

文章编号 1000-5013(2000)02-0200-05

基于遗传算法的 PID 参数优化设计

周凯汀^① 郑力新^②

(① 华侨大学电子工程系, ② 华侨大学电气工程与自动化系, 泉州 362011)

摘要 提出一种新的 PID 参数设计方法. 以模糊化的性能指标为目标函数、以设计参数的取值范围及极限性能指标为约束条件, 建立优化数学模型. 结果表明, 在 Matlab 环境下, 将遗传算法同 Simulink 仿真技术有机融合, 求解该优化模型. 该法能有效提高编程效率, 所得优化解大大提高系统性能指标.

关键词 PID, 参数优化设计, 遗传算法

中图分类号 TP 273.4

文献标识码 A

最近几年来, 模拟生物进化过程的遗传算法(GA)作为求解优化问题的有效手段, 开始被引入控制系统的设计中^[1~5]. GA 采用纯数值计算方法和随机进化策略, 无需梯度信息. 它能有效地攻克十分困难的优化问题, 使处理问题更具灵活性、适应性、鲁棒性和全局性. 它不仅能提高控制系统设计的品质, 而且能降低设计的难度. 因此, 在控制系统设计中有着广阔的应用前景. 本文提出一种基于遗传算法的 PID 优化设计方法. 它是一种纯数值计算方法, 有别于常用的分析法和作图法. 它能较好地融合 GA, Matlab 编程和 Simulink 仿真技术, 使得优化设计摆脱了复杂的公式和图表, 变得异常简单且极具工程性. 这种方法具有适用对象广和全局优化能力强等优越性.

1 优化模型的建立

典型的 PID 控制框图如图 1 所示, 其中 $G_o(s)$ 是控制对象. 在实际工程控制中, $G_o(s)$ 一般被辨识成一阶加延时、二阶加延时或积分加一阶加延时等数学模型. PID 的设计参数为比例放大系数 K_p 、积分时间常数 T_i 、微分时间常数 T_d . 从数学角度来讲, 一旦系统中对象模型确定后, 系统性能指标是设计参数的多峰非线性函数. 然而, 该代数表达式难以求出, 特别是在有纯延时环节的情况下. 故程序采用了 Matlab 编程及 Simulink 仿真技术. 在 Matlab 及 Simulink 强大专业功能的支持下, 可方便地获得对应 PID 参数的阶跃响应曲线 $y(t)$, 进一步获得系统的时间域性能指标超调(σ)为

$$\sigma = (y_{\max} - y) / y \times 100\%,$$

其中 y_{\max} 为 $y(t)$ 时间响应的最大值, y 为 $y(t)$ 时间响应曲线的稳态值. 过渡时间 t_s 为输出响应曲线 $y(t)$ 进入稳态误差 5% 的时间.

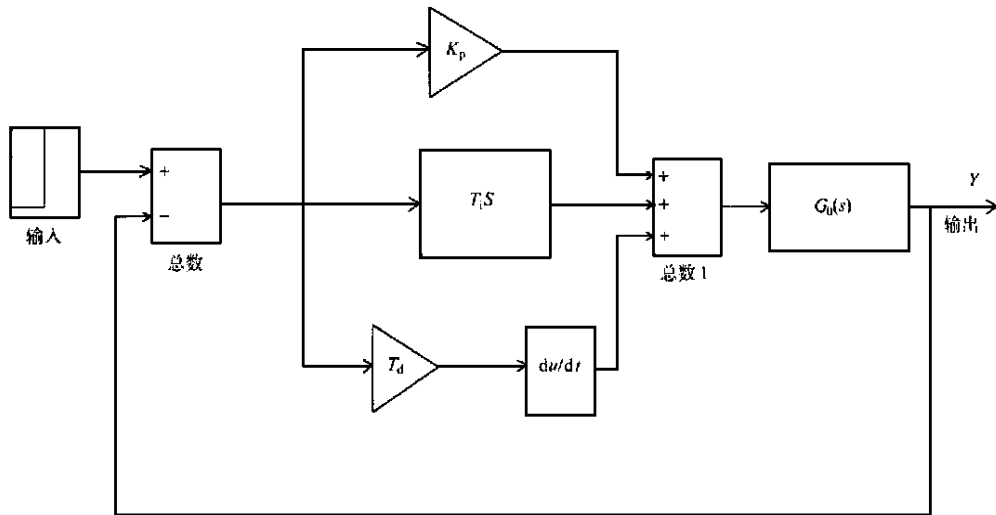


图 1 PID 典型控制框图

因为系统有两个性能指标 σ 及 t_s , PID 参数设计的任务是调配综合性能指标, 使之达到用户能满意的最优结果, 故该设计问题属于多重目标优化问题. 我们以 ZN 法达到的指标 σ^* , t_s^* 为参考, 引入设计参数的隶属度函数 f_1 与 f_2 , 合成统一的目标函数 F 为

$$F = \beta f_1 + (1 - \beta) f_2,$$

其中 $f_1 = 1.0 - \exp[-(2\sigma/\sigma^*)^2]$, $f_2 = 1.0 - \exp[-(2t_s/t_s^*)^2]$, β 为加权系数, 由设计者自定.

由于遗传算法的需要, 设计参数须有一个明确的取值范围. 我们以 ZN 法获得的结果 (K_p^*, T_i^*, T_d^*) 为中心, 向左右两边拓展参数的求解空间. 这样做的目的是充分利用 ZN 法的合理内核, 减少遗传算法的搜索时间.

综上所述, 将系统优化模型归纳成方程式为

$$\min F.$$

基于如下约束条件

$$\begin{aligned} \sigma & \leq \sigma^*, \\ t_s & \leq t_s^*, \\ (1 - \alpha) K_p^* & \leq K_p \leq (1 + \alpha) K_p^*, \\ (1 - \alpha) T_i^* & \leq T_i \leq (1 + \alpha) T_i^*, \\ (1 - \alpha) T_d^* & \leq T_d \leq (1 + \alpha) T_d^*, \end{aligned}$$

其中 α 为 $[0, 1]$ 内选定的数值.

2 遗传算法

遗传算法是一个强有力的求优算法. 它先随机地产生一组潜在的解 X (该解称为“染色体”; 解的特定集合称为“人口”; 解中的变量称为“基因”), 然后采用生物进化的过程 (如染色体交叉、变异和淘汰等) 不断提高解的品质, 最后获得最优解. 遗传算法中的两个重要控制参数

(交叉率 P_c 和变异率 P_m), 对算法的收敛速度有较大影响. 文 [5] 采用确定不变的 P_c 和 P_m , 而本文采用随世代数增加而不断自动调整的 P_c 和 P_m . 这样做的目的, 是因为在进化的初期, 人口的差异一般较大, 交叉率大和变异率小有助于加快收敛. 而在进化的后期, 交叉率小和变异率大有助于防止过早陷入局部最优. 因此有

$$P_c^{(\text{gen})} = P_c^{(\text{gen}-1)} - [P_c^{(0)} - 0.3]/\text{MAXGEN},$$

$$P_m^{(\text{gen})} = P_m^{(\text{gen}-1)} + [0.3 - P_m^{(0)}]/\text{MAXGEN},$$

其中 gen 表示世代数, MAXGEN 表示最大世代数. 下面介绍具体算法.

第 1 步, 全局变量设定, 给出 POP_SIZE (人口数), P_c, P_m, MAXGEN 的大小或范围.

第 2 步, 人口的产生及初始化. 以调节器参数为变量组成染色体 X , 即 $X = [K_p, T_i, T_d]$. 设世代计数器 $\text{gen} = 1$. 初始人口由 POP_SIZE 个染色体构成, 每个染色体的基因(设计参数)在各自的取值范围内随机产生, 但必须满足所有约束条件.

第 3 步, 适应性评价函数的计算. 为了能够评判染色体的优劣, 这里引入适应性评价函数 $\text{Eval}(X_k)$.

$$\text{Eval}(X_k) = \begin{cases} F; & \text{当 } X_k \text{ 满足约束条件,} \\ M; & \text{当 } X_k \text{ 不满足约束条件}(M \text{ 为一个大正数}). \end{cases}$$

对本问题, 评价函数值越小, 染色体的质量越好.

第 4 步, 进化操作. 通常进化操作有交叉、变异和选择三种. (a) 交叉. 设交叉计数器 $\text{ccnt} = 0$, 从 $[0, 1]$ 范围内产生随机数 $r_k (k = 1, 2, 3, \dots, \text{POP_SIZE})$. 如果 $r_k < P_c$, 则选择 X_k 为交叉用. 使交叉用染色体配对进行交叉操作, 接受交叉操作的染色体个数记入 ccnt 中. 交叉操作采用算术交叉^[6], 即

$$X_k = cX_j^{\text{gen}} + (1 - c)X_i^{\text{gen}},$$

$$X_l = cX_i^{\text{gen}} + (1 - c)X_j^{\text{gen}},$$

其中 X_i, X_j 为配对染色体, X_k, X_l 为新生染色体, i, j 表示同代人口中的第几个染色体 ($1 \leq i, j \leq \text{POP_SIZE}$). c 为 $[0, 1]$ 范围内产生随机数. (b) 变异. 设定变异计数器 $\text{mcnt} = 0$, 从 $[0, 1]$ 范围内产生随机数 $r_k (k = 1, 2, \dots, 3 \times \text{POP_SIZE} + 3 \times \text{ccnt})$. 如果 $r_k < P_m$, 则第 k 个基因进行变异操作, 即在其规定的取值范围内随机地产生一个数来取代原有值, 并使 $\text{mcnt} = \text{mcnt} + 1$. (c) 选择. 计算子代染色体的评价函数 $\text{Eval}(X_k) (k = 1, 2, \dots, \text{ccnt} + \text{mcnt})$, 同父代染色体一起按适应性大小顺序排列. 选出其中适应性最强的 POP_SIZE 个染色体构成新一代人口, 并保留上述过程中最佳染色体 V^* 及其评价函数值 maxeval . 这个过程称为“适者生存”选择.

第 5 步, 过程结束判定. 如果 $\text{gen} < \text{MAXGEN}$, 则回到第 3 步重复进行. 如果 $\text{gen} = \text{MAXGEN}$, 则输出 V^* 及 maxeval , 结束求解过程.

3 数值实验例

文献 [7] 提供了采用不同的方法来设计 PID 参数的实例. 控制对象为

$$G_0(s) = \frac{e^{0.5s}}{(s+1)^2}.$$

按 ZN 设计法得 $K_p = 2.813, T_i = 1.719, T_d = 1.151$. 经计算机系统仿真实验, 该设计

结果导致的系统性能指标为 $\sigma^* = 43\%$, $t_s^* = 3.9\text{ s}$.

为获得更优的性能指标, 我们取 $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.7$, 建立了系统的参数优化数学模型. 在奔腾 200 MXX 微型计算机完成所述遗传算法. 算法的参数设置为 $P_c^{(0)} = 0.6$, $P_m^{(0)} = 0.1$, POP_SIZE = 20, MAXGEN = 400, 程序语言为 Matlab. 实验重复进行了 5 次, 都得到相似的结果.

将 GA 结果同文献 [7] 提到的常用方法, 诸如 ISTE 即 ISTE 最优方法, AP 即幅值相位整定方法等的设计结果与性能指标做了比较, 结果如表 1 所示. 将表 1 方法对应的系统单位阶跃响应做了比较, 如图 2 所示.

表 1 PID 设计法及其所对应的参数和指标

PID 设计法	K_p	T_i	T_d	$\sigma/(\%)$	T_s
GA	2.7727	0.8133	1.4904	5.8	2.5
ZN	2.813	1.719	1.151	43.0	3.9
ISTE	1.648	0.843	0.659	15.1	5.1
AP	2.387	0.875	0.948	15.2	3.5

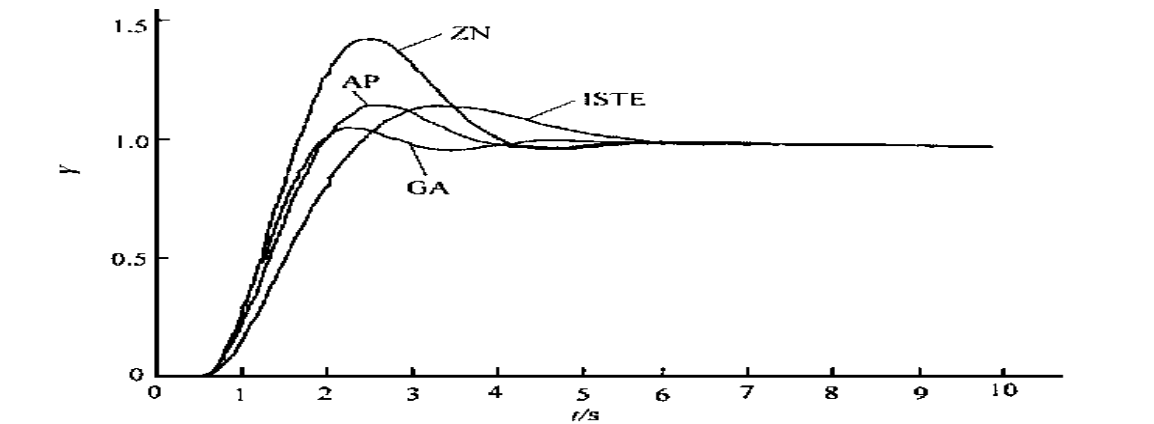


图 2 GA, ZN, ISTE 和 AP 法的单位阶跃响应

采用本文自适应遗传算法, 最优结果出现的平均世代数为 156, 出现时间 8.8 min. 采用文 [5] 的遗传算法 ($P_c = 0.3$, $P_m = 0.1$), 最优结果出现的平均世代数为 254, 出现时间为 14.5 min.

4 结论

将遗传算法设计的结果同 ZN 等常用设计法的结果作一比较. 可以看出遗传算法获得了更优解, 系统性能指标有了显著提高. 同文 [6] 提出的遗传算法相比, 新的自适应遗传算法大大提高了收敛速度, 从而提高了设计效率. 由于模糊目标函数综合了两项性能指标, 用户对这两项性能指标的偏爱可以通过一简单的加权值来表达, 十分符合工程实际的需要.

在遗传算法和控制系统性能求解方面, 本研究采用了更为专业的 Matlab 语言, 并实现了遗传算法同 Simulink 的软接口. 因而, 编程效率大为提高, 难度也大大下降, 使工程设计人员彻底摆脱了编写复杂的控制系统仿真程序的困扰. 这项技术为遗传算法在控制系统设计中的应用提供了广阔的前景, 将另文阐述.

本文研究虽然针对 PID 参数优化问题,但它充分说明了遗传算法设计的有效性.其基本思想与方法具有普遍性,可以在电气、电子等较复杂系统的参数优化问题中广泛应用.

参 考 文 献

- 1 Zuo W. A genetic approach to adaptive control system design[J]. Proc. Instn. Mech. Engrs. 1997, 211(1):15~23
- 2 Dakev N V, Whidborne J F. Evolutionary H_∞ design of an electromagnetic suspension control system for a maglev vehicle[J]. Proc. Instn. Mech. Engrs., 1997, 211(1):345~355
- 3 Trebi A, White B A. Multiobjective fuzzy genetic algorithm optimization approach to nonlinear control system design[J]. IEE Proc. Control Theory Appl., 1997, 144(2):137~142
- 4 Hyun J H, Lee C O. Optimization of feedback gains for a hydraulic servo system by genetic algorithms [J]. Proc. Instn. Mech. Engrs., 1998, 211(1):395~401
- 5 郑力新. 双闭环直流调速系统参数的进化计算[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 1998, 19(3):245~249
- 6 Mitsuo G, Cheng R W. Genetic algorithms & engineering design[M]. New York: John Wiley & Sons Inc., 1997. 60~63
- 7 薛定宇. 控制系统计算机辅助设计——MATLAB 语言及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997. 253~260

Optimization Design Based on Genetic Algorithm for Designing Parameters of PID controller

Zhou Kaitin^① Zheng Lixin^②

(^① Dept. of Electron. Eng., Huaqiao Univ.,

^② Dept. of Elec. Eng. & Auto., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

Abstract A new method of optimization design is presented for designing parameters of proportional-integral-differential controller. By taking fuzzy performance index as objective function and taking codomain of design parameters and limiting performance index as constraint conditions, an optimization mathematical model is formed. In the environment of Matlab, genetic algorithm is merged with simulation technique into an organic whole for solving this optimized model. The efficiency of programming is effectively promoted, and the performance index of the system is greatly improved by the optimized solution so obtained.

Keywords PID, optimization design of parameter, genetic algorithm