

基于遗传算法的汽轮机 DEH 控制系统的参数优化研究

戴义平¹, 刘 炯², 刘 朝

(1. 西安交通大学叶轮机械研究所, 陕西 西安 710049; 2. 东方汽轮机厂, 四川 德阳 618000)

摘 要: 在遗传算法基本原理的基础上将其应用于汽轮机数字电液控制系统 PID 调节器参数的优化整定, 对整定后系统的响应特性进行了对比分析, 结果表明, 改进遗传算法具有寻优速度快、能够获得全局最优的特点, 经过优化后控制系统具有良好的动态响应特性。遗传算法可以应用于汽轮机数字电液控制系统调节器参数的优化整定。

关 键 词: 遗传算法; 参数优化; 汽轮机; 数字电液控制系统

中图分类号: TK321 文献标识码: A

1 引 言

DEH 控制系统中 PID 调节器的参数是决定系统响应特性的重要因素, 只有在 PID 调节器参数得到良好整定的条件下, 控制系统才能获得满意的控制效果。实现 PID 控制器参数整定的方法很多基于被控对象特性的稳定方法中, 使用比较多的有基于 Z-N (Zigler-Nichols) 法则的稳定边界方法和继电整定法等^[1], 这些方法对于特性分明、结构简单的被控对象的控制器参数整定十分有效。在不是基于被控对象特性的整定方法中, 根据控制回路的特性指标或控制器自身的行为, 通过调整控制器的参数, 使某个目标函数在满足一定约束条件下达到最优来实现参数整定^[2]。近年来, 包括模糊控制、神经网络和遗传算法等新技术在控制器参数的优化整定中均得到了应用^[3~5], 其中遗传算法 (Genetic Algorithm, 简称 GA) 作为一种自适应全局优化概率搜索算法, 具有较强的寻优能力, 对于复杂的系统能够较好地实现参数优化。鉴于此, 本文将浮点编码的遗传算法 (Float-encoding Genetic Algorithm, 简称 FGA) 应用于汽轮机 DEH 控制系统 PID 控制器参数的优化, 取得了良好的效果。

2 遗传算法的基本运算

2.1 运算过程

遗传算法模拟了生物在自然界的遗传进化过程, 其运算过程如图 1 所示, 包括:

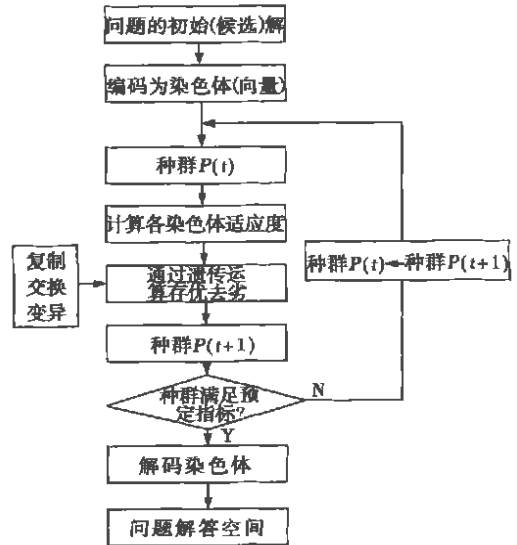


图 1 遗传算法的运算过程

(1) 编码: 随机产生若干个个体形成一个初始世代群体, 该群体代表优化问题的一些可能解的集合。GA 的任务是从这些群体出发, 模拟进化过程, 择优汰劣, 最后选择出优秀的群体和个体, 满足目标函数的优化要求。

(2) 评价: 将群体的每一个染色体的基因码所对应的自变量代入适应度函数求得每一个染色体的适应度值。适应度越大, 表示该染色体更适合于所定义的生存环境, 适应度为群体进化提供了依据。

(3) 遗传运算: 按照一定的策略进行选择、交叉和变异运算, 产生下一代群体。

收稿日期: 2002-05-14; 修订日期: 2002-10-15

作者简介: 戴义平(1961-), 男, 湖北天门人, 西安交通大学教授, 博士。

(4) 对产生的新一代群体返回第(2)步再进行评价, 然后进行遗传运算, 如此循环往复, 使群体中个体的适应度和平均适应度不断提高, 直至最优个体的适应度达到某一极限值或满足了设定的遗传终止条件, 则遗传过程结束。

2.2 编码

要实现遗传算法的寻优运算, 首先要解决染色体的编码问题, 编码方式与遗传进化质量和进化速度有直接的关系。简单遗传算法多采用二进制编码, 在遗传运算过程中需要进行十进制到二进制的转换, 结果输出时要解码, 进行二进制到十进制的转换。当需要优化的参数较多时, 二进制编码串将很长, 转换操作计算量较大。另外, 二进制编码优化求解的精度取决于最小分辨率的大小, 而最小分辨率取决于编码的长度。因此, 要提高精度就必须提高最小分辨率, 增加编码的长度, 这样就会使遗传算法的搜索空间急剧扩大, 增加了计算中内存的占用量, 同时运算量将呈几何级数增长, 这种“维数灾难”的情况在对多维问题求解时尤为明显。为了避免二进制编码存在的运算速度慢、精度低的问题, 本文采用浮点数进行编码, 提高了运算效率, 在优化质量和效率方面有较大的提高。

2.3 选择、交叉和变异运算

(1) 选择: 有各种方法实现遗传基因的选择。在这里采用基因排序法进行选择运算, 它根据个体的适应度对各个个体进行排序, 然后利用预先已被确定的概率决定遗留后代, 第 i 个个体的选择概率为:

$$P[i] = q^r (1 - q)^{r-1}$$

式中: $q^r = \frac{q}{1 - (1 - q)^P}$;

q — 最佳个体的选择概率; r — 该个体的排序位次; P — 种群规模。

(2) 交叉: 复制(选择)操作虽然能够从旧种群中选择出优秀者, 但不能创造出新的染色体。随机选择交换点位置, 互换染色体交换点右边的部分, 能够创造出新的染色体。本文采用算术运算实现交叉:

$$\bar{X}' = r\bar{X} + (1 - r)\bar{Y}$$

$$\bar{Y}' = (1 - r)\bar{X} + r\bar{Y}$$

式中: \bar{X}' 、 \bar{Y}' — 子代染色体; \bar{X} 、 \bar{Y} — 父辈染色体; r — 0 到 1 之间的随机数。

(3) 变异: 采用非均匀变异算法实现变异算法:

$$x_i' = \begin{cases} x_i + (b_i - x_i)f(G) & r_1 < 0.5 \\ x_i - (x_i - a_i)f(G) & r_1 \geq 0.5 \end{cases}$$

式中: x_i' — 子代染色体中的第 i 个变量; x_i — 父代染色体中的第 i 个变量;

$$f(G) = (r_2(1 - \frac{G}{G_{max}}))^b;$$

r_1, r_2 — 0 到 1 之间的随机数; $[a_i, b_i]$ — 该变量的编码范围; G — 当前代数; G_{max} — 最大代数; b — 权重系数。

3 遗传算法用于参数优化的运算过程

基于浮点编码的遗传算法应用于汽轮机 DEH 控制系统的优化过程必须完成遗传算法的各个遗传运算过程, 如图 2 所示。

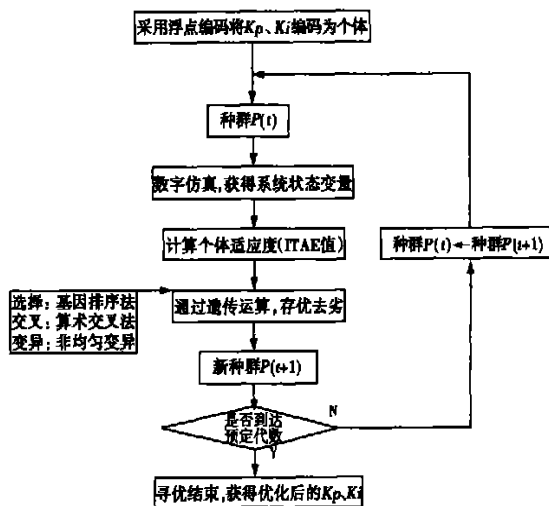


图 2 基于遗传算法的参数优化

(1) 编码: 采用浮点编码将 PI 控制器参数 (K_p 、 K_i) 编码为个体, 若干个个体形成初始群体, 即被优化参数的初值。

(2) 评价: 根据群体中每个个体的决策变量 (K_p 、 K_i), 对系统进行数字仿真, 获得系统响应特性的状态变量, 进而求得各个体的适应度值, 即优化准则指标。

(3) 遗传运算: 采用基因排序法进行基因复制, 算术交叉法进行基因交换, 非均匀变异法进行基因突变, 产生下一代群体, 即产生新的被优化参数的取值。

(4) 对产生的新一代群体(参数值)返回第(2)步再进行评价, 然后循环进行遗传运算, 使群体中个体的适应度和平均适应度(优化准则指标)不断提高, 直至进化的代数达到预定值或适应度值达到预定指标, 则优化过程结束, 获得 K_p 、 K_i 的优化解。

(5) 适应度: 根据自动控制的理论, 时间乘绝对误差积分准则 (ITAE) 为:

$$J = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt$$

按此准则设计的系统具有瞬态响应的超调量小、过程后期振荡有足够阻尼的特点。因此, 本文中采用扰动后机组转速变化过渡过程曲线的 ITAE 值作为优化的目标函数, 用于评价遗传过程中各个个体的适应度, 即优化准则指标。

4 控制器参数优化的仿真研究

基于上述思想, 对某中间再热 300 MW 汽轮机 DEH 控制系统转速控制回路 PI 控制器的参数进行了优化整定。

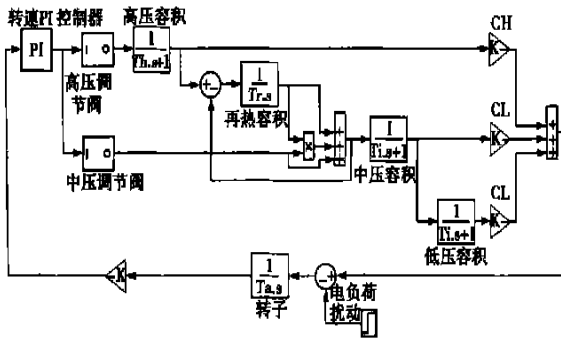


图 3 转速调节时的系统框图

负荷扰动时, 机组及其 DEH 控制系统如图 3 所示。参数优化的目的是确定转速 PI 控制器的比例和积分系数 K_p 、 K_i , 使得系统具有最佳的动态响应特性, 即为负号 ITAE 指标达到最大。参数优化过程中遗传算法采用的运算参数如表 1 所示, 阶跃负荷扰动值分别取为 ± 0.5 和 ± 1.0 , 优化结果如表 2 所示。遗传进化过程中, 种群的平均适应度 ($J = -ITAE$) 变化规律如图 4 所示。

表 1 FGA 运算参数

世代数	种群数	交叉概率	变异概率	K_p 编码范围	K_i 编码范围
30	50	0.4	0.04	[0.2 5]	[0.01, 2]

表 2 FAG 优化结果和 Z-N 方法整定结果

FGA 优化			Z-N 方法整定				
K_p	K_i	ITAE	K_r	T_r	K_p	K_i	ITAE
2.346 8	0.305 8	2.485	1.6	1.12	0.88	0.892 9	3.835

从图 4 所示的遗传进化过程中种群的平均适应度 (Average $J = -ITAE$) 随代数 (Generation) 变化的曲线可见, 参数优化过程开始时, 种群的平均适应度为 -4.54, 随着遗传代数的增加, 种群以很快的速度向更优良的方向进化, 适应度迅速增大, 到 20 代时种群平均适应度达到 -2.50, 之后基本上不再变化, 种群已经接近全局最优点, 遗传进化过程中种群的最佳适应度的变化规律与平均适应度的变化规律相同。由此可见, 采用遗传算法只要进行 20 次迭代进化就可以得到最佳结果, 具有较快的参数优化速度。

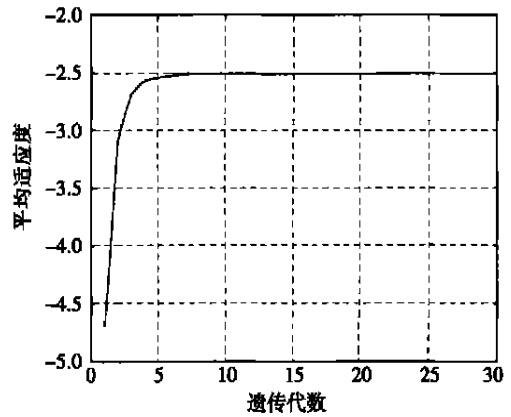


图 4 种群平均适应度变化过程

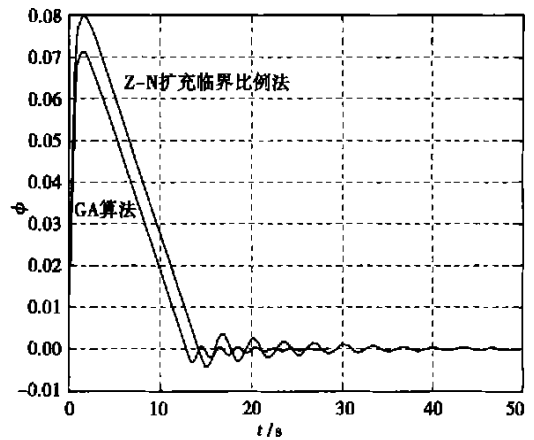


图 5 负荷扰动后转速过程曲线的比较

为了比较基于遗传算法的参数优化方法与其他参数整定方法所得到的整定结果对系统响应特性的影响, 采用适用于数字控制系统的扩充临界比例法——Z-N 方法对转速 PI 控制器的参数进行了整定。在 Z-N 方法中, 首先将控制器看成是纯比例控制, 逐渐增大比例系数, 使系统呈现出临界振荡状态, 求出临界振荡的周期 T_r , 并记下临界振荡比例系数 K_r , 根据临界振荡周期和临界振荡比例系数, 确定

PI 控制器的参数, 整定结果也列于表 2。

对于图 3 所示系统, 汽轮机转速 PI 控制器的参数分别采用表 2 中给出的 FGA 优化的结果和 Z-N 方法整定的参数, 通过计算机仿真得到机组甩全负荷后的转速过渡过程曲线如图 5 所示。从图中的过程曲线可见, 采用 Z-N 扩充临界比例法整定后系统的动态超调量为 7.98%, 过渡时间为 35 s, 过渡过程中转速波动较大, 其 ITAE 值为 3.835。采用 FGA 优化后系统的动态超调量为 7.1%, 过渡时间为 25 s, 转速变化相对平缓, 其 ITAE 值为 2.485, 超调量减少了 11%, 过渡时间缩短 28%, ITAE 值降低了 35%。可见采用 FGA 进行参数优化后, 系统的动态响应特性得到了明显改善。

5 结 论

控制系统中调节器的参数对于系统的响应特性具有重要的影响, 只有在控制器的参数得到良好整定的条件下, 才能获得满意的控制效果。将浮点编

码的遗传算法应用于汽轮机 DEH 控制系统的参数优化表明, 该算法具有寻优速度快, 能够获得全局最优的特点。经过优化整定后, 系统的动态响应特性优于采用 Z-N 扩充临界比例法整定后系统的动态响应特性。负荷扰动后, 转速过渡过程的动态超调量减少 11%, 过程时间缩短 28%, 最优化指标 ITAE 值减少 35%。因此浮点编码的遗传算法可以用于汽轮机 DEH 控制系统调节器参数的优化整定。

参考文献:

- [1] 刘 镇, 姜学智, 李东海. PID 控制器参数整定方法综述[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(8): 79-83.
- [2] 吕剑虹, 张世军, 陈来九. 智能 PID 控制器的设计及其应用研究[J]. 动力工程, 1995, 15(4): 6-10.
- [3] 李 卓, 萧德云, 何世忠. 基于 Fuzzy 推理的自调整 PID 控制器[J]. 控制理论与应用, 1997, 14(2): 238-243, 253.
- [4] 刘 镇, 姜学智, 李东海. 电站仿真器 PID 控制参数的模糊整定[J]. 系统仿真学报, 1998, 10(1): 43-50.
- [5] 李常平, 韩京梅, 张志高. 基于遗传算法的高性能 PI 控制器设计[J]. 航天控制, 1999(1): 63-69.

(何静芳 编辑)

设计技术

设计进展和生产型号

《Gas Turbine World 2001~2002 Handbook》以详尽的篇幅阐述了 2001~2002 年年度的燃气轮机设计技术的进展和新生产的型号。

过去 5 年, 从 1998~2002 年工业燃气轮机已经推出近 40 种新型燃气轮机。它们单机输出功率范围从用于分配电力生产和工业联合生产的回热设计的 400 kW 燃机到用于电力事业和商业装置联合循环电力生产的 335 MW 燃机。

中、小型机组目标是用于工业电力生产和主动力装置, 开发的大型机组主要用于高效的电力生产。

简单循环—中小功率机组用于调峰和中等范围电力生产、联合生产和热电联产(CHP)项目。

联合循环—大、中型机组用于中间的到基本负荷电力生产和热电联产项目。

机械驱动装置—中、小型机组用于输气管线、石化过程、工业和船舶推进项目。

航空技术—新一代燃气轮机主要为军用和民用飞机设计的喷气发动机。重型结构工业燃机也是工业化的航改型设计。

它们的设计结合了先进的流路空气动力学、航空发动机部件工程技术、高温材料和涂层以及先进发动机和部件的生产技术。

针对 1430 °C 和更高涡轮进口温度设计的蒸汽冷却的 G' 和 H' 型重型结构燃气轮机已投入商业使用, 可以评定其使用性能。空气冷却的 F 技术设计(涡轮转子进口温度为 1260~1288 °C)也进行了加大功率的改进设计, 以便在 1371 °C 和更高涡轮转子进口温度下运行。

改进设计包括更高压比的压气机、最新的高温涡轮叶片材料和涂层、增强和完善空气冷却设计。

小型 Trent 船用发动机。Rolls-Royce 公司正在推出 Trent 30 船舶燃气轮机, 第一台发动机将于 2003 年末可供应用。它也将配套用于机械驱动原动机和电力生产。

基本设计是 Trent 800 航空发动机的原型缩小。该功率等级比其它航改型燃机少 50%~60% 零件。

Trent 30 具有一个双转子高压比的燃气发生器, 包括一个 8 级可变几何的中压压气机和一个 6 级高压压气机。4 级自由动力涡轮也是由 Trent 800 航空发动机派生的。它被设计成用于无人的发动机舱运行, 日常的维护只限于检查流体的液位和外部检查。

在 ISO 条件下, Trent 30 的额定连续功率为 36 000 kW, 耗油率为 0.207 kg/kWh(热效率超过 40%)。当功率下降到 25 000 kW 时, Trent 30 仍保持很高的效率。

(吉桂明 供稿)

with those of experimental correlation. Meanwhile, this also shows that the large eddy simulation method is especially effective in capturing temperature fields and the time evolution process of flow field eddy series and very suitable for the analysis of temperature fields involving the flow movement of large eddies. **Key words:** gas sweeping across a single tube, forced convection, large eddy simulation

基于遗传算法的汽轮机 DEH 控制系统的参数优化研究 = A Study on the Parameter Optimization of a Digital Electro-hydraulic (DEH) Control System for a Genetic Algorithm-based Steam Turbine [刊, 汉] / DAI Yi-ping, LIU Zhao (Turbomachinery Research Institute under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049), LIU Jiong (Dongfang Steam Turbine Works, Deyang Sichuan Province, China, Post Code: 618000) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18 (3). — 263 ~ 266

After an explanation of the basic theory of genetic algorithm the latter is used for the parameter optimization of the PID (proportional-integral-differential) governor of a steam turbine DEH (digital electro-hydraulic) control system. The dynamic characteristics of the system after parameter optimization are compared with those of a system, which has undergone an adjustment by a conventional method. The results of comparison indicate that the improved genetic algorithm offers the merit of high convergence speed and the acquisition of global optimization. After being optimized the control system will enjoy better dynamic response characteristics. The genetic algorithm can be advantageously employed for the parameter optimization of the governor of a steam turbine DEH control system. **Key words:** genetic algorithm, parameter optimization, steam turbine, digital electro-hydraulic control system

再热汽轮机性能试验系统修正方法研究 = Investigation of a Method for Correcting the Performance Test System of a Reheat Steam Turbine [刊, 汉] / ZHANG Cai-wen, HUANG Hai-zhou (Steam Turbine Department, Hubei Provincial Electric Power Testing Institute, Wuhan, China, Post Code: 430077) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18 (3). — 267 ~ 269

An in-depth investigation was conducted of two kinds of revision calculation for the performance test system of a reheat steam turbine on the basis of "ASME PTC6-1996 Steam Turbine Performance Test Rules and Regulations". The process for realizing two kinds of calculation method is presented with their difference being analyzed. Moreover, through a calculation example the effect of these two calculation methods on the results of calculation is investigated, on the basis of which a revision calculation method is recommended. **Key words:** steam turbine, performance test, calculation

不同进风结构下煤粉燃烧器冷态流场实验研究 = An Experimental Study of the Cold-state Flow Field of a Pulverized-coal Burner under Different Air-entry Versions [刊, 汉] / JIANG Li-qiao, CHEN En-jian, YAN Chang-feng (Guangzhou Energy Source Research Institute under the China Academy of Sciences, Guangzhou, China, Post Code: 510070) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18 (3). — 269 ~ 271

An experimental study was conducted of the cold-state flow field characteristics of a pulverized-coal burner under two different air-entry versions, namely, air tangential entry and end-face air prewhirl entry. Test results indicate that the end-face prewhirl entry of air can lead to a considerably enhanced symmetry and uniformity of axial-speed distribution of the burner flow field. Furthermore, from the perspective of flow field distribution the integration of primary and secondary air into one stream of end-face prewhirl flow entry will be more contributive to the rational distribution of flow field than in the case of single axial entry of primary air. **Key words:** swirl flow, blade, five-hole probe

注蒸汽对涡轮增压器的影响 = The Influence of Steam Injection on a Turbocharger [刊, 汉] / LU Ben, WEN Xue-you (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036), XIA Jun-sheng (Hebei Jiteng Paper