

模型参考模糊自适应控制*

刘国荣

(湘潭机电高等专科学校·湘潭, 411101)

摘要: 本文提出了一种模糊自适应机构的设计方法, 所设计的自适应机构为偏差的非线性函数. 用模糊自适应机构替代常规自适应机构, 构成一个模型参考模糊自适应系统(MRFAS). 导出了该系统稳定的充要条件, 提出了一种量化因子的选择方法. 设计方法简单, 便于工程应用. 仿真结果表明: MRFAS 系统自适应性能好, 抗内外扰动的能力强.

关键词: 模糊控制; 自适应控制; 自适应机构

1 引言

许多工业控制对象, 随着环境条件的变化, 其对象参数会发生变化. 由于对象的复杂性, 有时还存在着未建模动态, 这就给控制带来了一定困难. 解决这一问题的较好方法是采用自适应控制. 然而, 自适应控制在工程应用中还存在一些困难: ①必须识别出被控对象的数学模型, 或用其他手段解决状态重构问题. 这在实际应用上容易带来很大误差; ②对一些复杂的高阶、非线性(带有纯滞后环节)系统, 理论上还没有合适算法, 工程上更难以实现; ③自适应机构较复杂, 计算工作量大, 计算机难以实现. 模糊控制是近三十年发展起来的一种简单实用的控制方法. 它根据被控量的调节偏差及其变化率进行调节, 不需要预先知道被控对象结构、参数, 对对象时变及纯滞后有一定的适用性. 如果能用一种模糊自适应机构去取代复杂的常规自适应机构, 实现自适应控制, 那么, 上述常规自适应控制存在的三个问题就迎刃而解了. 本文研究了这一问题. 采用 T-S 模糊模型^[1]设计模糊自适应机构, 用参考模型产生期望的输出时域响应(目标), 采用信号综合方法, 将模糊自适应机构的输出作用于受控子系统, 构成模型参考模糊自适应控制系统.

2 模糊自适应机构的设计

模型参考模糊自适应系统(MRFAS)结构框图如图 1 所示, 它由参考模型、受控子系统、模糊自适应机构三部分组成. 参考模型用来产生期望的输出时域响应. 受控子系统是一个包含对象在内的闭环控制系统. 模糊自适应机构根据参考模型输出与受控子系统输出之差及其变化率, 产生一个模糊自适应信号, 作用于受控子系统, 使其输出趋于参考模型输出.

当给定突变(假定 $G(s) \neq G_m(s)$), 对象参数变化或出现状态干扰时, 参考模型和对

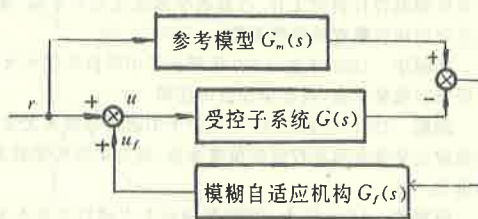


图 1 模型参数模糊自适应系统结构框图

* 机械工业部教育司科技基金资助课题.

本文于 1994 年 6 月 3 日收到, 1995 年 5 月 22 日收到修改稿.

瞬态响应之间的关系总共存在如图 2 所示 9 种情况. 当在每个采样时刻获得了响应 y, y_m 后, 我们就可以根据此时刻 y 偏离 y_m 的情况及其变化趋势, 产生一个模糊自适应信号, 作用于受控子系统, 使 y 尽快趋于 y_m . 设 E 和 EC 分别表示语言变量偏差和偏差变化率, 它们的取值见表 1, 其论域见表 2. 采用 T-S 模糊模型, 即采用如下形式的蕴含式

If ϵ is A And $\dot{\epsilon}$ is B Then $u_f = g(\epsilon)$.

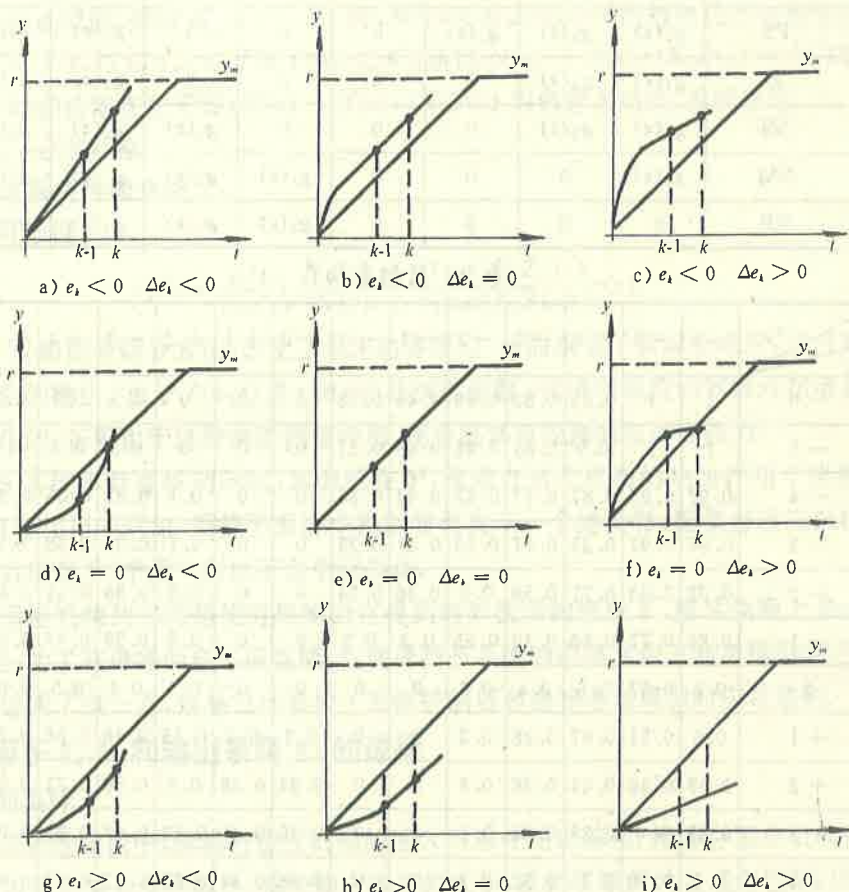


图 2 对象与参考模型瞬态响应之间的 9 种关系示意图

可得模糊控制表 1. 上式中 A, B 为模糊子集, $g(\epsilon)$ 为 ϵ 的连续函数, 表 1 中 $g_1(\epsilon), g_2(\epsilon), g_3(\epsilon)$ 分别取为 $K_o\epsilon, 0.6K_o\epsilon, 0.3K_o\epsilon$. 所有模糊子集的隶属函数取为分段线性函数, 按文[1]给出的模糊推理算法, 可求得模糊查询表如表 2 所示. 表中任一元素与 $K_o\epsilon$ 之积, 即为相应系统状态时模糊自适应机构的输出 u_f . 显然, $u_f = f(\epsilon, \dot{\epsilon})K_o\epsilon$. 式中 f 表示一种非线性函数关系, 其值由模糊查询表 2 确定.

3 MRFAS 系统稳定性及其性能分析

3.1 MRFAS 系统的稳定性

由图 1 可知

$$y(s) = G(s)(r(s) + f(\epsilon, \dot{\epsilon})K_o\epsilon(s)), \quad y_m(s) = G_m(s)r(s),$$

$$\epsilon(s) = y_m(s) - y(s) = \frac{G_m(s) - G(s)}{1 + f(\epsilon, \dot{\epsilon})K_oG(s)}r(s).$$

表 1 模糊控制表

$\begin{matrix} u_f \\ EC \end{matrix} \begin{matrix} E \\ EC \end{matrix}$	PB	PM	PS	PZ	NZ	NS	NM	NB
PB	$g_1(\epsilon)$	$g_1(\epsilon)$	$g_2(\epsilon)$	$g_3(\epsilon)$	0	0	0	0
PM	$g_1(\epsilon)$	$g_1(\epsilon)$	$g_2(\epsilon)$	$g_3(\epsilon)$	0	0	0	$g_3(\epsilon)$
PS	$g_1(\epsilon)$	$g_2(\epsilon)$	$g_3(\epsilon)$	0	0	0	$g_3(\epsilon)$	$g_2(\epsilon)$
Z	$g_1(\epsilon)$	$g_3(\epsilon)$	0	0	0	0	$g_3(\epsilon)$	$g_1(\epsilon)$
NS	$g_2(\epsilon)$	$g_3(\epsilon)$	0	0	0	$g_3(\epsilon)$	$g_2(\epsilon)$	$g_1(\epsilon)$
NM	$g_3(\epsilon)$	0	0	0	$g_3(\epsilon)$	$g_2(\epsilon)$	$g_1(\epsilon)$	$g_1(\epsilon)$
NB	0	0	0	0	$g_3(\epsilon)$	$g_2(\epsilon)$	$g_1(\epsilon)$	$g_1(\epsilon)$

表 2 模糊查询表

$\begin{matrix} f \\ x_\epsilon \end{matrix} \begin{matrix} x_\epsilon \end{matrix}$	-6	-5	-4	-3	-2	-1	-0	+0	+1	+2	+3	+4	+5	+6
-6	1	1	0.93	0.82	0.66	0.46	0.38	0	0	0	0.3	0.3	0.3	0.3
-5	1	1	0.9	0.81	0.65	0.45	0.37	0	0	0	0.3	0.3	0.3	0.3
-4	0.97	0.95	0.87	0.77	0.62	0.44	0.36	0	0	0.1	0.32	0.35	0.38	0.4
-3	0.96	0.91	0.85	0.67	0.53	0.41	0.35	0	0	0.1	0.34	0.38	0.4	0.43
-2	0.92	0.83	0.71	0.58	0.5	0.36	0.34	0	0	0.3	0.36	0.41	0.46	0.53
-1	0.86	0.77	0.66	0.48	0.35	0.3	0.3	0	0	0.3	0.38	0.47	0.51	0.6
0	0.8	0.67	0.5	0.4	0.3	0	0	0	0	0.3	0.4	0.5	0.67	0.8
+1	0.6	0.51	0.47	0.38	0.3	0	0	0.3	0.3	0.35	0.48	0.66	0.77	0.86
+2	0.53	0.46	0.41	0.36	0.3	0	0	0.34	0.36	0.5	0.58	0.71	0.83	0.92
+3	0.43	0.4	0.38	0.34	0.1	0	0	0.35	0.41	0.53	0.67	0.85	0.91	0.96
+4	0.4	0.38	0.35	0.32	0.1	0	0	0.36	0.44	0.62	0.77	0.87	0.95	0.97
+5	0.3	0.3	0.3	0.3	0	0	0	0.37	0.45	0.65	0.81	0.9	1	1
+6	0.3	0.3	0.3	0.3	0	0	0	0.38	0.46	0.66	0.82	0.93	1	1

设

$$G_m(s) = \frac{Z_m(s)}{N_m(s)}, \quad G(s) = \frac{Z(s)}{N(s)},$$

则

$$G_e(s) = \frac{\epsilon(s)}{r(s)} = \frac{N(s)Z_m(s) - Z(s)N_m(s)}{N_m(s)(N(s) + f(\epsilon, \dot{\epsilon})K_o Z(s))}.$$

系统特征方程为

$$N_m(s)(\dot{N}(s) + f(\epsilon, \dot{\epsilon})K_o Z(s)) = 0. \quad (1)$$

定理 1 MRFAS 系统稳定的充要条件是:

1° 参考模型 $G_m(s)$ 稳定;

2° 受控子系统 $G(s)$ 稳定;

3° $K_o \leq K_o^*$, K_o^* 为方程 $N(s) + K_o Z(s) = 0$ 以 K_o 为参数的根轨迹图的临界稳定值.

证 充分性. MRFAS 系统的特征方程如式(1)所示. 因为 $G_m(s)$ 稳定, 所以 $N_m(s)$ 为一稳定多项式, 若多项式 $N(s) + f(\epsilon, \dot{\epsilon})K_o \epsilon$ 为稳定多项式, 系统便稳定. 因受控子系统稳定, 其极点位于左开平面, 所以方程 $N(s) + K_o Z(s) = 0$ 的根轨迹各分支的起点都在左开平面. 而根轨迹是连续的, 对应 $K_o = 0 \sim K_o^*$ 时, $N(s) + K_o Z(s) = 0$ 的根轨迹段必然落在 S 左平面. 又因 $0 \leq f(\epsilon, \dot{\epsilon}) \leq 1$, $0 \leq f(\epsilon, \dot{\epsilon})K_o \leq K_o$, 所以 $N(s) + f(\epsilon, \dot{\epsilon})K_o Z(s) = 0$ 的根轨迹当 $K_o \leq K_o^*$ 时必然落在左平面, $N(s) + f(\epsilon, \dot{\epsilon})K_o Z(s)$ 为稳定多项式, 系统稳定.

必要性. 证明从略.

3.2 MRFAS 系统性能分析

由图 1 可求得:

$$y(s) = \frac{Z(s)}{N_m(s)} \frac{N_m(s) + f(\epsilon, \dot{\epsilon})K_o Z_m(s)}{N(s) + f(\epsilon, \dot{\epsilon})K_o Z(s)} r(s). \quad (2)$$

由上式可知, 采用信号综合方法, 改变了系统的零极点, 从而改变了其瞬态响应, 使对象输出趋于参考模型的输出. 由于 $f(\epsilon, \dot{\epsilon})$ 是 ϵ 和 $\dot{\epsilon}$ 的非线性函数, 这说明系统的零极点在动态过程中是不断变化的. 正是由于这种动态调整作用, 使系统具有较强的自适应能力.

MRFAS 系统不存在抖动问题, 其原因在于: 模糊自适应机构的输出作用于受控子系统, 而并非直接作用于对象. 受控子系统中控制器相当于一个滤波器, 模糊自适应机构的输出经其加工后得到了“平滑”, 所以不会引起抖动.

模糊自适应机构的作用是使对象输出在受到内外扰动的环境下, 能尽快跟上参考模型的输出. 因此, 为了获得好的自适应性能, 应使受控子系统响应速度快于参考模型响应速度, 仿真实验也证明了这一点, 这是设计受控子系统控制器和选择参考模型时应考虑的.

4 量化因子 $k_\epsilon, k_{\dot{\epsilon}}$ 和输出系数 K_o 的选择

4.1 $k_\epsilon, k_{\dot{\epsilon}}$ 的选择

MRFAS 系统结构中, 模糊自适应机构的输入为系统输出偏差. 模糊自适应机构的作用是使系统输出动态偏差尽快减小. 系统输出偏差的大小, 反映了系统的自适应性能. 因此, 我们结合对系统精度的要求来选择量化因子. 选择量化因子为

$$k_\epsilon = \frac{1}{\text{允许输出偏差}}, \quad k_{\dot{\epsilon}} = 5k_\epsilon. \quad (3)$$

一般, 系统要求的精度为 $1\% \sim 3\%$, 所以一般选择

$$k_\epsilon = 30 \sim 100, \quad k_{\dot{\epsilon}} = 150 \sim 500.$$

作者以 $(k_\epsilon, k_{\dot{\epsilon}}) = (100, 500)$ 为中心, 在其 $-1/5 \sim +5$ 倍的范围内选择多组量化因子进行了仿真实验, 图 3 给出了其中三组对应的仿真结果. 仿真结果表明, 按(3)式选择的量化因子是较合适的.

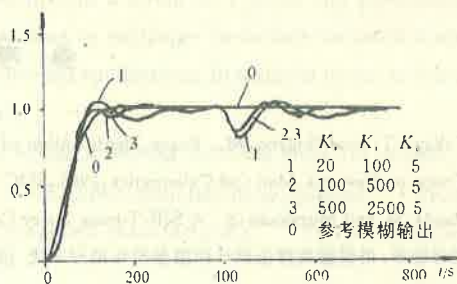


图 3 选择不同量化因子时系统输出仿真结果

4.2 k_o 的选择

由定理 1 可知, K_o 的选择范围为 $0 \sim K_o^*$. 在此范围内, 任选一个非 0 的 K_o , 都将使系统性能较无模糊自适应机构时好. 一般情况下, K_o 愈大, 系统自适应性能愈好, 但稳定裕量愈小. 一般选中间值 $K_o^*/2$.

5 仿真实验

仿真对象传递函数为 $G_p(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}$, 其中 $k = 1, \tau = 5s, T_1 = 50s, T_2 = 60s$. 参考模型选择为 $G_m(s) = \frac{0.03^2}{s^2 + 2 \times 0.8s + 0.03^2}$. 受控子系统采用常规 PI 控制, 控制器参数整定为 $K_p = 1.8, T_i = 100s, k_c, k_i, K_o$ 分别取为 100, 500 和 5. 我们改变对象参数、阶次, 就加和不加模糊自适应机构进行了对比实验. 仿真实验结果如图 4, 5 所示 (由于篇幅限制, 这里只给出了部分实验结果).

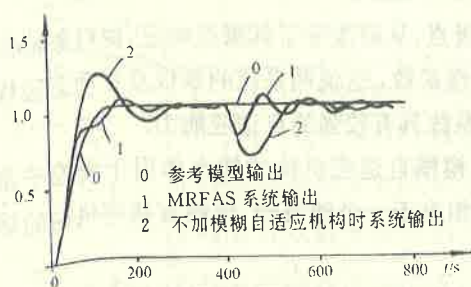


图 4 对象直流增益 K 增大到 1.5 倍时的仿真结果

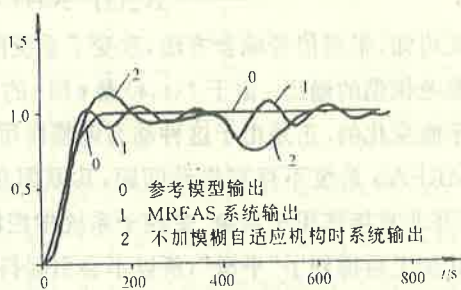


图 5 对象增加一个小惯性环节 $1/(3s+1)$ 时的仿真结果

6 结束语

- 1° 本文提出的模糊自适应机构设计方法对对象模型没有要求, 便于工程应用.
- 2° MRFAS 系统自适应能力较强, 其抗内、外扰动的能力较常规控制系统明显增强.
- 3° 为了获得好的自适应性能, 应适当选择 K_o, K_o 过小, 自适应效果不明显; 过大, 将使系统稳定裕量减小, 一般取为 $K_o^*/2$.
- 4° k_c, k_i 按 (3) 式选择较合适.
- 5° 为了获得较好的自适应性能, 受控子系统的响应速度应设计得快于参考模型的响应速度, 这样有利于受控子系统输出能较快跟上参考模型输出.

参 考 文 献

- [1] Takagi, T. and Sugeno, M.. Fuzzy Identification of System and Its Application to Modeling and Control, IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, 1985, SMC-15:116—132
- [2] Maeda, M. and Murakami, S.. A Self-Tuning Fuzzy Controller, Fuzzy Sets and System, 1992, 51:29—40
- [3] 郑维敏等. 用模糊集理论设计模型参考自适应系统. 信息与控制, 1982, (3):8—14

Model Reference Fuzzy Adaptive Control

LIU Guorong

(Xiangtan Institute of Machinery and Electricity Technology • Xiangtan, 411101, PRC)

Abstract: A design method for fuzzy adaptive mechanism is presented in this paper. The fuzzy adaptive mechanism designed by this method is nonlinear function of output deviation. To use fuzzy adaptive mechanism replace conventional adaptive mechanism and form a Model Reference Fuzzy Adaptive System (MR-FAS). A sufficient and necessary condition of the MRFAS stabilization is derived, and a selection method of quantity factor is presented. The design method is simple and convenient for engineering application. Simulation results illustrate that the adaptive performance of the MRFAS is good and the ability to reject inside and outside disturbances is strong.

Key words: fuzzy control; adaptive control; adaptive mechanism

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副校长、副教授, 主要研究方向是: 最优控制, 模糊自适应控制, 计算机实时控制。

ICARCV'96

FOURTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONTROL, AUTOMATION, ROBOTICS AND VISION

3-6 December 1996

Westin Stamford, Singapore,

CALL FOR PAPERS

The Fourth International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, icarcv'96, will be held in Singapore on 3-6 December 1996. This conference is organised by the School of Electrical and Electronic Engineering, Nanyang Technological University. The theme of ICARCV'96 is "Emerging Technologies for the Twenty First Century". The conference will provide a forum for Control and Automation professionals, manufacturing engineers and academic researchers to exchange up-to-date technical knowledge and experiences. The conference will focus on both theory and applications. In addition to the technical sessions, there will be plenary, invited and tutorial sessions.

Papers describing original work in, but not limited to, the following technical areas are invited:

AUTOMATION • Instrumentation systems • Flexible manufacturing systems • Process automation • Man-machine interaction • Computer integrated manufacturing • Factory modeling and automation • Petri nets and applications

(continued on page 120)