

文章编号 1000-5013(2005)01-0085-04

进化算法的 PID 参数最优设计

周凯汀 郑力新

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要 提出用进化算法最优设计 PID 参数的方法, 获得最优设计结果. 分析控制系统常用性能指标作为进化评价函数的不足, 构建控制系统新的评价函数. 为使优化模型简化, 设计参数采用实数编码及归一化处理, 进化算法使用新型的, 以基因为单位进化的遗传算法. 数值实验表明, 设计结果得到显著改善.

关键词 PID, 遗传算法, 性能指标, 优化设计

中图分类号 TP 273+.1 TP 18

文献标识码 A

PID 控制器原理简单, 形式固定, 鲁棒性好, 几十年来始终占据工业控制器的主流, 使用率达 80 % 以上. 因此, 研究 PID 参数的整定技术具有重要意义. ZN 法是整定 PID 控制器的经典方法, 它能够使系统形成闭环投入工作, 但存在超调量大的严重缺陷, 系统的工作状态尚待优化. 近年来, 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. GA 采用非数值计算方法和随机进化策略, 无需梯度信息, 能有效地攻克十分困难的优化问题. 它处理问题具有灵活性、适应性、鲁棒性和全局性, 不仅能提高设计品质, 而且降低了设计的难度. 本文提出了一种用遗传算法优化设计 PID 参数的方法. 与同类研究相比^[1,2], 具有如下 3 个特点. (1) 为了得到最优的设计结果, 分析了控制系统常用性能指标的缺陷, 并构建了一个更有效的新指标. (2) 采用实数编码, 并利用 ZN 法的合理内核对寻优参数进行了归一化处理, 使优化模型得以简化, 从而增强程序的鲁棒性. (3) 使用新型的以基因为单位进化的遗传算法, 提高了设计效率.

1 控制系统的性能指标

在控制系统的进化设计中, 性能指标作为遗传算法的评价函数指导着种群的进化, 它的真实、准确、灵敏程度对最终解的影响不容忽视. 从已有研究报道可以看出, 性能指标局限于常用的 IAE, ISE, ITAE 种 ISTE 等上, 所得到的解有一定的改善, 但还不能说很理想. IAE, ISE, ITAE 和 ISTE 等常用指标的优点是, 仅含有误差与时间两个变量, 容易从系统输出响应中直接获得; 而缺点是指标算式中的误差始终以绝对值形式出现, 无法区分正负误差. 此外, 没有直接反映出超调量和过渡时间这两项衡量控制系统优劣的重要内容.

基于上述分析, 本文提出了一个衡量控制系统性能的新指标, 即

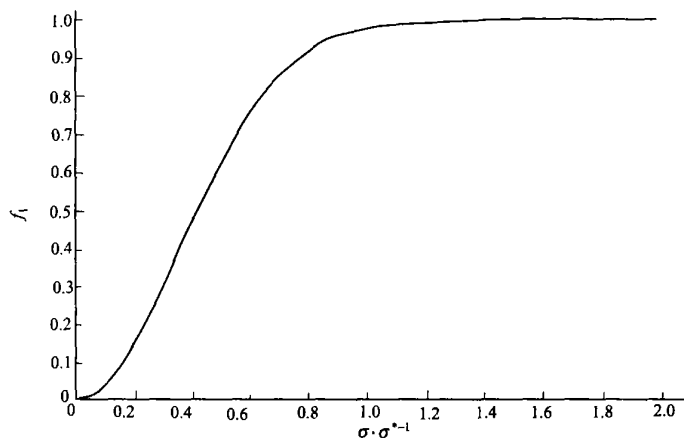
$$F = f_1 + (1 - \alpha)f_2,$$

其中 $f_1 = 1.0 - \exp[-(2/\alpha)^2]$, $f_2 = 1.0 - \exp[-(2t_s/t_s^*)^2]$, α 为加权系数, t_s 为系统的超调量与过渡时间, α^* , t_s^* 为与 ZN 法参数所对应的超调量与过渡时间. 以 f_1 函数为例, 当 α 为零, 即系统的超调量为零时, f_1 的值为零, 取最小值; 随着比值 α/α^* 的增大, 函数 f_1 陡然增大, 即系统超调量的微小变化将引起 f_1 的急剧变化, 使得该 f_1 指标对系统超调量的变化十分敏感. f_1 随 α/α^* 的变化关系, 如图 1 所示. f_2 与 t_s/t_s^* 具有完全类似的关系.

收稿日期 2004-02-18

作者简介 周凯汀(1968-), 女, 副教授, 主要从事智能仪器与控制的研究. E-mail: zlxkt1@people.com.cn

基金项目 华侨大学科研基金资助项目(02HJR05)

图1 f_1 与 σ/σ^* 比值的关系

新指标 F 将 f_1 与 f_2 用加权系数综合在一起,可以根据对超调量或者过渡时间的偏好设置加权系数,使用起来十分灵活.

2 优化模型的建立

典型的 PID 控制框图如图 2 所示. 其中, $G_0(s)$ 是控制对象. PID 控制器的传递函数为 $k_p + k_i \cdot \frac{1}{s} + k_d \cdot s$, 其中 k_p, k_i, k_d 分别为比例环节、积分环节、微分环节的增益系数,是待设计的参数. 由于遗传算法的需要,设计参数须有一个明确的取值范围. 为此,以 ZN 法的设计结果 k_p^*, k_i^*, k_d^* 作为合理内核,建立以下映射关系, $k_p = (k_{pmax} - k_{pmin}) \cdot k_{pc} + k_{pmin}$, $k_i = (k_{imax} - k_{imin}) \cdot k_{ic} + k_{imin}$, $k_d = (k_{dmax} - k_{dmin}) \cdot k_{dc} +$

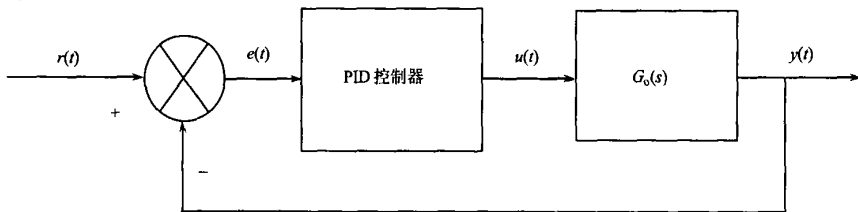


图2 典型 PID 反馈控制系统

$k_{dmin}, k_{pc} = [0, 1], k_{ic} = [0, 1], k_{dc} = [0, 1]$ 为新的设计参数. 文中,取 $k_{pmax} = 1.6 \cdot k_p^*, k_{pmin} = 0.3 \cdot k_p^*$, 另两个参数 k_i, k_d 的上下限则设定为与此相似. 即 $k_{imax} = 1.6 \cdot k_i^*, k_{imin} = 0.3 \cdot k_i^*, k_{dmax} = 1.6 \cdot k_d^*, k_{dmin} = 0.3 \cdot k_d^*$. 在保证系统稳定的前提下,规定不同的上、下限系数可重新设定搜索空间,但 k_{pc}, k_{ic}, k_{dc} 的取值区间则始终不变,恒为 $[0, 1]$. 如此处理简化了寻优参数搜索空间的规定,程序也更为简单可靠. 综上所述,系统优化模型可归纳为 $\min J (J = \text{ISE}, \text{IAE}, \text{ITAE}, \text{ISTE}, F)$; 基于 0 k_{pc} 1, 0 k_{ic} 1, 0 k_{dc} 1.

3 遗传算法

遗传算法有两个重要控制参数——交叉率 P_c 和变异率 P_m 对算法的效率有较大影响,本文研究使用了一种新型自适应遗传算法. 该算法摒弃了以往自适应遗传算法^[3~6)]以染色体为单位进化的观念而改为以基因为单位进化,使遗传算法的效率得到进一步提高. 下述 P_c 和 P_m 的计算方法.

令种群的染色体个数为 M , 每个染色体所含的基因种数为 N , 则种群全体可以用一矩阵表示为

$$X(M, N) = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1N} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{M1} & x_{M2} & \dots & x_{MN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_M \end{bmatrix}.$$

由欧式距离衡量第 n 种基因之间的差异,即

$$d_n = \frac{2 \sum_{i=1}^{M,M} (x_{in} - x_{jn})^2}{M(M-1)(x_{nmax} - x_{nmin})^2}, \tag{1}$$

而该基因对应的交叉率和变异率分别为

$$P_c(n) = \min\{c_d n, 0.625\}, \quad P_m(n) = m(1 - P_c(n)), \tag{2}$$

其中 x_{nmax}, x_{nmin} 为第 n 种基因的最大值与最小值, c, m 为设定常数. 式(2)合理地兼顾了基因间差异对和的调整作用,以及 P_c 和 P_m 的经验取值范围. 例如,当 c 取 5, m 取 0.5 时,便将 P_c 和 P_m 限制于区间 $[0, 0.625]$ 和 $[0.1875, 0.5]$ 内. 本文的优化设计有 5 个步骤过程. (1) 全局变量设定. 给出种群数 M , 系数 c, m , 最大世代数 MAXGEN 的大小. (2) 种群的产生及初始化. 设世代计数器 $gen = 1$. 以归一化所得的参数 k_{pc}, k_{ic}, k_{dc} 为基因组成染色体 X , 即

$$X = [k_{pc}, k_{ic}, k_{dc}].$$

种群由 M 个染色体构成,为 $X(M, 3)$ 矩阵. 初始染色体中的基因在 $[0, 1]$ 范围内随机产生. (3) 基因交叉率与变异率计算. 在 $X(M, 3)$ 矩阵中逐列选中基因,按式(1)计算对应平均欧氏距离,再按式(2)求出对应的交叉率和变异率. (4) 进化操作. 先复制种群. 在复制的种群中,按各列基因对应的交叉率和变异率逐列进行基因的交叉(采用算术交叉)^[7]和变异(在 $[0, 1]$ 区间随机地产生一个数来取代原有值),形成 M 个子代染色体. 然后,进行同一世代染色体的评价与选择. 将染色体逆映射于 PID 参数空间获得对应的 PID 参数,然后将 PID 参数代入仿真程序计算阶跃响应及评价函数 J . 选出其中 J 值最小的 M 个染色体构成新种群,并显示本世代的最佳染色体的评价. (5) 过程结束判定. 如果 $gen < MAXGEN$,回到步骤(3)重复进行;如果 $gen = MAXGEN$,则存贮最佳染色体. 绘制最佳染色体的输出响应曲线,结束求解过程.

4 数值实验例

文献 [8] 提供了采用不同方法来设计 PID 参数的实例. 其控制对象的模型为

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

按 ZN 法得 $k_p^* = 2.813, k_i^* = 1.719, k_d^* = 1.151$. 其对应系统性能指标为 $\sigma^* = 43\%, t_s^* = 5.1\text{ s}$. 分别以 ISE, IAE, ITAE, ISTE, F 为评价函数,取 $M = 20, MAXGEN = 40, c = 5, m = 0.5$, 采用 Matlab 语言在计算机上完成本方法设计, 所得结果如表 1 所示. 其中 G_M, P_M 为系统的幅值裕度与相位裕度. 暂且抛开超调量和过渡时间相互关联的事实, 表 1 的设计结果显示, 由其他指标所得的最佳超调量为

表 1 采用不同性能指标的进化结果及相应系统参数 (误差带取 2 %)

评价函数	k_p	k_i	k_d	$\sigma / (\%)$	t_s / s	G_M	$P_M / (^\circ)$
F	2.0028	0.9819	1.1493	0.35	1.76	2.9334	65.9940
ITAE	2.2566	1.0990	1.2432	6.73	3.34	2.6596	61.1835
ISTE	2.3132	1.1555	1.4566	6.88	3.31	2.4063	63.9358
IAE	2.3355	1.1278	1.4590	6.98	3.42	2.3917	63.8666
ISE	2.4091	1.3365	1.8416	12.25	5.87	2.0300	65.9762

6.73 % (ITAE 指标)、最短过渡时间为 3.31 s (ISTE 指标), 而 F 指标的超调量 $\sigma = 0.35\%$ 仅为上述最佳值的 5.2 %, 过渡时间 $t_s = 1.76\text{ s}$ 仅为上述最短过渡时间的 53.2 %, 频域指标 G_M, P_M 也是最好的. 由此可见, F 指标带来了显著改善的设计结果. 各指标 J 值的归一化平均变化范围, 如图 3 所示. 由图看出, F 指标的评价值 (K) 变化范围最大, 说明它能灵敏地反映出系统性能的微小改变. 由此看来, F 指标能够灵敏地反映出系统的性能, 而且能准确地指导着遗传算法的进化方向, 与 ISE, IAE, ITAE 和 ISTE 等常用指标相比, 具有更好品质. 图 4 为各指标设计结果对应的系统单位阶跃响应曲线, 其纵轴为归一化输出值 Y (即输出与输入之比), 其量纲根据实际对象确定. 采用本文的遗传算法, 最优结果出现的平均世代数为 14.5, 采用文献 [9] 的简单遗传算法和文献 [3] 的以染色体为单位进化的自适应遗传算法, 最优结果出现的平均世代数分别为 28.7 和 20.1, 显然, 本文的遗传算法具有显著提高效率.

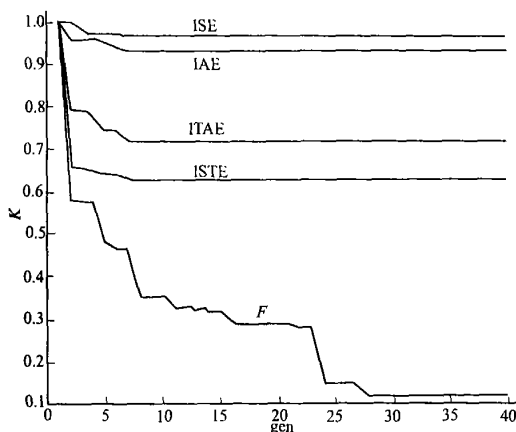


图3 不同指标对应的进化过程

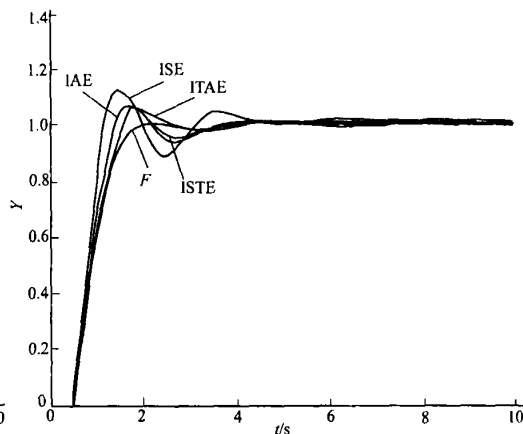


图4 不同指标对应的阶跃响应

5 结束语

用遗传算法优化设计 PID 参数是为了获得一个最优控制,除了前文所述的几个特色之外,本文的突出优势在于获得了显著改善的设计结果,更好地实现了设计的初衷.这一改善是由新建立的控制系统评价函数带来的.本文中, F 是以 ZN 法对应的超调量与过渡时间为参照,实际上,作为参照的超调量与过渡时间也可以做其它合理的选择,限于篇幅,这里不再赘述.总之,本文的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得到广泛的应用.

参 考 文 献

- Porter B, Jones A H. Genetic tuning of digital PID controllers[J]. Electron. Lett., 1992, 28:843 ~ 844
- Wang P, Kwok D B. Optimal design of PID process controllers based on genetic algorithms[J]. Control Engng. Practice, 1994, 2(4): 641 ~ 648
- 吴 斌, 吴 坚. 快速遗传算法研究[J]. 电子科技大学学报, 1999, 28(1): 49 ~ 53
- Fushuan Wen. New approach to alarm processing in power systems based on the set covering theory and a refined genetic algorithm [J]. Electric Machine and Power Systems, 1998, 25(1): 50 ~ 67
- 林家骏, 王赞基. 自适应杂交 NGA 及其在多值电路分析中的应用[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 1997, 23(4): 446 ~ 451
- 潘立登, 黄晓峰. 基于相似度的可变编码长度遗传算法[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 1997, 24(3): 55 ~ 58
- Gen Mitsuo, Cheng Runwei. Genetic algorithms & engineering design[M]. New York: John Wiley & Sons Inc., 1997. 60 ~ 63
- 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
- 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

Optimal Design of PID Parameters by Evolution Algorithm

Zhou kaiting Zheng Lixin

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, 362021, Quanzhou, China)

Abstract For optimally designing parameters of PID, the authors suggest to use the method of evolution algorithm. The shortage of using performance indices as evaluation function of control system is analysed; and a new type evaluation function is established for the control system so as to get results of optimal design. The design parameters are encoded in real number and are further normalized so as to simplify the optimization model. A new type genetic algorithm with gene as evolutionary unit is used to replace the conventional one. Numerical experiment shows that the results of design are improved significantly.

Keywords PID, genetic algorithm, performance index, optimizing design