

分层型多变量自适应模糊控制算法的研究

Study of Multivariable Adaptive Fuzzy Control Algorithm With Hierarchical Structure

27-32

白丽

Bai Li

杨永臻

Yang Yongzhen

(重庆大学电子信息工程学院, 重庆, 630044)

TP 273.2

摘 要 利用多维模糊条件语句的分解定理, 结合分层多规则集输入的设计方法, 获得了多变量模糊控制算法的一个简化表达式。模糊规则的修正通过抑制外扰的 α 因子查询修正表得到, 从而获得了一类带解耦设计的多变量自适应模糊控制算法, 并进行仿真验证。

关键词 模糊系统; 自适应; 多变量; 分层型 自适应控制, 算法
中国图书资料分类法分类号 TP273.3

ABSTRACT In this paper a class of multivariable fuzzy adaptive control algorithm with decoupling design is proposed. The proposed simplification controller is based on the decomposition theorem of multivariable fuzzy conditional statement and hierarchical multirules structure. The fuzzy modification of controller's rule is achieved by looking for a modifiable coefficient table for restraining disturbance. Simulation results demonstrate the effectiveness of the controller.

KEYWORDS fuzzy system; adaptive; multivariable; hierarchical structure

0 前 言

自从 E. H. Mamdani 首次提出模糊控制以来, 很多学者对模糊控制的理论和应用做了大量的研究工作, 取得了很大的进展。然而, 对于有耦合和关联作用的多变量系统则较少涉及。这主要是由于多维的模糊推理运算相当复杂, 而且需要解决多变量系统中各变量间的耦合问题, 算法复杂, 内存和计算时间剧增, 致使多变量模糊控制的实现非常困难。本文基于多维模糊条件语句的分解定理并结合单变量系统的模糊控制方法, 获得了一种多变量模糊控制算法的简化表达式。特点是将一个多变量模糊控制器转化成多个多层输入的单变量模糊控制器, 以消除多变量模糊控制系统间的耦合, 并通过抑制外扰的 α 因子查询修正表得到控制输入校正量来实现规则的修正, 推出了一类多变量自适应模糊解耦控制算法。

模糊控制是一种智能型控制方案, 必须解决以下三方面问题:

- 1) 精确量的模糊化, 把语言变量的语言值化为某适当论域上的模糊子集;
- 2) 模糊控制算法的设计。通过一组模糊条件语句构成模糊控制规则, 并进而确定出有

关变量间的模糊关系;

3) 输出信息的模糊化判决,并完成由模糊量到精确量的转化。

模糊控制算法设计是以被控变量的误差(E)和误差的变化(EC)作为控制器的输入,以控制量的变化作为控制器的输出。对于复杂的系统,单凭工程经验一次性地总结出满意的控制规则是十分困难的,而粗糙的模糊控制规则会影响控制效果。为了越过这个障碍,可采用自适应控制策略。实际上,在常规模糊控制系统中,附加上性能测量、控制量校正和控制规则修正三个功能块,就可以实现自适应模糊控制。

性能测量直接测量系统的输出特性,并与给定值进行比较,得出偏离的大小,并计算出校正量 $P(nT)$ 。

1 多变量解耦模糊控制算法

图1所示的 n 个输入, m 个输出的多变量控制系统,采用下面一组多维模糊条件语句来描述其控制策略^[1]: If $X_1(i)$ and $X_2(i) \cdots$ and $X_n(i)$ then $U_1(i)$ and

$U_2(i) \cdots$ and $U_m(i), i = 1, 2, L$ L 是控制规则数量。

其中 $X_k(i)$ 是定义在论域 X^k 上的第 k 个输入变量的模糊值, $k = 1, 2, \cdots, n$, $U_j(i)$ 是定义在论域 U^j 上的第 j 个输出变量的模糊值, $j = 1, 2, \cdots, m$ 。

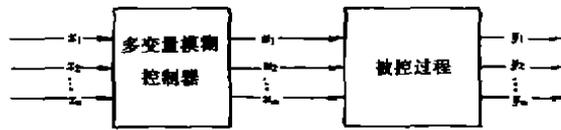


图1 n 输入 m 输出多变量模糊控制系统

则控制器的输出, $U = X \times R$, 其中 R 为模糊关系

$$R \in F(X_1 \times X_2 \times X_3 \times X_4 \times \cdots \times X_n \times U_1 \times U_2 \times U_3 \times U_4 \times \cdots \times U_m)$$

$$\text{第 } j \text{ 个输出变量 } U_j = (X_1 \times X_2 \times X_3 \times \cdots \times X_n) \times R_j \quad (1)$$

\times 表示合成运算, R_j 是相应于 U_j 的 $X^1 \times X^2 \times X^3 \times \cdots \times X^n \times U^j$ 的模糊关系。对于一个用一组多维模糊条件语句描述的多变量模糊控制器,总可以转化成多个单变量模糊控制器的相交组合^[2]。

$$\text{由此可得出如下公式, } U_j = X_1 \times R_{1j} \wedge X_2 \times R_{2j} \wedge \cdots \wedge X_n \times R_{nj}, j = 1, 2, \cdots, m \quad (2)$$

这实际上就是表征多变量模糊控制算法的一个简单表达式。

由上式可以看出,多变量模糊控制器的某一输出 $U_j (j = 1, 2, \cdots, m)$ 不但含有它对应的输入 $X_k (k = 1, 2, \cdots, n)$ 的作用,而且含有其它输入的作用。这样当 U_j 输入到被控对象时才能很好地消除耦合。由此可以将具有 n 个输入 m 个输出的多变量模糊控制器转化为多个单变量模糊控制器的相交组合。

对于两输入两输出过程,每个子系统以被控变量的误差 E 和误差的变化 EC 作为控制器的输入,以控制量的变化作为控制器的输出,则有:

$$U_1 = (E_1 \times EC_1) \times R_{11} \wedge (E_2 \times EC_2) \times R_{12} \quad (3)$$

$$U_2 = (E_1 \times EC_1) \times R_{21} \wedge (E_2 \times EC_2) \times R_{22} \quad (4)$$

结构框图如图 2 所示。

显然,直接用这种结构的模糊控制算法控制一个多变量系统是不方便的,因为要获得一组多维的模糊条件语句和各个输入与输出间的模糊关系非常困难,且计算量很大.因此作者采用了多层输入的单变量模糊控制算法,即把各子系统 中被控变量的误差 E 及误差的变化率 EC 作为主体模糊控制器的输入,而将其 它的输入量作为辅助变量,由它们的变化来代表不同的过程状态(K),在不同的过程状态下,再根据被控变量的误差 E 及变化率 EC 确定出控制规则.这种设计思想如图 3 所示,可以称为分层多规则集结构。

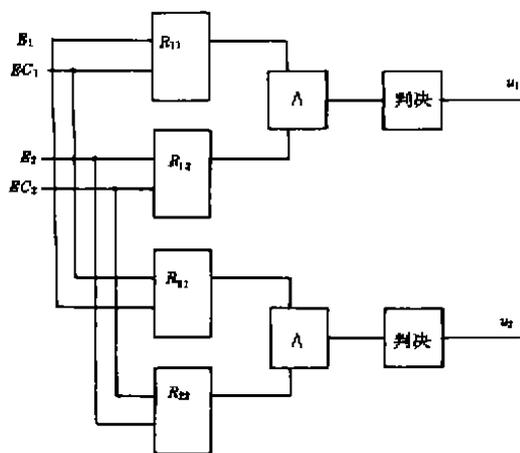


图 2 多变量模糊控制的简化形式

这种模糊控制(类似于两极控制)可用下列模糊条件语句来描述:

IF 过程状态 K , THEN 迹樱浴截制规则集 $R_k (K = 1, 2, \dots, n)$

n 表示过程状态数量。

R_k : IF $E = E_k$, AND $EC = EC_{kj}$,

THEN $U = U_{kj}$, ($i = 1, 2, \dots, L_1, j = 1,$

$2, \dots, L_2$), L_1, L_2 表示语言变量 E, EC 在其论域上的模糊子集数。

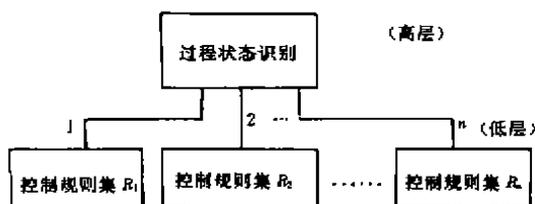


图 3 分层多规则集结构

表 1 规则集 R_1 中的控制输出(U_1) 查询表

E_1	EC_1						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PM	PS	ZO
NM	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	NS
NS	PB	PM	PM	PS	ZO	NS	NM
ZO	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
PS	PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NB
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NB	NB
PB	ZO	NS	NM	NS	NB	NB	NB

对于多变量控制系统的控制对象而言,一个控制变量可以用来控制不止一个被控制量.然而,每一个被控制变量可以认为受某一个基本控制变量所控制.这样,每个子系统都有一个主体通道.式(3)表示的模糊控制器输出 U_1 有四个输入量 E_1, EC_1, E_2, EC_2 . 令 E_1, EC_1 作为子系统 1 的主体模糊控制器输入,即由 E_1, EC_1 决定具体的控制规则集.而由 E_2 及 EC_2 决定的性能测量 P_2 作为辅助输入量,判别过程状态,从而形成两层控制.这里的 P_2 表示子系统 2 的性能测量.在模糊控制中,通常取“偏差”,“偏差变化”作为两个参数,来衡量输出特性与希望特性的偏离情况,并根据这两个参数计算出输出特性所需要的校正量.假设 P_2 有 7 个模

糊子集(PB, PM, PS, Z0, NS, NM, NB), 对其每一个模糊子集, 都对应一种过程状态, 主体模糊控制器也都有一个对应的模糊控制表。如对于 P_2 的模糊子集 PB, 对应的主体控制器的模糊控制表如表 1。

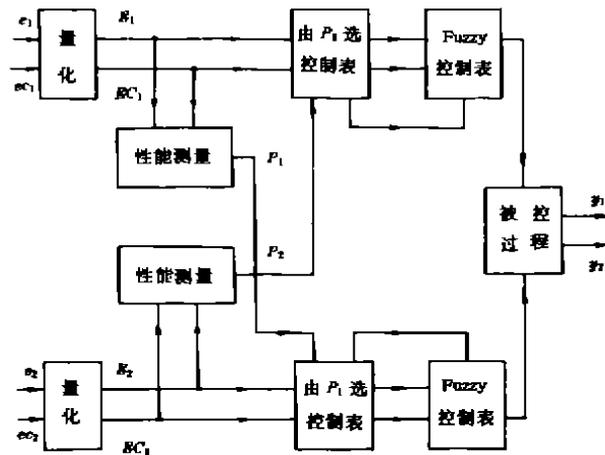


图4 分层多规则集多变量模糊控制系统示意图

在线应用时, 由辅助输入量确定对应过程状态, 再查对应的模糊控制表即可得到控制输出量, 类似地可得到子系统 2 的控制输出量, 系统框图如图 4 所示。

设计步骤归纳如下:

1) 确定各输入量与输出量的实际变化范围, 量化因子与比例因子, 从而确定论域离散档数。

表 2 α 因子查询表

P_i	P_{i-1}						
	NB	NM	NS	Z0	PS	PM	PB
NB	PM	PMS	PS	Z0	PS	PMS	PM
NM	PMS	PM	PS	Z0	PS	PMS	PM
NS	PB	PMB	PM	Z0	PMS	PM	PMB
Z0	PB	PMB	PM	Z0	PM	PMB	PB
PS	PMB	PM	PMS	Z0	PM	PMS	PB
PM	PM	PMS	PS	Z0	PM	PMB	PB
PB	PM	PMS	PS	Z0	PMS	PM	PB

各输入量, 辅助输入量, 输出量的变化范围可根据实际情况确定, 选择量化因子与比例因子, 将其离散化。

2) 模糊变量的选取与模糊赋值

分别在控制器的输入量与输出量的论域上定义模糊变量, 并确定模糊赋值。

3) 模糊控制规则集的确定及推理运算

根据分层规则集结构, 由过程状态决定控制规则集, 规则集均由操作经验而得, 计算由模糊控制规则决定的模糊关系, 并完成由模糊量到精确量的转化, 就可得到对应的模糊控制表。

4) 控制量的校正

设控制校正量为 r_k , 性能测量(即输出校正量)为 P_k , 归一化后, $r_k = P_k$. 由于干扰影响, 实际输出校正量并不等于 P_k , 因此须加一个调整因子 α . 令 $r_k = \alpha \cdot P_k$, α 的选取取决于不同时刻的性能指标, 调整因子 α 应在 0 到 1 的范围内改变, 其模糊状态可根据实际应用具体确定。

典型的 α 因子查询表如表 2 所示。

其中 P_{k-1} 为 m 时刻以前的输出校正量, P_k 为当前时刻的输出校正量。(输出校正量的语言变量为 $NB, NM, NS, Z0, PS, PM, PB$, 分别表示负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大)。

2 数字仿真

本文列出有代表性的三组数字仿真曲线。

仿真研究中采用双输入双输出的电加热炉控制系统模型:

$$y(k) + A_1 \cdot y(k-1) + A_2 \cdot y(k-2) = B_0 \cdot u(k-2) + B_1 u(k-3) + \zeta(k) + d$$

式中

$$A_1 = \begin{bmatrix} -0.2424 & -0.099 \\ -0.1322 & -0.4263 \end{bmatrix} \quad A_2 = \begin{bmatrix} -0.3426 & -0.405 \\ -0.1070 & -0.2404 \end{bmatrix}$$

$$B_0 = \begin{bmatrix} 0.1037 & 0.0763 \\ 0.0531 & 0.1352 \end{bmatrix} \quad B_1 = \begin{bmatrix} 0.0916 & 0.0575 \\ 0.0670 & 0.118 \end{bmatrix}$$

$\zeta(k)$ 是均值为零的白噪声向量, d 为直流分量。

仿真过程中, 所加的随机噪声方差为 $\sigma^2 = 0.05$ 。

图 5 是在仿真第 100 步使子系统 1 的时滞由 2 变为 4, 由图 5 可以看出时滞变化对系统性能影响不大, 系统仍能稳定运行。

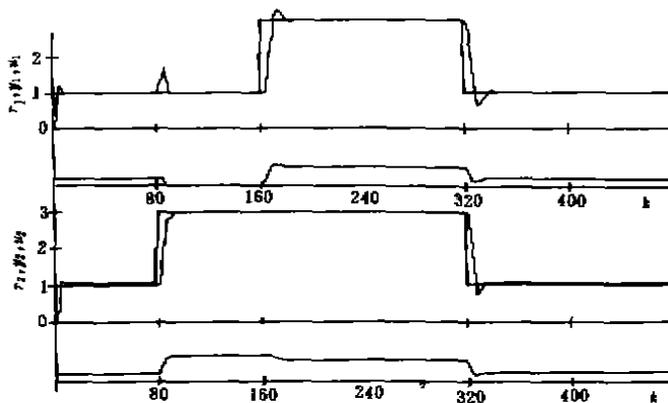


图 5 变时滞仿真曲线

图 6 是在仿真第 120 步之后, 加入 $d = 0.5$ 的直流扰动分量的仿真曲线, 可以看出算法对负载扰动有较强的鲁棒性。

图 7 是过程参数突变并加随机噪声的仿真曲线。在仿真第 120 步, 子系统 1 的模型增益由原来的 0.4706 变成了 0.7205, 变化了 53.0%。在仿真第 240 步, 子系统 2 的模型增益由原来的 0.7596 变成了 0.6156, 变化了 -18.9%。结果表明, 本算法能很快地适应模型参数变化, 并能有效地抑制随机噪声。

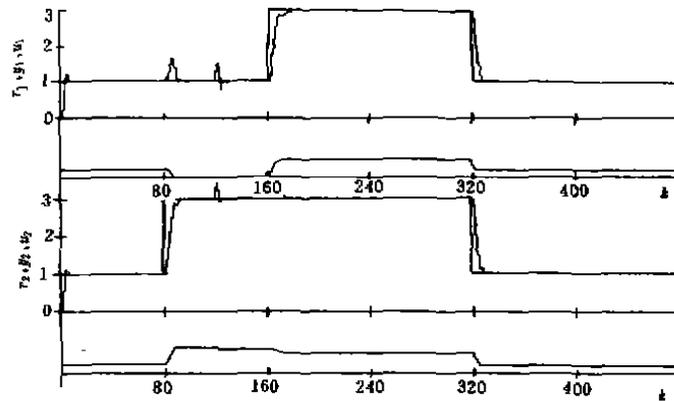


图6 突加直流扰动分量的仿真曲线

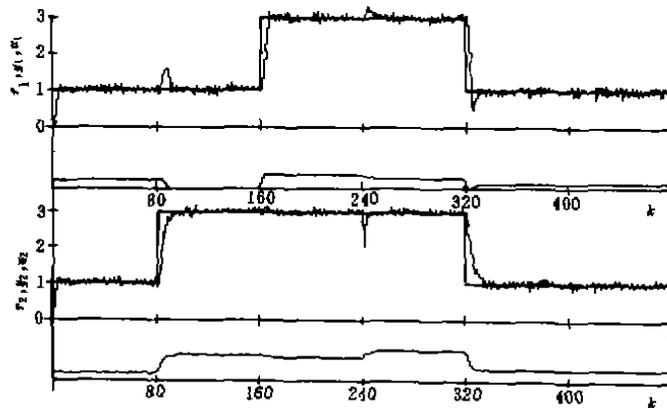


图7 变增益仿真曲线

3 结束语

多变量过程存在着耦合、时变、模型不确定等多种不利因素,实时控制困难,笔者提出的多变量自适应模糊解耦控制算法简单,利用分层结构和调整因子,较好地解决了多变量系统的耦合和不确定性等难控问题。数字仿真结果证实了该算法既能快速跟踪设定值,又能削弱各变量之间耦合的影响,抗负载扰动,抑制随机噪声以及对付参数时变的能力较强,表现出良好的鲁棒性和自适应性,为复杂工业过程控制提供了一种新的途径。

参 考 文 献

- 1 Gupta M M et al, Multivariable Structure of Fuzzy Control system. IEEE Trans, SMC-16, 1986(5): 638 ~ 655
- 2 Zhou changjin, Wang bianfang. Model Simplification of Multivariable fuzzy control system. proceeding of the 1988 IEE International Conference on SMC 1: 70 ~ 74