

文章编号: 1002-0411(2002)04-310-05

一类时变非线性系统的参数反馈模糊控制器分析与设计

冯冬青 马书磊 陈铁军 师 黎

(郑州大学工学院信息与控制研究所 郑州 450002)

摘要: 本文针对工业控制中一类常见的非线性时变系统, 提出了一种利用参数反馈在线修正规则的模糊控制器; 在全面介绍控制器结构与功能的同时, 详细阐述了模糊规则修正器的原理和设计方法, 并采用基于功能评价的方法进行系统分析. 在这个控制系统中, 基本模糊控制器简单实用; 模糊规则修正器能充分利用对被控对象的分析成果; GA 寻优算法能进一步简化设计, 提高性能. 仿真结果表明, 这种控制器的效果是令人满意的.*

关键词: 模糊控制; 参数反馈; GA; 非线性

中图分类号: TP13

文献标识码: B

ANALYSIS AND DESIGN OF FUZZY CONTROLLER WITH PARAMETER FEEDBACK FOR A KIND OF NONLINEAR TIME VARYING SYSTEM

FENG Dong-qing MA Shu-lei CHEN Tie-jun SHI Li

(Institute of Information and Control, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002)

Abstract: This article puts forward a kind of self-organization fuzzy controller with parameter feedback for a kind of common nonlinear time varying system in industry. It introduces the construction and functions of the whole controller, explains the principle and design method of the fuzzy rules reviser, and uses a method based on function evaluation to analyze the system. In this control system, the fundamental fuzzy controller is simple and applicable, the fuzzy rule reviser can use sufficiently the analysis result of the object controlled, GA can simplify the design and improve the performance of this controller. The results of simulation show that the effect of this controller is satisfactory.

Keywords: fuzzy control, parameter feedback, GA, nonlinear

1 引言(Introduction)

目前, 模糊控制的理论与应用发展很快, 模糊控制器以其特有的非线性逼近能力和较强的鲁棒性, 在工业过程中得到了越来越广泛的应用^[1]. 然而, 近年来的实际应用以及理论研究表明, 模糊控制在突出灵活性与鲁棒性的同时, 很大程度上则牺牲了精确性与规范性. 主要原因为, 模糊控制器的结构化分析和系统化设计方法还远没有成熟; 虽然无需系统的数学模型, 但是模糊控制以及各种类型的复合模糊控制的结构都不同程度依赖于特定对象的特性, 对象不同, 控制器结构也会大相径庭, 这无疑会给设计与分析带来很大困难. 另外, 一般工业对象的精确数学模型固然难以获得, 但是或多或少总可以部分

地描述出来, 如何把这些宝贵的信息有效地利用起来, 也是一个不容忽视的问题. 鉴于此, 本文针对工业控制中一类常见的不确定时变系统, 提出一种用参数反馈在线修正模糊规则的自组织模糊控制器.

2 问题的描述(The description of problem)

这里用一个例子来说明. 以工业过程控制中常见的 PH 值控制为例, 图 1 是酸碱中和过程的滴定曲线. 由于具有非线性、大时滞等特点, 所以该类对象比较适合用于模糊控制^[2]. 一般情况下, 这些对象都是时变的, 如时间常数、纯滞后等参数可以是某些不确定变量的函数, 当这些参数的值域较大时, 基本模糊控制器的效果是难以保证的. 即使采用自适应

* 收稿日期: 2001-12-10
基金项目: 河南省自然科学基金资助(项目编号: 0211050700)

或自组织模糊控制器,当对象参数变化范围超出一定界限时,也会影响控制效果.

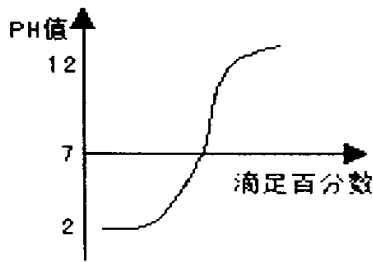


图1 滴定曲线

Fig.1 Neutralization curve

如图 2 所示, V 为某水处理系统中碱性水与酸性水中和的中间水箱, 分别有两个进水管和一个出水管, q_1 为碱性水流量, q_2 为酸性水流量, q 为中性水流量, 水箱液位直接决定了被控对象的时间常数与滞后大小, 当满足条件 $q_1 + q_2 = q$ 时水箱液位保持恒定, 水体 PH 值的变化规律趋于稳定. q 是由下道工序的需求所决定的, 即: $q = G(r)$

式中的 r 既不可预知也不可控制. 实用中, 本着简便和经济的原则, 一般会通过调节 q_1 或 q_2 其中的一个来控制 PH 值, 另一个基本保持不变. 这样, 水箱液位就会有较大的波动范围, 导致 PH 值变化规律的不确定性.

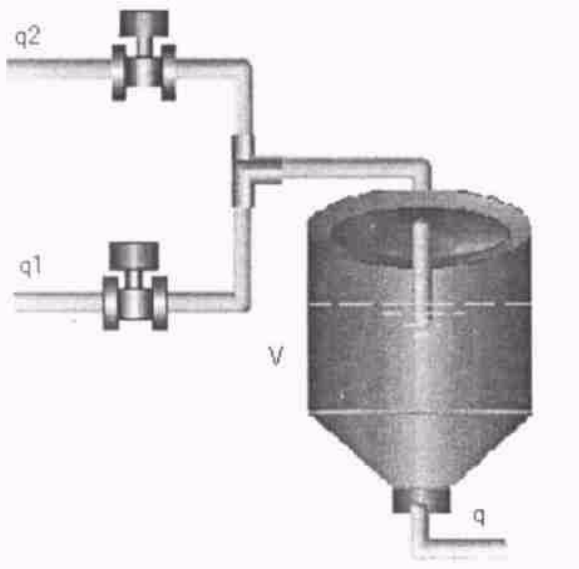


图2 酸碱中和设备

Fig.2 Neutralization facilities of acid and alkali

工业控制领域还有很多类似的被控对象, 可以简单地概括为对象参数以一定方式受控于不确定量的时变系统. 用状态方程描述如下:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u, s) \\ E s(t) = m \end{cases} \quad (1)$$

式中, $f(\cdot)$ 是一个线性或非线性函数, $E s(t)$ 表示求随机过程 $s(t)$ 的数学期望, 很多情况下, $s(t)$ 是平稳过程, 即 m 为常数.

对于上述对象, 采用一般的自组织模糊控制器或模糊自适应控制器时, 难以取得很理想的控制效果, 原因如下:

(1) 采用在线修正规则时, 系统的实时性必然变差, 对象参数变化频繁时, 难免出现规则调整滞后导致的控制不同步.

(2) 采用离线修正规则时, 投入正常使用的控制器等价于一个基本模糊控制器, 不再具有自组织功能, 性能更加无法保证.

通过上述分析可以发现, 虽然无法精确描述对象的全部特性, 但是可以利用某种方法得到影响对象参数变化的主要因素, 甚至能够得出它们之间的确定关系. 如果提取这一因素, 作为辅助变量, 与模糊控制器的规则集建立合适的映射关系, 用它来控制不同规则集之间的切换, 不仅能实现动态规则调整, 而且有效利用了被控对象更深层次的经验与知识.

3 控制器结构(The structure of controller)

系统控制器由基本模糊控制器、模糊规则修正器、寻优单元组成, 如图 3 所示.

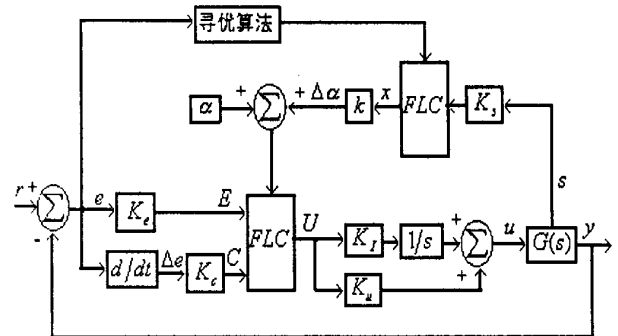


图3 控制器结构

Fig.3 The structure of controller

3.1 基本模糊控制器

为简化设计, 同时便于分析与规则调整, 基本模糊控制单元采用带多个修正因子的双输入单输出分段解析模糊控制器^[3]. 另外, 在控制器输出端串接 PI 输出环节, 同时对 FLC 的输出不再取整, 作为进一步改善系统稳态性能的措施.

设模糊控制器输入量化值为 E 、 C , 输出值为 u , 则模糊控制规则由下面的解析式描述:

$$U = \begin{cases} \alpha_1 E + (1 - \alpha_1) C, & |E| = 0, 1 \\ \alpha_2 E + (1 - \alpha_2) C, & |E| = 2, 3 \\ \alpha_3 E + (1 - \alpha_3) C, & |E| > 3 \end{cases} \quad (2)$$

在充分满足控制精度要求的前提下,为简化设计与参数整定,一般可取 $\alpha_2 \approx 0.5$, α_1 与 α_3 关于 α_2 对称,这样,就能用 α_1 一个参数控制全部规则。

比例因子可通过实验按以下原则确定:

$$K_e \geq \frac{1}{2\delta} \delta \text{ 是系统要求的最大稳态偏差.}$$

$$K_c = (1.5 \sim 2.5) K_e^{[4]}, K_u = (2 \sim 3) K_e^{[5]}.$$

3.2 参数反馈模糊规则修正器

这部分本质上相当于一个模糊前馈补偿网络,通过引入控制参数,利用模糊规则建立其与基本模糊控制规律的映射关系,达到动态调整控制器输出的目的.当然,除此之外,它还有自身的一些特点:

a. 明确了输入变量为被控对象自身参数,并非外部因素;

b. 输出量直接用于调整模糊控制器规则,增大了控制器适应范围;

c. 引入寻优算法进行优化,能进一步简化设计,改善控制效果.

以下结合式(1)描述的时变过程对参数反馈模糊规则修正器作定性分析.首先取输出方程 $y = Cx$,联立式(1)则可以确定关系: $y = g(u, s)$;假设初始时 $s_0 = m, y = y_0, u = u_0$,从而有 $y_0 = g(u_0, m)$;另设下一采样周期 s 的值为 s_1 ,则有 $\Delta s = s_1 - s_0$;此时 $y = y_0 + \Delta y = g(u_0 + \Delta u, m + \Delta s)$.

一般情况下, Δs 在一个采样周期内的变化很小,则 Δy 所导致的偏差 e 及偏差变化率 \dot{e} 的变化不足以改变其所在的量化区间,即 E 和 C 的值不变.

$$\text{由式: } u = K_u a_i E_i + K_u (1 - a_i) C_i + K_{ia} E_i + K_{i1} (1 - \alpha_i) C_i + K_{i1} \sum_{k=1}^{i-1} u_k$$

可知:若 α_i 不变,则 $\Delta u = 0$,

$$\text{即: } y = y_0 + \Delta y = g(u_0, m + \Delta s).$$

近年来对模糊控制器的系统研究表明:模糊控制器 FLC 可以任意精度逼近任一非线性函数,即万能的非线性逼近器^[6];因此,通过调整模糊量化精度与模糊推理规则,总可以找到一个映射 H ,即 $\Delta \alpha = H \Delta(s)$,使 $\Delta \alpha$ 满足下式:

$$\Delta y = g(u_0 + \Delta u, m + \Delta s) - y_0 = 0 \quad (3)$$

$$\text{式中: } \Delta u = (K_u \Delta \alpha + K_{i1} \Delta \alpha) (E_i - C_i)$$

可见,将参数反馈模糊规则修正器应用于这种时变对象的控制是可行的.

本文的做法是将模糊修正器的输出归一化,乘以比例因子 k 后与设定值 a 相加,作为最终输出;这样,通过调整 k 可以改变修正因子的作用范围和方向,设定 α 则可以保证基本模糊控制器的稳定性.

映射 H 可由基于 GA 的寻优算法自动搜索,搜索完成后, H 也就固定下来,在线应用时,只需经简单的查表运算就能快速修正基本模糊控制器规则,兼顾了实时性与自适应能力.

3.3 基于 GA 的寻优算法

由于模糊规则修正器的输入参数 s 与控制器输出 y 之间的关系往往具有复杂性和不确定性,仅靠经验知识难以建立理想的映射关系,因此有必要用遗传算法(GA)寻优.为压缩码键长度,减少计算量,以加快寻优收敛速度,本文采用单输入单输出模糊逻辑单元作为控制规则修正器的核心部件.

为分析方便,现假定输入量化论域确定为: $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$,与每一量化值对应有一个输出值,则共 7 个模糊输出变量,依次设为 x_1, x_2, \dots, x_7 ,组成 GA 目标函数的自变量向量:

$$\theta = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7)$$

寻优过程就是要得出这 7 个变量的最优组合: $\{x_{1i}, x_{2i}, x_{3i}, x_{4i}, x_{5i}, x_{6i}, x_{7i}\}$ 使得映射: $H: s \rightarrow x$ 满足式(3).

由于待寻优目标向量较长,存在组合爆炸的问题.假设每一输出变量的论域为: $\{-n, -(n-1), \dots, -1, 0, 1, \dots, n-1, n\}$,则各有 $2n+1$ 个可能的取值,若采用完全编码,将产生的群体规模为 $(2n+1)^7$: n 又不能取得太小,否则会影响输出精度.为此,本文采用部分编码的方法,首先根据经验与常识判断每一个输入量化值对应输出的可能取值区间,然后在这几个不同区间上进行组合编码.例如,设: $n=7$,将每一输出的可能取值列表,排除不可能或没有意义的取值,结果如表 1 所示.表中“1”表示可能,“0”表示不可能, x_i 代表第 i 个输入量化值对应的输出.从表中可以看出,经过压缩,编码后的码键长度由 21 位缩短为 14 位,而群体规模也由 7^7 减小为 4×3^5 ,显然可以大大减少计算量.

GA 算法的目标函数取为常用的 ITAE 积分,该积分为: $J = \int_0^{\infty} |e(t)| dt = \min$,由这一指标,可以评价每一个体的适应度,作为选择与交叉运算的依据.

表 1 输出取值

Tab. 1 The value of output

输出变量 \ 量化值	- 3	- 2	- 1	0	1	2	3
x_1	0	0	0	0	0	1	1
x_2	0	0	0	0	1	1	1
x_3	0	0	0	1	1	1	0
x_4	0	0	1	1	1	0	0
x_5	0	1	1	1	0	0	0
x_6	1	1	1	0	0	0	0
x_7	1	1	0	0	0	0	0

4 基于功能评价的系统分析 (The system analysis based on performance valuation)

目前对模糊控制器多采用基于语言模糊状态模型的稳定性分析,即把每个模糊规则的结论部分都用一个状态方程表示,模糊函数可以表示为:

$$x(k+1) = \sum_{i=1}^m \alpha_i (A_i x(k) + b_i u(k))$$

其中 A_i 为系统矩阵, b_i 为输入矩阵。

利用这一模型,根据李亚普诺夫稳定性理论,可以得出系统稳定的一些充分条件^[7]。

这种方法仍处于不断发展完善阶段,应用于实际的模糊控制系统还有困难,如计算复杂,条件苛刻等。所以,本文对前述的参数反馈模糊控制器,采用基于功能评价的分析方法,分几个方面作定性描述。首先选取待评指标集: {简单性,鲁棒性,参数整定难度,稳定度}。用符号表示为: {A, B, C, D}。取评语集: {优,良,中,差}。对应符号集: { u_1, u_2, u_3, u_4 }。取各评语论域为 [0, 100], 采用隶属函数: $u_i(x) = e^{-\frac{(x-a_i)^2}{b_i^2}}$ ($i=1, 2, 3, 4$) 其中 a_i, b_i 取值如表 2 所示。

表 2 a_i 和 b_i 的取值Tab. 2 The value of a_i and b_i

i	1	2	3	4
a_i	100	75	50	0
b_i	12	20	20	50

为指标集中每一个元素确定评语向量时,有两种可选方式:有量化指标时,将量化值直接映射到评语论域上,然后由隶属函数表达式求出它对各评语的隶属度;没有量化指标时,就采用根据专家有关结论对各评语打分的方法。

限于篇幅,这里对每一指标都采用直接给评语打分的办法,得各评语向量:

$$R_A = (0.2, 0.5, 0.3, 0)$$

$$R_B = (0.1, 0.5, 0.3, 0.1)$$

$$R_C = (0, 0.3, 0.6, 0.1)$$

$$R_D = (0.3, 0.4, 0.3, 0)$$

构成评价矩阵:

$$R = \begin{pmatrix} 0.2 & 0.5 & 0.3 & 0 \\ 0.1 & 0.5 & 0.3 & 0.1 \\ 0 & 0.3 & 0.6 & 0.1 \\ 0.3 & 0.4 & 0.3 & 0 \end{pmatrix}$$

根据四个指标在评价控制器性能中所被重视的程度,选择权重向量: $A = (0.2, 0.3, 0.1, 0.4)$

用加权平均模型 $M(\cdot, \odot)$ 求综合评判结果: $B = A * R = (0.19, 0.44, 0.33, 0.04)$

由这一结果可见,选择权重向量 A 时,控制器性能大致可评为“良”。

5 仿真研究 (The simulation)

针对 2. 中(1)式所描述的对象模型,选用如下非线性时变仿真对象:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -0.4x_1 - ax_2^3 + 0.1u(t-b) \\ y = x_1 \end{cases}$$

其中 $a = 0.5 + 0.2s, b = 0.2s, s$ 为 [0, 1] 间的随机变量。当 a, b 取为常数时,这一对象变为普通的非线性定常系统。基本模糊控制器参数选择如下:

$$K_e = 3.5, K_c = 6.0, K_u = 20,$$

$$K_I = 10, \alpha = 0.5, k = -0.015$$

图 4 为实验结果曲线。其中,图 4(a) 为采用上述时变模型,但未加入修正作用的实验曲线;图 4(b) 为加入修正作用的实验曲线。通过比较这组曲线,可以发现,参数反馈模糊规则修正器的作用是很显著的。

6 结论 (The conclusion)

针对工业控制中的一类时变对象,本文提出了一种模糊控制与模型分析相结合的参数反馈自适应模糊控制器,对模糊规则修正器的可行性作了定性描述,同时根据模糊系统理论与实践的发展趋势,尝试用基于功能评价的方法分析系统。控制器设计过程中,在满足控制要求的前提下,基本遵循简便经济的原则,尽量利用现有成熟的模糊控制器设计经验,

力图给出一套程序化的设计与分析方法,对一些具体问题,采用了新的处理技巧.从文中分析可以看到,这种控制器在发挥模糊技术智能化特长的同时,充分利用了对象分析过程中获得的各种相对精确知

识,将其中占主导地位的影响因素提取出来,作为改善控制效果的辅助措施,进一步扩展了模糊控制的使用空间.

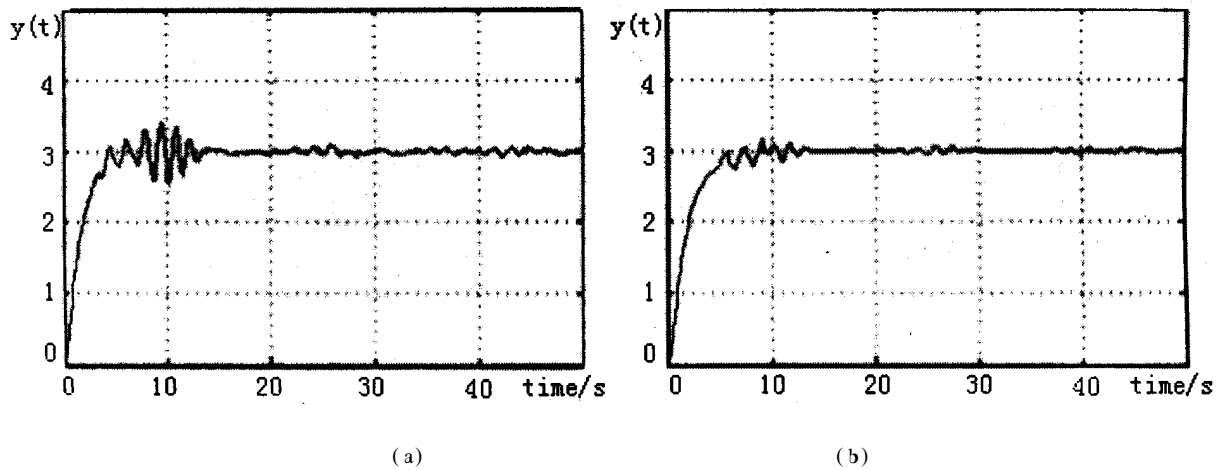


图 4 仿真实验曲线
Fig. 4 Curves of simulation

参 考 文 献 (References)

- 1 冯冬青, 谢宋和等. 模糊智能控制. 化学工业出版社, 1998
- 2 周景振, 韩曾晋. 具有时滞的 PH 值中和过程模糊自适应控制. 控制与决策, 1998, 13(5): 527~ 531
- 3 李东辉. Fuzzy 控制规则自调整和 Fuzzy 控制系统寻优及其仿真研究. 模糊数学, 1986, 3: 53~ 61
- 4 王金章等. 模糊调节参数的在线自整定. 控制与决策, 1989, 4: 40~ 45
- 5 胡家耀等. 模糊控制在退火炉燃烧过程控制中的应用. 自动化学报, 1989, 6(15): 501~ 507
- 6 H Y ing. Sufficient conditions on uniform approximation of multivariate functions by General Takagi-Sugeno fuzzy systems with linear rule consequent. IEEE Transactions on Systems, Man, & Cybernetics, 1998, 28A: 515~ 520
- 7 Tanaka K, Sugeno M. Stability analysis and design of fuzzy control systems. Fuzzy Sets and Systems, 1992, 45(2): 135~ 156

作者简介

冯冬青(1958-), 男, 硕士, 教授. 研究领域为智能控制, 计算机控制系统.

马书磊(1972-), 男, 硕士研究生. 研究领域为智能控制.

陈铁军(1954-), 男, 博士, 教授. 研究领域为复杂系统控制.

(上接第 303 页)

- 10 B S Ahn, S S Cho, C Y Kim. The integrated methodology of rough set theory and artificial neural network for business failure prediction [J]. Expert Systems with Applications, 2000, (18): 65~ 74

作者简介

张传芹(1967-), 男, 东南大学经济管理学院在读博士生. 研究领域为应急管理、企业管理-控制综合自动化, workflow 等.

盛昭瀚(1944-), 男, 教授, 南京大学管理科学与工程研究院院长, 博士生导师. 研究领域为企业管理-控制综合自动化、经济管理系统的复杂性等.