

过程控制结构的可行性分析

戴连奎 吕勇哉

(浙江大学工业控制研究所, 杭州)

摘要 本文论述了工业过程调节控制结构的可行性问题. 讨论的问题是, 对于某一反馈信息结构, 是否存在该结构下的某一分散控制器, 以使闭环系统具有渐近稳定性、良好的伺服跟踪性能和鲁棒性. 本文基于分散固定模的概念, 获得了一般分散控制结构可行性判据. 最后将该可行性判据成功地应用于某炼油厂催化裂化装置反应再生系统控制结构的选择及控制系统的设计. 结果表明, 该分散控制系统具有令人满意的动态性能和鲁棒性.

关键词: 伺服问题; 分散控制; 结构可行性; 鲁棒性; 催化裂化装置

1. 控制结构的可行性问题

对于实际的工业生产过程, 在设计具体的控制系统以前, 首先要解决测量与控制之间反馈结构的选择问题, 而解决这一问题的关键在于建立合适的结构可行性判据. 文〔1〕基于结构能控性的概念讨论了集中控制方式下的过程控制结构可行性问题. 文〔2〕基于分散固定模的概念〔3〕研究了块对角分散结构下伺服系统的控制结构可行性问题. 下面将探讨过程控制中任意反馈结构的可行性问题.

首先叙述一般分散控制结构的描述问题. 考虑以下线性多变量系统,

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad (1)$$

$$y_m = C_m x,$$

其中 $u \in R^m$ 为控制, $x \in R^n$ 为状态, $y_m \in R^{r_m}$ 为测量, A 、 B 、 C_m 为相应维数的实常数阵.

定义其控制结构为 K^* , 其中 K^* 为 $m \times r_m$ 维结构矩阵, 且

$$K^* \triangleq \begin{bmatrix} K_1^* \\ K_2^* \\ \vdots \\ K_m^* \end{bmatrix}, \quad (2)$$

这里 K_i^* 为 $1 \times r_m$ 维结构子阵, 其元素为

$$k_{ij}^* \triangleq \begin{cases} *, & u_i \text{ 与 } y_j^m \text{ 存在反馈信息联系;} \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, r_m$$

$$i = 1, 2, \dots, m$$

其中 K^* 中的非零元素 “*” 被称为结构元素，上式中 u_i, y_j^m 分别为 u 与 y_m 的相应分量。

系统 (1) 式对于结构 K^* 的固定模集合^[4] 定义为

$$F_m(C_m, A, B; K^*) \triangleq \bigcap_{K \in K^*} \sigma(A + BKC_m), \quad (3)$$

其中 $K \in R^{m \times r_m}$ 为 K^* 的某一实现， $\sigma(X)$ 为矩阵 X 的特征值集合。

现在考虑以下线性多变量被控过程，

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + E\omega, \\ y &= Cx, \\ y_m &= C_m x, \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $\omega \in R^q$ 为外部扰动， $y \in R^r$ 为过程输出。假设输出 y 的设定轨迹为 y^* ，则控制误差为

$$e(t) \triangleq y(t) - y^*(t). \quad (5)$$

另外设输出均可测，并且包含于 y_m 中；而 y_m 与 u 之间的输出反馈结构阵为 K^* ，其中 y 与 u 之间的反馈结构阵为 K_0 。

定义 1 考虑被控过程 (4)、(5) 式及反馈结构阵 K^* 。若在该结构约束下存在某一输出反馈线性时不变控制器，使得闭环系统具有以下性质：

- 1) 渐近稳定性；
- 2) 渐近伺服跟踪性能，即对于扰动 ω 与设定值 y^* 的任一阶跃变化，均有

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0;$$

3) 鲁棒性^[2]，即允许被控过程 (4) 式中的各系数阵发生小范围的摄动，而闭环系统仍具有渐近稳定性与渐近跟踪性；

则称结构 K^* 为可行结构。

2. 控制结构可行性判据

定理 1 考虑多变量系统 (4)、(5) 式与控制结构 K^*, K^* 为可行结构的充分必要条件是

1° 系统 (C_m, A, B) 对于结构 K^* 的固定模集合中不存在除零以外的其他非稳定模式，
即

$$F_m(C_m, A, B; K^*) \subset C^- \cup \{0\}, \quad (6)$$

其中 C^- 表示整个复平面中的左半开平面；

2期

2° 增广系统 $\left\{ \begin{bmatrix} C_m & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} A & 0 \\ C & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} \right\}$ 在该结构下的固定模集合不包含零, 即

$$0 \notin F_m \left\{ \begin{bmatrix} C_m & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} A & 0 \\ C & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}; [K^*, K_0^*] \right\}. \quad (7)$$

证 考虑系统 (4)、(5) 式与反馈结构 K^* . 引入以下伺服补偿器以使闭环系统具有跟踪性能,

$$\dot{z}(t) = e(t),$$

得到增广系统

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} E\omega \\ -y^s \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} y_m \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_m & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix}. \end{cases} \quad (8)$$

类似于文 [2], 因 $y(t)$ 直接可测, 可证得 K^* 为可行结构当且仅当增广系统 (8) 式在结构 K^* 的约束下可镇定; 而由文 [4] 定理 1 可知, 即要满足以下条件:

$$F_m \left\{ \begin{bmatrix} C_m & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} A & 0 \\ C & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}; (K^*, K_0^*) \right\} \subset C^-. \quad (9)$$

必要性 由文 [4] 定理 1 可知, 要使 (9) 式成立, 条件 (6) 式是必要的; 而条件 (7) 式作为 (9) 式的特例, 自然必须成立.

充分性 设矩阵 A 存在非零特征值 $\lambda(A)$ 满足 $\operatorname{Re}(\lambda) \geq 0$, 且 $\lambda \neq 0$. 假设条件 (6) 式成立, 即存在 $K \in K^*$, 使

$$\det(A + BKC_m - \lambda I) \neq 0. \quad (10)$$

而 (9) 式左边不包括 $\lambda(A)$ 的充分必要条件是, 存在 $K \in K^*$, $K_0 \in K_0^*$, 使

$$\det \begin{pmatrix} A + BKC_m - \lambda I_n & BK_0 \\ C & -\lambda I_r \end{pmatrix} \neq 0. \quad (11)$$

取 $K_0 \equiv 0$, 则 (10) 式与 (11) 式等价. 即若 (6) 式成立, 则

$$F_m \left\{ \begin{bmatrix} C_m & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} A & 0 \\ C & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}; (K^*, K_0^*) \right\} \subset C^- \cup \{0\},$$

再结合条件 (7) 可知 (9) 式成立. 证毕.

定理 1 表明, 判断某一反馈结构 K^* 是否可行, 完全可通过固定模的计算来解决.

由定理 1 可证得以下推论.

推论 1 K^* 为可行结构的必要条件是

$$1^{\circ} \quad \text{Rank} \begin{bmatrix} A & B \\ C & 0 \end{bmatrix} = n + r, \quad (12)$$

$$2^{\circ} \quad g.r.(K_0^*) = r, \quad (13)$$

其中 $g.r.(K_0^*)$ 为结构矩阵 K_0^* 的一般秩^[1].

由此可见,任一可行结构至少要有 r 个控制手段与 r 个结构元素.

推论 2 若被控过程 (4) 式中不存在除零以外的其他不稳定模式,且 $m = r$. 则反馈结构 K^* 为可行结构的充分条件也为 (12)、(13) 式.

特别地,对于开环稳定过程,条件 (12) 式等价于 $\text{Rank}(T) = r$. 其中 $T = -CA^{-1}B$ 为控制与输出之间的静态增益阵.

推论 2 表明,对于开环稳定过程,就分析反馈结构可行性而言,无须了解其动态特性.

作为该可行性判据的成功应用实例,文〔5〕详细地研究了某炼油厂催化裂化装置反应再生系统控制方案的选择与控制系统的設計问题.

首先基于对该被控过程的分析,将控制问题归结为一个两输入两输出系统反馈控制器的設計问题.鉴于实际过程的时变性与非线性,通过线性化将被控过程简化为一个近似的线性时不变系统.然后针对该线性时不变系统,基于反馈结构可行性条件,以控制结构最简单、控制对输出的灵敏度最大而相互关联最小为原则,结合该过程的具体要求,选取了一个简单而合理的分散控制结构.最后在此基础上设计了相应的分散控制系统,并在实际生产装置中获取实施.

经过长期实际运行的考核表明,该分散控制系统不仅具有良好的伺服性能与抗扰动能力,而且能适应负荷与原料油性质等变化.另外,因结构简单,该系统深受操作人员的欢迎.采用该系统后经济效益明显,经考核增加轻质油收率 1.37%,每年可增加产值 838 万元,利税 314.89 万元.

3. 结 论

本文讨论了线性系统输出反馈控制结构的可行性问题.基于分散固定模的概念,证明了一般意义下的分散控制结构可行性判据.最后将该可行性判据成功地应用于某炼油厂催化裂化装置反应再生系统控制方案的选取与控制系统的設計.结果表明,本文所提出的结构可行性判据一方面为许多经验方法找到了依据并给出了相应的使用条件;另一方面也为控制结构的综合提供了一种简单实用的方法,将有助于系统设计者选择合理的控制方案.

参 考 文 献

- (1) Morari, M., and G. Stephanopoulos, Studies in the Synthesis of Control Structures for Chemical Processes, Part II, AIChE J., 26, (1980), 232—246.
- (2) Davison, E. J., The Robust Decentralized Control of a General Servomechanism Problem, IEEE Trans. Aut. Contr., AC-21, (1976), 14—24.
- (3) Wang, S. H., and E. J. Davison, On the Stabilization of Decentralized Control Systems, IEEE Trans. Aut. Contr.,

AC-18, (1973), 473—478.

- (4) Hu, Y. Z., and W. S., Jiang, The Economical Output Feedback Stabilization Problem of Linear Multivariable Systems, Proceedings of IFAC 9th Triennial World Congress, Budapest, Hungary, (1984), 239—244.
- (5) 戴连奎、吕勇哉, 催化裂化反应再生系统的分散鲁棒控制, 信息与控制, 17, 1, (1988), 5—11.

Feasibility Analysis of Process Control Structures

Dai Liankui, Lu Yongzai

(Institute of Industrial Process Control, Zhejiang University, Hangzhou)

Abstract: The feasibility problem of regulative control structures in industrial processes is addressed in this paper. A control structures being feasible, means there exists a corresponding decentralized robust controller under the structure to make the resulting closed-loop system have asymptotic tracking behavior and asymptotic stability. Using the concept of decentralized fixed modes, we have obtained the feasibility criteria for a generally decentralized control structure. Finally, the proposed feasibility criteria have been successfully applied to control structure synthesis for a reactor-regenerator system in fluidized catalytic cracking unit.

Key words: servomechanism problem; decentralized control; structure feasibility; robustness; fluidized catalytic crackins unit