

文章编号: 1000-8055(2007)09-1588-05

基于混合遗传算法的航空发动机 PID 控制参数寻优

曹志松, 朴 英

(清华大学 航天航空学院, 北京 100084)

摘 要: 结合某型航空发动机的比例积分微分控制(PID)参数整定与优化问题,提出了一种全局最优且与初值无关的优化算法. 算法采用与单纯形相结合的混合遗传算法,结合了遗传算法良好的全局收敛性和单纯形算法的优秀的局部搜索能力,提高了搜索速度与精度. 仿真结果表明这种方法具有较好的收敛性与稳定性.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 航空发动机; PID 控制; 遗传算法; 单纯形算法

中图分类号: V233.7

文献标识码: A

Optimization methodology of PID controller parameters for aeroengines based on mixture genetic algorithm

CAO Zhi-song, PIAO Ying

(School of Aerospace, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Based on the mathematical model of aeroengine, an optimization methodology of the PID controller parameters with genetic algorithm (GA) was developed. This optimization methodology is a global optimization and has nothing to do with initial values. Mixture genetic algorithm fusing the advantage of steeply convergence and highly precession of simplex algorithm and global convergence of genetic algorithm, is used to improve the searching process and precision. The result shows that the algorithm has good convergence and steadiness.

Key words: aerospace propulsion system; aeroengine; proportional-integral-derivative control (PID); genetic algorithm; simplex algorithm

航空发动机是一个结构极其复杂、工作环境极为恶劣、强非线性的被控对象. 在实际工作过程中,航空发动机特性会随着负荷或飞行条件的变化而发生变化. 经典自适应控制运用现代控制理论在线辨识对象特性参数,实时改变其控制策略,以使控制系统品质指标保持在最佳范围内,但其控制效果的好坏取决于辨识模型的精确度,这对于航空发动机这样复杂的系统是非常困难的. 因此,在实际工程中大量采用的仍然是经典的 PID 控制算法. 由于发动机特性的大范围变化,因此需

要 PID 参数随之变化而获得较好的控制指标.

目前 PID 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. 为了解决这一问题可以采用具有全局搜索能力的算法来解决,如模拟退火,遗传算法等,但在实际应用中,单独的采用全局搜索算法

收稿日期: 2006-07-24; 修订日期: 2007-06-24

作者简介: 曹志松(1977-),男,江苏靖江人,博士生,主要从事航空发动机系统级仿真研究.

效率低而且解的精度不高.本文首先基于数值寻优的思想,构造了基于性能指标加权的适应度函数,然后采用了一种混合遗传算法,即在全局搜索的遗传算法中引入局部搜索的单纯形寻优,来提高搜索速度和精度.最后通过仿真表明了方法的有效性.

1 某型航空发动机的PID参数优化性能指标

以某涡扇发动机主供油量 W_f 对风扇转速 N_f 的线性化数学模型为被控对象,则被控对象的传递函数为

$$G(s) = \frac{N_f(s)}{W_f(s)} = \frac{1.192s + 6.273}{s^2 + 7.167s + 12.84} \quad (1)$$

式(1)为在零高度零马赫数下利用拟合法^[2]建立的增量形式的线性化模型.为了简单起见,省略了增量符号 Δ .发动机主供油量执行机构被视为时间常数为 0.1 s 的惯性环节,则闭环系统结构如图1所示.

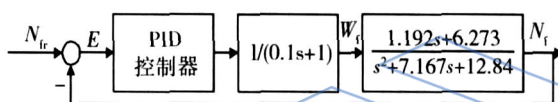


图1 闭环系统结构图

Fig.1 Closed loop system structure diagram

优化过程中采用离散系统进行设计,根据涡扇发动机非线性模型要求,取 30 ms 为其采样步长,以转速 N_f 的阶跃指令为输入信号.采用误差绝对积分性能指标作为目标函数.为了防止控制能量过大,在目标函数中加入控制输入的平方项.选用式(2)作为参数选取的最优指标

$$J = \int_0^{\infty} w_1 |e(t)| + w_2 W_f^2(t) dt + w_3 t_r \quad (2)$$

式中 $e(t)$ 为系统误差; W_f 为控制器输出的供油量; t_r 为上升时间; w_1, w_2, w_3 为相应的权值.为避免超调,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

$$J = \int_0^{\infty} w_1 |e(t)| + w_2 W_f^2(t) + w_4 |e(t)| dt + w_3 t_r \quad e(t) < 0 \quad (3)$$

式中 w_4 为产生超调后的附加系统误差权值,其值应大于 w_1 .

2 混合遗传算法的设计

遗传算法是一种基于生物遗传和进化机制的

寻优搜索算法,具有全局寻优能力和较好的稳健性,在函数优化等方面得到了广泛的应用^[3-4].但是常规遗传算法局部寻优能力差,又易产生早熟,搜索后期往往在最优解附近反复进行,不能得到高精度的最优解.

单纯形法是一种直接搜索方法,它有很强的局部搜索能力,但是必须在给定合适的初始单纯形条件下,才能快速高精度的收敛于初始值附近的最优解,而某些时候初始值的选择并不容易.

在改进常规遗传算法的基础上,提出了一种混合遗传算法,即在执行交叉和变异等随机性操作后,以一定的概率选择当前种群中的部分优秀个体,以这些个体为初始值,执行若干步单纯形搜索,来强化优秀个体,提高搜索效率,同时也保留了种群的个体差异性,不影响全局搜索的性能.在迭代过程中,当代价函数的适应度小于某一容差时,将取这一代种群中的最优个体作为初始值,只采用单纯形算法进行局部寻优,从而消除了遗传算法在局部搜索时的不利因素,可以用更少的计算量得到问题的最优解.混合遗传算法操作过程详述如下:

2.1 实数编码

对于一些多维,高精度要求的连续函数优化问题,通常采用实数编码方法.个体的每个基因值用某一范围内的一个浮点数来表示,编码长度等于其决策变量的个数.实数编码方法可以表示范围较大的数,提高遗传算法的计算精度,便于较大空间的遗传搜索,同时改善遗传算法的计算复杂性,提高运算效率.

2.2 适应度计算

遗传算法在运行时,是依靠适应度函数值的大小来区分每个个体的优劣,并判定是否进入下一代的进化.适应度函数的选择直接影响着算法的性能,几种常用的适应度函数方法及其分析参见文献[5].本文在算子设计时以随机联赛算子为选择算子,该算子可以直接通过比较个体的目标函数值来完成操作,因此本文的遗传算法的适应度函数直接选择为优化目标函数,即由式(3)确定.

2.3 遗传算子

遗传算子设计包括交叉算子、变异算子和选择算子的设计.

(1) 选择算子

传统的标准选择算子一方面要求适应度函数大于零,给适应度函数的选择带来了一定的困

难;另一方面基于适应值的排序选择算子是造成算法早熟、收敛速度慢的主要原因.为避免上述问题,本文采用既具有较高确定性和一定随机性的随机联赛方法^[5]为选择算子.联赛规模的取值为 2.除了选用联赛选择操作外,还采用了最优保存策略,通过保留上代群体的最优解,平衡了交叉操作和变异操作的破坏作用,使算法可以以概率 1 收敛到全局最优解.

(2) 交叉算子

选用一种改进的算术交叉算子^[6],其改进在于对父代矢量的各个分量进行交叉时,采用不同的随机数.

$$\begin{aligned} x'_i &= (1 - r_i) x_i + r_i y_i \\ y'_i &= r_i x_i + (1 - r_i) y_i \end{aligned} \quad i = 1, 2, \cdots, p \quad (4)$$

其中 x'_i, y'_i 分别代表子代个体矢量的分量; x_i, y_i 分别代表父代个体矢量的分量; p 为矢量维数; r_i 为 $[-0.25, 1.25]$ 区间的随机数.由此产生的子代个体,不再局限在父代个体的连线上,而是可以散布于更为宽广的空间中,从而拓宽了子代个体的搜索空间,有助于避免早熟,提高全局寻优效率.

(3) 变异算子

非均匀变异^[3]是对原有基因值做一随机扰动,以扰动后的结果作为新的基因值.非均匀变异时,随机选择 1 个变异基因 x_i ,其取值范围为 a_i ,

b_i ,则变异后 x'_i 的由下式确定

$$x' = \begin{cases} x_i + \Delta(t, b_i - x_i), & \text{if random}(0, 1) = 0 \\ x_i + \Delta(t, x_i - a_i), & \text{if random}(0, 1) = 1 \end{cases}$$
$$\Delta(t, y) = yr(1 - t/T)^c \quad (5)$$

其中 r 是 $[0, 1]$ 之间的随机数; t 是进化代数; T 为最大的代数; c 为决定非均匀度的系统参数; $\Delta(t, y)$ (y 代表 $b_i - x_i$ 和 $x_i - a_i$) 返回区间 $[0, y]$ 里的一个值,使 $\Delta(t, y)$ 靠近 0 的概率随代数的增加而增加.这一性质的算子在初始阶段均匀地搜索空间,而在后面阶段进行局部搜索,它产生的新基因值比均匀变异所产生的基因值更接近于原有基因值.因此随着遗传算法的运行,非均匀变异就使得最优解的搜索过程更加集中在某一最有希望的重点区域中.

2.4 混合遗传算法的流程

选用前面介绍的浮点数编码、随机联赛选择、非均匀算术交叉、非均匀变异及最优保留策略,并引入单纯形寻优算法就构成了混合遗传算法.整个算法的流程如图 2 所示,在算法的开始阶段主要利用遗传算法的全局寻优的能力,并以一定的概率对某些优秀个体进行单纯形运算,提高搜索速度,当适应度小于允许误差时,就选择该子代中的最优个体进行单纯形寻优,最后输出结果.

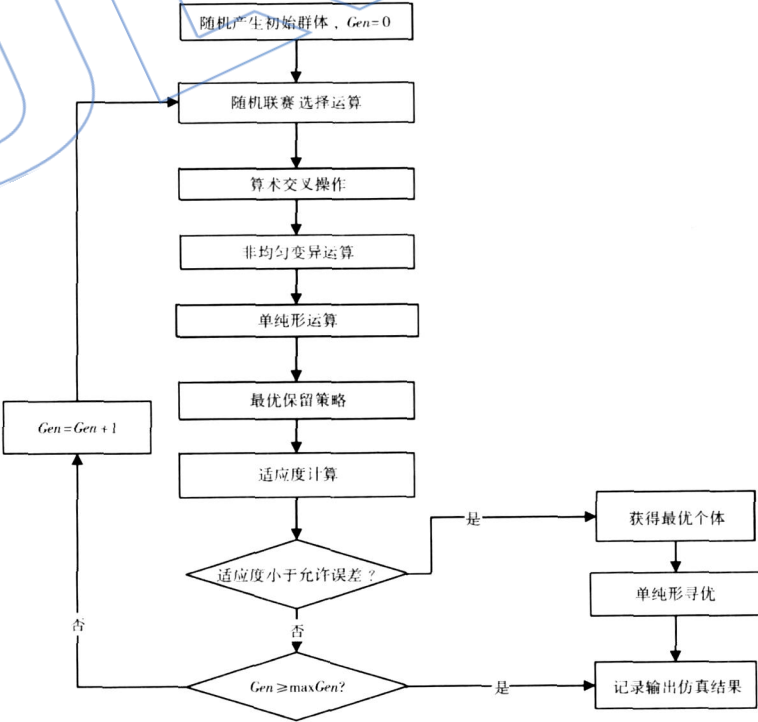


图 2 混合遗传算法流程

Fig. 2 Flow chart of mixture genetic algorithm

3 仿真结果和分析

下面对本例采用混合遗传算法、常规遗传算法(使用的样本个数为 30,随机联赛选择,交叉概率 0.9,变异概率 0.05,初始种群与混合遗传算法相同)的运算效率进行对比.取 $w_1 = 0.999$ ($r^{-1} \cdot \min$), $w_2 = 0.001 \text{ kg}^{-2} \cdot \text{h}^2$, $w_3 = 2 \text{ s}^{-1}$, $w_4 = 2\,000$ ($r^{-1} \cdot \min$).图 3 显示了迭代 100 次,混合遗传算法和常规遗传算法的最优指标 J 值的变化情况.

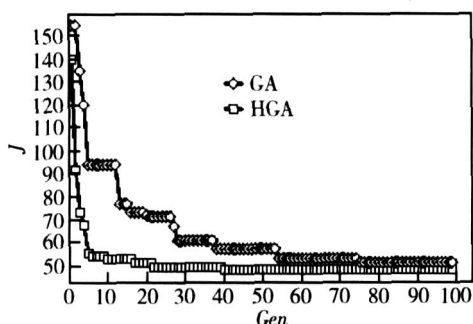


图 3 常规和混合遗传算法的最优指标 J 的变化曲线

Fig. 3 J functions of general genetic algorithm (GA) and hybrid genetic algorithm (HGA)

可以看出这两种算法的最优指标值都呈下降趋势,在初始阶段,混合遗传算法和常规遗传算法的收敛速度都比较快,表现了遗传算法的全局搜索的性能,而混合遗传算法中通过引入了单纯形算子进一步提高了收敛速度.常规遗传算法运算后期,收敛缓慢,表现了遗传算法在局部搜索时效果不好.由于单纯形算法对初值要求比较高,如果初始值选择不好,就容易陷入局部极小点.混合遗传算法采用大范围寻优可以很容易的解决这个问题.混合遗传算法结合了常规遗传算法和单纯形法的优点,开始阶段利用遗传算法的全局搜索的性能使得最优指标值较快地减少,当找到一个优

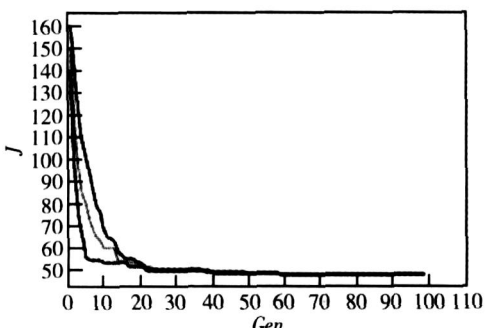


图 4 不同初值下混合遗传算法的最优指标 J 的变化曲线

Fig. 4 J functions of HGA with different initial value

秀的个体后再采用单纯形算法,这比只使用单纯形收敛更快.对于不同的初值,得出寻优过程曲线对比图如图 4 所示,可以看出寻优结果与初值选取无关.

通过混合遗传算法获得的优化参数为 $K_p = 9.933$, $K_i = 11.146$, $K_d = 0.808$.闭环系统阶跃响应如图 5 所示.由于对系统超调指标的加权比较大,系统的响应完全无超调.

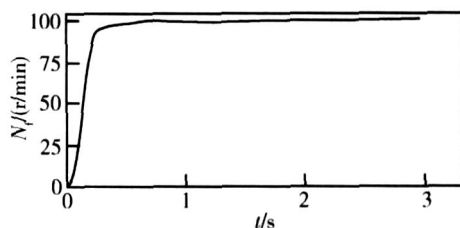


图 5 闭环系统阶跃响应

Fig. 5 Step response of N_r

衡量参数寻优算法的首要指标是算法收敛的可靠性,同时计算成本也是一个需要考虑的指标.混合遗传算法、常规遗传算法和单纯形算法的运行时间分别为 6.278 s, 171.314 s 和 1.857 s,可以看出混合遗传算法是常规遗传算法与单纯形算法在求解精度和求解速度的协调.

4 结束语

结合某型航空发动机的 PID 控制参数整定与优化问题,基于数值寻优的思想,构造了基于性能指标加权的适应度函数,同时算法采用混合遗传算法,结合了遗传算法良好的全局收敛性和单纯形算法的优秀的局部搜索能力,使得在收敛速度上优于一般遗传算法,又避免了传统优化算法易陷入局部最优点的缺陷.仿真结果表明,该方法优于常规遗传算法和单纯形算法,提高了求解速度与精度,是一种有效、实用的 PID 参数优化方法.

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] 冯正平, 孙健国, 黄金泉, 等. 一种建立航空发动机状态变量模型的新方法[J]. 航空动力学报, 1998, 13(4): 435-438.
FENG Zhengping, SUN Jianguo, HUANG Jinqian, et al. A new method for establishing a state variable model of aeroengine[J]. Journal of Aerospace Power, 1998, 13(4): 435-438.
- [3] Krishnakumar. Solving large parameters optimization

- problems using genetic algorithms [R]. AIAA-95-3223-CP, 1995.
- [4] LI Songlin, SUN Jianguo. Application of genetic algorithm to solving nonlinear model of aeroengine[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2003, 16(2): 69-72.
- [5] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999: 45-58.
- ZHOU Ming, SUN Shudong. Genetic algorithms: theory and applications [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999: 45-58. (in Chinese).
- [6] 王小平, 曹立明. 遗传算法[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002: 34-36.
- WANG Xiaoping, CAO Liming. Genetic algorithms [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002: 34-36. (in Chinese).

大型飞机关键技术高层论坛暨中国航空学会 2007 学术年会在深圳召开

大型飞机关键技术高层论坛暨中国航空学会 2007 学术年会于 2007 年 9 月 2 日至 3 日在深圳召开。会议由中国航空学会和中国工程院机械与运载工程学部主办, 我国航空航天领域的科技工作者和各界人士 600 余人参加了会议。中国科学院院士曹春晓、崔尔杰及中国工程院院士张彦仲、刘大响、陈懋章、关桥、温俊峰、张福泽、李明、冯培德出席了会议。

大会主席、中国航空学会副理事长、中国工程院机械与运载工程学部主任张彦仲院士致开幕词。深圳市科协张克科常务副主席、国防科工委王欣副司长、中国航空工业第一集团公司陈元先副总工程师、中国航空工业第二集团公司徐占斌副总经理、美华航太工程师协会理事长田长焯先生分别在开幕式上致词。

大会报告分别由中国航空学会副理事长、西北工业大学校长姜澄宇教授, 中国航空学会副理事长兼科技咨询工作委员会主任、中国航空工业第一集团公司科技委副主任刘大响院士, 中国航空学会副理事长兼国际合作工作委员会主任、中国航空工业第一集团公司顾问杨育中研究员, 中国航空学会副理事长范肖梅研究员主持。张彦仲、刘大响、冯培德、曹春晓、关桥等院士及宋笔锋、王中、崔德刚等专家学者作了大会报告。与会专家对大型飞机关键技术的发展现状进行了深入地分析和探讨。

大会报告后, 会议进行了各专业委员会的专题学术报告。本次会议共收到投稿 400 多篇, 收录 450 篇。专题学术报告内容包括: 总体设计与综合技术, 空气动力, 飞机结构技术, 动力, 机载、航电, 材料, 制造技术, 可靠性、安全性、维修性及适航性等。陈懋章、崔尔杰院士等几十位专家作邀请报告。《航空动力学报》的代表参加了会议。

亚洲国际航空展览会在香港举行

亚洲国际航空展览会 (Asian Aerospace) 于 2007 年 9 月 3 日至 6 日在香港亚洲国际博览馆 (Asia World - Expo) 举办, 定位为涵盖航空工业所有部门领域的国际民用航空展, 聚焦于亚太区国家的需求与出口。亚洲国际航空展览会一直在全球商业航空展中占据首要地位, 2007 年由新加坡移到香港。来自世界 33 个国家和地区的约 400 家航空、航天企业参加了此次香港的航展。A380 大型客机成为此次航展的焦点。

中国航空学会组织航空领域的相关代表参加了此次的香港航展盛会。作为中国航空学会主办的专业核心学术期刊, 《航空动力学报》也派代表参加了此次航展, 与国内外从事航空、航天动力方面的相关公司进行了广泛地交流, 建立了联系。