

文章编号 1000-5013(2000)01-0016-05

基于遗传算法的双闭环系统模糊优化设计

郑力新^① 周凯汀^②

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

摘要 提出一种基于遗传算法的直流双闭环调速系统参数优化设计方法。根据工程技术的要求, 选用速度超调量和过渡时间作为参数优化性能指标。将该指标用模糊隶属度函数归一化, 再加权平均形成系统优化模型的目标函数。采用计算机数值计算方法, 通过仿真获得系统对应参数的动态响应曲线及其性能指标。最后以工程设计的参数为搜索范围, 以速度调节器和电流调节器的参数为染色体中的基因, 通过遗传算法在搜索范围中优化这些基因, 获得优化解。实验结果表明, 所设计的参数能使系统性能指标有显著提高。

关键词 遗传算法, 双闭环系统, 模糊优化设计

中图分类号 TP 273. 4

文献标识码 A

近年来, 做为求解优化问题的有效手段, 模拟生物进化过程的遗传算法被引入控制系统的设计中^[1~5]。它采用纯数值计算方法和随机进化策略, 无需梯度信息, 能有效解决十分困难的优化问题。双闭环调速系统是直流调速系统应用最广泛的一种^[6], 其基本结构的改进和扩展导致了其它多种类别的调速系统。因此, 对其设计方法的研究具有实际意义, 传统的设计方法有工程设计法^[7]等。文献[8]提出用遗传算法计算双闭环系统参数的新方法, 取得了较好的结果。但是, 该研究局限于小信号系统模型, 而在实际应用中出现更多的大信号系统模型却未被采用。同时, 它也未考虑启动过程的饱和和非线性特性, 设计目标函数又过于单一化, 缺乏用户人机交流和选择功能。本文在文献[8]基础上, 采用新的数学模型和自适应快速遗传算法, 通过加权模糊目标函数提供了可供用户多种选择的方案。这样, 使设计更加实用化和规范化, 有效地克服了原方法的不足。

1 优化模型的建立

在实际应用中, 双闭环系统为了克服干扰和提高稳定性, 在给定和反馈环节中增加了梯形滤波器。另外, 速度调节器 ASR 具有饱和和非线性特性。因此, 在启动过程中具有准最优时间控制特性。其结构已基本定型^[7], 如图 1 所示。图中 ASR 和 ACR 的输出限幅于 U_{sm} ; 而 K_n , T_n , K_i 和 T_i 为设计参数, 其余均为已知参数。

为了用状态方程式描述双闭环系统, 以环节为单位设定 $Y_1 \sim Y_9$ 等 9 个状态变量和 $U_1 \sim$

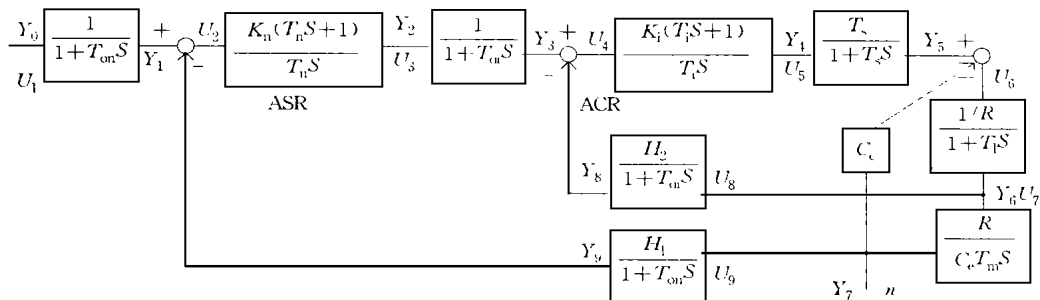


图1 实用双闭环直流调速系统结构

U_9 等 9 个中间变量。从而, 获得每个环节输入输出方程式为

$$(A + BS)Y = (C + DS)U,$$

其中 $Y = [Y_1 \ Y_2 \ \dots \ Y_9]$, $U = [U_1 \ U_2 \ \dots \ U_9]$, A, B, C 和 D 为对角矩阵。对角矩阵的对角元素为 $A_- = [1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1]$, $B_- = [T_{on} \ T_n/K_n \ T_{oi} \ T_i/K_i \ T_s \ T_1 \ 1 \ T_{oi} \ T_{on}]$, $C_- = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ K_s \ 1/R \ R/C_e T_m \ H_2 \ H_1]$, $D_- = [0 \ T_n \ 0 \ T_i \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ 。反映 Y 与 U 的连接关系矩阵式为

$$U = W_1 Y + W_0 Y_0,$$

其中

$$W_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, W_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -C_e & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

在时域范围内, 经矩阵的等效变换后得

$$\dot{Y} = MY + NY_0,$$

其中 $M = (B - DW_1)^{-1}(CW_1 - A)$, $N = (B - DW_1)^{-1}CW_0$ 。状态变量 Y_7 是系统的速度输出。因此, 可以获得系统的时域性能指标超调量(σ)为

$$\sigma = \frac{Y_{7\max} - Y_7}{Y_7} \times 100\%,$$

其中 $Y_{7\max}$ 为 Y_7 时间响应的最大值, Y_7 为 Y_7 时间响应曲线的稳态值。过渡时间 t_s 为 Y_7 响应曲线进入稳态误差带 5% 的时间。

从数学的角度来讲, 一旦系统中的结构和已知参数确定后, σ 与 t_s 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。故程序采用了纯数值算法——四阶龙格库塔法, 并加入对 ASR 和 ACR 输出限幅的处理语句, 先求出 Y_7 阶跃响应曲线, 即可算得 t_s 及 σ 。

系统设计的任务是总体调配综合性能指标, 使其达到用户满意的最优结果。因此, 设计问题属于多重目标优化问题。以工程设计法达到的指标 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 $f_1 = 1.0 - \exp[-(2\sigma/\sigma^*)^2]$, $f_2 = 1.0 - \exp[-(2t/t_s^*)^2]$, β 为加权系统(设计者自定).

由于遗传算法的需要,设计参数要有一个明确的取值范围.因此,以工程设计法获得的结果 $(K_n^*, T_n^*, K_i^*, T_i^*)$ 为中心,向左右两边拓展了参数的求解空间.这样做的目的,是充分利用工程设计法的合理内核,减少遗传算法搜索时间.综上所述,将系统优化模型归纳为如下方程式.即由 $\min F$ 并基于约束条件 $Y = MY + NY_0, Y_2 \leq U_{sm}, Y_4 \leq U_{sm}, (1 - \alpha)K_n^* \leq K_n \leq (2 + \alpha)K_n^*, (1 - \alpha)T_n^* \leq T_n \leq (2 + \alpha)T_n^*, (1 - \alpha)K_i^* \leq K_i \leq (2 + \alpha)K_i^*, (1 - \alpha)T_i^* \leq T_i \leq (2 + \alpha)T_i^*$, 其中 α 为 $[0, 1]$ 内选定数值.

2 遗传算法

遗传算法是一个强有力的求优算法,它首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,获得最优解.遗传算法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.文献[8]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 ,即

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

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

其中 gen 表示世代数, $\max\text{gen}$ 表示最大世代数.有5个具体步骤.(1)全局变量设定.给出 POP_SIZE (人口数), P_c , P_m 和 $\max\text{gen}$ 的大小或范围.(2)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 $X = [K_n, T_n, K_i, T_i]$.设世代数计数器 $\text{gen} = 1$,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.(3)适应性评价函数的计算.为了评判染色体的优劣,需引入适应性评价函数 $\text{Eval}(X_k)$,即

$$\text{Eval}(X_k) = \begin{cases} F; & \text{当 } X_k \text{ 满足约束条件,} \\ M; & \text{当 } X_k \text{ 不满足约束条件}(M \text{ 为一大正数}). \end{cases}$$

对于本问题,评价函数值越小,染色体的质量越好.(4)进化操作.(a)交叉.设交叉计数器 $\text{ccnt} = 0$,从 $[0, 1]$ 范围内产生随机数 $r_k (k = 1, 2, \dots, 4 \times \text{POP_SIZE} + 4 \times \text{ccnt})$.如果 $r_k < P_c$,则选择 X_k 为交叉用.这样,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^[9],即

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

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 $[0, 1]$ 范围的一个随机数.(b)变异.设定变异计数器 $\text{mcnt} = 0$,从 $[0, 1]$ 范围内产生随机数 $r_k (k = 1, 2, \dots, 4 \times \text{POP_SIZE} + 4 \times \text{ccnt})$.如果 $r_k < P_m$,则第 k 个基因进行变异操作(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.保

留上述过程中最佳染色体 V^* , 以及其评价函数值 \max_{eval} . 这个过程称为“适者生存”选择.

(5) 过程结束判定. 如果 $gen < \max_{gen}$, 则回到步骤(3)重复进行; 而如果 $gen = \max_{gen}$, 则输出 V^* 及 \max_{eval} , 结束求解过程.

3 数值实验例

文献 [7] 提供了一个用工程设计方法对双闭环系统设计的实例(图 1), 其结构参数如表 1 所示.

表 1 数值实验例结构中已知参数

T_{on}	T_{oi}	T_s	T_1	T_m	K_s	R	C_e	H_1	H_2	U_{sm}
0.01	0.002	0.001 7	0.03	0.18	40.0	0.5	0.132	0.007	0.05	10.0

按工程设计法, 可得 $K_n^* = 6.06$, $T_n^* = 0.174$, $K_i^* = 1.013$, $T_i^* = 0.03$. 经计算机系统仿真实验, 可得出该设计结果导致的系统性能指标 σ^* 为 22.04%, t_s^* 为 0.393 s.

为获得更优的性能指标, 取 $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.3$ 和 0.7 来建立系统参数优化数学模型. 算法的参数设置为 $P_c^{(0)} = 0.6$, $P_m^{(0)} = 0.1$, POP_SIZE = 40, $\max_{gen} = 600$, 程序语言为 Turbo_C. 实验重复进行了 5 次, 取得相同结果(表

表 2 遗传算法设计的参数与指标

	β	K_n	T_n	K_i	T_i	$\sigma/\%$	t_s
2). 采用本文的自适应遗传算法, 最优结果出现的平均世代数为 179, 出现时间 3.8 min.	0.7	9.0	0.18	0.25	0.017	14.85	0.390
采用文献 [8] 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 398, 出现时间 8.0 min.	0.3	10.2	0.10	0.24	0.021	20.60	0.245

4 结论

比较遗传算法设计的结果和工程设计法的结果, 可以看出遗传算法获得了更优解, 系统性能指标有显著提高. 同文献 [8] 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. 本文的模型采用工程实用系统的模型, 对系统的饱和和非线性给予了充分的考虑, 因而更具有实用性. 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简单的加权值来表达, 设计变得更加简洁.

本文研究虽然针对双闭调速系统的参数优化问题, 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得到广泛的应用.

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 O, 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].

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Proc. Instn. Mech. Engrs., 1998, 212(1) : 395 ~ 401

- 5 Warwick K, Kang Y H. Self-tuning proportional, integral and derivative controller based on genetic algorithm least squares[J]. Proc. Instn. Mech. Engrs., 1998, 212(1): 473 ~ 448
- 6 郭伯农, 陆德浩, 葛渝生等. 自动控制系统[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1986. 1 ~ 2
- 7 孔凡才. 自动控制原理与系统[M]. 第2版. 北京: 机械工业出版社, 1995. 136 ~ 137
- 8 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(1) : 245 ~ 249
- 9 Gen Mitsuo, Cheng Runwei. Genetic algorithms & engineering design[M]. New York: John Wiley & Sons Inc., 1997. 60 ~ 63

Fuzzy Optimization Design of Double Loop System Based on Genetic Algorithm

Zheng Lixin^① Zhou Kaiting^②

(① Dept. of Elec. Eng. & Auto., ② Dept. of Electron. Eng., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

Abstract A method of fuzzy optimization design based on genetic algorithm is presented as a new method of parameter optimization design for DC double closed loop speed adjusting system. The method covers three steps. Firstly, speed overshoot rate and settling time are chosen as performance indice according to the demand of engineering. These indice are normalized by using fuzzy membership function and then weighted to form objective function of optimization model of the system. Secondly, the dynamic response curve of the system with corresponding parameters and peformance indice are obtained by computerized numerical calculation and simulation. Finally, parameters of engineering design are expanded as searching space; and parameters of speed regulator and current regulator are taken as genes in chromosome. These genes in searching space are optimized to get best solution by way of genetic algorithm. As shown by experimental results, the parameters designed by this method are capable of significantly improving performance indice of the system, which proves that it is a practical and effective method.

Key words genetic algorithm, double closed loop system, fuzzy optimization design