2n} 分别表示系统在 r_1, r_2 作用下的理想内模解耦控制阶跃响应输出量和应用本文算法所得内模解耦控制阶跃响应输出量。可以看出, 只要建模精确, 应用 NLJ 算法的内模控制效果基本接近理想内模控制效果, 耦合现象也基本能够消除。

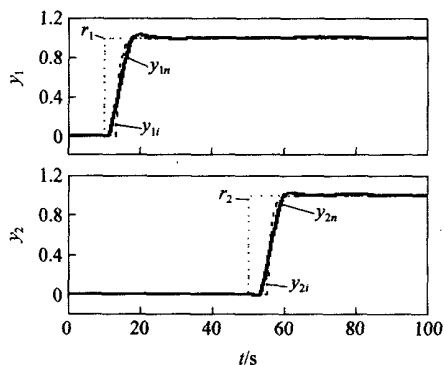


图 2 内模控制输入输出仿真曲线对比

Fig. 2 IMC control performance

3.2 IMC-PID 转化

鉴于目前国内 DCS 系统的实际情况, 内模控制 (IMC) 必须转化成 IMC-PID 才能应用, 根据第 2 节, 按 (4) 式选择 PID 控制器形式, 得 PID 参数结果

$$\text{为 } = 0.2716, P = \begin{bmatrix} 0.3310 & -0.0300 \\ 0.1062 & -0.1256 \end{bmatrix},$$

$$I = \begin{bmatrix} 0.0374 & -0.0247 \\ 0.0127 & -0.0167 \end{bmatrix},$$

$D = \begin{bmatrix} -0.6271 & -1.4981 \\ -0.8310 & -0.1201 \end{bmatrix}$ 。P, I, D 参数同时为负的控制器是由于对象具有负的放大系数。而只有 D 为负的控制器在实际应用中不可实现, 应省去。仿真结果如图 3 所示, 曲线中 r_1, r_2 表示单位阶跃输入量, 开始加入时间分别为 0 s 和 40 s, y_{12}, y_{22} 和 y_{14}, y_{24} 分别表示系统用 2 主回路 IMC-PID 控制器控制的阶跃响应输出量和用 4 个 IMC-PID 控制器控制的阶跃响应输出量。

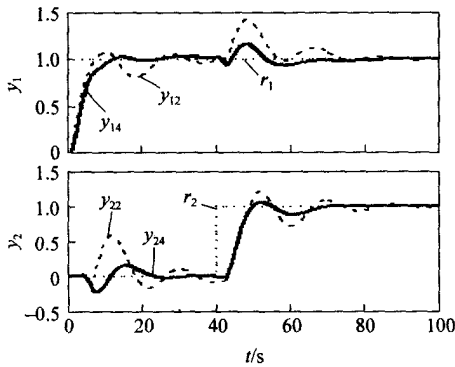


图 3 IMC-PID 输入输出仿真曲线对比

Fig. 3 IMC-PID control performance

可以看出, 按常规单回路 PID 控制, 耦合现象无法消除, 要改善耦合现象就必须通过改造 DCS 系统组态, 增加解耦控制器。四个 PI 控制器的控制方框图如图 4 所示。

4 结束语

本文针对不同回路时滞不同的多变量稳定过

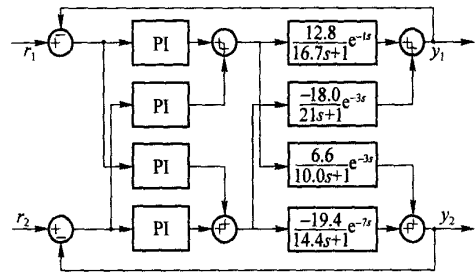


图 4 四个 PI 控制器的 IMC-PID 控制方框图

程, 提出了一种多变量解耦内模控制设计及其常规 PID 控制转化应用方法, 为精馏等化工装置的复杂控制系统提供了一种新的优化和先进控制方案。

参 考 文 献

- [1] Garcia C E, Morari M. Internal model control 3: multivariable control law computation and tuning guidelines [J]. Ind Eng Chem Proc Des Dev, 1985, 24: 484 - 494
- [2] 李全善, 潘立登, 王文新, 等. 催化裂化装置 PID 控制回路的优化 [J]. 石油炼制与化工, 2004, 35(9): 46 - 50
- [3] 马俊英, 罗元浩, 潘立登. 用改进的 NLJ 方法辨识闭环系统的模型参数及滤波器设计 [J]. 北京化工大学学报, 2003, 30(4): 95 - 97
- [4] Wang Qing-guo, Zhang Yu, Chiu Mir-sen. Decoupling internal model control for multivariable systems with multiple time delays [J]. Chem Eng Science, 2002, 57: 115 - 124
- [5] 王文新, 潘立登, 孔德宏, 等. IMC-PID 鲁棒控制器设计及其在蒸馏装置上的应用 [J]. 北京化工大学学报, 2004, 31(5): 93 - 96

Decoupling IMC for multivariable systems based on NLJ random search

WANG Quan-liang ZHEN Xin-ping PAN Li-deng WEN Guang-hui

(College of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: The decoupling internal model control (IMC) was investigated for multivariable stable processes with different time delays. And this method was extended and applied to a conventional PID control of DCS equipment by IMC-PID transform. All the stabilizing IMC controllers and the resulted closed-loop systems were characterized in terms of the open-loop system's time delays. The method has an advantage of being simple and easy to realize for the optimization and APC control of a complex process system like a rectification.

Key words: multivariable systems; NLJ random search method; decoupling; IMC (internal model control); time delays

(责任编辑 刘同帅)