

多变量系统模糊解耦自适应控制*

刘国荣

(湘潭机电高等专科学校·湖南湘潭, 411101)

摘要: 对象模型难以确定的系统, 采用经典控制方法难以实现解耦控制. 作者应用模糊控制理论, 研究了一种无需对象模型的模糊解耦自适应控制方法. 应用该方法, 可使对象模型难以确定的系统实现解耦控制, 且系统鲁棒性好, 自适应能力较强. 本文介绍了这一方法, 导出了实现模糊解耦自适应控制的充要条件, 并给出了仿真结果.

关键词: 模糊解耦控制; 自适应控制

1 引言

经典解耦控制理论大都建立在模型精确完整的基础上^[1,2], 因此, 解耦控制系统对参数十分敏感. 而许多实际的生产过程很难建立起精确的数学模型, 更不说有些生产过程其参数是时变的, 并且存在非线性, 这就限制了经典解耦控制理论的应用. 为了解决解耦控制器对参数的敏感问题, 不少学者研究了一些“不敏感”算法, 实现鲁棒解耦控制. 然而, 迄今为止, 所做的鲁棒解耦研究工作都只是针对特定系统讨论特殊的解耦设计方法, 未系统地解决一般不确定系统的鲁棒解耦问题.

模糊控制是一种具有强鲁棒性的控制方法, 许多学者从 80 年代开始研究模糊解耦控制问题, 提出了一些控制方法, 导得了一些结论. 然而许多结果还只是理论推导, 所提的方法实际应用非常困难, 工程中难以实现. 能否找到一种无需对象模型的简单有效的模糊解耦控制方法, 它既使系统实现鲁棒解耦控制, 又使系统具有较强的自适应能力? 本文研究了这一问题.

2 单变量系统的模糊自适应控制

在文[3]中, 对单变量系统, 作者研究了一种模糊自适应控制方法, 其系统结构如图 1 所示, 图中模糊自适应机构为

$$u_f = f(\epsilon, \dot{\epsilon}) \bar{K}_0 \epsilon. \quad (1)$$

式中 $f(\epsilon, \dot{\epsilon})$ 表示一种非线性函数关系, 其值不大于 1, 由模糊查询表确定 (见文[3]), $\bar{K}_0$ 为输出系数. 受控子系统是一个闭环控制子系统. 当被控制过程模型难以获得时, 可采用模糊控制理论来设计. 然而, 常规模糊控制器的控制作用是随时间变化的阶跃函数, 用它控制的系统, 存在零点极限环振荡现象, 稳态时存在抖动, 工作不平稳, 控制精度不高. 为此, 作者研究了一种无抖动模糊控制器, 它由模糊控制作用、积分作用和限幅处理三部分组成, 如图 2 所示. 模糊控制作用 $u_{ff} = f(e, \dot{e}) K_0 e$, 它与模糊自适应机构形式相同. 其中 $f(e, \dot{e})$ 表示一种非线性函数关系, 其值由模糊查询表确定, K_0 为输出系数. 积分控制作用与模糊控制作用并联, 用来消除系统静差. 积分时间常数 T_i 取为对象最大时间常数的 0.4~0.6 倍. 若对

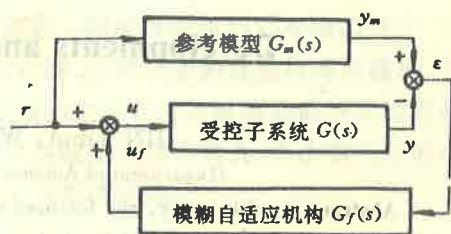


图 1 单变量模糊自适应控制系统结构框图

* 机械工业部教育司科技基金资助项目.

本文于 1996 年 3 月 12 日收到, 1996 年 9 月 24 日收到修改稿.

象由多个惯性环节组成,且这些环节的时间常数相差不超过 5 倍时,则 T_i 取为这些时间常数之和的 0.4~0.6 倍. 输出系统 K_0 对控制器性能影响较大,限幅处理的引入,是为了在确保控制量不超过工程允许值的前提下,适当增大输出系数 K_0 ,提高系统的快速性.

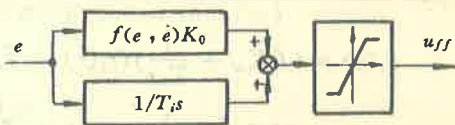


图 2 无抖动模糊控制器结构框图

无抖动模糊控制器有 3 个特点,一是控制器输出为误差的连续函数,它连续变化,去掉了常规模糊控制器的输出继电型非线性特性.当系统进入稳态后,即使误差在平衡点附近波动,由于 $|e|$ 很小, $u_{ff} = f(e, \dot{e})K_0 e$ 仍趋于 0,这时,在积分作用下,系统能很平稳地回到平衡点,消去了零点极限环振荡现象,不存在稳态抖动问题,系统工作平稳.二是自适应能力强.模糊控制作用实质上是一个变系数比例控制器,其比例系数随误差及其变化率的变化而变化,以适应系统参数和工作状况的变化.三是稳态精度高,由于积分作用是直接对未经量化和模糊化处理的误差进行积分,所以能完全消除静差.

上述无抖动模糊控制器和模糊自适应机构相结合,控制一个生产过程,无论过程模型是否知道,都可获得较好的动静态控制性能.

3 模糊解耦自适应控制

考虑一个 $m \times m$ 维多输入多输出系统

$$Y(s) = H(s)U(s). \quad (2)$$

其中

$$Y(s) = [y_1(s), y_2(s), \dots, y_m(s)]^T, \quad U(s) = [u_1(s), u_2(s), \dots, u_m(s)]^T,$$

$$H(s) = \begin{bmatrix} h_{11}(s) & h_{12}(s) & \cdots & h_{1m}(s) \\ h_{21}(s) & h_{22}(s) & \cdots & h_{2m}(s) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ h_{m1}(s) & h_{m2}(s) & \cdots & h_{mm}(s) \end{bmatrix}.$$

当 $h_{ij}(s) (i, j = 1, 2, \dots, m)$ 均不为 0 时,任一个输入变化都会影响所有的输出,输入输出之间存在耦合.我们希望设计一个控制器,在 $H(s)$ 难以确定的条件下,也能实现静态解耦控制,即:各输出分量的稳态值只受相应输入分量的控制.

(2)式给出的 $m \times m$ 维多变量系统可以看作是 m 个多输入单输出子系统,其第 i 个子系统为

$$y_i(s) = h_{i1}(s)u_1(s) + h_{i2}(s)u_2(s) + \cdots + h_{im}(s)u_m(s), \quad i = 1, 2, \dots, m.$$

m 个输入都影响这个子系统的输出.在这 m 个输入中,选择一个主导作用的输入,记为 u_i ,其余看作是系统的外来干扰,则有

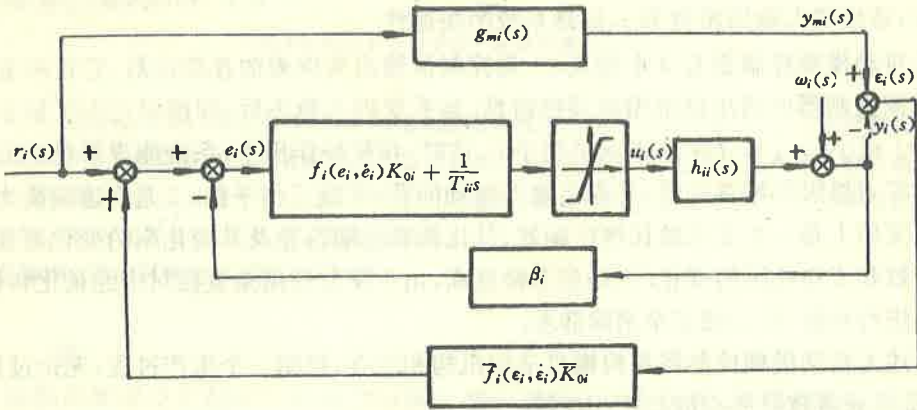
$$y_i(s) = h_{ii}(s)u_i(s) + \omega_i(s), \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (3a)$$

$$\omega_i(s) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m h_{ij}(s)u_j(s). \quad (3b)$$

这样就将一个 $m \times m$ 维多输入多输出系统分解成为 m 个单输入单输出系统.对每个子系统,采用上节介绍的模糊自适应控制方法进行控制,我们有下述结构框图.

图中,限幅处理是为了提高系统稳定裕量、确保控制量不超过工程允许值而引入的,它不影响输入输出的解耦,故下面推导中省去该环节.将 $f_i(e_i, \dot{e}_i)$ 和 $\bar{f}_i(e_i, \dot{e}_i)$ 分别简记为 f_i 和 $\bar{f}_i$,由图 3 有:

$$\begin{aligned}
 u_i(s) &= (f_i K_{0i} + \frac{1}{T_{ii}s})(r_i(s) + \bar{f}_i \bar{K}_{0i} \epsilon_i(s) - \beta_i y_i(s)) \\
 &= (f_i K_{0i} + \frac{1}{T_{ii}s})(r_i(s) + \bar{f}_i \bar{K}_{0i} y_{mi}(s) - (\beta_i + \bar{f}_i \bar{K}_{0i}) y_i(s)), \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (4)
 \end{aligned}$$

图3 第*i*个子系统模糊自适应控制结构框图

令

$$\begin{aligned}
 E(s) &= \text{diag}[f_1 K_{01} + \frac{1}{T_{i1}s} \quad f_2 K_{02} + \frac{1}{T_{i2}s} \quad \dots \quad f_m K_{0m} + \frac{1}{T_{im}s}], \\
 F(s) &= E(s) \cdot \text{diag}[\bar{f}_1 \bar{K}_{01} \quad \bar{f}_2 \bar{K}_{02} \quad \dots \quad \bar{f}_m \bar{K}_{0m}], \\
 G(s) &= E(s) \cdot \text{diag}[\beta_1 + \bar{f}_1 \bar{K}_{01} \quad \beta_2 + \bar{f}_2 \bar{K}_{02} \quad \dots \quad \beta_m + \bar{f}_m \bar{K}_{0m}], \\
 R(s) &= [r_1(s) \quad r_2(s) \quad \dots \quad r_m(s)]^T, \\
 Y_m(s) &= [y_{m1}(s) \quad y_{m2}(s) \quad \dots \quad y_{mm}(s)]^T.
 \end{aligned}$$

选择参考模型为 $g_{mi}(s) = \frac{\omega_{ni}^2}{s^2 + 2\xi\omega_{ni}s + \omega_{ni}^2} \frac{1}{\beta_i}, \quad i = 1, 2, \dots, m.$

令

$$G_m(s) = \text{diag}[g_{m1}(s) \quad g_{m2}(s) \quad \dots \quad g_{mm}(s)],$$

则

$$U(s) = E(s)R(s) + F(s)Y_m(s) - G(s)Y(s). \quad (5)$$

将(5)式代入(2)式得:

$$[I + H(s)G(s)]Y(s) = H(s)[E(s) + F(s)G_m(s)]R(s). \quad (6)$$

定理 线性多变量系统实现模糊静态解耦的充要条件是:

- 1) 各受控子系统稳定;
- 2) 开环静态增益矩阵 $H(0)$ 可逆.

充分性证明. (6)式两边同乘以 s^2 再取极限, 有

$$\lim_{s \rightarrow 0} [sI + H(s)sG(s)]sY(s) = \lim_{s \rightarrow 0} H(s)[sE(s) + sF(s)G_m(s)]sR(s).$$

令

$$T = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \text{diag}[\frac{1}{T_{i1}} \quad \frac{1}{T_{i2}} \quad \dots \quad \frac{1}{T_{im}}],$$

$$P = \lim_{s \rightarrow 0} sG(s) = T \cdot \text{diag}[\beta_1 + \bar{f}_1 \bar{K}_{01} \quad \beta_2 + \bar{f}_2 \bar{K}_{02} \quad \dots \quad \beta_m + \bar{f}_m \bar{K}_{0m}],$$

$$Q = \lim_{s \rightarrow 0} sF(s)G_m(s) = T \cdot \text{diag}[\bar{f}_1 \bar{K}_{01} \quad \bar{f}_2 \bar{K}_{02} \quad \dots \quad \bar{f}_m \bar{K}_{0m}] \cdot \text{diag}[\frac{1}{\beta_1} \quad \frac{1}{\beta_2} \quad \dots \quad \frac{1}{\beta_m}].$$

则有

$$H(0)P \lim_{s \rightarrow 0} sY(s) = H(0)[T + Q] \lim_{s \rightarrow 0} sR(s).$$

因受控子系统稳定,所以,当输入为阶跃信号时, $Y(\infty)$ 存在, $Y(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} sY(s)$.

又因 $H(0)$ 可逆, P 为可逆对角阵,故有

$$\begin{aligned} Y(\infty) &= \lim_{s \rightarrow 0} sY(s) = [H(0)P]^{-1}H(0)[T + Q]R \\ &= \text{diag}\left[\frac{1}{\beta_1 + \bar{f}_1\bar{K}_{01}} \quad \frac{1}{\beta_2 + \bar{f}_2\bar{K}_{02}} \quad \cdots \quad \frac{1}{\beta_m + \bar{f}_m\bar{K}_{0m}}\right] \\ &\quad \cdot [I + \text{diag}[\bar{f}_1\bar{K}_{01} \quad \bar{f}_2\bar{K}_{02} \quad \cdots \quad \bar{f}_m\bar{K}_{0m}]] \cdot \left[\frac{1}{\beta_1} \quad \frac{1}{\beta_2} \quad \cdots \quad \frac{1}{\beta_m}\right]R \\ &= \text{diag}\left[\frac{1}{\beta_1} \quad \frac{1}{\beta_2} \quad \cdots \quad \frac{1}{\beta_m}\right]R. \end{aligned} \quad (7)$$

即 $\lim_{t \rightarrow \infty} y_i(t) = \frac{1}{\beta_i} r_i \quad i = 1, 2, \dots, m.$ (8)

上式表明,系统进入稳态后,每个输出都只受同序号输入的控制,实现了静态解耦. 证毕.

必要性证明. 要使系统能实现静态解耦,显然,各受控子系统必须是稳定的. 系统实现了静态解耦,必然有闭环稳态增益矩阵为对角阵,即

$$\begin{aligned} \lim_{s \rightarrow 0} \bar{H}(s) &= \lim_{s \rightarrow 0} [I + H(s)G(s)]^{-1}H(s)[E(s) + F(s)G_m(s)] \\ &= \text{diag}[\bar{h}_{11}(0) \quad \bar{h}_{22}(0) \quad \cdots \quad \bar{h}_{mm}(0)]. \end{aligned} \quad (9)$$

而 $\lim_{s \rightarrow 0} [I + H(s)G(s)]^{-1}H(s)[E(s) + F(s)G_m(s)] = [H(0)P]^{-1}H(0)[T + Q].$

P, T, Q 均为满秩对角阵,上式右边等于一个非奇异对角阵,必然有 $H(0)$ 可逆. 证毕.

无抖动模糊控制器模糊自适应机构的设计都不需要对象模型,这意味着,对于一个多变量系统,即使不知道其数学模型,应用上述模糊解耦控制方法,也可实现静态解耦控制.

4 仿真实验

文[4]中介绍的汽鼓锅炉单元组负荷系统是一个具有强互作用的双维多变量系统,其输入输出的关系为

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{(1+83s)^2} & \frac{68.18s}{(1+12s)(1+82s)} \\ \frac{2.194}{(1+80s)^2} & \frac{-2.194(1+10.744s)}{(1+3s)(1+124s)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}.$$

u_1, u_2 分别为锅炉燃烧率指令和汽机调节阀开度指令; y_1, y_2 分别为发电机实发功率和主蒸汽压力. 作者选择这一系统作为仿真对象,进行了仿真实验. 实验中,无抖动模糊控制器和模糊自适应机构的参数选择如下:误差、偏差量化因子 $K_{e1} = K_{e2} = K_{e1} = K_{e2} = 100$,误差、偏差变化率量化因子 $K_{e1} = K_{e2} = K_{e1} = K_{e2} = 500$,输出系数 $K_{01} = K_{02} = \bar{K}_{01} = \bar{K}_{02} = 1$,积分时间常数 $T_{i1} = 70s, T_{i2} = 50s$,反馈系数 $\beta_1 = \beta_2 = 1$,4 个模糊查询表取得相同,其表值与文[3]中给出的相同. 取

$$\begin{aligned} g_{m1}(s) &= \frac{0.03^2}{s^2 + 2 \times 0.8 \times 0.03s + 0.03^2}, \\ g_{m2}(s) &= \frac{0.04^2}{s^2 + 2 \times 0.8 \times 0.04s + 0.04^2}. \end{aligned}$$

第一组,在 0 时刻,突加给定 $r_1 = 1.5, r_2 = 1$;当 $t = 700s$ 时,给定 r_1 突变到 2;第二组,在 0 时刻,突加给定 $r_1 = 1, r_2 = 1.5$,当 $t = 700s$ 时,给定 r_2 突变到 2. 仿真结果见图 4 和图 5. 图中用实线划的曲线为系统输出 $y_1, -y_2$, 点划线划的曲线为参考模型输出 y_{1m}, y_{2m} . 由图 4 和图 5 可知,系统进入稳态后, $y_1 = r_1, -y_2 = r_2$, 稳态输出与给定相等. $r_1(r_2)$ 突变时,会引起

$y_2(y_1)$ 发生变化(这是没有实现动态解耦的原因),但这一动态变化的过渡过程结束后,系统输出 $y_2(y_1)$ 又恢复了给定值,实现了静态解耦。作者还进行了参数摄动实验和抗扰动实验,由于篇幅限制,实验结果这里就不一一给出。实验结果表明:系统的鲁棒性较好,抗干扰能力较强,即使存在持续作用的外扰,也能实现静态解耦。

5 结 语

本文介绍的模糊解耦自适应控制方法具有如下特点:

- 1) 控制系统的设计不需要对象模型,方法简单,便于工程应用,特别适用于对象模型难以确定,而又需要实现解耦控制的情况。
- 2) 能对多变量系统实现有效的静态解耦控制。
- 3) 采用这种方法设计的系统,具有较强的自适应能力,鲁棒性较好,抗干扰能力较强。
- 4) 本文研究的是线性多变量系统,不难看出,其结论和方法对非线性系统也是适用的。有关证明有待进一步的工作。

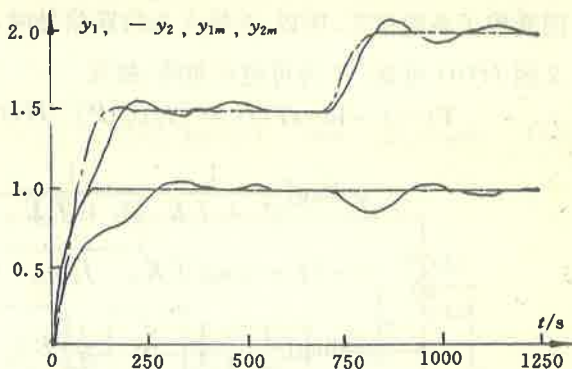


图4 解耦实验 1: r_1 突变

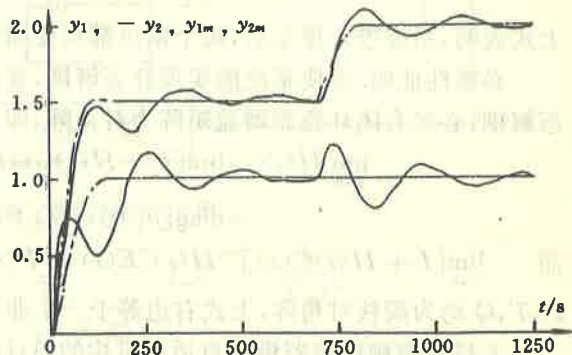


图5 解耦实验 2: r_2 突变

参 考 文 献

- 1 张化光等. 多变量模糊控制的现状与发展(Ⅰ)——关于解耦、神经网络、变结构等问题. 控制与决策, 1995, 10(4): 289—295
- 2 陈苏平等. 多变量过程的鲁棒解耦. 自动化学报, 1995, 21(2): 214—220
- 3 刘国荣. 模型参考模糊自适应控制. 控制理论与应用, 1996, 13(1): 92—97
- 4 张化光. 复杂系统的模糊辨识与模糊自适应控制. 沈阳: 东北大学出版社, 1993

The Fuzzy Decouple Adaptive Control of Multivariable System

LIU Guorong

(Xiangtan Institute of Mechanical and Electrical Technology • Xiangtan, 411101, PRC)

Abstract: It is difficult that the input and output of the system with uncertain parameters decouple by conventional control method. Authod study a fuzzy decouple adaptive control method by applying fuzzy control theory. It is available to made the input and output of the system with uncertain parameters decouple by applying the method, and robust performance and adaptive ability of the system designed using the method is good. In this paper, the method is introduced, and sufficient and necessary condition is derived and simulation experiment results are given.

Key words: fuzzy decouple control; adaptive control

本文作者简介

刘国荣 1957年生, 分别于1982年和1984年在湖南大学获工业自动化专业学士学位和硕士学位。现任机械工业部湘潭机电高等专科学校校长、副教授。主要研究方向是最优控制, 模糊自适应控制, 工业过程计算机控制。