

# 双闭环直流调速系统参数的进化计算\*

郑 力 新

( 华侨大学电气技术系, 泉州 362011 )

摘要 用现代控制理论方法建立双闭环直流调速系统的状态方程式, 并以时域性能指标为目标函数, 建立了系统参数优化的数学模型. 在工程设计方法的基础上引入了遗传算法, 对设计参数进行了优化, 优化后的设计参数显著地提高了系统性能指标.

关键词 遗传算法, 工程设计, 双闭环系统, 优化设计

分类号 TM 331. 302

双闭环调速系统广泛地应用于直流调速系统中<sup>[1]</sup>, 对其设计方法的研究具有实际意义. 双闭环系统经多年的研究和实践, 结构已基本定型, 电流与速度调节器都采用 PI 调节器, 设计工作主要是合理选择两个调节器的参数<sup>[2, 3]</sup>. 通行的设计方法, 是基于古典控制论的工程设计与经验公式. 这种方法对系统结构进行了局部分割和简化, 其优点是设计简单快捷, 但所求得的设计参数不是系统的最优参数. 近年来, 遗传算法作为求解优化问题的有效手段正倍受关注<sup>[4]</sup>, 其处理问题具有较强的灵活性、适应性、鲁棒性和全局性, 对模型简化要求低. 本文将遗传算法<sup>[5]</sup>引入了双闭环系统参数设计中, 并用现代控制理论的状态方程式建立双闭环系统的数学模型. 以性能指标为目标函数, 建立系统参数优化问题的数学模型, 在工程设计法所获得的参数值基础上, 拓展求解空间并采用遗传算法在该空间搜索优化解. 数字仿真结果表明, 优化后的设计参数进一步提高了系统的性能指标.

## 1 优化模型的建立

双闭环的结构已基本定型, 如图 1 所示<sup>[6]</sup>.

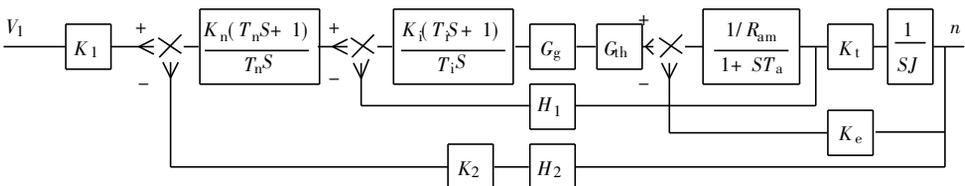


图1 双闭环直流调速系统基本结构

图中  $K_1, K_2$  为给定和反馈幅度调整系数;  $H_1, H_2$  分别为速度和电流反馈系数;  $G_g, G_{th}$  分别为可控硅相位和电压放大倍数;  $R_{am}$  为电机电枢电阻;  $K_t$  为电机的转矩常量;  $K_e$  为电机电势常量;  $J$  为电机速度惯量;  $T_a$  为电机电磁时间常数;  $K_n, T_n$  分别为速度调节器放大倍数及时间常

数;  $K_i, T_i$  分别为电流调节器放大倍数及时间常数;  $K_n, T_n, K_i$  和  $T_i$  皆为设计参数.

为了用状态方程式描述双闭环系统, 对系统框图进行变换, 并设定了 4 个状态变量  $X_1, X_2, X_3$  和  $X_4$ , 如图 2 所示. 状态变量  $X_4$  是系统的速度输出, 于是, 可获得两个系统的时域性能指标, 即超调量  $\sigma\% = \frac{X_{4max} - X_4}{C_4} \times 100\%$ , 过渡时间  $t_s$  为  $X_4$  响应曲线进入稳态误差带 0.5% 的时间. 其中  $X_{4max}$  和  $X_4$  分别为  $X_4$  时间响应的最大值和稳态值.

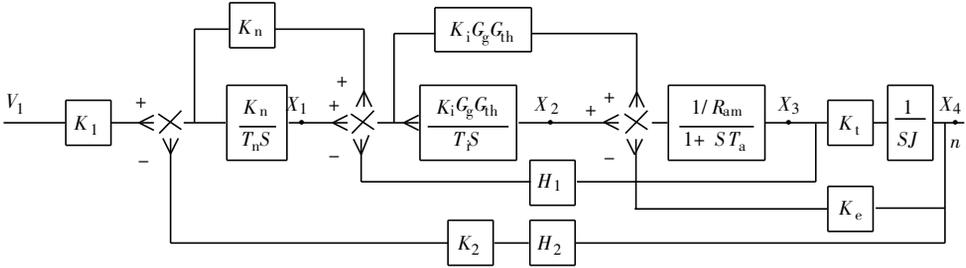


图2 双闭环直流调速系统框图等效变换

从数学的角度来讲, 一旦系统中的结构及其它参数确定后,  $\sigma\%$  及  $t_s$  是设计参数的非线性函数, 即

$$\sigma\% = \sigma\%(K_n, T_n, K_i, T_i), \quad t_s = t_s(K_n, T_n, K_i, T_i),$$

但该表达式难以求出. 因此, 计算  $\sigma\%$  与  $t_s$  时, 采用状态方程式的计算机数值算法——四阶龙格库塔法, 避开求解函数式的困难.

设计时, 往往由用户提出极限值  $\sigma\%^*, t_s^*$ . 设计的任务是计算出合适的  $K_n, T_n, K_i$  和  $T_i$ , 使系统性能尽可能小于  $\sigma\%^*$  及  $t_s^*$ . 由于遗传算法的需要, 设计参数要有一个明确的取值范围. 本文设计参数的取值范围, 是以工程设计法获得的结果  $K_n, T_n, K_i$  和  $T_i$  为中心, 向左右两边拓展了的求解空间. 这样, 可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, 我们将系统优化模型归纳为 “min  $\sigma\%$  (目标函数 1); 或 min  $t_s$  (目标函数 2)”, 这是基于

$$\begin{aligned}
 & t_s \quad t_s^*; \text{ (或 } \sigma\% \quad \sigma\%^* \text{),} \\
 & (1 - \alpha)K_n^* \quad K_n \quad (2 + \alpha)K_n^*, (1 - \alpha)K_i^* \quad K_i \quad (2 + \alpha)K_i^*, \\
 & (1 - \alpha)T_n^* \quad T_n \quad (2 + \alpha)T_n^*, (1 - \alpha)T_i^* \quad T_i \quad (2 + \alpha)T_i^*, \\
 & \dot{X}_1 = - \frac{K_2 H_2 K_n}{T_n} X_4 + \frac{K_1 K_n}{T_n} V_i, \\
 & \dot{X}_2 = \frac{K_i G_g G_{th}}{T_i} X_1 - \frac{K_i H_1 G_g G_{th}}{T_i} X_3 - \frac{K_i K_2 K_n H_2 G_g G_{th}}{T_i} X_4 + \frac{K_n K_1 K_i G_g G_{th}}{T_i} V_i, \\
 & \dot{X}_3 = \frac{K_i G_g G_{th}}{T_a R_{am}} X_1 + \frac{1}{T_a R_{am}} X_2 - \frac{K_i G_g G_{th} H_1 + R_{am}}{T_a R_{am}} X_3 \\
 & \quad - \frac{(K_e + K_i K_2 H_2 G_g G_{th} K_n)}{T_a R_{am}} X_4 + \frac{K_n K_1 K_i G_g G_{th}}{T_a R_{am}} V_i, \\
 & \dot{X}_4 = \frac{K_1}{J} X_3,
 \end{aligned}$$

## 2 遗传算法

遗传算法是个强有力的求优算法, 它随机地产生一组潜在的解(向量), 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、变异淘汰等)不断提高解的品质, 最后获得最优解。对本文研究的双闭环系统参数优化问题, 我们设计的遗传算法如下。

### 2.1 染色体的产生及初始化

把调节器参数组成向量  $X$ , 即  $X = [K_n, T_n, K_i, T_i]$ , 以  $X$  为染色体。第一代人口由 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, 但必须满足其他所有约束条件。

### 2.2 适应性评价函数的确立

为了评判染色体的优劣, 我们引入了适应性评价函数  $Eval(X_k)$ , 即

$$Eval(X_k) = \begin{cases} \text{当 } X_k \text{ 满足约束条件时, 为} & \begin{cases} \sigma\% (\text{采用第一目标函数}), \\ t_s (\text{采用第二目标函数}), \end{cases} \\ \text{当 } X_k \text{ 不满足约束条件时, 为 } M (\text{大的正数}), \end{cases}$$

其中  $\sigma\%$  或  $t_s$  的求解方法是, 将染色体  $X_k$  中的各基因值代入状态方程式, 采用四阶龙格库塔法解出状态变量  $X_4$  的时间响应过程, 并求出系统的性能指标  $\sigma\%$  和  $t_s$ 。

对本问题, 评价函数值越小, 染色体的质量越好。

### 2.3 基因操作

通常基因操作有交叉、变异和选择 3 种。

(1) 基因交叉。采用算术交叉<sup>[1]</sup>, 即

$$\begin{aligned} X_j &= cX_j^{\text{gen}} + (1-c)X_l^{\text{gen}}, \\ X_l &= cX_l^{\text{gen}} + (1-c)X_j^{\text{gen}}, \end{aligned}$$

其中 gen 第几代人口;  $l, j$  表示同代人口中的第几个染色体 ( $1 \leq l, j \leq \text{pop-size}$ );  $c$  为  $[0, 1]$  范围的一个随机数。

(2) 基因变异。随机地选择某染色体的某基因  $X_{kj}$ , 然后在其规定的取值范围内随机地产生一个数来取代原有值。

(3) 染色体选择。原有的染色体集(人口)称为父代, 经交叉变异后的染色体称为子代。将它们都代入评价函数进行适应性的计算, 并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, 这个过程称为“适者生存”选择。

### 2.4 算法

(1) 全局参数的设定。设定人口参数 pop-size, 交叉率  $P_c$ , 变异率  $P_m$  和最大世代数 max-gen, 世代数初始值 gen=1。

(2) 初期人口的产生, 方法同 2.1 节。

(3) 基因操作: (a) 交叉。设交叉计数器 ccnt=0, 从  $[0, 1]$  范围内产生随机数  $r_k$  ( $k=1, 2, \dots, \text{pop-size}$ )。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在 cent 中; (b) 变异。设变异计数器 mcnt=0, 从  $[0, 1]$  范围内产生随机数  $r_k$  ( $k=1, 2, \dots, 4 \times \text{pop-size} + 4 \times \text{cent}$ )。如果  $r_k < P_m$ , 则第  $k$  个基因进行变异操作, 并使 mcnt=

ment+ 1; (c) 适者选择. 计算子代染色体  $X_k$  的评价函数  $\text{Eval}(X_k)$  ( $k = 1, 2, \dots, \text{ccnt} + \text{mcnt}$ ). 与父代染色体一同进行“适者生存”选择, 形成下一代父代染色体(人口), 并保留上述过程中最佳染色体  $V^*$  及其评价函数值  $\max \text{Eval}$ .

(4) 过程结束判定. 如果  $\text{gen} < \max \text{gen}$ , 则回到(3) 重复进行; 如果  $\text{gen} = \max \text{gen}$ , 则输出  $V^*$  及  $\max \text{Eval}$ , 结束求解过程.

### 3 数值实验例

文[7]提供了一个用工程设计法对双闭环系统设计的实例, 其结构如图1所示. 结构已知参数如表1所示.

表1 数值实验例结构中已知参数

$T_n$	$K_1$	$K_2$	$H_1$	$H_2$	$G_g$	$G_{ih}$	$R_{am}$	$K_i$	$K_e$	$J$
0.036 4	1/3	1/3	0.018 2	0.010 5	18	10.35	0.055	0.42	0.442	1/3

由工程设计法得  $K_n^* = 140$ ,  $T_n^* = 0.143$ ,  $K_i^* = 0.11$ ,  $T_i^* = 0.06$ , 经计算机系统仿真实验, 得出系统性能指标  $\sigma\% = 13.60\%$ ,  $t_s = 0.535$  s.

为获得更优的性能指标, 取  $\alpha = 0.5$ , 建立系统参数优化数学模型为“ $\min \sigma\%$  (目标函数 1); 或  $\min t_s$  (目标函数 2)”, 这是基于

$$\begin{aligned}
 & t_s = 0.535; \text{ (或 } \sigma\% = 13.60\%), \\
 & 70 K_n = 350, 0.055 K_i = 0.275, \\
 & 0.071 5 T_n = 0.357 5, 0.03 T_i = 0.150, \\
 & \dot{X}_1 = \frac{0.003 5 K_n}{T_n} X_4 + \frac{K_n}{3 T_n} V_i, \\
 & \dot{X}_2 = \frac{186.3 K_i}{T_i} X_1 - \frac{3.4 K_i}{T_i} X_3 - \frac{0.652 K_i K_n}{T_i} X_4 + \frac{62.1 K_n K_i}{T_i} V_i, \\
 & \dot{X}_3 = 93 057 K_i X_1 + 500 X_2 - (1 700 K_i + 27.5) X_3 \\
 & \quad - (221 + 326 K_i K_n) X_4 + 31 019 K_n K_i V_i, \\
 & \dot{X}_4 = 1.26 X_3.
 \end{aligned}$$

在 NECEWS 4800/210 工作站完成所述遗传算法, 算法的参数为  $P_c = 0.6$ ,  $P_m = 0.4$ ,  $\text{pop-size} = 40$ ,  $\max \text{gen} = 500$ , 程序语言为 UNIX-C. 实验重复 5 次, 得到同样结果(表 2). 最优结果出现的平均世代数为 201, 平均时间 3 min.

表2 遗传算法设计中各参数的指标值

函数类别	$K_n$	$T_n$	$K_i$	$T_i$	$\sigma\%$	$t_s/s$
第一目标函数	209	0.157	0.164	0.030	8.65	0.533
第二目标函数	209	0.091	0.151	0.031	13.6	0.351

### 4 结论

将遗传算法设计的结果同工程设计法做一下比较, 可以看出在过渡时间  $t_s$  基本相同的情况下, 前者超调量性下降了 36%; 而在超调量一致的情况下, 过渡时间减少了 34%. 因此可以

得出结论,采用遗传算法的设计比工程设计法对系统性能指标的提高有显著效果,遗传算法获得了更优解。当然,遗传算法的实现有赖于高速计算机的帮助,在计算机技术高速发展的今天,这个条件将越来越容易得到满足。

本文研究虽然针对双闭环调速系统的参数优化问题,但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。

本文得到日本足利工业大学横田孝雄教授、玄光男教授的帮助,特此致谢。

### 参 考 文 献

- 1 郭伯农,陆德浩,葛渝生等. 自动控制系统. 上海:上海科学技术文献出版社,1986.90~91
- 2 王永初,王启志. 观测器与控制器的协调次优化设计方法. 华侨大学学报(自然科学版),1997,18(2):171~176
- 3 孔凡才. 自动控制原理与系统. 北京:机械工业出版社,1987.167~168
- 4 Thomas B, Ulrich H, Hans-Paul S, et al. Evolutionary computation: comments on the history and current state. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1997, 11(1): 3~17
- 5 郑力新. 采用遗传算法的模拟集成电路参数最优设计. 华侨大学学报(自然科学版), 1998, 19(2): 128~132
- 6 Mitsuo G, Cheng Runwei. Genetic algorithms & engineering design. New York: John Wiley & Sons Inc., 1997. 60~63
- 7 伊藤政八. 自动制御 Ⅰ. 东京:电气书院, 1973. 294~304

## Evolutionary Computation of the Parameters in DC

### Double Loop Speed Control System

Zheng Lixin

(Dept. of Elec. Tech., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

**Abstract** An state equation for a DC double loop speed control system is set up by applying modern control theory; and a mathematical model of parameter optimization for the system is set up with time-domain performance criteria as objective function. On the basis of engineering design method, the genetic algorithm is introduced for optimizing the parameters. The optimized design parameters greatly improve the performance criteria of the system.

**Keywords** genetic algorithm, engineering design, double loop system, optimization design