

一种新的模糊控制器的优化方法

李家炜

(哈尔滨工业大学机器人研究所·哈尔滨, 150001)

摘要: 通过分析对模糊控制器作优化的原理, 提出了一种新的优化设计方法. 用三个参数调整所定义的输入、输出语言变量的隶属函数, 通过单纯形法调整参数使性能指标最小, 从而使设计出的模糊控制器性能接近最优. 仿真结果表明, 本文的方法简单、有效, 对于模糊控制器的工程设计具有很大实用性.

关键词: 模糊控制; 优化; 隶属函数

文献标识码: A

A New Optimization Method for Fuzzy Controller's Design

LI Jiawei

(The Robotic Institute, Harbin Institute of Technology · Harbin, 150001, P.R. China)

Abstract: By analyzing the principle of optimization, a new optimization method for fuzzy controller's design is put forward. The membership functions of input and output variables are defined by three parameters which are adjusted to minimize the performance index by simplex means. Therefore the fuzzy controller is designed to approach the optimal. This optimization method is simple and effective, and practical for fuzzy controller's design.

Key words: fuzzy control; optimization; membership function

1 引言 (Introduction)

模糊控制器的设计一般是由设计者将熟练操作人员(或专家)的经验总结成模糊控制规则, 同时设计出相应的输入、输出隶属函数. 然而, 设计出的模糊控制规则并不能保证与专家的经验完全符合, 对隶属函数的设计则完全依赖于设计者的经验, 因此这样设计出的模糊控制器不能保证在实际应用中达到满意的控制效果, 有必要对其进行优化. 目前已有多种对模糊控制器的优化方法, 较实用的有两种: 一是对模糊控制规则进行优化^[1]; 二是对输入、输出的量化比例因子作优化^[2,3]. 因为模糊控制器同时与控制规则、输入输出的隶属函数等因素有关, 单独对其中某个因素作优化而不考虑其它因素的作用, 显然不能得到最优的结果, 但是要对全部因素作优化又过于复杂, 所以普遍认为目前还没有一种比较理想的优化设计方法. 下面本文将对这些优化方法的原理进行分析, 据此提出一种行之有效的优化方法.

2 优化原理分析 (Analysis of the principle of optimization)

为了说明问题的方便, 现以一单输入、单输出模糊控制器为例, 来分析对其优化的原理. 假设输入为

偏差, 输出为控制量, 都分为 5 个量化等级, 记为: 负大, 负小, 零, 正小, 正大. 隶属函数形状取作三角形, 如图 1 所示, 这里隶属函数的取法没有按一般的、先将精确值乘以量化比例因子, 而是直接给出其隶属函数. 控制规则如表 1. 反模糊化采用重心法. 这样构成一个模糊控制器, 其输入与输出的关系曲线如图 2 中折线 ABCD. 曲线上 A, B, C, D 四点的位置由输入、输出隶属函数的量化值 a, b, c, d , 以及模糊控制规则决定, A, B, C, D 之间曲线的形状是由隶属函数形状决定的. 此例中隶属函数的形状为三角形, 所以输入与输出的关系为分段直线, 如果采用其它的隶属函数的形状如正态形、费米曲线形等, 则 A, B, C, D 之间为某种形状的曲线. 从这里可以看出隶属函数的形状对控制效果影响不大, 输入与输出的量化值即 a, b, c, d , 与模糊控制规则是决定模糊控制器性能的主要因素.

表 1 模糊控制规则

Table 1 Fuzzy control rules

输入	负大	负小	零	正小	正大
输出	正大	正小	零	负小	负大

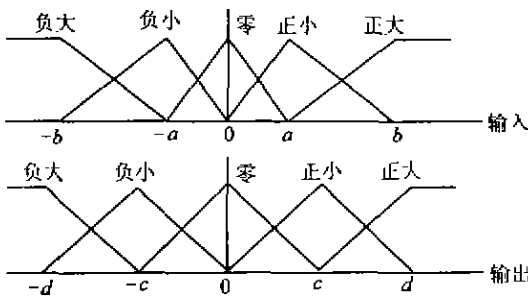


图1 输入、输出的隶属函数

Fig. 1 Membership function of input and output

假设输入与输出的最优关系为图2中的曲线S,则优化的目的就是要输入与输出曲线尽量接近S.如果A, B, C, D等点越接近S,则曲线整体越接近S.对于B点来说,有两种方式接近曲线S,一种是沿BB₁,另一种沿BB₂.保持输入、输出的隶属函数不变,优化模糊控制规则就是使B接近B₁.这种优化方法首先要求对隶属函数的量化要合理,尤其是输入a, b的取值要适当,如b值过小,当偏差较大时控制器达不到最优输出;其次,对模糊控制规则的优化比较困难,基本的两输入,一输出模糊控制器一般有几十条控制规则,目前常用[1]中提出的方法,通过一个或几个参数调整模糊规则.这种方法只能实现一定程度的优化,并且模糊控制规则是专家经验的体现,而隶属函数由设计者给出,相比之下隶属函数更可能存在缺陷,通过调整控制规则来弥补隶属函数的不足,使得优化的结果可能已违背了专家的本意,这是这种方法的不足之处.

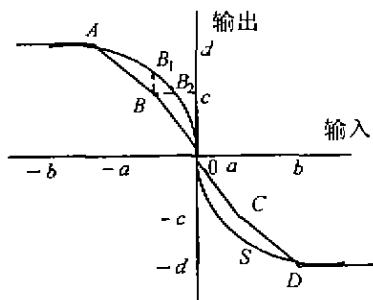


图2 输入与输出关系曲线

Fig. 2 Curve of output vs input

另一类优化方法是保持模糊规则不变,优化输入、输出的隶属函数.优化输入的量化值就是使B沿BB₂接近S,优化输出的量化值就是使B沿BB₁接近S.文献[2]的方法是通过调整量化比例因子实现优化的,这实际上也就是优化输入、输出的隶属函数.如减小输入的量化因子,在图2中相当于增大a, b值,使得A, B点左移, C, D点右移,结果使输入-输出曲线整体斜率增大;反之,如增大输入的

量化因子,将使输入-输出曲线整体斜率减小.对于输出也是同样道理.这种优化方法的缺点是对a, b或c, d等量化值只能同时增大或减小,如图2中B点离S较远,若增大输入的量化因子使B向右移动,则A也同时向右移动,且移动的幅度大于B.

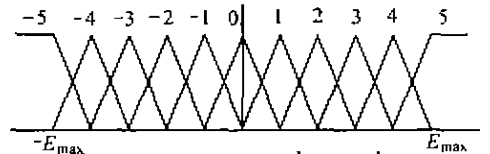
上述讨论虽然是针对单输入,单输出模糊控制器的,但其结论对于多输入模糊控制器同样适用.

3 一种新的优化方法 (A new optimization method)

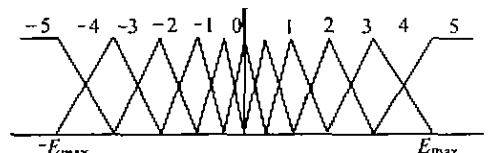
采用量化因子调整隶属函数对于偏差这样论域为无穷的变量是合适的,而对于偏差变化率和控制量这样论域为有限的变量则不太适合,因为增大量化因子将使部分量化值超出论域的范围.本文将提出一种新的调整量化值的方法.

假定某语言变量分为11档,这里简单地用数字表示为:

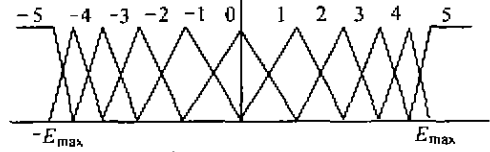
$$(-5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5).$$



(a) r₁=1



(b) r₂=1.3



(c) r₃=0.8

图3 三种不同的隶属函数形式

Fig. 3 There forms of membership function

图3给出三种不同的隶属函数形式,它们的论域相同,而疏密分布不同.如果把论域E_{max}内量化值由a, b, c, d, e表示,如图3(a),并认为序列a, b, c, d, e成等比关系,比值为r₁,并将r₁称为等比因子,由r₁调整隶属函数的量化值.r₁=1对应图3(a)均匀分布的隶属函数形式;r₁>1时隶属函数在模糊语言值“零”附近较密集,远离零值时较稀疏,如图3(b) r₁=1.3; r₁<1时则相反,如图3(c) r₁=0.8.这样,通过调整r₁值,可以得到不同形式的隶属函数.那么,用等比因子r₁改变隶属函数的量化值对

输入与输出的关系有何影响呢?在图 2 中,假设输出的量化值 c, d 按此方法由 r_1 调整. r_1 增大时, c 减小,使 B 点向下移动;反之,如 r_1 减小, c 增大,使 B 点向上移动. 在此过程中 d 值不变,所以 A 点位置不变. 可见,这种方法同样可以调整输入-输出曲线的形状,并且其最大量化值不变,不会超出论域的范围. 因此,对于偏差变化率和输出控制量这样论域有限值的变量,采用上述调整量化值的方法比较合适.

现以两输入-单输出的基本模糊控制器为例说明本文的优化设计方法.

假定输入的偏差、偏差变化率和输出的控制量,其论域分别为 $(-E_0, E_0), (-V_{max}, V_{max}), (-U_{max}, U_{max})$. 对偏差采用量化因子 k_1 调整其隶属函数的论域;对偏差变化率和控制量采用等比因子 k_2, k_3 调整其隶属函数. 模糊推理采用最小-最大法.

选取某种性能指标如 ITAE, IAE 等作为目标函数,即可对 k_1, k_2, k_3 进行寻优. 寻优算法采用单纯形法:在三维向量空间中取边长为 a 的四面体,计算四面体四个顶点的目标函数值,取目标函数值最大的顶点为最劣点,接着抛弃最劣顶点,取该顶点相对于底面的对称点作为新的顶点,组成一个新的四面体,再重复上述过程. 这样不断抛弃最劣顶点,最终可找到使目标函数值最小的点,该点坐标就是所寻的最优因子.

用量化比例因子调整隶属函数相当于保持等比因子不变,只调整论域的大小,而等比因子的缺点是无法调整论域的大小. 两者结合使用,起到互补的效果,可使模糊控制器的性能接近最优.

4 两个优化的例子 (Two examples using the optimization method)

1) 传递函数为 $H(s) = \frac{2}{s^2 + 4s + 3}$ 的二阶线性过程.

取采样周期 $T = 0.01$. 模糊控制器输入为偏差 e 与偏差变化 \dot{e} , 输出为控制量 u , 假设最大控制量 $u_{max} = 10.0$, 偏差变化最大值取 $\dot{e}_{max} = 10.0$. 输入、输出语言变量都分成五档, 隶属函数和控制规则表按照上小节的取法, 偏差的量化因子为 k_1 , 偏差变化与输出的等比因子分别为 k_2, k_3 . 目标函数取 ITAE 指标, 即 $J = \int_0^{\infty} t \cdot |e(t)| dt$. 取设定点 $r = 1.0$, 仿真时间为 1000 个采样周期, 优化结果为 $k_1 = 35.5, k_2 = 1.11, k_3 = 0.95$, 目标函数值从 22.34 减

小到 8.16. 优化后的输出—时间曲线见图 4.

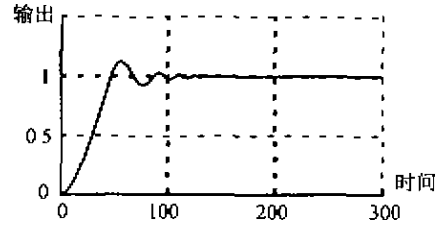
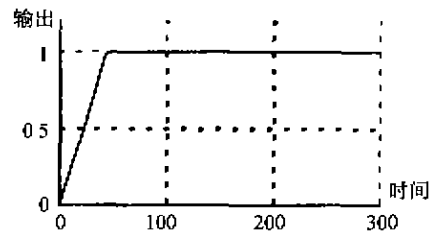


图 4 二阶过程阶跃响应

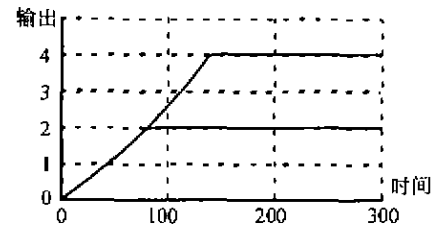
Fig. 4 The step response of the two order linear process

2) 非线性过程 $\dot{y}(t) = y(t) + \sqrt{y(t)} + u(t)$.

取采样周期 $T = 0.01$. 模糊控制器输入为偏差 e 与偏差变化 \dot{e} , 输出为控制量 u , 假设最大控制量 $u_{max} = 3.0$, 偏差变化最大值取 $\dot{e}_{max} = 5.0$. 输入、输出语言变量同样分成五档, 取设定点 $r = 1.0$, 仿真时间为 1000 个采样周期, 优化结果为 $k_1 = 32, k_2 = 0.01, k_3 = 0.6$, 优化后的响应曲线见图 5. 由图 5 (b) 可见, 优化的结果对不同的给定都达到理想的控制效果.



(a) 设定点为 1



(b) 设定点分别为 2, 4

图 5 非线性过程阶跃响应曲线

Fig. 5 The step response of the nonlinear process

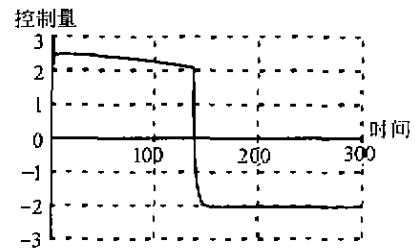


图 6 设定点 $r=4$ 时的输出曲线

Fig. 6 The output curve when setpoint $r=4$

图 5(b) 中设定点 $r = 4.0$ 时, 输出存在较小的稳态误差, 这是“位置型”模糊控制器本身的缺点,

(下转第 290 页)

$$\dot{x} = (h_1 A_1 + h_2 A_2)x + (h_1 b_1 + h_2 b_2)u.$$

其中 $h_i = \mu_i, i = 1, 2$.

因 $\mu_1 + \mu_2 = 1$, 上式可写成

$$\dot{x} = (A_1 + h_2(A_2 - A_1))x + (b_1 + h_2(b_2 - b_1))u.$$

根据本文的控制器设计过程得:

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 1 \end{bmatrix}, T = \begin{bmatrix} 10 \\ 11 \end{bmatrix}, T^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}.$$

$$P = 0.5, u_l = 103.74x_1 + 11.34x_2,$$

$$u_n(x) = 5.67\rho(t)\text{sgn}(0.5x_1 + 0.5x_2),$$

$\delta = 0.803 < 1$, 上界选为

$$\rho(t) =$$

$$5.08(8|x_1 + x_2| + 0.1416|103.7x_1 + 11.34x_2|) + 0.1.$$

初始条件 x_0 分别为 $(50^\circ, 0), (70^\circ, 0), (80^\circ, 0)$. 仿真结果如图 1 所示.

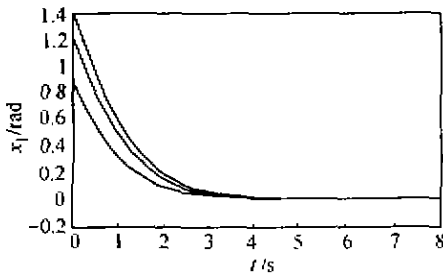


图 1 系统响应曲线

Fig. 1 The curve of system respond

5 结论(Conclusion)

研究了非线性系统基于 T-S 模型的变结构控制

(上接第 281 页)

而不是优化方法所造成的. 图 6 为 $r = 4.0$ 时的控制器输出曲线, 可以看到控制器的稳态输出不为零, 这相当于系统存在定值的外扰, “位置型”模糊控制器在这种情况下总要有一定的稳态误差.

5 结论(Conclusion)

通过上面两例模糊控制器的优化, 证明此优化方法是有效的, 并且优化的结果对不同的给定同样适用, 都达到了满意的控制效果.

在实际的控制问题中, 往往对控制量、偏差变化的范围等有明确要求, 采用上述优化方法就更加方便.

参考文献(References)

[1] Long Shengzhao and Wang Peizhuang. Self-tuning of the fuzzy con-

问题. 将变结构和模糊控制相结合, 用模糊语言描述系统, 用变结构确保系统稳定性, 充分发挥了两者的优点. 控制器结构简单, 规则少. 并为一级倒立摆仿真实验所验证.

参考文献(References)

- [1] Takagi T and Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control [J]. IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., 1985, 15(1): 116-132
- [2] Tanaka T and Sugeno M. Stability analysis and design of fuzzy control systems [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1992, 45(2): 135-156
- [3] Tanaka K and Sano M. Fuzzy stability criterion of a class of nonlinear systems [J]. Information Science, 1993, 70(1): 3-26
- [4] Gao W B. The Theoretical Basis About Variable Structure Control [M]. Beijing: Science Publication of China, 1990 (in Chinese)
- [5] Tian H Q. The Sliding Mode Control Theory and Application [M]. Wuhan: Wuhan Publication, 1995 (in Chinese)
- [6] Utkin V I. Variable structure systems with sliding models [J]. IEEE Trans. Automat. Contr., 1977, 22(20): 212-222

本文作者简介

- 吴忠强 1966 年生, 燕山大学副教授, 中国矿业大学博士研究生. 研究方向: 模糊控制, 自适应控制及应用. 发表论文 40 余篇. Email: wuzhq@88mail. ysu. edu. cn
- 许世范 1931 年生, 中国矿业大学教授, 博士生导师. 研究方向: 自适应控制, 模糊神经网络控制, CIMS.
- 岳东 1964 年生, 中国矿业大学教授. 研究方向: 分布参数系统, 广义系统, 时滞系统, 随机系统的鲁棒控制和变结构控制.

trol rules [J]. Fuzzy Mathematics, 1982, 3(1): 45-53

- [2] Athalye A, Edwards D, Manoranjan V S, et al. On designing a fuzzy control system using an optimization algorithm [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1993, 56(1): 32-39
- [3] Leang T P. An optimization design method of fuzzy logic controller [J]. Control Theory and Applications, 1995, 12(4): 491-497
- [4] Kang H and Vachtsevanos G J. Nonlinear fuzzy control based on the vector fields of the phase portrait assignment algorithm [A]. Proc. 28th American Control Conf. [C], Baltimore, 1990, 368-376
- [5] Kandel K. Fuzzy Mathematical Techniques with Applications [M]. Massachusetts: Addison-Wesley Pub. Co., 1986

本文作者简介

李家炜 1971 年生, 硕士, 博士毕业于哈尔滨工程大学. 现在哈尔滨工业大学做博士后研究. 研究领域为机器人仿人灵巧手协调控制、模糊控制等. Email: jwli@robotst. hit. edu. cn