

文章编号: 1000-8152(2002)04-03-0644

基于波波夫稳定判据的模糊控制器系统化设计方法^{*}

郑 伟¹, 徐洪泽¹, 李士勇², 张福恩²

(1. 北方交通大学 自动化系, 北京 100044; 2. 哈尔滨工业大学 控制科学与工程系, 哈尔滨 150001)

摘要: 利用模糊控制器具有的输入输出比例特性及非线性系统的波波夫稳定判据, 提出了在保证被控系统稳定的前提下模糊控制器的系统化设计方法. 仿真结果表明, 应用此种方法设计的模糊控制器可以确保系统的稳定性.

关键词: 波波夫稳定判据; 单输入控制器; 模糊控制

中图分类号: TP273.4

文献标识码: A

Systematic design method of fuzzy controller based on Popov stability criterion

ZHENG Wei¹, XU Hong-ze¹, LI Shi-yong², ZHANG Fu-en²

(1. Department of Automation, Northern Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Department of Control Science and Engineering, Harbin University of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: A systematical method of fuzzy controller design is introduced based on the Popov stability criterion and proportion property of input to output of the fuzzy controller. Simulation results indicate that this type of fuzzy controller could guarantee the stability of the system.

Key words: Popov stability criterion; single-input controller; fuzzy control

1 引言(Introduction)

稳定性是非线性模糊系统的重要指标之一. 模糊系统结构的复杂性及控制环境的不确定性决定了其稳定性分析方法也远非传统的基于精确模型的稳定性分析方法那样简单和成熟. 近几年来关于稳定性的有关文献主要集中在采用李亚普诺夫方法判定系统的稳定性^[1,2]. 波波夫稳定判据是基于线性被控对象的一种分析方法, 本文将波波夫稳定判据与采用模糊控制方法的 PID 实现相结合, 提出一种模糊系统的系统化设计方法.

2 波波夫稳定判据(Popov stability criterion)

在如图中 1 所示的系统模型中, $G(s)$ 为时不变线性环节, $N(s)$ 为时不变非线性环节. 非线性环节需满足以下条件:

$$0 \leq \frac{N[x(t)]}{x(t)} \leq K, x \neq 0, N[0] = 0.$$

其中 K 为任意的整数. 且时不变线性环节 $G(s)$ 为渐进稳定的. 则图 1 所示的系统渐近稳定的充分条件为: 对于所有的 $w \geq 0$ 和任意小的数 $\delta > 0$, 存在

某个实数 q , 满足以下条件:

$$\operatorname{Re}[(1 + jwq)G(jw)] + \frac{1}{K} \geq \delta > 0. \quad (1)$$

将式(1)写成

$$\operatorname{Re}[G(jw)] > -\frac{1}{K} + wq \operatorname{Im}[G(jw)], \quad (2)$$

$\operatorname{Re}[G(jw)]$ 和 $\operatorname{Im}[G(jw)]$ 分别表示为 $G(jw)$ 的实部和虚部. 引入新的频率特性:

$$G^*(jw) = X + jY, X = \operatorname{Re}[G(jw)],$$

$$Y = w \operatorname{Im}[G(jw)],$$

将式(2)中的 $G(jw)$ 用 $G^*(jw)$ 来代替, 得

$$\operatorname{Re}G^*(jw) > -\frac{1}{K} + q \operatorname{Im}G^*(jw), w \geq 0. \quad (3)$$

波波夫直线通过点 $(-\frac{1}{K}, 0)$, 斜率为 $\frac{1}{q}$.

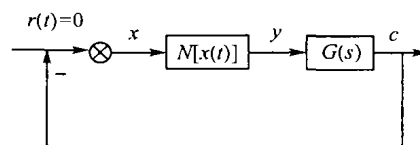


图 1 带有非线性环节的系统模型
Fig. 1 System model with nonlinear element

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金(69674019)资助项目.

收稿日期: 2000-07-17; 收修改稿日期: 2001-02-20.

闭环系统稳定的充分条件为 $G^*(j\omega)$ 的 Nyquist 图位于波波夫直线的右方. 对于带有非线性环节而被控对象 $G(j\omega)$ 为线性环节的闭环系统, 画出其相应的 $G^*(j\omega)$ 的 Nyquist 图就可以计算出保证系统稳定的 K 的最大值. 由于本文的单输入模糊控制器的设计主要是针对 K 值, 本文仅对 q 值作一下定性的分析. 由图 2 可知, 选择了适当的 K 之后, 对于一般系统的 Nyquist 图, 应使波波夫直线的斜率尽可能的大, 则 q 的取值需尽可能的小.

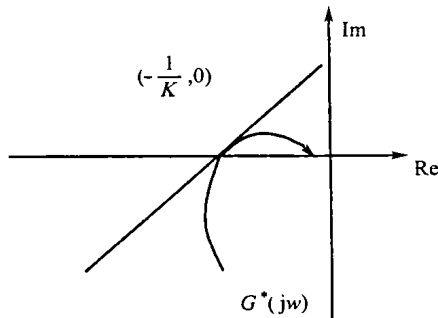


图 2 $G^*(j\omega)$ 的 Nyquist 图

Fig. 2 Nyquist diagram of $G^*(j\omega)$

3 模糊控制器的设计 (Design of fuzzy controller)

在模糊控制器的设计过程中, 借鉴了文[3]的通过模糊控制器的设计实现 PID 控制的方法和文[4]的单输入变量的设计方法.

文[3]提出了一种乘积-加法-重心法和简化模糊推理方法, 推导了单输入变量取两个隶属函数时的输入输出比例关系. 本文将输入隶属函数增加到 n 个, 推导输入输出的比例关系.

设输入误差变量的论域范围为 $[e1, en]$, n 个模糊集分别是为 $\{\bar{e}1, \bar{e}2, \dots, \bar{e}n\}$ 隶属函数为高度为 1 的三角形, 相邻的隶属函数在高度 0.5 处相交.

控制规则如下:

规则 1: $\bar{e}1 \Rightarrow u1$, 规则 2: $\bar{e}2 \Rightarrow u2, \dots$, 规则 n : $\bar{e}n \Rightarrow un$.

其中, $u1 = \alpha e1, u2 = \alpha e2, \dots, un = \alpha en, \alpha$ 为可调整值. 对于任意输入变量 $e \in [e1, en]$, 最多只能对应两个隶属函数, 设 $e \in [ei, e(i+1)], i = 1, \dots, n-1$, 可求得输出 u 的值为

$$u = \frac{0 \cdot u1 + \dots + \beta \cdot ui + (1-\beta) \cdot u(i+1) + \dots + 0 \cdot un}{0 + \dots + \beta + (1-\beta) + \dots + 0}, \quad \beta = \frac{e(i+1) - e}{e(i+1) - e(i)} \quad (4)$$

将 $u1 = \alpha e1, u2 = \alpha e2, \dots, un = \alpha en$ 代入式(6)得:

$$u = \alpha e. \quad (5)$$

至此, 模糊控制器等效于一种比例控制器, α 值可以在设计初期进行调整. 以误差作为唯一的输入变量存在的问题是误差包含较少的系统动态过程的信息量, 在控制过程中很难使系统具有较好的动态性能. 文[4]设计了一种单输入模糊控制器, 原理如下: 在由误差 e 和误差变化 ec 组成的平面中, 设定切换线 $s_1: ec + \lambda e = 0$, 取距离

$$d = \frac{|ec + \lambda e|}{\sqrt{1 + \lambda^2}}$$

作为控制输入. 由于输入变量有负值, 需定义一个带符号的距离

$$d_s = \text{sgn}(s_1) \frac{|ec + \lambda e|}{\sqrt{1 + \lambda^2}}.$$

其中

$$\text{sgn}(s_1) = \begin{cases} 1, & s_1 > 0, \\ -1, & s_1 < 0, \end{cases}$$

则式(5)写成:

$$u = \alpha d_s. \quad (6)$$

由于输入变量是误差 e 和误差变化 ec 的线性组合, 带符号的距离 d_s 在控制过程中可能会超出事先设定的领域, 对此, 考虑设定的最大控制量 u_m . 设 $|e1| = |en|, e1 < 0 < en$, 式(6)可以改写成如下形式:

$$u = \begin{cases} -u_m, & d_s < e1, \\ \alpha d_s, & e1 \leq d_s \leq en, \\ u_m, & d_s > en. \end{cases} \quad (7)$$

为保证闭环系统的稳定, 模糊控制器设计所能调节的参数为 α, λ, u_m , 计算出线性被控对象所对应的波波夫直线的 K 值, 则闭环系统稳定的充分条件为 $\alpha \leq K$.

4 仿真分析 (Simulation analysis)

选择被控对象

$$G(s) = \frac{1}{(s+1)(s+2)(s+3)},$$

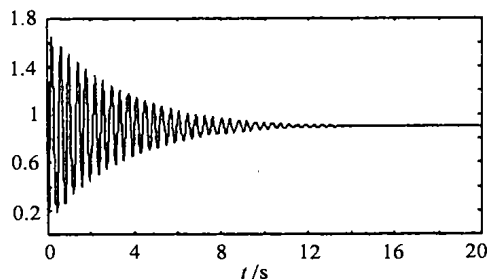
满足线性环节所需要的条件.

根据第 2 节的推理过程,

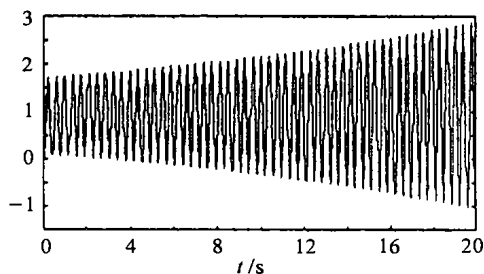
$$G^*(j\omega) = \frac{6(1 - \omega^2) + j\omega^2(\omega^2 - 11)}{(\omega^2 + 1)(\omega^2 + 4)(\omega^2 + 9)},$$

由 $G^*(j\omega)$ 的 Nyquist 图可知, 当其虚部为 0 时, 其实部值为 $-\frac{1}{60}$, 则保持闭环系统稳定的 K 的最大值为 60.

模糊控制器的参数设计:分别以误差 e 和带符号的距离 d_s 为唯一的输入变量,论域为 $[-1, 1]$, $\lambda = 1$, $u_m = 80$, $q = 0.1$, α 分别取 59, 61 对系统进行仿真控制,阶跃响应曲线分别如图 3, 图 4 所示.



(a) $\alpha = 59$



(b) $\alpha = 61$

图 3 响应曲线

Fig. 3 Responding curve

由图 3 可以看出,以误差 e 为输入变量的闭环控制系统当 α 的取值小于 60 时,系统处于稳定状态,当 α 的取值大于 60 时,系统发散.由图 4 可以看出,将输入变量由误差 e 变成为带符号的距离 d_s 放宽了系统的稳定条件,当 α 的取值大于 60 时,系统仍然保持稳定.由于波波夫稳定判据只是系统稳定的充分条件,图 4 的结果与理论分析并不矛盾,同时也说明以带符号的距离 d_s 作为输入变量的模糊控制器具有较强的自适应性和鲁棒性.

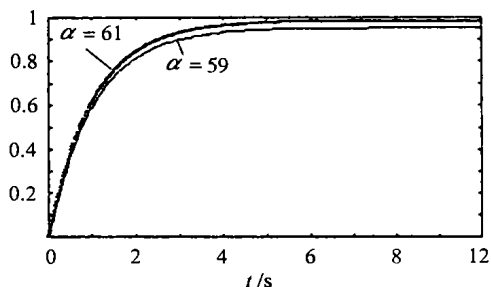


图 4 响应曲线

Fig. 4 Responding curve

关于单输入模糊控制器的控制精度及控制品质,本人的另一篇文章[5]以倒立摆为仿真对象对其进行了系统的分析,结果表明相对于传统的双输入模糊控制器,单输入模糊控制器不仅可以有效地减少模糊控制规则,同时也具有较小的超调和较强的鲁棒性.

5 结论(Conclusion)

本文将处理非线性系统的波波夫稳定判据与模糊控制器的设计想结合,利用模糊控制器所具有的比例特性,提出了基于闭环系统稳定的模糊控制器的系统化设计方法,其中包括隶属函数的选择和输入变量数值的确定,方法简便有效.仿真结果表明了理论分析的正确性.

参考文献(References)

- [1] Tanaka K, Sugeno M. Stability analysis and design of fuzzy control systems [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1992, 45(2): 135 - 156
- [2] Chen C L, Chen P C, Chen C K. Analysis and design of fuzzy control system [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1993, 57(2): 125 - 140
- [3] Mizumoto M. Realization of PID controls by fuzzy control methods [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1995, 70(2): 171 - 182
- [4] Choe B J, Kwak S W, Kim B K. Design of single-input fuzzy logic controller and its properties [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1999, 106(3): 299 - 308
- [5] Zheng Wei, Li Shiyong, Zhang Fuen. Design of a single-input fuzzy controller based on synthetically combined reasoning of quantitative and qualitative variable [J]. System Engineering and Electric Technology, 2001, 23(7): 52 - 54

本文作者简介

郑伟 1975 年生. 2002 年于哈尔滨工业大学获得工学博士学位. 现为北方交通大学自动化系讲师. 研究领域: 模糊控制, 智能控制.

Email: wendyzheng75@yahoo.com.cn

徐洪泽 1966 年生. 1997 年于哈尔滨工业大学获得工学博士学位. 现为北方交通大学自动化系副教授. 研究领域: 智能控制, 交通信号与控制.

李士勇 1943 年生. 现为哈尔滨工业大学控制科学与工程系教授, 博士生导师. 主要研究方向为模糊控制, 神经控制及智能控制理论及其在过程控制和高技术理论中的应用研究.

张福恩 1936 年生. 现为哈尔滨工业大学控制科学与工程系教授, 博士生导师. 主要研究方向为仿真转台技术与设备, 导航技术与设备, 计算机控制工程等.