

最优模糊控制器的系统设计

李 平 孙优贤 周春晖

(浙江大学工业控制技术研究所, 杭州, 310027)

摘要: 典型模糊控制器在难于建立数学模型或对控制精度要求不高的场合已得到了成功的应用, 但传统的控制方法相比, 它存在两个明显的弱点, 一是所得到的模糊控制规则不能保证其是最优的或是次最优的, 二是在设计模糊控制器获取模糊控制规则时主要是凭经验进行, 没有系统的步骤可遵循. 本文提出了一类最优模糊控制器的系统设计方法及步骤. 这种最优模糊控制器既有典型模糊控制器的形式, 又有类似于线性二次型的性能指标 $J = \sum_{k=1}^{T_f} (aN_{A(k)} + bN_{B(k)})$, 使该性能指标趋于最小, 便能保证所得到的模糊控制规则最优. 采用该最优模糊控制器的造纸机计算机控制系统成功地投入实际应用, 效果令人满意.

关键词: 模糊集; 最优模糊控制; 造纸过程控制; 控制系统设计

1 问题的提出

模糊控制器自 1974 年问世以来, 出现了大量理论上和应用上的研究成果, 但其基本设计方法没有什么改变. 例如设计单输入单输出典型模糊控制器时, 定义由语言变量描述的模糊子集, 获取模糊规则, 模糊化(把输入的确切值经量化后转化为模糊值)和判决(由运算出的输出模糊值转化为确切值)等步骤已基本形成固定程序. 其中模糊规则的获取完全按操作人员和设计者的经验进行, 而其它各步骤中或多或少都有一些指导原则可采用. 但在各步骤中, 最为重要的恰恰是获取模糊控制规则, 因为模糊控制规则是模糊控制器的核心, 实际上决定了控制系统的性能.

由于模糊控制规则的获取完全凭经验进行, 造成了模糊控制器的设计无法保证有最优或是次最优的控制性能. 其原因可以归咎于以下几个方面. 首先, 设计者的经验丰富与否决定了他是否能够从操作者大量的操作经验中恰如其分地总结归纳出尽可能简单有效的控制规则. 其次, 过程操作人员的经验本身也不一定是最好的, 他们往往只是按照习惯, 而不是按照最佳控制方案进行最优操作. 最后, 也是最重要的一点, 在模糊控制器的全部设计过程中, 没有控制系统的性能指标, 因而无法对控制系统性能做出任何考虑.

模糊控制器设计由于其关键部分完全靠经验取得, 获取好的模糊控制规则更象是一种技巧而不是一种技术, 因而使整个设计过程缺乏完整的系统性. 为了克服模糊控制器设计中的上述不足, 使模糊控制器能够充分发挥其描述不精确控制行为和不受数学模型限制的特长, 我们提出一类最优模糊控制器及其系统性设计方法.

为满足新设计方法的需要, 这里对模糊集理论提出以下几条补充定义.

2 关于模糊理论的若干补充定义

为满足新设计方法的需要, 这里对模糊集理论提出以下几条补充定义.

1 期

2.1 模糊数(广义)

定义 设 A 为实轴 R 上的模糊集, $\mu_A(x)$ 是其隶属函数, $x \in R$. 设 $\beta = \sup \mu_A(x)$, 若对任意 $\lambda \in (0, \beta)$, $A_\lambda = \{x | \mu_A(x) \geq \lambda\}$ 都是一个闭区间, 则称 A 是一个模糊数(广义).

2.2 模糊集的均值(广义)

定义 设 A 为模糊数(广义), $\beta = \sup \mu_A(x)$, $x \in R$, $X_h = \max\{x | \mu_A(x) = \beta\}$, $x_l = \min\{x | \mu_A(x) = \beta\}$, 则称 $M_A = \frac{1}{2}(x_h + x_l)$ 为模糊集 A 的均值(广义).

2.3 模糊子集的有序性

定义 设 $A_1, A_2, \dots, A_n$, 为在 R 上的模糊子集, 均为模糊数(广义), 且有

$$M_{A_1} < M_{A_2} < \dots < M_{A_n}.$$

则模糊子集的有序性可表示为 $A_1 < A_2 < \dots < A_n$.

2.4 模糊集的模

定义 设 A 为 R 上的模糊数(广义), 则

$$N_A = |M_A|$$

为 A 的模.

3 最优模糊控制设计

为便于叙述, 这里只考虑单输入单输出系统. 最优模糊控制器的设计分为以下几个步骤.

3.1 定义参考模糊子集

首先根据对象工艺要求, 确定输入 u 和输出 y 的变化范围. 即确定论域 U 和 Y .

然后, 分别在论域 U 和 Y 上定义参考模糊子集 $A_1, A_2, \dots, A_n$ 和 $B_1, B_2, \dots, B_m$. 参考模糊子集的定义除一般的要求外, 还有以下要求:

1) 为了使最优模糊控制器的设计有意义, 要求所有参考模糊子集均为模糊数.

2) 各参考模糊子集应有有序性, 即 $M_{A_1} < M_{A_2} < \dots < M_{A_n}$ 和 $M_{B_1} < M_{B_2} < \dots < M_{B_m}$.

3.2 建立模糊模型

在已定义参考模糊子集的基础上, 采用参考文献[1]的辨识方法, 根据对象的输入输出数据即可建立如式(1)所示的模糊语言规则, 即

$$\begin{aligned} \text{If } u = A_i \text{ and } y_b = B_j \text{ then after } T = k_{ijh} \quad y_f = B_h, \\ i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m}, \quad h \in \{1, \dots, m\}. \end{aligned} \quad (1)$$

在模糊模型式(1)的辨识中, 模糊规则总数理论上最多为 $n \times m^2$ 条, 但实际可得规则一般均少于此值, 而在最优模糊控制器设计中所需的规则数又要少于实际可得规则数. 因此, 在设计辨识实验时, 可只考虑那些对于最优模糊控制器设计有用的模型规则的辨识.

辨识中数据的采样周期对模型(1)中时间参数 k_{ijh} 有影响. 改变采样周期后, k_{ijh} 也会改变. 但与确定性离散状态模型相比, 模糊模型(1)中其它参数对采样周期变化不敏感. 因此当采样周期变化后, 仅仅将参数 k_{ijh} 加以修改, 即可保持模型的有效性.

3.3 最优模糊控制规则的获取

最优模糊控制规则的获取是在模糊模型(1)的基础上进行的. 其具体的步骤为

第一步 定义模糊模型(1)中每一条规则的模糊损耗函数为

$$J_{ijh} = ak_{ijh}N_{A_i} + b \sum_{l=j}^h k_l N_{B_l} = \sum_{l=j}^h k_l (aN_{A_i} + bN_{B_l}),$$

$$i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m}, \quad h \in \{1, \dots, m\}. \quad (2)$$

式中, N_{A_i} 和 N_{B_l} 为参考模糊子集 A_i 和 B_l 的模, $\sum_{l=j}^h k_l = k_{ijh}$, $a > 0, b > 0$ 为加权系数, 其作用类似于确定性系统线性二次型最优控制设计中的加权矩阵 Q 和 R , 即 a 越大表明在最优设计中要求控制作用 u 的振幅越小, 对 b 亦然.

(2) 式也可以表示为 $J_{ijh} = \sum_{k=1}^{k_{ijh}} (aN_{A(k)} + bN_{B(k)}).$ (3)

这里 $A(k)$ 和 $B(k)$ 分别表示在 k 时刻 u 和 y 所取的参考模糊子集.

对模糊模型(1)中每一条规则计算其模糊损耗 J_{ijh} 后, 可以将模糊模型(1)式改写为如下形式

$$\text{If } u = A_i \text{ and } y_b = B_j \text{ then } y_f = B_h \text{ with } T = k_{ijh} \text{ and } J_{ijh},$$

$$i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m}, \quad h \in \{1, \dots, m\}. \quad (4)$$

第二步 在模糊子集 $B_1, B_2, \dots, B_m$ 中确定控制目标模糊子集 B_0 ($B_0 \in \{B_1, B_2, \dots, B_m\}$), 即希望控制的结果使对象输出 y 落在 B_0 中.

第三步 采用逆向回溯法建立控制网络. 由于模糊模型(1)中的规则均为因果关系形式, 因而可以采用启发式的逆向回溯法来建立各模糊子集之间的联系关系图, 或称为控制网络. 具体方法是, 先在所有规则中寻找在结论部分包含有 B_0 的那些规则, 即寻找模型(1)中具有“...then $y_f = B_0$...”的规则, 将这些规则的前提部分中包含的模糊子集 B_j 作为第一级逆向回溯的结果, 记为 $B_l^{(1)}, 0, l^{(1)} = 1, \dots, m^{(1)}, m^{(1)} < m$. 再分别以 $B_l^{(1)}, 0$ 为起点, 作第二级逆向回溯的起点, 同样进行搜索, 得到第二级逆向回溯的结果, 记为 $B_{l^{(2)}, l^{(1)}}, l^{(2)} = 1, \dots, m^{(2)}, m^{(2)} < m, \dots$. 这样逐级进行逆向回溯, 并注意保持单向性, 即在回溯中根据各模糊子集的有序性, 只从 B_0 分别向 B_1 和 B_m 方向扩展, 以避免形成无休止的循环. 经过这样的搜索, 可得到如图 1 所示的树状结构. 图中箭头表示规则作用方向.

对图 1 的树状结构进行整理, 将各级中模糊子集相同的结点并在一起, 就形成了图 2 所示的网状结构.

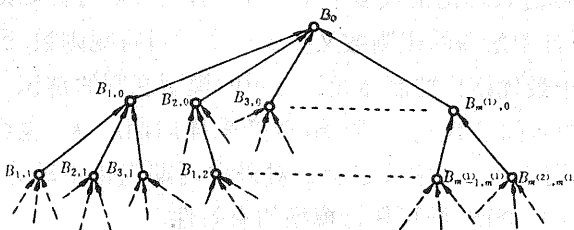


图 1 逆向搜索的树状结构

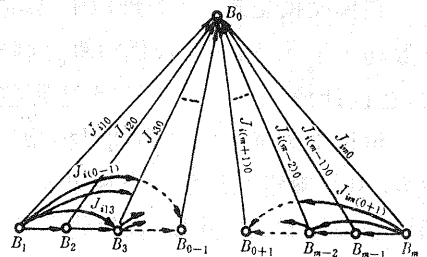


图 2 网状结构控制网络

1 期

在图 2 的网络连线上标上相应规则的损耗函数 J_{ijh} 值,即得到所需的控制网络.由于对起始点相同的规则 u 可能取不同的模糊子集 A_i ,在标出 J_{ijh} 时应取使 J_{ijh} 值最小的 A_i ,并具体标明 i 的数值.

第四步 根据图 2 所示的控制网络,可以方便地采用基本动态规划方法求出从各起始结点(模糊子集 $B_j \neq B_0$)向目标结点(模糊子集 B_0)的控制作用的最佳路径,使该路径上的损耗函数

$$J = \sum J_{ijh} \quad (5)$$

取最小值.

由动态规划法所选取的最佳路径,就可以确定各起始模糊子集 B_j 对指定目标模糊子集 B_0 的最优模糊控制规则

$$\text{If } y = B_j \text{ then } u = A_i, \quad (6)$$

$$j = \overline{1, m}, \quad i \in \{1, \dots, m\}.$$

这些规则能够保证最优模糊目标函数

$$J_m = \sum_{k=1}^{\infty} [aN_{A(k)} + bN_{B(k)}] \quad (7)$$

取极小值.

3.4 由最优模糊控制规则转换为查询表矩阵

这一步与典型模糊控制器设计步骤相同,这里就不再赘述.

至此,我们就完成了最优模糊控制器的设计.

4 若干问题的讨论

4.1 模糊最优控制与最优模糊控制

模糊最优控制概念是 Bellman 和 Zadeh 首先提出的^[2],其基本内容是在已知期望输出序列和控制序列条件下,使实际的输出和控制作用与期望值尽可能接近,从而使隶属度形式的目标函数取最大.对于模糊控制器的设计,这样的模糊控制思想是难于应用的.

为区别于模糊最优控制,我们将所提出的模糊控制器称作为最优模糊控制器.这种最优模糊控制器在本质上与典型的模糊控制器没有什么不同,只是在设计过程中是按照使模糊目标函数(7)取极小的最优准则从模糊模型得到模糊控制规则,而不是从操作人员的经验中总结归纳得到,这种模糊控制器的设计具有了系统性,而不再是只依赖于经验和技巧.

4.2 对多输入系统的适用性

在前面对最优模糊控制器描述时,是以最简单的单输入(即只有对象输出偏差)单输出系统为例子的,这样便于以图示说明.当模糊控制器为两输入时(对象输出偏差和偏差变化率),这种设计方法仍可适用,只不过增加了一定的计算复杂性和计算机内存需要量.

4.3 最优模糊控制器的存在条件

最优模糊控制的概念基于参考模糊子集的均值和模这样一些基本定义,而这些定义对于任何具有连续隶属函数的凸模糊子集都存在,因此,最优模糊控制器对于模糊参考子

集仅有是可排序的模糊数(无论狭义或广义)的要求.

4.4 最优模糊控制的精确性与复杂性关系

正如其名称所指出的,模糊目标函数 J_m 的最优含义是模糊的. 当 J_m 数值上取确定值时, u 和 y 都有一个允许变化范围, 这取决于参考模糊子集如何定义. 在相同论域上, 参考模糊子集个数越多, J_m 确定性就越有意义, 越接近真正的最优, 但计算难度也越大, 用计算机实现时所需内存越多, 查询时间也越长. 这就需要在最优模糊控制的精确性与复杂性之间作权衡. 考虑前面讨论的单输入单输出模糊对象. 对一个确定的论域 U , 假定定义 n 个参考模糊子集 $A_i (i = \overline{1, n})$, 将其等分, 则当 U 中的元素 $u = A_i$ 时, 其允许变化范围为 $M_{A_i} \pm U/2n$. 同样, 对确定论域 Y , 定义 m 个参考模糊子集 $B_j (j = \overline{1, m})$, 将其等分, y 的允许变化范围为 $M_{B_j} \pm Y/2m$. 因此, 当目标函数 J_m 取极小值

$$J_m^* = \min \sum_{k=1}^{T_f} (aN_{A(k)} + bN_{B(k)}) \quad (8)$$

时, 其实际值变化范围为

$$J_m^* \pm \sum_{k=1}^{T_f} (aU/2n + bY/2m) = J_m^* \pm (aU/n + bY/m)T_f/2 = J_m^* \pm J_e. \quad (9)$$

这里 $J_e = (aU/n + bY/m) \cdot T_f/2$. 显然, 有 $n \uparrow, m \uparrow \rightarrow J_e \downarrow$. 但同时, 所建立的模糊模型的模糊语言规则最多条数为 $n * m^2$, 最优模糊控制规则的最多条数为 $n * m$, 而规则的条数多少决定了规则的复杂程度. 假定以 J_e 的倒数表示最优模糊控制的精确程度, 以规则总数 nm 表示其复杂程度. 由 $1/J_e = 2nm/T_f(aUm + bYn)$, 与规则总数 nm 相比可知, n, m 的增加对复杂性的影响比对精确性的影响更大. 因此, 不应轻易以提高参考模糊子集个数的方法来追求控制的精确程度.

4.5 模糊定值控制与模糊随动控制

对于模糊定值控制系统, 由于目标模糊子集 B_0 是确定的, 只需要对 B_0 为目标进行最优模糊控制器设计得到相应的一组最优模糊控制规则, 因此可只考虑有关模糊规则的辨识和最优设计, 使辨识和设计都大为简化. 而对于模糊随动控制系统, 若不是采用偏差控制方法, 则目标模糊子集是不确定的, 必须以所有的 B_i 作为目标模糊子集进行最优模糊控制设计, 得到不同的各组最优模糊控制规则. 相比之下, 这种模糊随动控制系统的设计和实施都要复杂一些.

本文提出的最优模糊控制器设计方法, 对典型的模糊控制器设计方法作了两点重要改进, 即: 1) 提出了模糊控制系统的一种最优性能指标; 2) 使模糊控制规则的获取过程由完全依赖经验变为可以完全由计算机完成的系统性设计过程. 这将使得模糊控制器更易于在实际工业过程控制中应用推广. 用这种方法设计的造纸生产过程纸张水份最优模糊控制系统, 在某纸机投入实际运行取得满意的效果.

5 应用实例

在造纸计算机控制系统中, 可用两个控制子系统控制纸张最重要的两个质量指标——定量(每平方米克重)和水份(含水量的百分比), 其中水份子系统采用最优模糊控

制。
首先通过模糊辨识得到如式(1) 所示的不包括定量影响的模糊模型,由此按本文提出的方法设计不考虑定量关联的最优模糊控制器,然后再根据操作经验考虑定量的影响对模糊控制器输出进行修正。

以水份偏差值最小的模糊子集 B_7 为目标模糊集,取加权系数 $a = b = 0.5$,由模糊模型表可作出形如图 2 所示的控制网络,根据控制网络进行动态规划即可以求得不考虑定量影响的最优模糊控制器规则,如表 1 所示。

表 1 不考虑定量影响的最优模糊规则

If $y_2 =$	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7	B_8	B_9	B_{10}	B_{11}	B_{12}	B_{13}
Then $u_2 =$	A_1	A_1	A_2	A_3	A_3	A_6	A_7	A_8	A_{11}	A_{12}	A_{13}	A_{13}	A_{13}

在考虑定量影响时,将定量变化定义为“正大”、“正中”、“正小”、“负小”、“负中”、“负大”6 个模糊子集,根据操作经验将表 1 中的最优模糊控制规则修正为考虑定量关联的最优模糊控制规则,如表 2 所示的。

表 2 考虑定量影响时最优模糊规则

$y_1 \backslash u_3$	y_3												
	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7	B_8	B_9	B_{10}	B_{11}	B_{12}	B_{13}
PB	A_1	A_1	A_1	A_1	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_7	A_8
PM	A_1	A_1	A_2	A_2	A_2	A_4	A_6	A_7	A_7	A_8	A_9	A_9	A_{11}
PS	A_1	A_1	A_2	A_3	A_3	A_6	A_7	A_8	A_{11}	A_{12}	A_{12}	A_{12}	A_{13}
NS	A_1	A_1	A_2	A_3	A_3	A_6	A_7	A_8	A_{11}	A_{12}	A_{13}	A_{13}	A_{13}
NM	A_3	A_3	A_4	A_6	A_7	A_7	A_9	A_{11}	A_{11}	A_{13}	A_{13}	A_{13}	A_{13}
NB	A_5	A_6	A_7	A_7	A_7	A_9	A_{10}	A_{11}	A_{13}	A_{13}	A_{13}	A_{13}	A_{13}

由表 2 按一般模糊控制设计方法进行设计,即可得到纸机水份子系统的最优模糊控制查询表并由计算机实施。

在水份子系统模糊控制器设计中,可以加入积分作用^[4],其积分参数根据文献[5] 中的积分作用设计准则确定.图 3 为纸机水份最优模糊控制系统投运后的运行曲线.曲线 1 表示水份,曲线 2 表示定量,水份给定值改变 + 1.3%(从 4.7% ~ 6.0%)。

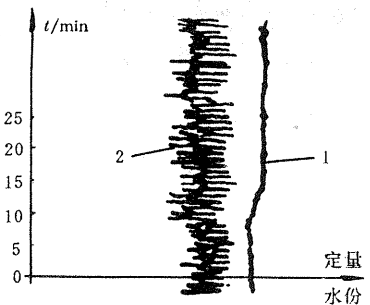


图 3 水份最优模糊控制系统运行记录

参 考 文 献

[1] 李平,王慧,钱积新,孙优贤,周春晖.一种带时间因子的模糊模型辨识,第六届全国青年系统与控制科学讨论会论文集(下册),杭州,1990, 527—533

- [2] Bellman R. E. and Zadeh. L. A. Decision-Making in a Fuzzy Environment, Manage. Sci., 1970, 17(4):141—154
- [3] 李平. 精确-模糊集成控制策略的研究及工程应用. 浙江大学博士论文, 1987
- [4] 淳于怀太. 模糊控制器与积分控制器混合应用的研究. 化工自动化及仪表, 1986, 13(5):1—5
- [5] 李平, 王慧, 钱积新, 孙优贤, 周春晖. 模糊控制中的积分作用. 模糊系统与数学, 1993, (1):12—19

Systematic Synthesis of an Optimal Fuzzy Controller

LI Ping, SUN Youxian and ZHOU Chunhui

(Institute of Industrial Process Control, Zhejiang University • Hangzhou, 310027, PRC)

Abstract: The fuzzy logic controller has been shown its power in ill-defined or nonprecise systems. However there are still some shortcomings. Two of them are that the control rules of fuzzy controller could not be always made optimal and that no systematic method is available for acquiring fuzzy control rules. In this paper, a systematic design procedure of an optimal fuzzy controller is presented. This controller will have the form of an ordinary fuzzy controller and make the fuzzy performance index $J = \sum_{k=1}^{T_f} (aN_{A(k)} + bN_{B(k)})$ minimum, which is similar to the quadratic performance index. This method is applied to a papermachine control system and the control result is very satisfactory.

Key words: systematic synthesis; optimal fuzzy controller; papermachine control; fuzzy set

本文作者简介

李 平 1954 年生. 1978 年考入浙江大学化工系, 1988 年获博士学位, 1988 年至 1990 年在浙江大学流体传动与控制博士后流动站工作, 出站后到浙江大学工业控制研究所工作, 主要研究兴趣为工业过程模型化, 鲁棒控制, 模糊控制及人工智能控制.

孙优贤 见本刊 1995 年第 1 期第 10 页

周春晖 1922 年生. 1947 年在美国麻省理工大学毕业并获学士学位, 1954 年在美国密西根大学获博士学位, 1958 年至今为浙江大学教授, 博士生导师. 主要研究方向是工业过程的建模, 控制与优化.