

PI 控制作用在催化反应模型识别中的应用*

程民权 陈良恒

(华东化工学院联合化学反应工程研究所, 上海)

摘要 非线性系统最显著的多态特性往往受到操作条件的限制而不可能在开环系统中充分地揭示. PI 控制器的控制增益将增加了闭环系统调节的自由度, 以此所揭示的非线性行为为模型识别提供了有力的依据. 本文提供了全局分析的计算方法, 并以催化反应模型来说明方法的应用.

关键词: PI控制; 催化反应; 参数估计; 系统辨识

1. 前 言

由于催化反应体系的非线性, 由实验所得的稳态数据可用多种模型来拟合⁽¹⁾. 有时即使只存在一种模型但仍可能存在多组拟合参数都适宜的情况⁽²⁾. 正由于稳态数据不足以充分揭示模型的非线性特性或者操作条件受物理或化学上的约束, 使所确定的模型一般只能适应于实验所操作的范围而不能作一定幅度的外推, 有的即使在实验操作范围内该模型也难于正确、完全地反映其非线性特性.

为了克服催化反应模型筛选中的困难, 提高筛选的正确性和有效性, 通常应用:

1) Bennett⁽¹⁾等提出的“瞬时响应”方法;

2) Lyboratos⁽³⁾等提出的应用非线性控制器通过闭环系统特性的研究来进行模型识别.

前者虽然应用了动态特性提高了识别能力, 但对于充分揭示内在的非线性特性或者区分极具竞争力的相似模型来说仍感困难; 后者对这两方面的缺陷的改善起了很大的作用, 但随系统而异的非线性控制器的设计和实施往往带来新的困难.

为了弥补上述方法的不足, 本文应用线性 P 和 PI 控制器通过闭环系统的分枝特性来进行模型的识别. 通常非线性特性表现为系统具有多重定态、周期性振荡 (极限环或 Tori) 和混沌的动态特性. 本文部分作者曾研究了非线性模型经 PIO 控制后的分枝特性⁽⁴⁾, 表明 P 控制的引入会引起多重态还可能产生振荡现象, 而 PI 控制必会引起系统的振荡. 因此只要充分利用这些特性就有利于模型的识别, 或者说由稳态数据所获得的竞争模型用线性控制手段来进行鉴别. 一般来说, 通过这样途径所获得的模型具有较高的可信度和较大的外推幅度. 另外从控制增益的调节来说, 它增加了系统调节的自由度, 在一定程度上弥补了操作条件本身的限制.

* 国家自然科学基金资助项目.

本文于 1988 年 6 月 29 日收到, 1989 年 2 月 11 日收到修改稿.

2. 数学背景和计算方法

设被检系统的数学模型为下列自治方程的形式:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{f}(\mathbf{x}; u), \\ \mathbf{f}(0, 0) &= 0.\end{aligned}\quad (1)$$

式中 u 为一维操作变量, \mathbf{x} 中分量 x_1 为对应于 u 的一个被控变量. 引入 P 控制器和 PI 控制器后的闭环系统可分别描述为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, u), \\ u = -Kx_1, \end{cases}\quad (2)$$

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, u), \\ u = -Kx_1 + z, \\ \dot{z} = -K'x_1, \end{cases}\quad (3)$$

式中 K 和 K' 分别为 P 和 I 的控制增益. 显然临界控制增益即为式 (2) 和式 (3) 的简单分枝点和 Hopf 分枝点. 在简单分枝点外有限环生成. 对于 PI 控制系统, 已证明^[4] 必存在 Hopf 分枝点, 亦表明经 PI 控制的闭环系统必存在动态解.

简单分枝点处的增益值容易求得. 它满足 Jacobi 矩阵奇异、穿越性和临界稳定三个条件. 而对 Hopf 分枝点除了要确定控制增益值外还需要获悉极限环生长的方向、稳定性以及 Hopf 分枝点邻近的极限环近似表达式. 对于低维系统可以手算, 但一般可调用 Biforz^[5] 程序同时获悉以上所需信息.

被检各模型中的参数一旦决定后, 我们应对实施控制后的闭环系统进行在状态空间中的全局分析. 全局分析是指在控制增益变化范围内系统所具有的所有定态和动态解以及它们的稳定性. 对高阶系统或强非线性系统, 一般的求解方法无法满足全局分析的需要, 而必需应用连续性算法. 通常以控制增益作为分枝参数, 应用修正的 Knbicek^[6] 程序来自动跟踪定态解曲线以及计算其稳定性; 同时记录曲线上可能出现的简单分枝点和 Hopf 分枝点, 以备继续求解. 对于动态解的求取, 我们是从 Hopf 分枝点附近(由 Biforz 所获得的初始值和周期)用 Peflog^[7] 程序自动跟踪极限环分枝以及通过 Floguet 因子^[8] 的计算来决定其稳定性. Floguet 因子随参数变化的规律——从复平面上单位圆逃逸的方向又能决定出极限环演变的规律——周期倍分裂、Tori 或者直接发生浑沌现象^[9].

在全局分析图上可以选择某个控制增益, 使它对应着反映强烈非线性行为的解例如多定态、极限环或浑沌等. 这样可以通过闭环系统的实验数据与理论计算数据进行比较来筛选模型. 显然实验中若能展示这些非线性特性的模型其可靠性和实用性就比较大.

3. N_2O 催化分解过程模型的识别

Yang^[10]、Lyberatos^[3] 等曾研究了 N_2O 在镍催化剂上进行分解的过程. 按机理可存在两个模型:

模型 I:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = -\beta_1 xw - (x-u), \\ \frac{dy}{dt} = \beta_1 xw - y, \\ \frac{dz}{dt} = r_1(\alpha_1 - w)^2 - \delta_1 w^2 z - z, \\ \frac{dw}{dt} = -\beta_1 xw + 2r_1(\alpha_1 - w)^2 - 2\delta_1 w^2 z. \end{cases} \quad (4)$$

模型 II:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = -\beta_2 xw - r_2 x(\alpha_2 - w) + \delta_2 yzw - (x-u), \\ \frac{dy}{dt} = \beta_2 xw + r_2 x(\alpha_2 - w) - \delta_2 yzw - y, \\ \frac{dz}{dt} = r_2 x(\alpha_2 - w) - \sigma_2 yzw - z, \\ \frac{dw}{dt} = -\beta_2 xw + r_2 x(\alpha_2 - w) - \delta_2 yzw, \end{cases} \quad (5)$$

式中符号说明可参阅 [10], [3]. 已经证明在

$$\begin{aligned} \alpha_1 = 8.44, \quad \beta_1 = 0.023, \quad r_1 = 1.816, \quad \delta_1 = 0.1588, \\ \alpha_2 = 8.4275, \quad \beta_2 = 0.0115, \quad r_2 = 0.2255, \quad \delta_2 = 0.9719 \end{aligned} \quad (6)$$

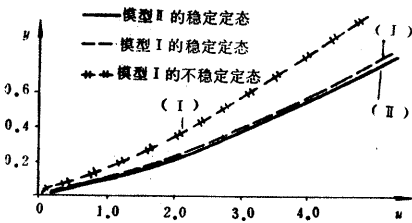


图1 两种模型的开环特性

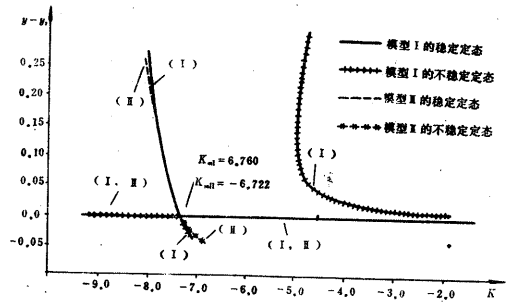


图2 两种模型在P控制作用下的全局定态特性

的参数条件下, 式(4)和式(5)在稳态数据上或者瞬时响应上都不表现出明显的差异. 其定态解曲线如图1所示, 图1中已除去了那些没有物理意义的定态.

为了考察闭环时的特性, 我们选用 $u_s = 0.5$ 时的定态解

$$x_s = 0.423, \quad y_s = 0.038, \quad w_s = 7.825 \quad (7)$$

作为设定值, 取 y 作为被控变量, u 为操作变量. 则P和PI的控制表达式可分别写为

$$u = u_s - K(y - y_s), \quad (8)$$

$$u = u_s - K(y - y_s) - K' \int_0^t (y - y_s) dt, \quad (9)$$

式中 K 和 K' 分别为 P 和 I 的控制增益. 在应用时式 (9) 通常应用下列的等价形式

$$u = u_s - K(y - y_s) + z^*$$

$$\dot{z}^* = -K'(y - y_s).$$

(10)

模型 I 和 II 经 P 控制后的闭环系统的全局分析如图 2 所示. 从图中可见, 应用 P 控制并不能严格地区分开这两个机理模型. 经 PI 控制后, 在控制增益 $K-K'$ 平面上可获得一条临界稳定曲线 Γ_H 如图 3 所示. 在 Γ_H 上具有 $\pm iw$ 和负实部的特征值即 Hopf 分枝点; Γ_H 上标绘的箭头指向生成极限环分枝的方向. 从图 3 可见, 当 (K, K') 落在区域 II 时模型 I 的设定点是不稳定的, 而对于模型 II 是稳定的. 这样如果我们选择 $(K, K') = (-3.0, 10.0)$ 时以 $(x, y, z, w) = (0.5, 0, 0, 8.0)$ 为初始条件两模型的动态特性会有明显的差异, 如图 4 所示. 此为模型的识别提供了重要的依据; 特别当 K' 取得较大时更容易起到识别作用.

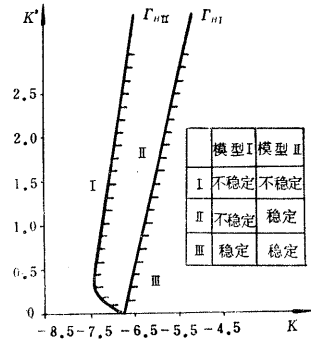


图 3 PI 控制作用下增益空间中的 Hopf 分枝点轨迹

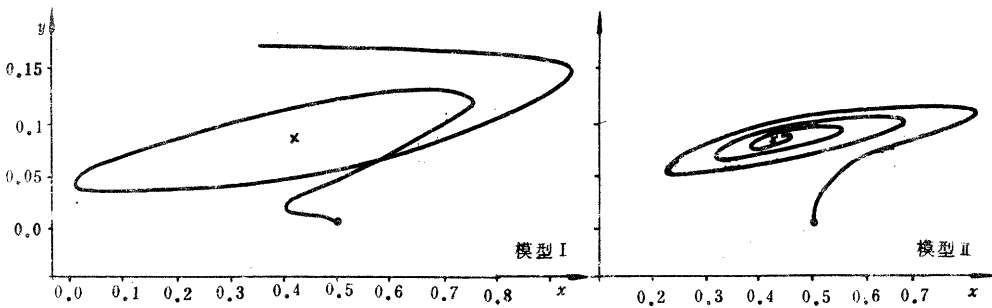


图 4 PI 控制作用下两种模型由相同始点出发得到的不同状态轨迹

$K = -3, K' = 10, x^0 = 0.5, y^0 = 0, z^0 = 0, w^0 = 8.0$

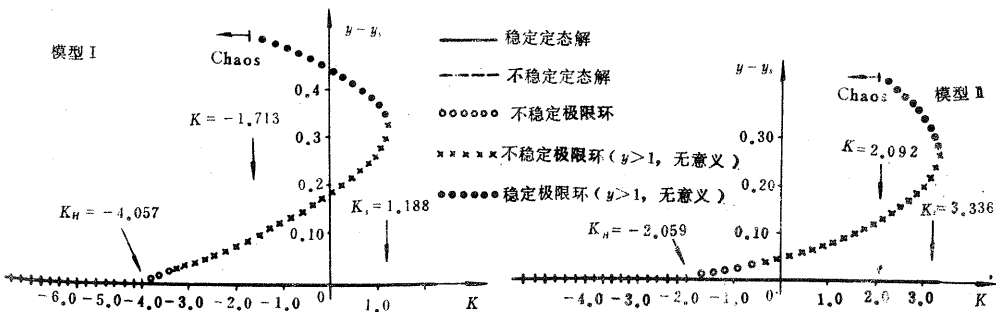


图 5 $K' = 10$ 时两种模型经 PI 控制作用下的全局特性

对于 PI 控制下的闭环系统全局分析($K'=10.0$ 时)如图 5 所示. 但遗憾的是由于物理量 x 和 y 在数值上都不能大于 1, 因此由模型求得的稳定极限环乃至混沌现象在物理意义上是不存在的, 否则可选择适当的 K 值进行闭环系统的实验, 使一个模型具有动态特性, 另一个模型只具有定态特性, 这样更易起到识别模型的作用.

4. 结 语

- 1) 非线性系统在线性 P 或 PI 控制作用下, 闭环系统将呈现出强烈的非线性行为; 控制增益的选择范围拓宽了操作变量变化范围的限制, 为模型识别或者模型参数的求取提供了有力的依据, 是化工中常用的稳态数据或瞬时响应方法所无法比拟的.
- 2) 修正的 Kubicek 和 Peflog 程序为闭环系统的全局分析提供了可能.

参 考 文 献

- (1) Bennett, C. O., The Transient Method and Elementary Steps in Heterogeneous Catalysis, *Catal. Rev.*, **13**, 2, (1976), 121-148.
- (2) Kobayashi, M., Rival Kinetic Methods In the Oxidation of Carbon Monoxide Over a Silver Catalyst by the Transient Response Method, *Chem. Reac. Engng.* — Boston, ACS Symp. Ser., **196**, (1982), 213-223.
- (3) Lyberatos, G., Kuszta, B. and Bailey, J. E., Discrimination and Identification of Dynamic Catalytic Reaction Models Via Introduction of Feedback, *Chem. Engng. Sci.*, **39**, 3, (1984), 739-750.
- (4) Chang, H. C. and Chen, L. H., Bifurcation Characteristics of Nonlinear Systems Under Conventional PID Control, *Chem. Engng. Sci.*, **39**, 7/8, (1984), 1127-1142.
- (5) Hassard, B. D., Karerino, N. D. and Wan, Y.H., Theory and Application of Hopf Bifurcation, Cambridge University Press, Cambridge, (1981), 288-295.
- (6) Kubicek, M., Algorithm 502, Dependence of Solution of Nonlinear Systems on a Parameter, *ACM Trans. Math. Softw.*, **2**, 1, (1976), 98-106.
- (7) Aluko, M. and Chang, H. C., An Algorithm for the Bifurcational Analysis of Periodic Solutions of Autonomous Systems, *Comp. Chem. Engng.*, **8**, 6, (1984), 355-365.
- (8) Iooss, G. and Joseph, D. D., Elementary Stability and Bifurcation Theory, Springer-Verlag, Berlin, (1980), Chapter 7.
- (9) Casti, J. L., Recent Developments and Future Perspectives in Nonlinear System Theory, *SIAM Rev.*, **24**, 2, (1982), 301-331.
- (10) Yang, C. C., Cutlip, M. B. and Bennett, C. O., Catalysis: Proceedings of the 5th International Congress, Miami Beach, Fla., North-holland Pub. Co., Amsterdam, (1973), 279-288.

Discrimination of Catalytic Reaction Models Via the Conventional PI Controller

Cheng Minquan, Chen Liangheng

(UNILAB Research Centre of Chemical Reaction Engineering East China University
of Chemical Technology, Shanghai)

Abstract: The most distinct properties of nonlinear system is not fully revealed since the adjustable parameters are limited in physical and chemical properties. Degrees of freedom in controlled system will be increased and the corresponding controller gains can be adjusted freely. Revealed nonlinear behaviours of the closed loop system under the conventional PID controller will be most effectively utilized for model identification and discrimination. In this work, this concept has been successfully applied to discriminate two rival models in N_2O catalytic decomposition process.

Key words: PI control; catalytic reaction; parameter estimation; system identification

(上接第 91 页)

52. SIAM Journal on Control and Optimization (工业与应用数学学会控制与最优化杂志), 1962-, 双月刊, 该刊曾数易其名, 1976 年第 14 卷起改为现名, 刊载有关控制的数学理论及其应用, 系统理论, 最优化, 以及应用于控制论和最优化的数学分析、应用概率论和随机过程等方面的论文。

53. Soviet Journal of Automation and Information Science (苏联自动化与信息科学杂志), 1986-, 双月刊, 美国 Wiley 公司出版, 原刊名为 Soviet Automatic Control, 选译苏联期刊发表的自动化与信息科学领域的研究论文。

54. Systems and Control Letters (系统与控制快报), 1981-, 年出 2 卷共 10 期, 荷兰 Elsevier 出版社出版, 刊载有关系统与控制在工程、经济、物理学及信号处理的应用方面的研究论文。

55. und order nor + Steuerungstechnik (“或非”和控制技术), 1968-, 月刊, 联邦德国 Krausskopf 公司出版, 内容分电子技术、控制技术和射流技术三大类, 介绍生产过程自动化、设备控制、自动调节技术、自动控制过程中的计算和测量技术, 以及控制技术基本原理等。

56. АВТОМАИКА И ТЕЛЕМЕХАНИКА(自动装置与遥控), 1936-, 月刊, 苏联科学院主办, 刊载自动化控制理论和应用方面的研究论文、综述文章、简讯、书评等。

57. ИАН ТЕХНИЧЕСКАЯ КИБЕРНЕТИКА(苏联科学院通报:技术控制论), 1963-, 双月刊, 苏联科学院主办, 刊载研究论文和专题综述, 以及简讯等。美国 Wiley 公司出版了该刊的英译本: Soviet Journal of Computer and Systems Science。

58. КИБЕРНЕТИКА(控制论), 1965-, 双月刊, 苏联乌克兰共和国科学院控制论中心编辑, 刊载研究论文、评论和简讯, 以及苏联国内有关控制论的最新成果。美国 Plenum 公司出版了该刊的英译本: Cybernetics。

59. НОВОЕ Г ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ: СЕРИЯ МАТЕМАТИКА
КИБЕРНЕТИКА(生活与科技新知识丛刊:数学,控制论), 1973-, 月刊, 苏联莫斯科知识出版社出版的科普性期刊, 介绍有关数学和控制论方面的成就, 历史概况, 当前重大课题的研究和发展趋势等。

60. ПРИБОРВЫ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ (仪表和控制系统), 1956-, 月刊, 苏联仪表制造、自动化和控制系统工业部、仪表制造工业科技学会中央理事会主办, 介绍自动化仪表和自动控制方面的研究成果。(未完待续)