

文章编号: 1671-7848(2006)S₀-0071-04

进化规划模糊算法在 PID 控制中的应用

曾俊杰¹, 陈得宝², 刘瞰东¹, 李茂青¹

(1. 厦门大学 自动化系, 福建 厦门 361005; 2. 淮北煤炭师范学院 物理系, 安徽 淮北 235000)



摘 要: 针对非线性控制系统, 利用进化规划模糊算法, 对 PID 控制器规则基的参数进行离线优化, 优化后的模糊控制规则可对系统实现实时控制。该控制算法无需任何先验知识和量化因子, 具有很强的数据挖掘能力, 且模糊规则基的寻优速度较快。通过对非线性系统进行仿真, 验证了该算法的有效性, 与传统固定参数 PID 控制方法及遗传算法整定参数 PID 控制方法相比, 明显地提高了系统的稳定性和动态性能。

关键词: 模糊算法; 进化规划; 规则基自动获取; PID 控制器

中图分类号: TP 391.9

文献标识码: A

Application of Evolutionary Programming and Fuzzy Algorithm in PID Control

ZENG Jun-jie¹, CHEN De-bao², LIU Tun-dong¹, LI Mao-qing¹

(1. Department of Automation, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. Physical Department of Huaibei Coal Industry Teachers College, Huaibei 235000, China)

Abstract: An evolutionary programming and fuzzy algorithm is proposed for nonlinear complicated systems. Evolutionary programming is used in offline training to optimize controller's rule base. Then the optimized base is implemented in online control. The novel method doesn't need any numerical factor and prior experience while possessing strong data-mining ability and rapid optimized speed of fuzzy rule base. Finally, compared with the traditional PID control algorithm and the PID controller with the genetic algorithm based parameter adjustment the simulation result shows that the proposed method has made a great step in the stability and dynamic performance of the given system.

Key words: fuzzy algorithm; evolutionary programming; automatic fuzzy rule acquisition; PID controller

1 引言

PID 由于其算法简单, 可靠性高和对模型依赖程度低, 被广泛应用于工业过程控制中^[1]。然而, 常规 PID 控制多局限于线性系统, 对于非线性系统, 难以达到理想的控制效果。1965 年, 美国学者 Zadeh 提出模糊算法, 并在控制领域内得到广泛的应用, 为解决非线性问题提供了新的途径。模糊控制规则的获取通常采用抽取专家经验的方法, 存在着一定的人为误差; 近年来, 模糊规则的自动获取成为一个较活跃的研究领域, 并取得一定的进展^[2,3]。不过, 这些规则的获取局限于已知规则基结构。1975 年, John Holland 提出的遗传算法也是解决非线性问题的较好方法, 尤其在规则基参数的优化方面发挥了重大的作用^[4], 但在无先验知识或

先验知识不完备情况下, 不同规则之间的交叉变得十分复杂, 因而应用受到限制。20 世纪 60 年代中期, L. J. Fogel, A. J. Owens 和 M. J. Walsh 等人提出进化规划方法^[5], 它取消了遗传算法中不可少的交叉操作, 而将变异作为其主要进化手段, 为求解空间未知的情况提供了一种并行、随机、和自适应的全局优化方法, 因而更适用于模糊规则基的自动寻优。为此, 本文针对 PID 控制器设计, 提出一种无需先验知识和量化因子的 PID 参数寻优方法。

2 基于模糊规则的 PID 基本控制原理

基于模糊规则的 PID 基本控制原理如图 1 所示。图中, 控制部分由 PID 控制器和进化规划调整模糊语言规则基部件组成。

1) PID 控制器 图 1 中 PID 控制器的算式表达

收稿日期: 2005-10-18 收修定稿日期: 2005-10-29

基金项目: 厦门大学 985 二期信息创新平台资助项目

作者简介: 曾俊杰(1977), 男, 福建南安人, 研究生, 主要研究方向为智能控制与进化计算等。

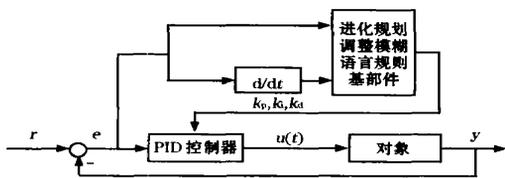


图 1 基于模糊规则的 PID 控制原理图

式为

$$u(k) = k_p e(k) + k_i \sum_{i=0}^k e(i) + k_d [e(k) - e(k-1)] \quad (1)$$

其相应的增量形式为

$$\Delta u(k) = k_p \Delta e(k) + k_i e(k) + k_d [\Delta e(k) - \Delta e(k-1)] \quad (2)$$

式中, k_p, k_i, k_d 分别为比例系数、积分系数、微分系数。

常规 PID 控制是将偏差的比例、积分和微分三参数通过线性组合构成控制器, 对被控对象进行控制, 系统控制品质的优劣取决于上述三个参数的整定, 通常难以保证优良的控制效果。本文采用控制器系数随系统响应的变化而变化的模糊形式, 其数值在模糊语言规则基的控制下在线变化, 能达到更好的控制效果。

2) 模糊语言规则基的设计

①参数的表示形式 模糊规则的表示采用二维矩阵的形式^[9]。矩阵的行数=规则数, 列数=输入变量*输入模糊语言变量数+输出变量数。假设: X_1, X_2 为控制输入, O_1, O_2, O_3 为模糊输出, 参数形式见表 1。

表 1 参数形式

X_1			X_2			O_1	O_2	O_3
d'_{11}	d_{11}	d''_{11}	d'_{12}	d_{12}	d''_{12}	O_{11}	O_{12}	O_{13}
d'_{21}	d_{21}	d''_{21}	d'_{22}	d_{22}	d''_{22}	O_{21}	O_{22}	O_{23}

②简单模糊推理 考虑如下模糊控制规则:

$$R^j: \text{If } e(k) \text{ is } A_1^j \text{ and } e(k) \text{ is } A_2^j$$

THEN $K_p = O_1^j, K_i = O_2^j, K_d = O_3^j$

式中, K_p, K_i, K_d 为控制器的系数; O_i^j 为模糊单点输出; A_i^j 为隶属度函数, 其表达式可以有梯形、三角形、高斯形等多种方式。

本文采用不规则的三角形, 其定义如下:

$$A_i^j = \begin{cases} (u_i + d_{ij}^l - d_j^l) / d_{ij}^l & \text{if } (d_{ij} - d_j^l \leq u_i < d_{ij}) \\ (-u_i + d_j^r + d_{ij}^r) / d_{ij}^r & \text{if } (d_j^r \leq u_i < d_{ij} + d_j^r) \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

上式各变量的意义, 如图 2 所示。

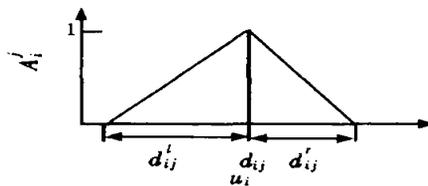


图 2 隶属度函数

模糊推理过程如下:

a) 计算第 j 条规则的满意度:

$$w_j = A_1^j * a_1 * A_2^j * a_2 \quad (4)$$

式中, a_1 和 a_2 为每条规则的重要程度, 这里都取 1。

b) 最后的推理输出(预测输出)是所有规则的合成, 其推理输出为

$$k_{p.i.d} = \frac{\sum_{j=1}^R (w_j * O_j^i)}{\sum_{j=1}^R w_j} \quad (5)$$

式中, R 为模糊规则数。

3 改进的进化规划算法

本文采用的进化规划优化模糊语言规则基的主要实现步骤如下:

1) 寻优参数编码 用规则基的各参数作为染色体的基因, 这里采用实数编码方法, 它无需译码, 收敛速度优于二进制编码。初始化一组行数等于规则数, 列数等于(输入变量个数 * 3 + 输出变量数)的二维数组作为初始种群。本文随机初始化一组行数为 5, 列数为 9 的二维数组。这里不采用量化因子, 初始化参数应在给定输入值附近, 给定输入值越大, 系数越大, 反之则小。

2) 产生初始种群 群体规模对算法的收敛速度有很大的影响, 过大的群体规模易使系统收敛速度慢, 过小则易使系统不收敛。通常群体规模取为 70~100 之间。

一般初始种群的产生有两种方法: 一是完全随机方法, 一般适用于对问题的解无任何先验知识的情况; 二是某些先验知识转变为一组要求, 然后在满足这些要求的解中再随机地选取样本, 一般适用于对问题的解有先验知识的情况。本文采用第一种, 无需任何先验知识。

3) 确定适应度函数 为获取满意的过渡过程动态特性, 定义误差形式如下:

$$E = (|\sum_{i=1}^n (y_i - y_i^*)^2|) / n \quad (6)$$

式中, n 为采样点的个数; y_i 为期望输出; y_i^* 为模糊规则基对系统的控制输出。

考虑到 d_{ij}^l, d_{ij}^r 可能产生负值, 可引入如下式的惩罚函数:

$$F_{\text{penalty}} = \sum_{j=1}^R c_j \quad (7)$$

如果对任意 j , 满意度 w_i 都为 0, 则 c_j 等于常数; 否则 $c_j=0$ 。如果有 d_{ij}^l, d_{ij}^r 为负值, $w_i=0$ 。这样就保证无效规则的适应度很小。

为了避免超调太多, 采用惩罚功能, 即一旦产生超调, 将超调量作为最优指标的一项, 定义如下:

$$ey = \begin{cases} 100 * |y_l - y_l^*| & (y_l < y_l^*) \\ 0 & (y_l \leq y_l^*) \end{cases} \quad (8)$$

根据分析, 定义适应度函数如下:

$$F = 1.0 / (E + ey + F_{\text{penalty}}) \quad (9)$$

这样当找到有最大适应度的解时, E 也趋近于零, 此时认为控制器的规则基已满足要求。

4) 选择过程 利用 q 竞争原理, 首先计算群体的适应度, 选择得分高的前 50 % 个个体, 保留到下一代, 并按变异率将其复制和变异, 这样子父的个数不变。比较过程中, 对每个比较都要重新采样, 这样保证最好的个体被保留下来。

5) 变异 将需要变异的个体, 随机选择三种变异算子中的一种进行变异。这三种变异算子如下:

① 互换同一个体同行的两元素; ② 互换同一个体同列的两元素; ③ 按指数变化规律, 通过增加高斯随机数, 采用指数变异, 对适应变大的个体施加较小的变异, 反之施加较大的变异。

第三种变异算子的具体格式如下^[7]:

$$d_{ij} = d_{ij} + \Delta d_{ij},$$

$$\Delta d_{ij} = \alpha_p * \exp[(F_{\text{max}} - F_k) / F_{\text{max}}] * \gamma_{ij} \quad (10)$$

式中, Δd_{ij} 为参数变异的调整量; α_p 为参数变化率, 一般为介于 0 到 1 之间的常数; F_{max}, F_k 分别为每代中个体的最大适应度和第 k 个个体的适应度; γ_{ij} 是均值为 0, 方差为 1 的高斯随机数。

上述过程反复进行, 直到满足控制要求为止。若没满足, 则返回适应度的计算, 重新选择变异。

4 仿真实验

设被控对象的传递函数为

$$G(s) = \frac{20}{(0.4s+1)(4s+1)} \quad (11)$$

其采样时间为 0.1 s, 采用零阶保持器离散化后的方程为

$$y(k) = 1.754 * y(k-1) - 0.7596 * y(k-2) +$$

$$0.05711 * u(k-1) + 0.05211 * u(k-2) \quad (12)$$

为验证本文方法对非线性系统控制的有效性, 加入输出的平方项, 方程如下:

$$y(k) = [1.754 * y(k-1) - 0.7596 * y(k-2) + 0.05711 * u(k-1) + 0.05211 * u(k-2)] / (1 + y(k-1) * y(k-1)) \quad (13)$$

进化参数如下: 进化代数为 5 000; 群体大小为 70; 变异率为 0.12; $\alpha_p=0.2$; 初始基因随机选取在 0 ~ 1.5 之间。

程序采用 C 语言进行编制, 计算速度快。在给定的输入为 1 时, 经过 4 748 代进化, 最好的个体适应度为 1.093 428, 寻优时间仅为 22 s (用 P4, 2.4G 微机仿真)。优化后的控制器参数, 见表 2。

表 2 优化的控制器参数表

d_e^l	d_e	d_e^r
0.239 564	1.559 923	1.269 942
0.694 923	0.496 091	1.204 128
0.167 774	0.451 966	1.405 095
0.869 844	1.079 959	0.503 626
0.148 302	0.870 601	0.682 686
d_{de}^l	d_{de}	d_{de}^r
0.200 385	0.532 087	0.848 768
0.279 084	0.796 795	0.438 936
0.345 794	0.805 526	0.741 550
0.257 066	0.405 100	0.811 968
0.008 692	0.377 589	1.054 903
K_p	K_i	K_d
0.716 813	0.438 368	0.579 684
-0.352 194	1.090 250	0.007 919
0.932 151	-0.683 383	0.886 232
1.185 538	-0.198 850	1.217 668
1.255 738	0.246 535	1.222 860

将优化后的模糊语言规则应用于实时控制系统, 系统的响应曲线如图 3 所示。

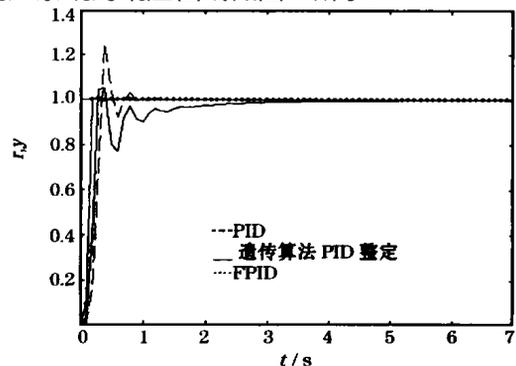


图 3 系统的响应曲线

图中同时仿真另外两种算法: 一是传统固定参

数 PID 算法的响应曲线, 其参数整定为 $k_p=0.1$; $k_i=0.6$, $k_d=0.0875$; 二是实数遗传 PID 算法的响应曲线, 其获得的优化参数为^[8]: $k_p=0.0205$, $k_i=0.4551$, $k_d=0.0765$ 。

由图可知, 传统固定 PID 算法和实数遗传 PID 算法两种算法对于非线性系统控制较难有理想的效果, 而本文所提方法基本没有超调量(仅 0.3%), 振荡很小, 响应速度快, 明显地提高了系统的稳定性和动态性能。

5 结 语

本文将进化规划模糊算法与传统 PID 控制方法相结合, 给出了一种通过进化规划寻优得到优化的模糊控制规则基的方法, 此方法不再需要任何先验知识和量化因子。在实时控制中利用优化后的规则基去控制系统, 根据误差及其变化率实时改变 PID 参数, 计算时间仅为一组规则基的计算时间, 系统的响应速度快。仿真结果表明本方法明显提高了系

统的稳定性和动态性能, 具有进一步研究的价值。

参考文献:

[1] 陶永华. 新型 PID 控制及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.

[2] Karr C L, McCormick E. Simultaneous design of membership functions and rule sets for fuzzy controllers using genetic algorithms[J]. IEEE Trans Fuzzy Syst, 1995, 3(2): 129-139.

[3] Joo Y H, Hwang H S, Kim K B, et al. Linguistic model identification for fuzzy system[J]. Electron Lett, 1995, 31(4): 330-331.

[4] 王晶, 等. 基于遗传算法的模糊系统优化设计方法[J]. 控制理论与应用, 1999, 16(5): 699-704.

[5] 姚新, 陈国良, 等. 进化算法研究进展[J]. 计算机学报, 1995, 18(9): 694-706.

[6] Hwang H S. Automatic design of fuzzy rule base for modeling and control using evolutionary programming[J]. IEEE Proc-control Theory, 1999, 146(1): 1-15.

[7] 陈得宝, 王晓兰, 等. 基于递阶进化规划的 RBF 网络设计新方法[J]. 甘肃工业大学学报, 2001, 27(3): 60-63.

[8] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真(第 2 版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.

(上接第 70 页)

从图 5 的误差曲线图可以看出, 训练主要在前 60 步, 误差越小说明辩识的 ANFIS 推理系统的输出越接近于理想的输出。在图 6 和图 7 中, 纵坐标表示经过单位化后, 需要在净化过程中加入化学品 PAC 的量。经过反单位化, 可以看出训练后系统的输出结果与训练数据及核对数据的比较, 从图中可以很明显的看出, ANFIS 推理系统的输出量十分接近本文想要的理想输出量。

将本文方法所得结果与采用水净化过程的统计模型^[8]所得的计算结果比较, 其数据见表 1。

表 1 ANFIS 推理系统与统计模型的结果比较

操作实际数据	统计模型结果	ANFIS 推理系统
1 300	994	1 304
1 200	1 286	1 217
1 100	1 199	1 108
1 000	985	991
900	1 068	913

可以看出, ANFIS 推理系统的输出结果明显更加接近于操作的实际数据, 较文献[8]的统计模型计算的结果更为合理。

5 结 语

将 ANFIS 应用于水净化处理问题, 结果表明:

①通过应用 Matlab 对 ANFIS 的自适应神经模糊

水净化过程的仿真, 看出 ANFIS 推理系统拥有较好的控制效果及精度。②对实际系统进行采样时, 为了能够精确地辩识系统, ANFIS 的训练数据要有较高的精度, 需要大量的数据。③ANFIS 克服了模糊推理系统中模糊化、反模糊化的人为决定性以及模糊规则的不全面性和粗糙性。神经网络与模糊控制的结合, 能够更有效地使系统本身朝着自适应、自组织、自学习的方向发展, 在控制领域将得到更广泛的应用。

参考文献:

[1] Shing J, Jang R. ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system[J]. IEEE Transaction on Systems Man and Cybern, 1993, 23(3): 665-685.

[2] Takagi T, Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control[J]. IEEE Trans Syst Man and Cybern, 1985, 15(1): 116-132.

[3] 张平安, 高春华. 神经-模糊和软计算[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000.

[4] 张国良, 曾静, 柯熙政, 等. 模糊控制及其 Matlab 应用[M]. 西安: 西安交通大学出版, 2002.

[5] Chiu S L. Fuzzy model identification based on cluster estimation[J]. Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, 1994, 2(3): 267-278.

[6] 汤兵勇, 路林吉, 王文杰. 模糊控制理论与应用技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.

[7] Sugeno M, Kang G T. Structure identification of fuzzy model[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1988, 28(1): 15-33.

[8] 李国勇. 智能控制及其 Matlab 实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.