

遗传算法处理导弹一体化优化中隐式约束问题探讨*

赵建民,夏智勋,胡建新,罗振兵

(国防科技大学 航天与材料工程学院 湖南 长沙 410073)

摘要:在详细分析模式定理及典型遗传算法运行机理基础上,针对“隐式约束”问题,创造性地对其进行了适应性改造,并证明了其收敛性。仿真算例及工程实践问题表明,该方法有极强的全局寻优及高速收敛能力,是值得推荐使用的有效方法之一。

关键词:模式定理;全局收敛;欺骗问题;一体化优化设计

中图分类号:O232 文献标识码:A

Research of GAs for the Problems Restricted by the Implicit Formula in the Integral Design Optimization

ZHAO Jian-min, XIA Zhi-xun, Hu Jian-xin, LUO Zhen-bing

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract Genetic algorithm is altered to solve the problems restricted by the implicit formula on the basis of the research on schema theorem and canonical genetic algorithm theorem. The simulation results show that its performance of searching the global optimal solution and rapid convergence is better than that of some other GAs. It is a good way in numerical computing.

Key words schema theorem; global convergence; deceptive problem; integral design optimization

近年来,许多冠以“遗传算法”的研究与 Holland 最初提出的算法已少有雷同之处^[1]。不同的遗传基因表达方式,不同的交叉和变异算子,特殊算子的引用,以及不同的再生和选择方法,都提高了遗传算法的性能。目前,解决工程中大量存在的约束问题主要有算子修正法、罚方法等^[3],这些方法基于约束的“显性”特点,计算前,可以对设计变量进行范围判断,然后进行修正或加入罚函数以达到处理掉约束的目的。但工程实践中的确存在着所谓“隐式约束”的优化设计问题,即约束函数在约束范围内存在不可行解。例如在导弹一体化优化设计中,在解空间内很多设计点是不能满足发动机设计要求的,有些虽然可以进行设计,但在进行弹道仿真优化中,由于飞行条件的变化,可能导致发动机无法正常工作。对于这些不可行解,只能在计算中才可发现,无法事先进行判断,也就无法进行修正,也无所谓罚函数问题。如果仅仅将不可行解简单地抛弃,则非常类似于随机搜索,效率极低。

1 改进遗传算法

在只有交叉算子的情况下,存在如下定理^[2] (1) 随着进化代数增加,模式内部各基因趋于独立; (2) 只要组成模式的各个基因都存在,则该模式一定能够被搜索到; (3) 模式的极限概率等于组成模式各基因的初始概率的乘积,并且与模式的定义长度无关。由此,如果种群中所有模式是全的,那么在只有交叉算子的情况下,最优解肯定可以找到。但这是纯随机搜索,没有进化概念而言。

在加入选择压力后,“模式定理”明确指出,在种群中较优模式的数目呈指数增长。这样,种群虽然得以向优秀个体方向进化,但也伴随着模式将变得越来越少。变异算子的引入可有效避免这种状况,但变异率选取存在很大难度,取大就变成随机搜索,取小则不能有效引入其它模式。为了能快速收敛,一般趋向于取小值,这样,对于稍微复杂一点的函数优化问题,经过淘汰选择后,由变异引入的新模式不能

* 收稿日期:2004-09-22

作者简介:赵建民(1976—),男,博士生。

很快进入种群扩散而最终遭到淘汰。有时种群在经过若干代进化以后结构趋同,由一点翻转而来的变异已经不可能引入新的模式了,最终导致早熟。这就是典型遗传算法(CGA: canonical genetic algorithm)出现“遗传漂移”现象的根本原因^[3]。

一些学者试图引入自适应交叉、变异算子或采用混沌变异的方法来解决上述问题^[4~6],取得了一定成果,但本文认为这类方法没有统一的适用标准,往往造成在一个优化问题上有效而在另一个问题上却变得束手无策,操作性很差。尤其对于“隐式约束”问题还未见涉及,这里提出一些改进措施,可有效解决遗传算法上述问题,其主要思想有(1)采用优秀个体保留策略(2)引入全模式种群的概念,在没有选择变异算子情况下搜索到全局最优解的种群称为全模式种群,为了在进化过程得到全模式种群,将二进制个体及其翻转个体保留(3)抛弃交叉率,所有被选择的个体都要进行交叉操作,即交叉率为1,由于个体翻转操作是一种特殊的变异,所以不再保留变异操作(4)由于非可行解可能比可行解包含更多的最优解信息,所以不能采取简单的抛弃策略,根据实际问题赋以较小值参与遗传操作(5)引入基于二进制编码的方向交叉策略,只对优秀个体的后半部分进行交叉,由于个体信息主要由前半部分保留,此策略可在优秀个体附近寻优,最大限度避免再次陷入不可行解。

为了使优秀模式得以在种群中迅速传播,一个最优个体是不够的,为此保留10%~60%的优秀个体并参与交叉操作。为了使种群始终处于全模式状态下,除优秀个体外,使一半的个体翻转并保留,一半的个体无条件淘汰,即模式不仅要“全”,还要分布“均匀”。进行翻转操作可以每代进行,也可以每隔若干代进行,视具体问题、具体要求而定。

文献[7]中定理1指出,采用最优个体保留策略遗传算法为全局收敛的充分条件为:在搜索过程中能够发现全局最优解或经历包含全局最优解的状态 E 。本方法在运行过程中始终处于全模式状态下,根据本文对全模式种群的定义,完全可以满足该充分条件,收敛性得证。

2 测试分析

如何评测遗传算法计算效率,目前还没有一个很具操作性的方法,只有引入具体的工程实际问题,通过比较分析才能判断。为验证本方法的计算效能,从文献中选取两个复杂函数进行测试分析。

$$F_1 = f(x, y) = 0.5 - \frac{\sin^2 \sqrt{x^2 + y^2} - 0.5}{[1 + 0.001(x^2 + y^2)]^2}, \quad x, y \in [-100, 100]$$

F_1 函数是著名的Schaffer函数,该函数有无数个极大点,其中只有(0,0)一个为全局最大,最大值为1,此函数最大峰值周围有一圈脊,取值为0.990283,因此很容易陷入此局部极大点。引入如下约束:

$$\begin{aligned} x^2 + (y - 50)^2 &> 2500 \\ (x - 50)^2 + (y + 50)^2 &> 2500 \\ (x + 50)^2 + (y + 50)^2 &> 2500 \end{aligned}$$

以上约束只是用于模拟“隐式约束”,仅用来进行不可行解判断,不能用其进行任何的约束处理。

$$F_2 = \max f(x, y) = \left[\frac{a}{b(x^2 + y^2)} \right]^2 + (x^2 + y^2), \quad x, y \in [-5.12, 5.12]$$

函数 F_2 是文献[8]为研究遗传算法的“模式欺骗问题”专门设计的一类大海捞针问题,随着参数 a, b 的变化,该函数将形成不同程度的欺骗问题,其全局最优解往往被最差解所包围,隔断了模式的重组过程,使得一般算法长期陷入局部极值点。文献中取 $a = 3, b = 0.05, \max f(x, y) = 3600$ 。

引入文献[9]中的平均截止代数和截止代数分布熵的概念进行测试,分别用一般遗传算法(SGA)、ASGA法对 F_1, F_2 进行 T, H 值计算,计算次数均为随机计算100次,最大收敛代数为500代、变异率0.05,交叉率0.8,ASGA各变量取值以下文讨论的优秀结果为准。其结论见表1。计算距原点距离时, T 值要除以最大收敛代数,以相对值参加距离计算。

计算结果表明,本方法可以100%搜索到全局最优解,有效地解决了遗传算法中的“模式欺骗问题”,在收敛速度上,可控制在500代以内,效率还是比较高的。

表 1 SGA 与 ASGA 方法收敛性比较分析

Fig.1 Contrast of SGA and ASGA

	SGA			ASGA		
	T	H	距离	T	H	距离
F_1	492	0.65	1.176	381	0.75	1.068
F_1 (加约束)	403	0.82	1.146	325	0.83	1.054
F_2	475	0.65	1.151	160	0.9	0.955

从表 1 中可以看出,无论在平均收敛代数上还是距原点距离上,ASGA 方法都优于 SGA 方法,从截止代数分布熵上来看,似乎 SGA 方法要优于 ASGA 方法,但实际这是由于 SGA 方法早熟现象造成的,这也更加充分地证明了 ASGA 方法要大大优于 SGA 方法。

3 空空导弹整体式冲压发动机一体化优化设计

导弹的设计是一个整体,已经优化的发动机应用在导弹中,不一定是总体性能最优。这里以空空战术导弹为对象,从全弹系统出发,进行内外弹道一体化优化设计,协调发动机参数与总体性能间的关系,以求挖掘系统潜力、提高整体性能。目标函数:空空导弹总体性能可以归结为在导弹质量固定下有着最远的飞行距离,所以取平飞距离为目标函数。针对本设计对象及所选取的目标函数,取以下 5 个参数作为优化的设计变量:助推器推力 f_z ,助推器工作时间 t_z ,空燃比,设计高度 H ,设计马赫数 M_a 。

约束条件包括设计变量取值范围(解空间)、最大过载、刚度强度等。计算方法为改进的遗传算法。优化过程如下:在解空间内取值,按总压恢复系数最大进行进气道设计,据此设计整体式冲压发动机,之后进行弹道仿真求得目标函数。过程中遇到的非设计点及非发动机工作弹道进行归小数处理,其收敛过程如图 1 所示。经过优化计算后所得结果如表 2 所示,方案 1、方案 2 为按分部设计方法所得方案。

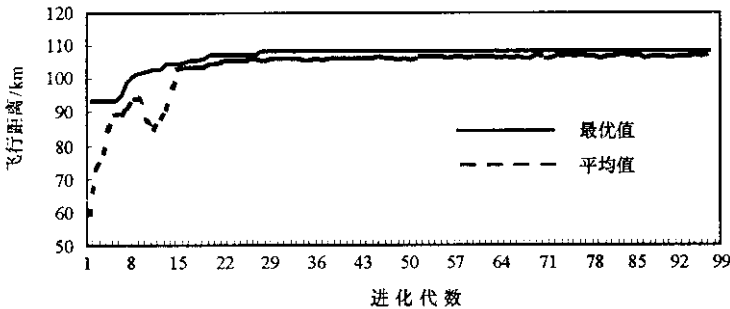


图 1 优化收敛过程

Fig.1 Convergence process of optimization

表 2 结果对比

Tab.2 Contrast of results

	t_0 (s)	f_0 (kN)	k	M_a	H (km)	L (km)
优化方案	3.67	28.13	10.08	2.54	10.99	110.19
方案 1	3.6	29.3	10.6	2.5	10.8	104.5
方案 2	3.5	33.1	9.0	2.9	10.8	95.5

与原方案相比,优化方案在性能上分别提高 6.1% 和 13.3%,优化方案在质量分配上比原方案更优,在空燃比、设计马赫数、设计高度取值上更为合理,这些都提高了导弹的飞行性能。

4 结论

改进遗传算法结合了全模式种群与最优个体引导的进化思想,针对“隐式约束”问题进行适应性改造后,可有效避免“遗传漂移”现象的发生,在解决“模式欺骗问题”和提高收敛速度方面都显示出了强大的优势,且具有简单易行、高效的突出特点,在算例仿真及空空导弹整体式冲压发动机一体化优化设计方法上表现出的优良性能,可以预期将在工程实际设计优化中发挥重要作用。

参考文献:

- [1] 戴晓晖,李敏强,寇纪松.遗传算法理论研究综述[J].控制与决策,2000,15(3):263-268.
- [2] 任庆生,曾进,戚飞虎.自交叉算子[J].控制理论与应用,2001,18(4):525-528.
- [3] Mahfoud S W. Genetic drift in sharing methods[A].Proc 1st IEEE Conf Evolutionary Computation[C].Nj:IEEE Press,1994:67-72.
- [4] 周激流,郭晶.一种可寻得全局最优解的改进变异算子[J].控制理论与应用,2001,18(5):755-758.
- [5] 王蕾,沈庭芝,招扬.一种改进的自适应遗传算法[J].系统工程与电子技术,2002,24(5):75-78.
- [6] 王炎,刘景录,孙一康.基于变尺度混沌优化策略的混合遗传算法[J].控制与决策,2002,17(6):958-960.
- [7] 何琳,王科俊,李国斌,等.关于“遗传算法的全局收敛性和计算效率分析”一文的商榷[J].控制理论与应用,2001,18(1):142-145.
- [8] 李敏强,寇纪松.遗传算法的模式欺骗性分析[J].中国科学(E辑),2002,32(1):95-102.
- [9] 孙瑞祥,屈梁生.遗传算法优化效率的定量评价[J].自动化学报,2000,26(4):382-384.

(上接第126页)

表1 两种不同验前分布下的验后估计比较

Tab.1 The comparison of post estimations between two different prior distributions

验前信息 可信度 c	无信息验前分布		基于仿真信息的均匀分布	
	λ_0	\hat{D}_{bayes}	λ_0	\hat{D}_{bayes}
1	1	420.4	1	420.4
0.95	0.3628	599.4	0.9550	444.5
0.9	0.2124	641.6	0.9096	468.8
0.8	0.1071	671.2	0.8173	518.1
0.7	0.0654	682.9	0.7229	568.5

当验前信息可信度不高时,传统的 Bayes 方法估计值偏离真值较远,而考虑了可信度的 Bayes 估计值却是稳定的,其绝对误差要小很多。当混合验前分布中一种分布采用无信息验前分布时,验前信息对于验后估计的权重远小于验前信息可信度,使得验后估计过于倾向无信息验前,而使用本文的均匀分布则避免了这个问题。从表1中可以看出,验前信息对于验后估计的权重与验前信息可信度相当,这说明了均匀分布假设的合理性,这种方法使得小子样 Bayes 估计的结果具有更好的可信度。

参考文献:

- [1] 张金槐,唐雪梅. Bayes 方法(修订版) [M]. 长沙:国防科技大学出版社,1993.
- [2] John C L, Steven E A, et al. Simulation-Based Diagnostics and Control for Nuclear Power Plants [R]. AD96001985, 1995(7).
- [3] Prudencio S V, Lopes M. Real Time Digital Simulation of an Autonomous and Magnetic Attitude Control System of a Satellit [R]. AIAA-98-4429.
- [4] 李鹏波,谢红卫,张金槐.考虑验前信息可信度时的 Bayes 估计[J].国防科技大学学报,2003(4):107-110.
- [5] 查亚兵,黄柯棣,张金槐.导弹系统仿真的可信性及其在试验鉴定中的应用[J].系统仿真学报,1997(1):10-17.
- [6] Kleyner A, Bhagath S, Gasparini M, et al. Bayesian Techniques to Reduce the Sample Size in Automotive Electronics Attribute Testing [J]. Microelectron Reliab., 9(6):879-883, 1997.

