

文章编号: 1001-0920(2007)05-0585-04

基于粒子群优化的一类模糊控制器设计

郝万君^{1a,2}, 强文义^{1a}, 柴庆宣^{1a}, 胡林献^{1b}

(1. 哈尔滨工业大学 a. 航天学院, b. 电气工程系, 哈尔滨 150001; 2. 北华大学 计算机学院, 吉林省 吉林市 132021)

摘 要: 针对一般模糊控制器存在稳态性能与动态性能之间的矛盾, 提出一种参数自整定模糊控制器. 该控制器结构简单, 算法简便, 具有良好的动态特性, 能有效消除静态偏差, 且有一定的鲁棒性. 为避免模糊控制器设计中参数调试的复杂性, 获得最佳的控制性能, 应用改进的自适应粒子群优化算法对模糊控制器参数进行优化设计. 通过典型的被控对象的仿真研究, 验证了所提出算法的有效性和适应性以及所设计控制器的优越性.

关键词: 模糊控制; 自适应控制; 参数优化; 粒子群优化算法

中图分类号: TP273.5

文献标识码: A

Design of fuzzy controller based on particle swarm optimization

HAO Wan-jun^{1a,2}, QIANG Wen-yi^{1a}, CHAI Qing-xuan^{1a}, HU Lin-xian^{1b}

(1a. School of Astronautics, 1b. Department of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. School of Computer, Beihua University, Jilin 132021, China. Correspondent: HAO Wan-jun, E-mail: hao_wanjuan@hit.edu.cn)

Abstract: A fuzzy controller with parameter self-tuning structure is proposed for solving the contradiction between the steady performance and dynamic performance of usual fuzzy controllers. The obtained controller has good dynamic performance and robustness, the structure of which is simple and the algorithm is convenient, which can effectively eliminate steady state deviations. For avoiding complex adjustment of parameters in the design of fuzzy controllers and attaining optimal control properties, a modified self-adaptive particle swarm optimization (PSO) algorithm is applied to optimizing the parameters of a fuzzy controller during design. Numerical simulations based on typical controlled objects show the effectiveness and the adaptability of the algorithm, as well as the superiority of the designed controller.

Key words: Fuzzy control; Self-adaptive control; Parameter optimization; Particle swarm optimization algorithm

1 引言

模糊控制具有不依赖于被控对象的精确数学模型、响应速度快、对系统参数变化有较强的鲁棒性等特点, 在经典控制理论和现代控制理论难以应用的场合发挥了很大作用. 如何设计结构简单、算法简便、具有较好动静态特性的模糊控制器, 已成为重要的研究课题^[1,2].

模糊控制器本质上是一种非线性控制器, 但由于实际系统的非线性和复杂性, 对于控制器参数仍缺乏有效的设计和调整方法. 常用的参数整定方法各有优点, 也存在不足. 梯度法要求目标函数连续可导; 单纯形法受初值和计算步长影响较大, 且易收敛于局部最优解; 遗传算法需要进行复制、交叉和变异

操作, 进化速度较慢, 且易产生早熟.

粒子群优化 (PSO) 算法^[3] 以其计算效率高、鲁棒性强、能以较大概率找到问题的全局最优解而引起普遍重视.

本文在文献 [4, 5] 的基础上, 提出一种结构简单、算法简便、动态和稳态特性较好的模糊控制器. 针对模糊控制设计中参数难以确定的问题, 提出了应用改进的粒子群优化算法进行参数优化的方法.

2 控制器设计

2.1 系统结构

系统由两个模糊控制器 (FC1 和 FC2), 粒子群优化器 (PSO) 和控制对象 $G(s)$ 组成, 如图 1 所示.

2.2 模糊控制器设计

收稿日期: 2006-02-21; 修回日期: 2006-05-22.

基金项目: 黑龙江省科技攻关项目 (GC05A306).

作者简介: 郝万君 (1965—), 男, 吉林伊通人, 副教授, 博士生, 从事智能控制、预测控制的研究; 强文义 (1937—), 男, 江苏无锡人, 教授, 博士生导师, 从事智能控制、机器人控制等研究.

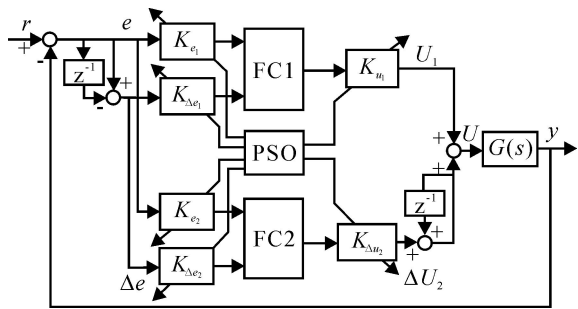


图 1 模糊控制系统结构

2.2.1 输入输出变量及其模糊化

模糊控制器的输入变量为偏差 e 和偏差变化率 Δe ; 分别乘以量化因子 k_e 和 $k_{\Delta e}$ 后, 输入变量为

$$k_e \cdot e(k) = k_e \cdot (r(k) - y(k)), \tag{1}$$

$$k_{\Delta e} \cdot \Delta e(k) = k_{\Delta e} \cdot (e(k) - e(k - 1)). \tag{2}$$

其中: $y(k)$ 和 $r(k)$ 分别为过程输出和设定值, $e(k)$ 和 $e(k - 1)$ 为当前和前一时刻的误差, $*$ 代表 1 和 2.

偏差和偏差变化率量化后的论域取为 $[-L, L]$. L 通常在 $[1, 5]$ 区间选取, 亦可根据输出设定值的变化来动态调整, 以降低控制系统对设定值变化的敏感性. 输入语言变量模糊集定义为: 负(N) 和正(P), 如图 2(a) 所示.

隶属函数计算公式为

$$\mu_{N_{e_*}} = \frac{L - k_{e_*} e}{2L}, \mu_{P_{e_*}} = \frac{L + k_{e_*} e}{2L}, \tag{3}$$

$k_{e_*} e \in [-L, L];$

$$\mu_{N_{\Delta e_*}} = \frac{L - k_{\Delta e_*} \Delta e}{2L}, \mu_{P_{\Delta e_*}} = \frac{L + k_{\Delta e_*} \Delta e}{2L}, \tag{4}$$

$k_{\Delta e_*} \Delta e \in [-L, L].$

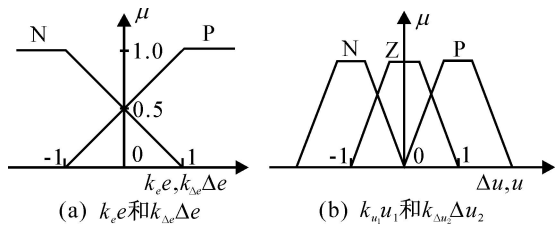


图 2 隶属函数

FC1 和 FC2 的输出变量分别为 $u_1(k)$ 和 $\Delta u_2(k)$; 它们的量化因子分别为 k_{u_1} 和 k_{u_2} . 输出语言变量模糊集定义为: 负(N), 零(Z) 和正(P), 其各自隶属函数的中心值分别为 $-H, 0$ 和 H (H 选为 5). 隶属函数如图 2(b) 所示.

2.2.2 模糊控制规则

FC1 和 FC2 采用相同形式的模糊控制规则, 即
 R_1 : if e is N_e and Δe is $N_{\Delta e}$, then u is N;
 R_2 : if e is N_e and Δe is $P_{\Delta e}$, then u is Z;
 R_3 : if e is P_e and Δe is $N_{\Delta e}$, then u is Z;

R_4 : if e is P_e and Δe is $P_{\Delta e}$, then u is P.

其中 u 代表 u_1 或 Δu_2 .

2.2.3 模糊推理与控制器输出

采用 Larsen 乘积推理方法, 其“与”运算采用 Zadeh 模糊逻辑“与”的形式, “或”运算采用 Lukasiewicz 模糊“或”的形式, 输出量采用重心解模糊算法^[6]. 求得控制器的输出为:

模糊控制器 1(FC1) 的输出

$$K_{u_1} u_1 = k_{u_1} H \frac{S(\mu_{R_4}) - S(\mu_{R_1})}{S(\mu_{R_1}) + S(\mu_{R_2 \ R_3}) + S(\mu_{R_4})}, \tag{5}$$

模糊控制器 2(FC2) 的输出

$$K_{\Delta u_2} \Delta u_2 = k_{\Delta u_2} H \frac{S(\mu_{R_4}) - S(\mu_{R_1})}{S(\mu_{R_1}) + S(\mu_{R_2 \ R_3}) + S(\mu_{R_4})}. \tag{6}$$

其中

$$S(\mu_{R_1}) = \mu_{R_1} S, S(\mu_{R_2 \ R_3}) = \mu_{R_2 \ R_3} S,$$

$$S(\mu_{R_4}) = \mu_{R_4} S.$$

S 是图 2(b) 中单个输出模糊集的面积; $S(\mu_{R_1})$, $S(\mu_{R_2 \ R_3})$ 和 $S(\mu_{R_4})$ 分别对应于各个控制规则的输出模糊集的隶属度加权面积.

两个模糊控制器的输出分别为

$$U_1 = \frac{k_{u_1} H}{4L - 2\max(k_{e_1} |e|, k_{\Delta e_1} |\Delta e|)} \times (k_{e_1} e + k_{\Delta e_1} \Delta e), \tag{7}$$

$$\Delta U_2 = \frac{k_{\Delta u_2} H}{4L - 2\max(k_{e_2} |e|, k_{\Delta e_2} |\Delta e|)} \times (k_{e_2} e + k_{\Delta e_2} \Delta e). \tag{8}$$

总的模糊控制器输出为

$$U = U_1 + \sum_k \Delta U_2 = \frac{k_{u_1} H (k_{e_1} e + k_{\Delta e_1} \Delta e)}{4L - 2\max(k_{e_1} |e|, k_{\Delta e_1} |\Delta e|)} + \sum_k \frac{k_{\Delta u_2} H (k_{e_2} e + k_{\Delta e_2} \Delta e)}{4L - 2\max(k_{e_2} |e|, k_{\Delta e_2} |\Delta e|)}. \tag{9}$$

控制器共有 $k_{e_1}, k_{\Delta e_1}, k_{e_2}, k_{\Delta e_2}, k_{u_1}, k_{\Delta u_2}$ 6 个控制参数. 采用粒子群优化方法确定它们的参数值.

3 基于 PSO 的模糊控制器参数寻优

3.1 PSO 优化算法

PSO 初始化为一群随机粒子(随机解). 在每次迭代中, 粒子通过跟踪两个最优解来更新自己, 最终达到从全空间搜索最优解的目的. 在第 k 次迭代时, 粒子 i 的位置和飞行速度分别表示为

$$X_i(k) = (X_{i_1}(k), X_{i_2}(k), \dots, X_{i_N}(k)), \tag{10}$$

$$V_i(k) = (V_{i_1}(k), V_{i_2}(k), \dots, V_{i_N}(k)). \tag{11}$$

每次迭代时,粒子通过跟踪两个极值来更新自己的速度和位置:一个是粒子本身所找到的最优解,即个体极值 p_{Best} ;另一个是整个种群目前找到的最优解,即全局极值 g_{Best} . 分别表示为

$$P_i(k) = (P_{i_1}(k), P_{i_2}(k), \dots, P_{i_N}(k)), \quad (12)$$

$$P_g(k) = (P_{g_1}(k), P_{g_2}(k), \dots, P_{g_N}(k)). \quad (13)$$

在第 $k + 1$ 次迭代计算时,粒子 i 根据下列规则来更新自己的速度和位置:

$$\begin{aligned} V_{i_n}(k+1) = & wV_{i_n}(k) + c_1r_1(P_{i_n}(k) - X_{i_n}(k)) + \\ & c_2r_2(P_{g_n}(k) - X_{i_n}(k)), \end{aligned} \quad (14)$$

$$X_{i_n}(k+1) = X_{i_n}(k) + V_{i_n}(k+1). \quad (15)$$

其中: w 为惯性权重, 调整其值可以改变搜索范围和搜索速度; c_1 和 c_2 为学习因子, 是非负常数; r_1 和 r_2 是介于 $[0, 1]$ 之间的两个独立的随机数; $n = 1, 2, \dots, N$ 为粒子的维数向量值; $X_{i_n}(k)$ 和 $V_{i_n}(k)$ 是粒子第 n 维向量的速度和位置.

本文提出一种新的惯性权值 w 调整算法, 计算公式为

$$\begin{aligned} w(k) = & w_{\max} - (w_{\max} - w_{\min}) \times \\ & \left(1 - \frac{|J_{\text{opt}} - J_{\text{mean}}|}{\max(J_{\text{opt}}, J_{\text{mean}})}\right). \end{aligned} \quad (16)$$

其中: $w(k)$, $w_{\max}$ 和 $w_{\min}$ 分别为惯性权重、最大权重和最小权重; J_{opt} 和 J_{mean} 是当前时刻全局最优粒子的适应度函数及所有粒子适应度函数的平均值; k 为当前的迭代次数.

设计目的是为使 w 能随 PSO 寻优速度的改变而自适应调整, 既提高了 PSO 算法的收敛速度, 又不易陷入局部最优.

PSO 算法的参数设置如下: 种群总数为 50, 每个微粒的维数为 6 (对应于 FC1 和 FC2 控制器的 k_{e_1} , $k_{\Delta e_1}$, k_{e_2} , $k_{\Delta e_2}$, k_{u_1} , $k_{\Delta u_2}$ 6 个变量), 最大迭代次数为 200, $c_1 = c_2 = 1.5$, $w_{\max} = 0.95$, $w_{\min} = 0.1$; 微粒速度范围 $[-10, 10]$, 微粒位置范围 $[0, 4]$; $k_{e_1} \sim k_{\Delta u_2}$ 被初始化为 $[0, 4]$ 之间的 50 组随机数值.

3.2 寻优目标函数

参数整定本质上是基于一定目标函数的参数寻优问题. 目标函数即适应度函数, 本文采用如下目标函数^[7]:

$$J_{\text{ITAE}} = c | \min(y(k)) | + T^2 \sum_k | e(k) |. \quad (17)$$

其中: T 为采样时间间隔, k 为迭代次数, c 为加权因子 (非最小相位系统 c 选为 200, 其他情况 c 选为 0).

前一项针对存在负调的系统 (如非最小相位系

统) 而设计, 用来抑制系统的负调; 后一项为 ITAE 准则, 它对初始误差考虑较少, 主要限制过渡过程后期出现的误差. 采用 ITAE 准则的系统一般具有快速、平稳和超调量小的特点.

4 仿真研究

为验证本文的设计方法, 通过几个典型对象的仿真算例给出本文方法与现有方法的比较.

4.1 积分延迟过程

积分延迟过程模型 (对象 1) 为

$$G(s) = \frac{1}{s(s+1)} e^{-0.2s}.$$

积分延迟对象的仿真结果如图 3 所示, 多次随机仿真的性能统计数据如表 1 所示.

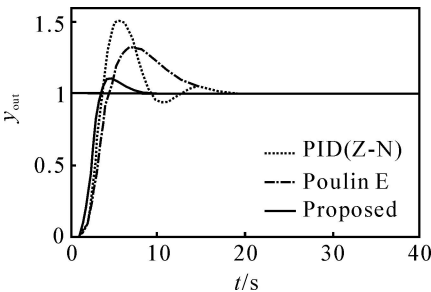


图 3 积分延迟过程仿真结果

表 1 积分延迟对象的控制性能比较

性能指标	$\delta / \%$	$U_s / \%$	T_r	T_s	ITAE
Poulin E	33.5	—	1.10	16.52	2.71
PID(Z-N)	51.2	—	2.26	16.87	3.43
Proposed	11.3	—	1.80	7.51	1.62

通过仿真可以看出, 系统的超调量 $\delta \%$, 上升时间 T_r 和调节时间 T_s , 与 Z-N 法整定的 PID 控制和 Poulin 等^[8] 提出的控制算法相比, 均得到不同程度的改善. 超调量只有 11.3%, 调节时间也大大缩短.

4.2 非最小相位系统

典型非最小相位系统 (对象 2) 为

$$G(s) = \frac{s^2 - 7s + 6}{s^3 + 6s^2 + 8s + 6}.$$

文献^[7,9] 中控制器和本文模糊控制器的性能统计数据如表 2 所示, 非最小相位系统在上述控制器作用下的阶跃响应如图 4 所示.

表 2 非最小相位对象的控制性能比较

性能指标	$\delta / \%$	$U_s / \%$	T_r	T_s
Open-loop	9.36	29.81	1.10	8.53
Wang	0.93	7.79	3.10	7.22
Proposed	1.10	16.12	0.85	4.58

通过图表可以看出, 对于系统超调 $\delta \%$, 上升时间 T_r 和调节时间 T_s , 本文算法比文献^[7,9] 都有不

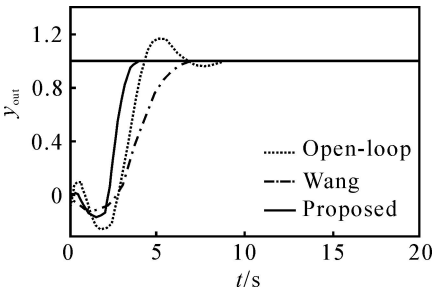


图 4 非最小相位对象仿真结果

同程度的改善,并在负调 $U_s\%$ 和系统的快速调节方面实现了较好的折衷.

模型 1 和模型 2 两种模糊控制器参数如表 3 所示.

表 3 控制器参数

控制对象	K_{e1}	$K_{\Delta e1}$	K_{u1}	$K_{\Delta u2}$	K_{e2}	$K_{\Delta e2}$
对象 1	0.006 5	0.619 3	1.197 3	8.09e-8	0.463 2	0.567 5
对象 2	1.202 4	0.816 9	0.542 1	0.717 6	0.342 1	0.034 0

4.3 双联箱系统

典型的双联箱水位控制系统的模型由实验数据获得,对象的传递函数(对象 3)为^[10]

$$G(s) = \frac{0.75e^{-8.067s}}{(1 + 61.45s)^2}.$$

采用变设定值外加输出扰动的实验方法,在 $T = 4\ 000$ 时加入数值为 0.2 的输出扰动. 仿真结果如图 5 所示.

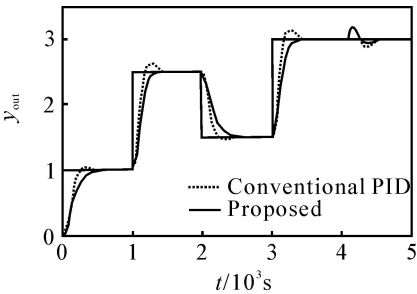


图 5 双联箱系统的水位控制仿真结果

仿真表明,本文方法表现出良好的性能,当水位设定值变化时,系统只有微小的超调,扰动对系统造成的影响较小,并很快恢复到稳态;而传统 PID 控制器^[10]的超调却较大.

5 结 语

本文提出一种参数自整定模糊控制器,并采用改进粒子群算法对模糊控制器参数进行优化设计. 由此得到的模糊控制器,动态性能好,稳态精度高,鲁棒性强. 仿真结果证明了所提出算法的有效性和

所设计控制器的优越性.

参考文献(References)

[1] Wang L X. Modeling and control of hierarchical systems with fuzzy system[J]. Automatica, 1997, 33 (6) : 1041-1053.

[2] 张恩勤, 施颂椒, 高卫华. 模糊控制系统近年来的研究与发展[J]. 控制理论与应用, 2001, 18(1) : 7-11. (Zhang E Q, Shi S J, Gao W H. Recent researches and developments on fuzzy control system [J]. Control Theory and Applications, 2001, 18(1) : 7-11.)

[3] Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarm optimization [C]. Proc of IEEE Int Conf on Neural Networks. Piscataway: IEEE Press, 1995:1942-1948.

[4] Ying H. The simplest fuzzy controllers using different inference methods are different nonlinear proportional-integral controllers with variable gains[J]. Automatica, 1993, 29(6) :1579-1589.

[5] 苏玉鑫, 郑春红, 段宝岩. 一种改进的模糊 PD 控制器[J]. 控制与决策, 2004, 19(2) : 173-178. (Su Y X, Zheng C H, Duan B Y. An enhanced fuzzy PD controller[J]. Control and Decision, 2004, 19(2) : 173-178.)

[6] 王建辉, 黄敏, 顾树生. 基于 PSO 的板形板厚小波神经网络解耦 PID 控制[J]. 东北大学学报, 2005, 26(3) : 224-227. (Wang J H, Huang M, Gu S S. PSO-based decoupling PID control using wavelet neural network for strip flatness/ gauge[J]. J of Northeastern University, 2005, 26(3) : 224-227.)

[7] 王凌, 李文峰, 郑大钟. 非最小相位系统控制器的优化设计[J]. 自动化学报, 2003, 29(1) : 135-141. (Wang L, Li W F, Zheng D Z. Optimal design of controllers for non-minimum phase systems [J]. Acta Automatica Sinica, 2003, 29(1) : 135-141.)

[8] Poulin E, Pomerleau A, Desbiens A, et al. Development and evaluation of an auto-tuning and adaptive PID controller [J]. Automatica, 1996, 32 (1) : 71-82.

[9] Ho W K, Xu W. PID tuning for unstable processes based on gain and phase-margin specifications[J]. IEE Proc D: Control and Applications, 1998, 145 (5) : 392-396.

[10] Ho W K, Hang C C, Cao L S. Tuning or PID controllers based on gain and phase margins specifications[J]. Automatica, 1994, 31(2) :497-502.