

文章编号: 1000-8055(2005)06-01078-05

基于遗传算法的航空发动机PI控制器 参数优化方法

苏伟生^{1,2}, 李玥¹, 孙健国¹, 周维¹

(1 南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016;

2 中航第一集团公司 航空动力控制系统研究所, 江苏 无锡 214063)

摘要: PD 控制器参数整定与优化一直是自动控制领域研究的问题。采用遗传算法进行的 PD 参数整定与优化是一种全局最优且与初值无关的优化方法。本文结合某型航空发动机, 利用遗传算法对发动机单变量及双变量 PI 控制器参数进行优化。仿真结果表明: 该方法对 PI 参数整定具有比较好的综合控制性能, 不失为一种具有较好实用价值的航空发动机 PI 控制器参数整定与优化方法。

关键词: 航空、航天推进系统; 遗传算法; PI 控制; 航空发动机; 参数优化

中图分类号: V 233.7

文献标识码: A

Optimization Methodology of PI Controller Parameters for Aeroengines Based on Genetic Algorithm

SU Wei-sheng^{1,2}, LI Yue¹, SUN Jian-guo¹, ZHOU Wei¹

(1. The College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. China Aviation Motor Control System Institute, AVIC I, Wuxi 214063, China)

Abstract: Based on the mathematical model of aeroengine, an optimization methodology of the PI controller parameters with Genetic Algorithm (GA) was developed. This optimization methodology is a global optimization and has nothing to do with initial values. The fitting function used was based on the weighting combination of the system dynamic and steady state performance. The PI controller parameters of an aeroengine for both single-input single-output and two-input two-output were optimized with GA. The simulation results indicate that the optimization methodology of the aeroengine PI controller parameters developed in this paper is very effective.

Key words: aerospace propulsion system; Genetic Algorithm (GA); PI control; aeroengine; parameter optimization

PD 控制是工业过程控制中应用最广的控制策略之一, 尤其适用于线性、单变量的确定性控制系统^[1]。而现代航空发动机是具有强非线性、多变

量、时变不确定性的复杂系统, 应用常规 PD 控制器难以达到理想的控制效果。但由于 PD 控制算法简单、鲁棒性好和可靠性高而仍然在航空发

收稿日期: 2004-03-17; 修订日期: 2005-09-10

基金项目: 航空科学基金资助(04C52019)

作者简介: 苏伟生(1959-), 男, 上海人, 南京航空航天大学能源与动力学院博士生, 主要从事航空发动机数字控制系统的研究

动机中获得广泛的应用^[2,3]。一般采用的方法是在发动机的全包线和全状态范围内选取若干点,在这些点上分别整定 PD 参数,列成表格或用曲线拟合的方法用于实际发动机控制。其过程烦杂,且常规 PD 控制器参数整定方法难以获得最佳的效果。为此寻求一种 PD 控制器参数的自动整定技术,以适应航空发动机复杂的工况和高指标的控制要求,具有重要的理论和实际意义。目前 PD 参数的优化方法有很多^[1],如间接寻优法,梯度法,爬山法等。而在工程上单纯形法、专家整定法应用较广,虽然两者都具有良好的寻优特性,但却存在着一些弊端,单纯形法对初值比较敏感,容易陷入局部最优解,造成寻优失败,专家整定法则需要太多的经验,不同的目标函数对应不同的经验,而整理知识库又是一项长时间的工程。本文拟采用遗传算法(GA)来优化控制器参数,考虑到微分环节对高频噪声的抑制能力很差,我们实际采用 PI 控制。

1 遗传算法的基本思想和步骤

遗传算法是1962年由美国的Holland提出的一种模仿生物进化过程的最优化方法。其算法简单,可并行处理,是一种不需要任何初始信息并可以寻求全局最优解的高效的优化方法^[4~6],因此具有很大潜力。具体步骤如下:

第一步 随机产生初始种群,在本文的PI参数优化中,初始种群为PI参数可行解区域内的基因编码,种群的个体数目一定。

第二步 将种群中每个个体进行解码并代入目标函数中进行计算,可以得到具有一定初始适应度的函数值。判断是否符合优化准则,若符合,输出最佳个体及其代表的最优解,并结束计算,否则转向第三步。本文采用误差绝对值时间积分性能指标作为参数选择的最小目标函数。

第三步 依据适应度对染色体进行选择操作。按比例适应度分配,利用比例于各个个体适应度的概率决定其子孙遗留的可能性。

第四步 按照一定的交叉概率 P^c 对染色体进行交叉操作。

第五步 按照一定的变异概率 P^m 对染色体进行变异操作。

第六步 由交叉和变异操作产生新一代的种群,返回到第二步。

如此循环,经过一定的循环次数后,停止迭代。由于最好解并不一定出现在最后一次循环中,

我们要把每一次所得到的最好解保存下来。

在上述步骤中要注意以下问题:

(1) 如何确定目标函数。函数优化问题可直接将函数本身作为对象函数,而复杂系统的对象函数一般不那么直观,往往需要研究者自己构造出能对解的性能进行评价的函数,目标函数的确是关键的一环。

(2) 确定 GA 本身的参数。在运行 GA 程序时,需要对一些参数作事先选择,这些参数对 GA 的性能都有很重要的影响,根据本文的优化情况,提出如下几个参数:

种群数目 N : 种群的大小影响 GA 的有效性。较大数目的 N 可以同时处理更多的解,因而容易找到全局最优解;而 N 太大则会使计算量增加,增加每次迭代时间。一般取20~100。

交叉概率 P^c : 它决定交叉概率的操作频率,频率越高,可以越快地收敛到最有希望的最优解区域;但频率太高,则会使高适应度的结构很快被破坏掉。一般取0.4~0.9。

变异概率 P^m : 变异概率是增大种群多样性的第二个因素,通常选取很小的值。高的变异概率可以增加样本模式的多样性;但过大的变异概率可能会引起不稳定。一般取0.001~0.1。

(3) 适应度函数的选择。GA 在进化搜索中基本不利用外部信息,仅以适应度函数为依据,利用种群中每个个体的适应度值来进行搜索,因此适应度函数的选取至关重要,直接影响到 GA 的收敛速度以及能否找到最优解。一般而言,适应度函数是由目标函数变换而成的。对目标函数值域的某种映射变换称为适应度的尺度变换。常用的尺度变换方法有线性变换法,幂指数变换法和指数变换法等,读者可参阅有关文献,这里不再赘述。

2 基于遗传算法的航空发动机 PI 参数整定方法及仿真结果

用传统工业过程调节 PI 控制器参数的方法^[1]对航空发动机 PI 控制器进行参数整定也能够获得较好的品质,但是传统的整定方法采用经验加试凑的方法由人工整定,这种整定工作不仅需要熟练的技巧,而且往往要花费大量的时间,更重要的是当被控对象特性发生变化需要控制器作相应调整时,PI 控制器没有这种“自适应”能力,只能依靠人工重新整定参数。鉴于遗传算法的众多优点,我们采用遗传算法来进行 PI 参数整定。

基于遗传算法整定优化 PI 控制器参数的原理如图 1 所示。

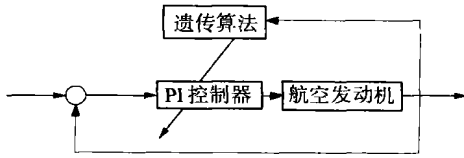


图1 基于遗传算法优化 PI 控制器参数

Fig 1 Optimization of PI controller parameters based on GA

2.1 单变量控制

以某型涡扇发动机为对象, 先以单变量控制为例, 燃油流量 W_{fm} 为控制量, 高压转速 N_2 为被控制量。为了获取满意的过渡过程动态特性, 采用误差绝对值时间积分性能指标作为参数选择最小目标函数。为了防止控制能量过大, 在目标函数中加入控制量。因此为了使控制效果更好, 我们给出了被控制量的误差量 e 和控制量 u 作为目标函数中的两项, 目标函数如下:

$$J = \int [W_1 |e(t)| + W_2 u^2(t)] dt \quad (1)$$

其中 W_1 和 W_2 为权值, 为调试方便, 其和可为常数, 不失一般性, 取 $W_1 + W_2 = 1$ 。为了限制超调, 采用了惩罚功能, 即一旦产生超调, 将超调作为最优指标的一项, 此时最优指标为:

$$\text{if } e(t) < 0$$

$$J = \int [W_1 |e(t)| + W_2 u^2(t) + W_3 |e(t)|] dt \quad (2)$$

式中: 选取 $W_3 = 100$ 。

选取 $H = 0, M a = 0$, 发动机在中间状态, 先采用发动机线性模型如下所示:

$$dx/dt = Ax + Bu \quad (3)$$

式中: 状态向量 x 为低高压转子转速, 控制量 u 为主燃油流量, 输出量 y 为高压转子转速。现将它改写到用 Matlab 编写的 GA 源程序中, 使用 GA 优化的 PI 控制器参数对该线性模型进行仿真。

用以上遗传算法离线进行 PI 参数整定, 并用数字仿真进行评价, 在仿真中对参数都进行了无量纲化。通过对多次运行收敛情况和对解的质量的判断, 最终设置种群大小为 30, 最佳进化代数为 150, 遗传算法所得 PI 控制器优化参数为 $K_p = 19.8591, K_i = 31.4962$ 。线性模型控制系统仿真结果如图 2 所示。由图可见, 使用 GA 优化的 PI 控

制器参数, 发动机高压转速 N_2 上升时间短, 未产生超调, 稳定性好, 且系统达到稳定后完全消除静差。

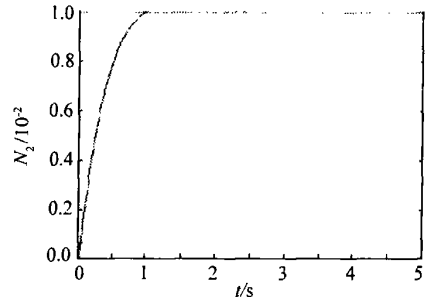


图2 ($H = 0, M a = 0$) 线性发动机模型高压转速 N_2 的阶跃响应

Fig 2 Step response of high pressure speed N_2 with linear aeroengine model ($H = 0, M a = 0$)

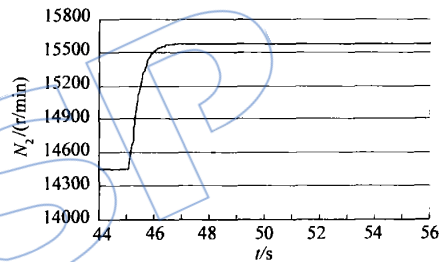


图3 ($H = 0, M a = 0$) 非线性模型 N_2 的阶跃响应

Fig 3 Step response of N_2 with nonlinear model ($H = 0, M a = 0$)

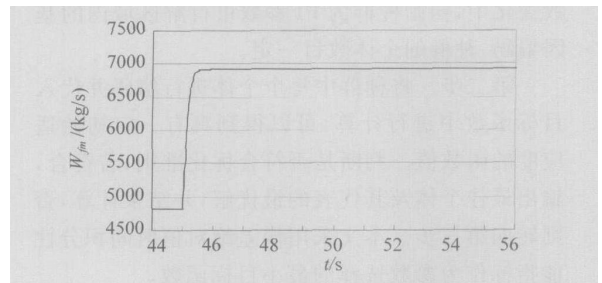


图4 ($H = 0, M a = 0$) 非线性模型 W_{fm} 的变化曲线

Fig 4 W_{fm} History with nonlinear model ($H = 0, M a = 0$)

为了更好的验证遗传算法优化效果, 把 GA 优化发动机线性模型所得的 PI 控制器参数 $K_p = 19.8591, K_i = 31.4962$ 用于非线性模型, 用物理量表示。该非线性模型为某型涡扇发动机部件级实时模型。仿真中, 对 $M a = 0, H = 0$ 发动机中间状态这一点进行控制, 给高压转子转速 N_2 一个 10% 的阶跃量指令, 观察 PI 控制器控制效果。仿真结果如图 3 和图 4 所示。

由图可见, N_2 响应曲线未产生振荡与超调, 达到稳定后完全消除静差。从这一仿真结果可以看出, 使用 GA 对某一状态点优化所得的 PI 控制器参数, 不管是线性模型还是非线性模型, 系统都能获得很好的动态特性和稳态精度, 说明控制系统的鲁棒性较强。

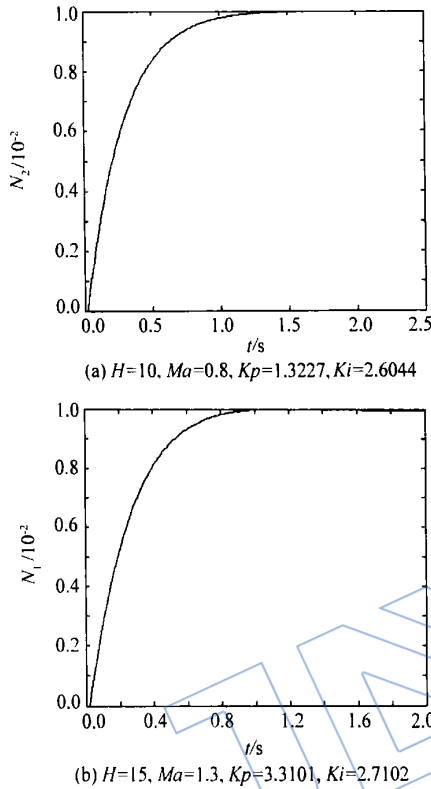


图5 高空 N_2 的阶跃响应

Fig 5 Step response of N_2 in flight envelope

以上仿真是在地面条件 $H = 0, M a = 0$ 下完成的, 我们在包线内作了大量仿真, 仿真结果表明, 该方法在包线内都是适用的, 限于篇幅, 下面给出两组高空仿真曲线如图5所示。

由图5可见, 在高空用本文的方法优化 PI 参数, 系统的响应特性仍然比较理想。

2 2 双变量控制

现代航空发动机的控制变量越来越多, 在发动机多变量控制系统中, PI 控制仍然获得较广泛的应用^[7]。但 PI 控制是一种单变量的控制算法, 用于多变量控制时, 通常按每个回路分别设计 PI 控制器, 再组合成多变量控制系统。用传统手动整定参数的方法, 先在每一回路整定 PI 控制器参数, 构成多变量控制系统后再反复调试整定。其整定过程复杂, 且难以获得好的效果。采用 GA 算法可以把发动机多变量控制系统作为一个完整的系

统, 进行参数整定和优化, 是一种很有效的方法。

下面以某型涡扇发动机双变量控制系统为例, 说明用 GA 算法来优化发动机双变量 PI 控制器参数的方法, 并用数字仿真说明其有效性。发动机的线性模型仍如(3)式所示, 但控制变量为燃油流量 W_{fm} 和尾喷口面积 A_8 , 输出变量为高压转子转速 N_2 和涡轮落压比 π_t , 在仿真中对参数都进行了无量纲化。对于双变量控制系统, 要选取4个 PI 控制器参数 $K_{p1}, K_{i1}, K_{p2}, K_{i2}$ 。其目标函数 J 选择如下:

$$J_1 = \int [W_{11} |e_1(t)| + W_{21} u_1^2(t)] dt + W_{31} t_{u1}$$

$$J_2 = \int [W_{12} |e_2(t)| + W_{22} u_2^2(t)] dt + W_{32} t_{u2}$$

为了限制超调取目标函数为:

$$\text{if } e_1(t) < 0$$

$$J_1 = \int [W_{11} |e_1(t)| + W_{21} u_1^2(t) + W_{41} |e_1(t)|] dt + W_{31} t_{u1}$$

$$\text{if } e_2(t) < 0$$

$$J_2 = \int [W_{12} |e_2(t)| + W_{22} u_2^2(t) + W_{42} |e_2(t)|] dt + W_{32} t_{u2}$$

最后目标函数为:

$$J = J_1 + J_2 \tag{4}$$

其中: $e_1(t)$ 和 $e_2(t)$ 分别为 N_2 和 π_t 的误差, $u_1(t)$ 和 $u_2(t)$ 分别为 W_{fm} 和 A_8 的增量, 为方便起见, 下面仍用 W_{fm} 和 A_8 表示, t_{u1} 和 t_{u2} 分别为 N_2 和 π_t 的上升时间。

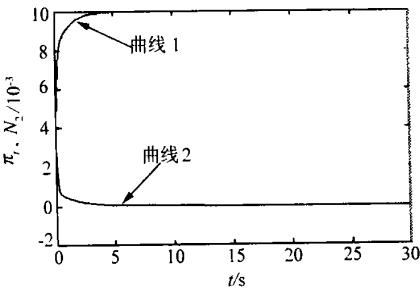


图6 N_2 单独阶跃的双变量控制系统 N_2 和 π_t 的响应

Fig 6 Response of N_2 and π_t of double variable control system with N_2 step input

仍选取 $H = 0, M a = 0$, 发动机中间状态进行优化设计, 在优化中选择种群大小为30, 进化代数

为 100 代, 得到的 4 个优化参数依次为: $K_{p1} = 10.369$, $K_{i1} = 16.56$, $K_{p2} = 39.6$, $K_{i2} = 57.8$ 。并在该条件下进行仿真。图 6 和图 7 为 N_2 和 π_t 分别

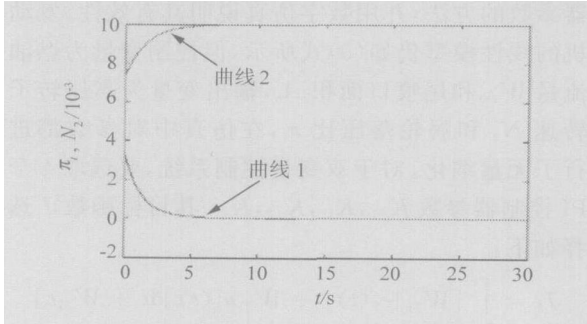


图 7 单独阶跃的双变量控制系统 N_2 和 π 的响应

Fig 7 Response of N_2 and π of double variable control system with π step input

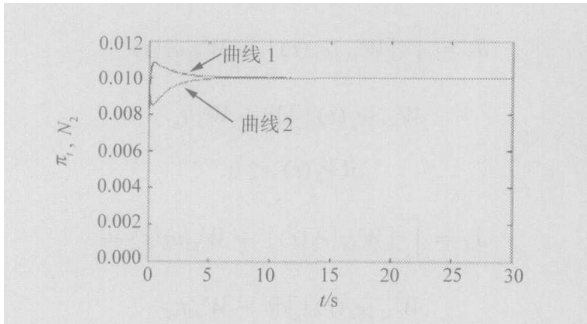


图 8 N_2 与 π 同时阶跃的双变量控制系统 N_2 和 π 的响应

Fig 8 N_2 and π Response of double variable control system with step inputs of both N_2 and π

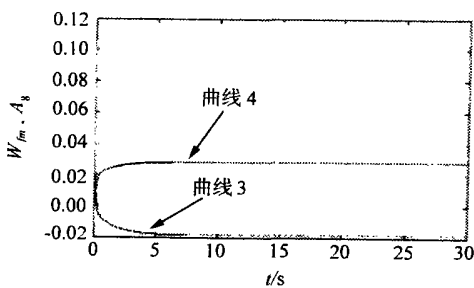


图 9 N_2 与 π 同时阶跃的双变量控制系统 w_{fm} 和 A_8 的变化曲线

Fig 9 w_{fm} and A_8 histories of double variable control system with step inputs of both N_2 and π

单独作 1% 阶跃输入时的响应曲线, 其中曲线 1 代表 N_2 , 曲线 2 代表 π , 曲线 3 代表 w_{fm} , 曲线 4 代表 A_8 。图 8 和图 9 为双变量控制系统 N_2 和 π 同时作 1% 阶跃输入时的响应曲线。从图 6~ 图 9 可以看到优化效果较好, 能够稳态解耦, 且具有一定的动态解耦效果。在优化前, 笔者曾试图用手工整定这 4 个 PI 参数未能实现发动机中间状态双变量稳定控制, 而深感 GA 优化算法的优越性。

3 结 论

遗传算法是从许多点开始并行操作, 在解空间进行高效启发式搜索, 克服了从单点出发的弊端以及搜索的盲目性, 从而使寻优速度更快, 避免了过早陷入局部最优解; 它不仅适用于单目标寻优, 而且也适用于多目标寻优, 根据不同的控制系统, 针对一个或多个目标, 遗传算法均能在规定的范围内寻找到合适参数; 利用遗传算法优化的 PI 控制器参数对某型发动机进行控制, 取得了较好的综合性能, 而且相对于传统 PI 参数整定, 不管是在方法上还是在优化结果上都有着明显的优越性。

参考文献

- [1] 邵惠鹤, 工业过程高级控制[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1997.
- [2] Kong C D, Kim S K. Real Time Linear Simulation and Control for the Small Aircraft Turbojet Engine[R]. *Proceedings of the 1997 ASME ASIA Congress & Exhibition*, Sep. 30-Oct 2, 1997.
- [3] 王曦, 覃道亮. 航空发动机 H_∞ /PI 输出反馈控制—非严格正则 LM I 方法[J]. 航空动力学报, 2004, 19(2): .
WANG Xi, TAN Dao-liang. H_∞ /PI Output Feedback Control of Aero-Engine Under Nonstrict Properness Based on LM I[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2004, 19(2): .
- [4] Krishnakumar, etc. Solving Large Parameters Optimization Problems Using Genetic Algorithms[R]. AIAA - 95-3223-CP.
- [5] 王小平, 曹立明. 遗传算法—理论、应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- [6] Li Song-lin, Sun Jian-gua. Application of Genetic Algorithm to Solving Nonlinear Model of Aeroengine[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2003, 16(2): 69~72.
- [7] Gangopadhyay A, Meckl P. Multivariable PI Tuning for Disturbance Rejection and Application to Engine Idle Speed Control Simulation[J]. *International Journal of Control*, 2001, 74(10): 1033~1041.