

智能优化算法及其在飞行器优化设计领域的应用综述

杨希祥¹, 李晓斌², 肖 飞¹, 张为华¹

(1. 国防科技大学航天与材料工程学院, 长沙 410073;

2. 中国人民解放军92493部队博士后科研工作站, 葫芦岛 125000)

摘 要: 在对国内外相关文献进行系统研究的基础上, 阐述了飞行器优化设计领域应用较为广泛的几种智能优化算法的基本原理, 分析了算法的优缺点和改进方法, 总结了算法在飞行器轨迹、气动和控制等学科优化设计中的应用情况。同时, 文章对在飞行器优化设计领域应用刚刚起步, 但较有发展前景的智能优化算法的特点和应用情况进行了概述。最后, 对智能优化算法在飞行器优化设计领域应用的未来研究方向进行了分析。

关键词: 智能优化算法; 飞行器; 优化设计; 综述

中图分类号: V221; V421.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-1328(2009)06-2051-11

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2009.06.001

0 引言

优化技术是一门以数学为基础, 用于求解各种工程问题优化的应用技术。作为工程领域的一个重要分支, 飞行器优化设计研究是众多优化设计领域中较为活跃的一个。飞行器优化设计是一个复杂的系统工程, 尤其是在飞行器多学科设计优化(Multidisciplinary Design Optimization, MDO)中, 要充分考虑总体、发动机、气动、轨迹、控制和结构等众多学科间的耦合, 将各学科本身优化同整个系统优化相结合, 形成了多变量(连续、离散变量共存)、多目标、多约束、非线性、多极值、目标函数和约束条件非解析函数的复杂优化问题, 使传统优化算法(包括基于梯度的优化算法和 Powell 法等直接优化算法)面临严峻挑战, 主要表现在:(1) 传统优化算法不能直接用于处理带连续/离散混合设计变量的优化问题;(2) 传统优化算法往往对初值较为敏感, 且容易陷入局部最优点;(3) 传统优化算法的单点运算方式大大限制了计算效率提高;(4) 传统优化算法往往要求目标函数和约束条件是连续可微的解析函数。

智能优化算法在飞行器优化设计领域的应用是当前的热点研究方向, 但较全面地对各种方法进行

综合研究的文献极少且近期未见公开发表。智能优化算法(Intelligent Optimization Algorithm), 又称智能计算(Intelligent Computation), 是通过模拟或揭示某些自然现象或过程发展而来的优化算法, 其思想和内容涉及数学、物理学、生物学和计算机科学等学科, 它不依赖梯度信息, 具有全局、并行、高效的优化性能, 鲁棒性和通用性强, 为解决大规模非线性问题提供了新的思路 and 手段^[1]。近年来, 国内外对智能优化算法的研究异常活跃, 新的优化算法不断出现: 1975年, Holland 提出了模仿生物种群中优胜劣汰机制的遗传算法(Genetic Algorithms, GA); 1977年, Glover 通过将记忆功能引入最优解的搜索过程, 提出了禁忌搜索(Tabu Search, TS)算法; 1983年, Kirkpatrick 基于对热力学中固体物质退火机制的模拟, 提出了模拟退火(Simulated Annealing, SA)算法; 1991年, Dorigo 等借鉴自然界中蚂蚁群体的觅食行为, 提出了蚁群优化算法(Ant Colony Algorithms, ACA); 1995年, Kennedy 和 Eberhart 受鸟群觅食行为启发, 提出了粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法, 还有免疫克隆选择算法(Clonal Selection Algorithm, CSA)、量子计算(Quantum Computing, QC)、国内学者李晓磊等提出的鱼群算法, 等等。

本文讨论智能优化算法在飞行器优化设计领域的应用。关于智能优化算法在飞行器优化设计领域应用的综述性文献并不多见,被广泛引用的是 Prabhath 在 1999 和 2002 年发表的两篇文章^[2-3],他总结了当时在飞行器设计优化领域较为流行的智能算法,包括遗传算法、模拟退火算法、神经网络等;文献[4]对当时飞行器优化设计领域已得到应用的智能优化算法进行了简要概述,主要是遗传算法;文献[5]对当时飞行器 MDO 中应用的几种智能优化方法做了简单介绍,但未总结应用情况;陈刚等对遗传算法在航天器轨迹优化中的应用进行了总结,分析了遗传算法在求解轨迹优化问题时的几个关键问题^[6]。本文从应用角度出发,结合近年来智能优化算法在飞行器优化设计领域的研究进展,阐述了几种典型智能优化算法的基本原理,分析了其优缺点,讨论了在基本算法基础上发展起来的常见改进算法,以国外为主,兼顾国内,总结了算法在飞行器优化设计相关的总体、轨迹、气动和控制等学科的应用情况,并对算法的未来发展和研究方向进行了展望。

1 遗传算法 (Genetic Algorithms)

1.1 基本原理

遗传算法 (Genetic Algorithms, GA) 是一种借鉴生物界自然选择和进化机制发展起来的高度并行、随机、自适应搜索算法,它使用群体搜索技术,将种群代表一组问题解,通过对当前种群施加选择、交叉和变异等一系列遗传操作,产生新一代种群,并逐步使种群进化到包含近似最优解的状态。GA 的数学理论基础是模式定理^[7]。标准遗传算法 (SGA) 的操作流程如图 1 所示。

具体说明如下:

(1) 产生初始种群:随机生成一定规模的初始群体,群体规模一般取为 50~200。

(2) 计算适应度函数:计算群体中每个个体的适应度函数,适应度函数一般根据目标函数来设计,遵循单值、连续、非负、最大化等准则。飞行器设计都是带约束的优化问题,常常利用罚函数法将约束条件进行适当处理,使其成为目标函数的一项,从而成为适应度函数的一项,以使有约束优化问题转化为无约束优化问题。

(3) 选择:根据每个个体的适应度函数和选择原则进行选择复制操作,其目的是使设计变量向最优值靠近。

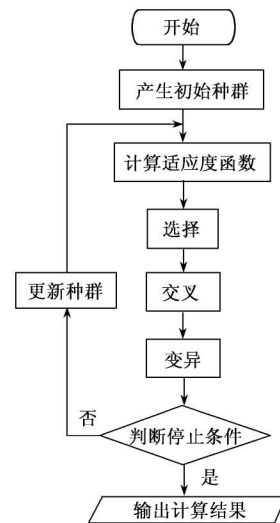


图 1 SGA 操作流程

Fig.1 Operational flowchart of SGA

(4) 交叉:根据交叉原则和交叉概率,进行双亲结合以产生后代,交叉概率一般取 0.4~0.9。

(5) 变异:根据变异原则和变异概率,对部分个体进行变异操作以产生新个体,变异概率一般取 0.01~0.25,该步操作目的是增加种群多样性,从而增强 GA 的局部寻优能力。

(6) 判断是否满足终止条件:终止条件一般取为遗传代数或设定的计算精度。

1.2 优缺点分析与改进

1.2.1 优点

(1) 自组织、自适应、自学习性。

(2) 较好的全局寻优性。GA 的概率选择原则,使其可以在整个设计空间同时开始寻优搜索,可以有效避免陷入局部最优解。

(3) 本质的并行性。GA 采用种群方式进行搜索,可以同时搜索设计空间内的某个区域,具有本质的并行性。

(4) 对搜索空间无特殊要求(如连通性、凸性等)。GA 不需要导数或其他辅助信息,而只需要影响搜索方向的目标函数和相应的适应度函数,因而,可用于求解无数值概念的优化问题。

(5) 较强的容错性。GA 通过选择、交叉、变异等操作,能够迅速排除与最优解相差很大的解。

1.2.2 缺点

(1) 早熟问题。由于 GA 单纯根据适应度函数决定解的优劣,使得适应度较大的个体在种群内迅速扩散,从而导致种群过早失去多样性,陷入局部最

优点。

(2) 局部寻优能力较差。GA 局部寻优能力较差,导致进化后期收敛速度变慢,甚至无法收敛到全局最优解。

(3) 交叉和变异无方向性。进化过程中,交叉和变异操作不能保证产生的新个体的优良性,若个体不够优良,反而会减慢收敛速度。

笔者在研究三级固体+液体末助推的多级运载火箭总体/动力/轨迹一体化优化问题时,以起飞质量最小为目标函数,采用 SGA 对 15 个设计变量进行寻优,优化结果尚不如作者根据经验值设计的结果,而采用自适应模拟退火遗传算法时,优化方案的起飞质量比总体单位提供的方案减小 12.1%,说明应用 SGA 解决实际工程优化问题时,对其不足进行改进十分必要。

1.2.3 算法的改进研究

针对 SGA 存在的缺点和不足,国内外学者在改进 GA 性能方面进行了大量研究,这些研究主要集中在在编码方式、控制参数确定、选择、交叉和变异方式、将 GA 与其余优化算法结合等几个方面。

在编码方式方面,出现了二进制编码、实数编码等方式。通过根据适应度函数及进化代数改进交叉概率和变异概率,提出了自适应遗传算法(Adaptive GA, AGA);通过引入生物学上的小生境概念,提出了小生境遗传算法(Niched GA, NGA),包括基于预选择机制的选择策略、基于排挤机制的选择策略、基于共享机制的选择策略等。

在混合遗传算法(Hybrid GA, HGA)研究方面,为改进 GA 局部寻优能力较差的缺点,加速全局收敛性,将 GA 与传统数值优化算法或其余智能优化算法相结合,例如,文献[8]提到的将 GA 与最速下降法结合的混合遗传算法;笔者在研究小型多级固体运载火箭轨迹优化时,以火箭液体末助推级燃料消耗最少为目标函数,将 GA 与具有强局部搜索性的 Powell 法相结合,构成串联式混合遗传算法,如图 2 所示,优化方案末助推级消耗的液体推进剂比总体单位提供的原方案减少 8.7%;通过与模拟退火算法结合,提出了模拟退火遗传算法(Simulated Annealing GA, SAGA);通过与免疫算法结合,提出了免疫遗传算法(Immune GA, IGA);通过将遗传算法与模糊优化理论相结合,产生了模糊遗传算法(Fuzzy GA, FGA),既增加了种群多样性,又通过模糊控制思想自适应改变种群规模、交叉和变异概率、适应度

函数等;通过引入混沌运动理论,产生了混沌遗传算法,增强了 GA 全局寻优能力;通过将遗传算法与量子计算原理相结合,提出了量子遗传算法(Quantum GA, QGA)^[1],实现了比 SGA 更好的寻优性能,等等。

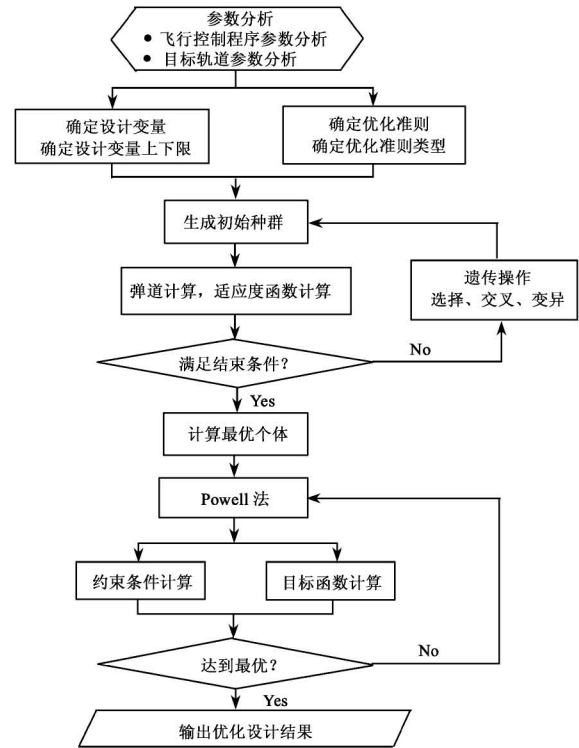


图 2 运载火箭轨迹优化设计流程

Fig.2 Launch vehicle trajectory optimization design flowchart

1.3 应用

遗传算法是飞行器优化设计领域应用最为广泛、最为成功的智能优化算法,鉴于基本遗传算法存在的不足,实际应用的基本都是改进遗传算法,或是将遗传算法与具有快速收敛特性的优化算法结合,或是将遗传算法与具有良好局部搜索特性的优化算法结合。

在轨迹优化领域,美国学者 Coverstone-Crroll V 较早利用 GA 研究了大气层外航天器低推力轨道转移问题^[9];Crain 等详细探讨了串行混合遗传算法在行星探测轨道优化设计中的应用^[10];Adam 等利用基于变量积分的局部搜索方法作为局部搜索算子,构造了镶嵌混合遗传算法,并将其应用于火星探测轨道优化设计问题^[11];Nobuhiro 等以为基于梯度的优化算法提供较好初值为目标,提出一种改进选择策略、实数编码的 GA,并将其应用于空天飞机再入段轨迹优化^[12];Robin 等研究了轨迹优化问题中 GA 参数设置问题,包括种群规模、交叉概率和变异概率

等, 研究表明, 种群规模是影响算法性能的最重要因素, 交叉概率和变异概率次之^[13]。陈刚等对 GA 在 RLV 再入轨迹优化中的应用进行了研究, 取得了一系列重要研究成果^[6,14]; 罗亚中等采用单纯形法作局部搜索算子, 对串行和镶嵌式混合遗传算法在运载火箭轨迹优化中的应用进行了深入研究^[15]; GA 相关研究还有高超声速飞行器轨迹优化^[16]、月球软着陆轨迹优化^[17]等。

在气动学科优化领域, Doorly 等最早提出将并行遗传算法 (Parallel GA) 用于机翼气动外形优化^[18]; Frederic 等以气动阻力最小为目标函数, 提出采用多样性保持模块来预防早熟现象的改进 GA, 对机翼-机身气动外形进行了优化^[19]; Abdurrahman 等将 GA 应用于翼型反设计^[20-21], 在文献^[20]中, 将实数编码的 GA 与神经网络相结合, 用于翼型反设计问题, 在收敛精度和鲁棒性得到保证的前提下, 搜索速度大大提高; Sriram 等提出一种基于目标规划的多目标遗传算法 (Multi-objective GA), 并将其应用于超声速飞行器气动外形和推进系统一体化设计优化^[22]。

在控制学科优化领域, Hull 最早采用 GA 对导弹自动驾驶仪控制器参数优化问题进行了研究^[23]; Mario 等采用精英选择策略对 GA 进行改进, 选用浮点数编码, 将其用于无人机控制器参数设计优化^[24]; Daisuke 等提出一种鲁棒性较好的、适应度函数中含自适应变化因子的 GA-变环境遗传算法, 为提高计算精度和速度, 引入 Powell 法作局部搜索算子, 并将其应用于无人机自动驾驶仪参数优化设计^[25]。

在总体优化设计领域, Anderson 等采用 pareto 遗传算法对固体火箭发动机导弹进行了优化设计, 考虑发动机、气动、控制等多个学科的 29 个设计变量, 包括最小脱靶量、最少拦截时间、最小起飞质量和最小过载等四个目标函数^[26]; Hartfield 等采用基于小生境技术的 pareto 遗传算法, 对固体助推的冲压发动机导弹进行了总体优化设计^[27]; Douglas 等采用和 Anderson 相同的遗传算法, 以起飞质量和成本最低为目标函数, 考虑发动机、气动、质量和弹道四个学科, 研究了多级固体运载火箭总体优化设计问题^[28]。

此外, GA 在飞行器发动机和结构等学科的优化设计中也得到广泛、成功应用。近年来, 改进 GA、GA 与传统优化算法相结合、GA 与其余智能优化算法相结合的优化算法在飞行器设计领域得到越来越广泛应用。

2 模拟退火算法 (Simulated Annealing)

2.1 基本原理

模拟退火算法 (Simulated Annealing, SA) 是一种模拟热力学中固体物质退火过程的启发式随机搜索算法。SA 算法的基本思想是将优化问题与统计力学中的热平衡作类比, 把优化的目标函数看做能量函数, 模拟物理退火过程, 由一个给定的初始高温开始, 基于具有概率突跳特性的 Metropolis 准则进行随机搜索, 最终得到全局最优解。与其他智能优化算法相比, SA 算法理论较为完善, 其收敛性可以基于 Maekov 过程进行分析。下面通过一个基本优化问题说明 SA 的基本操作流程。

优化问题描述为

$$\min f(x), x \in S$$

SA 算法的基本操作流程如图 3 所示。

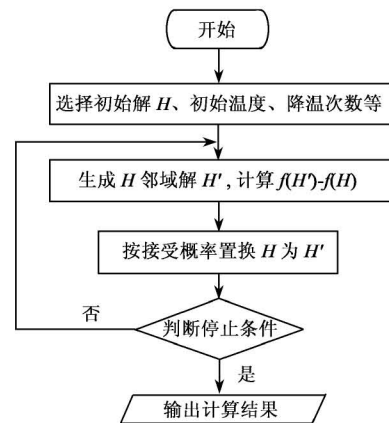


图 3 SA 算法操作流程

Fig.3 Operational flowchart of SA

流程图中, “按接受概率置换 H 为 H' ” 操作中的接受概率 P , 由统计物理学获得的 Metropolis 接受准则而来, 表达式为:

$$P = \begin{cases} 1 & f(H') \leq f(H) \\ \exp\left(\frac{f(H') - f(H)}{T_k}\right) & f(H') > f(H) \end{cases} \quad (1)$$

式中, T_k 为当前温度。

2.2 优缺点分析与改进

2.2.1 优点

(1) 既具有很好的局部寻优特性, 又具有较好的全局寻优特性。SA 算法在求解优化问题时, 不但接受优化解, 还以某种概率接受恶化解, 避免了过早收敛到局部极值点, 也正是这个特性, 使得 SA 算法能够跳出局部最优解, 从而得到全局最优解或近似

全局最优解。

(2) 通用性强。SA 算法适用范围广,可人为控制降温次数,反复求解,具有很强的通用性,可以用于求解各种优化问题。

2.2.2 缺点

(1) 收敛速度缓慢。虽然可以从理论上证明 SA 算法的收敛性,但其收敛速度很慢。

(2) 实际应用中往往寻得近似最优解。SA 算法对寻得最优解的条件要求较高,包括初始温度要足够高、终止温度足够低、降温过程足够慢等,这些条件在实际应用中很难同时得到满足。

2.2.3 算法的改进研究

针对基本 SA 算法存在的缺陷和不足,国内外学者在改进算法性能方面进行了大量研究,这些研究主要集中在降温函数的选取、邻域的生成、将 SA 算法与其余优化算法结合使用等几个方面。

针对 SA 算法收敛速度缓慢问题,提出了一些改进,例如,改进冷却进度表、加温退火法、有记忆的 SA 算法、两阶段 SA 算法^[29]等;通过采取自适应调整温度和搜索步长等策略,提出了自适应模拟退火算法(Adaptive Simulated Annealing, ASA),加快了搜索速度。

在 SA 与其余算法融合方面,将 SA 算法与基于梯度的优化算法相结合,先用 SA 算法搜索较好初值,然后利用梯度法快速精确寻优,既弥补了梯度法对初值敏感的缺点,也改进了 SA 算法收敛速度慢的不足;笔者在研究多级固体运载火箭上升段轨迹优化问题时,将 ASA 算法与序列二次规划方法(SQP)相结合,首先利用 ASA 算法产生“广义”的最佳可行解,作为 SQP 方法的初值,再利用 SQP 收敛性好、计算效率高、边界搜索能力强、能有效处理约束条件的优点进行寻优计算,取得了良好效果;为充分利用 GA 的全局寻优特性和 SA 算法强大的局部寻优特性,提出遗传模拟退火算法;通过将 SA 和免疫算法相结合,提出了免疫模拟退火算法(Immune SA, ISA),提高了算法收敛特性;通过与混沌算法相结合,提出混沌模拟退火算法,利用混沌算法确定初始温度和扰动准则,有效减小了搜索区域,使算法能更有效跳出局部最优解,等等。

2.3 应用

模拟退火算法也是飞行器优化设计领域应用较为广泛的智能优化算法,早在 1992 年, Tong 等人就

在用于复杂航空系统的优化设计软件中采用了 SA 算法^[30]。

在轨迹优化领域, LU Ping 等研究了连续 SA 算法在高性能战斗机轨迹优化问题中的应用^[31]; Kararli 等研究了单目标 SA 算法和多目标 SA 算法在运载火箭上升段轨迹优化中的应用,单目标优化以飞行时间最短为目标,多目标优化以入轨质量和入轨速度最大为目标^[32];陈刚等利用 SA 算法思想设计 GA 约束处理时的惩罚因子,研究了机动弹头再入轨迹优化问题^[33]。SA 算法的应用还包括导弹轨迹优化^[34]、连续低推力轨迹优化^[35]等。

SA 算法较早应用于气动外形优化设计大约是在 1996 年, Sherif 等将改进的 SA 算法应用于气动外形优化设计问题^[36]; Jenn-Long 等将 SA 算法与部分因子分析法相结合,提出一种新的 Taguchi-SA 算法,并将其应用于机翼气动外形设计优化,结果表明,优化设计的飞机气动性能参数,明显优于采用基本 SA 算法的设计结果^[37]; X. Wang 等对并行 SA 算法在气动外形优化设计中的应用进行了深入研究^[38]。

在控制学科优化领域, Tushikazu 等研究了 SA 算法在飞行控制系统参数优化问题中的应用,并以无人驾驶再入飞行器控制系统为例进行了验证,结果表明, SA 算法比下山单纯形法(downhill-simplex)优化效果更好,而和 GA 相比,计算代价较小^[39]; Rizk 等研究了 SA 算法在空对地导弹模糊控制器设计中的应用^[40]。

此外, SA 算法在发动机设计和结构等学科的优化设计中也得到了应用。

3 粒子群优化(Particle Swarm Optimization)算法

3.1 基本原理

粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法是一种基于群体智能理论的全局优化算法,也称微粒群算法。在 PSO 算法中,群体中每个粒子都有一个速度,并根据速度在搜索空间运动,同时,每个粒子都有一个记忆单元,记下它曾到达过的最优位置。整个寻优过程就是粒子根据其先前到达过的最优位置和其邻域中其他粒子到达过的最优位置来改变自己位置和速度,最终趋向全局最优值的聚集加速过程。目前, PSO 算法严格的数学基础正在逐步建立^[1]。标准 PSO 算法的操作流程如图 4 所示。

关于流程图中的几点说明如下:

(1) 粒子群体初始化:随机生成一定规模的粒

子群体,并设定粒子的初始位置和速度;PSO 算法对群体规模大小不十分敏感,一般取为 30~50,对于多模态函数优化问题可以取 100~300。

(2) 适应度函数:与 GA 类似,每个粒子都有一个由目标函数决定的适应值。

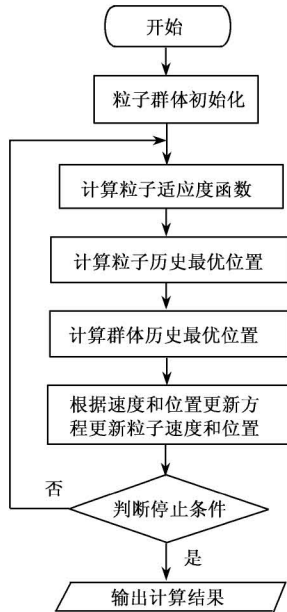


图 4 标准 PSO 算法流程

Fig. 4 Operational flowchart of standard PSO

(3) 速度和位置更新方程:设在第 k 次迭代中,对于第 i 个粒子 P_i ,第 j 维的速度和位置分别为 v_{ij}^k 和 x_{ij}^k , P_i 目前所找到的最优解 $pbest$ 在第 j 维的坐标为 $pbest_j^k$,整个种群目前所找到的最优解 $gbest$ 在第 j 维的坐标为 $gbest_j^k$,则 P_i 根据如下公式来更新自己的位置和速度,

$$v_{ij}^{k+1} = v_{ij}^k + c_1 * r_1 (pbest_j^k - x_{ij}^k) + c_2 * r_2 (gbest_j^k - x_{ij}^k) \quad (2)$$

$$x_{ij}^{k+1} = x_{ij}^k + v_{ij}^{k+1} \quad (3)$$

式中, c_1 和 c_2 是学习因子,通常取 $c_1, c_2 \in [0, 4]$,其取值对算法收敛性影响不大,只是合适取值可以加快收敛速度; r_1 和 r_2 是介于 $[0, 1]$ 之间的均匀随机数,用于保证群体的多样性。

3.2 优缺点分析与改进

3.2.1 优点

(1) PSO 算法没有交叉和变异操作,依靠粒子速度完成搜索,收敛速度较快。

(2) PSO 算法具备有效地全局和局部搜索的平衡能力,能够有效避免早熟。

(3) PSO 算法采用同时处理粒子群中多个粒子的方法,可以同时搜索设计空间中的某个区域,具有本质的并行性。

(4) PSO 算法采用实数编码,直接在问题域上进行求解,且需设置的参数较少,调整方便,因此算法简单,易于工程实现。

3.2.2 缺点

(1) PSO 算法易陷入局部极值点。

(2) PSO 算法搜索精度不高。

(3) PSO 算法高效的信息共享机制可能导致粒子寻优时过分集中,使粒子都移向某个全局最优点,从而不能用于多模态函数优化。

(4) PSO 算法求解带离散变量的优化问题时对离散变量的取整可能导致大的误差。

3.2.3 算法的改进研究

针对基本 PSO 算法存在的缺点和不足,国内外学者在改进算法性能方面进行了大量研究,研究可以归纳为两个方面,一是将各种先进理论引入 PSO 算法,研究改进的 PSO 算法,二是将 PSO 算法和其余优化算法相结合。

在改进算法本身方面,Shi Y 等引入惯性权重概念,建立 PSO 算法的惯性权重模型,在此基础上提出了自适应粒子群优化算法(Adaptive PSO, APSO)和模糊粒子群优化算法(Fuzzy PSO, FPSO),使算法的全局寻优特性得到很大提高^[41];通过引入小生境概念,提出小生境粒子群优化算法(Niched PSO, NPSO),提高了局部搜索能力;文献[42]介绍了一种带收敛因子的 PSO 优化算法,力图避免 PSO 算法易陷于局部最小值的缺点;相关的典型改进算法还有混沌粒子群优化算法、带邻域操作的粒子群优化算法以及灰色粒子群优化算法等。

在与其他优化算法的融合方面,通过将遗传算子与基本粒子群优化算法结合,提出了杂交和混合粒子群优化算法,提高了算法的全局寻优能力;通过将模拟退火思想引入 PSO 算法,提出了基于模拟退火的 PSO 算法,改善了算法易陷入局部极值点的缺点,同时提高了算法的收敛速度;通过将 PSO 算法与免疫算法相结合,提出了免疫粒子群优化算法(Immune GA, IGA),提高了算法的收敛特性;等等。

3.3 应用

和其他智能优化算法往往首先应用于组合优化

领域不同,粒子群算法从一开始就是求解函数优化问题的有力工具,因此,其在飞行器设计领域的应用虽然起步相对较晚,但近年来呈迅速发展趋势,并已几乎涉及到各个学科。

在轨迹优化领域,Bessette 等将 PSO 算法应用于航天器最优轨道转移问题,并同差分进化算法和 CMA-ES 算法优化结果进行了对比,表明 PSO 算法具有较好的全局寻优性能和较高的寻优效率^[43];Roberto 等将 PSO 算法应用于气动-引力辅助变轨航天器轨迹和气动外形一体化优化问题,得到了多目标优化问题的 Pareto 优化解集合^[44];Mateen-ud-Din 等将 PSO 算法与 SQP 方法相结合,利用 PSO 算法为 SQP 方法产生适当初值,并将算法应用于多级运载火箭上升段轨迹优化,优化结果证明了算法的有效性^[45];Al-Garni 等将 PSO 算法与 GA 相结合,提出一种混合启发式搜索算法,并将其应用于空天飞机上升段轨迹优化,仿真结果表明,算法具有较好的鲁棒性、收敛精度和收敛速度^[46]。

在气动学科优化领域,Venter 等较早将 PSO 算法引入飞行器气动外形优化设计领域,研究了 PSO 算法在机翼外形设计中的应用,考虑气动和结构学科,数值计算结果表明,针对带离散设计变量和数值杂讯(Numerical Noise)的优化问题,PSO 算法能够寻得全局最优解,能够应对 MDO 面临的挑战^[47];Kazu-hisa 等研究了 PSO 算法与 GA 相结合的混合优化算法在机翼外形设计中的应用,考虑气动、结构和声学三个学科,优化问题含 5 个目标函数,58 个设计变量^[48];王允良等研究了 PSO 算法与 GA 相结合的混合优化算法,并将其应用于 RLV 和 CAV 气动外形设计问题^[49-50]。

在控制学科优化领域,Byoung 等将 PSO 算法与 SQP 方法相结合,利用 PSO 算法为 SQP 产生适当初值,并将算法应用于空空导弹自动驾驶仪设计,设计的自动驾驶仪控制性能优于采用经典设计方法的设计结果^[51];Tae 等针对上面级采用反作用推力器作为姿态控制系统的运载火箭,采用 PSO 算法设计 8 个推力器布局,仿真结果表明,优化得到的推力器布局使姿态控制效率得到很大提高^[52]。

此外,PSO 算法也已应用于飞行器结构优化设计等领域。作为一个年轻的、具有很大开发潜力的智能优化算法,PSO 算法在飞行器优化设计领域的

应用还有很大的拓展空间,随着算法速度和位置构造、参数设计等数学理论的逐步成熟,其应用会越来越受到重视。

4 蚁群算法(Ant Colony Algorithm)

4.1 基本原理

蚁群算法(Ant Colony Algorithms, ACA)源于昆虫学家对自然界群居性昆虫蚂蚁觅食行为的研究:蚂蚁在觅食时,能在其走过的路径上释放一种蚂蚁特有的分泌物—信息素(pheromone),使得一定范围内的其他蚂蚁能觉察,并影响其行为,当某些路径上通过的蚂蚁越来越多时,留下的信息素也就越来越多,以致后来的蚂蚁选择该路径的概率也就越来越高,蚂蚁就是靠这种内部的正反馈生物协调机制,逐渐找出一条从窝巢到食物源的最短路线。蚁群算法从这种模型中得到启示,并用于解决优化问题。蚁群优化算法中,每个优化问题的解都是搜索空间的一只蚂蚁,蚂蚁都有一个由优化的目标函数决定的适应度函数值(与释放的信息素成正比),蚂蚁根据周围信息素的多少决定搜索方向,并在搜索过的路径上释放信息素以影响别的蚂蚁。

根据作者研究体会,在飞行器设计相关的轨迹和控制等学科,实数编码的小生境蚁群算法(NACA)优化效果较好,且易于编程实现,其设计思想和方法可参见文献[1]。

4.2 优缺点分析

ACA 具有如下优点:

- (1) ACA 是一种正反馈算法,这是蚁群算法最显著的特点;
- (2) ACA 本质上一种分布式并行算法。
- (3) ACA 具有较好的全局寻优特性。
- (4) ACA 对优化问题无严格的数学要求。不求搜索空间连续、可导等,也不要求目标函数和约束条件有精确的数学描述。
- (5) ACA 具有较好的鲁棒性。

作为一种新兴的智能优化算法,ACA 同样存在一些缺点:

- (1) ACA 收敛速度一般较慢。
- (2) ACA 对初始参数的设置比较敏感。
- (3) ACA 容易出现停滞现象,即搜索进行到一定程度后,所有个体发现的解完全一致,导致不能对

解空间进行进一步搜索,从而不利于发现更好的解。

4.3 应用

虽然早在 1991 年, Dorigo 等就提出了 ACA 算法,但直到 1996 年后,算法才逐渐受到国际学术界广泛关注,2000 年, Dorigo 等在《Nature》上发表了 ACA 的研究综述,将这一研究推向国际学术界前沿。ACA 在飞行器优化设计领域的应用起步也较晚,且主要是在飞行器航迹规划领域,近两年才在其余学科的优化设计中开始应用,但可以看出,国内外研究人员正在积极拓展其应用范围。

在轨迹优化领域,段佳佳等利用增加了局部搜索策略的十进制 ACA,研究了最省燃料月球软着陆轨迹优化问题,仿真结果表明,算法能快速搜索到满足终端约束条件的最优轨迹,具有较好的全局和局部搜索能力,与采用极大值原理得到的轨迹燃料消耗相当,而与采用自适应模拟退火遗传算法相比,在精度相当的情况下,蚁群算法收敛速度较快^[53]; ZHANG Qingzhen 等利用 ACA 研究了 RLV 再入轨迹优化问题,目标函数为最小热载^[54]。

在控制学科优化领域,段海滨等采用相遇搜索策略和信息素残留系数自适应控制思想,对基本 ACA 算法进行了改进,并将其应用于飞行仿真转台非线性 PID 控制参数优化问题,实验结果证明,提出的方案能提高控制系统设计品质,降低控制系统设计难度^[55]; Nobahari 等将多目标 ACA 应用于导弹 CLOS 导引律参数优化问题,对导引律中段和末段用模糊控制器参数进行了设计,同传统方式设计结果对比表明了算法的优越性^[56]。

此外,ACA 在飞行器结构优化领域也已有应用。相对于各种比较成熟的群智能优化算法来说,ACA 研究和应用还处于初级阶段,存在种种需要深入研究和解决的问题,但可以预言,蚁群算法代表了未来群智能算法在飞行器优化设计领域应用的一个重要方向。

5 结论与展望

当前,智能优化算法在飞行器优化设计领域正得到越来越广泛应用,很多智能优化算法,已经从开始时只是在飞行器优化设计某一学科应用,发展为在多个学科的普遍应用,一些新兴的智能优化算法也在组合优化等领域成功应用的基础上,逐渐应用

于函数优化领域,进而在飞行器优化设计领域开始得到应用。

根据对国内外研究现状的研究和作者及作者所在课题组的研究工作体会,今后一段时期内,智能优化算法在飞行器优化设计领域的应用将重点集中在以下几个方面:

(1) 混合智能优化算法的应用

1997 年,斯坦福大学 Wolpert 和 Macready 教授提出了优化领域意义深远的 NFL(NO Free Lunch)定理^[57],根据 NFL 定理,单一优化算法都有其应用的优势与不足,算法之间存在互补性,不存在占绝对优势的优化算法。从解决实际优化问题角度出发,融合不同类型机制的优化算法,充分发挥它们各自优势,是解决问题的必然发展趋势。智能优化算法也不例外,从上述文献研究来看,十几年来,国内外学者正是采用智能优化算法和经典优化算法相结合、智能优化算法与智能优化算法相结合、智能优化算法与试验设计算法相结合等各种算法混合策略,成功解决了飞行器优化设计领域的大量实际工程问题,这一研究方向必将受到高度关注。

(2) 改进算法及其应用

智能优化算法大多给出的只是一个基本的计算思想和步骤,针对各种智能优化算法存在的缺点与不足进行改进,历来是国内外学者极为重视的研究方向,研究成果在反映智能优化算法最新研究进展的国际著名期刊《IEEE Trans on Evolutionary Computation》、《Evolutionary Computation》、《International Journal of Systems Science》,以及国内重要核心期刊《控制与决策》、《软件学报》、《自动化学报》等期刊近年刊登的论文中得到充分体现,上述飞行器优化设计领域的文献综述也表明了这一特点,根据实际应用不断改进和完善算法流程的关键操作节点、控制参数选择、约束条件处理等仍有很大的创新空间,例如,为 GA 设计新的遗传算子,为 SA 算法设计新的冷却策略,为 PSO 算法设计新的速度更新方程,调整 ACA 中信息素表示、分布及存在方式以使其能较好的应用于连续域优化问题等,仍是智能优化算法尤其是新兴智能优化算法在飞行器优化设计中应用的重要研究内容,此外,算法的并行性研究及其在飞行器 MDO 中的应用也正在成为一个重要的研究方向。

(3) 新的智能优化算法的应用

这里所谓的新的智能优化算法包括两层含义,一是有些智能优化算法有着鲜明的特色优点,在其余工程问题的应用中也表现出了良好的寻优特性,和其余智能优化算法相比,提出时间也不晚,但在飞行器优化设计领域的应用尚未得到足够重视,应用潜力尚待开发,例如禁忌搜索算法(Tabu Search, TS),它在1989年后就已开始引起学术界的广泛关注,是在搜索过程中引入记忆功能的先驱^[58],具有爬山能力好、全局寻优和局部寻优能力能较好平衡等优点,与GA、SA、ACA等相结合,形成了更为有效的混合智能优化算法,在求解很多实际应用问题时都取得了相当成功,包括飞行器航迹规划领域,但目前还只是在飞行器优化设计相关的轨迹、气动等个别学科中有极少应用。二是伴随着近年来智能优化算法的研究热潮,出现了一些新的、已被证明具有良好寻优特性、且在很多领域已经得到成功应用的智能优化算法,例如免疫克隆选择算法(Immune Clonal Selection Algorithm, ICSA)、捕食搜索(Predatory Search, PS)算法^[59]等,将这些算法引入飞行器优化设计领域是很有意义的研究方向。

参考文献:

- [1] 黄友锐. 智能优化算法及其应用[M]. 北京:国防工业出版社,2008.[HUANG You-rui. Intelligent Optimization Algorithm and Its Application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008 (in Chinese).]
- [2] Prabhat Hajela. Nongradient methods in multidisciplinary design optimization—status and potential[J]. Journal of Aircraft, 1999, 36(1):255–265.
- [3] Prabhat Hajela. Soft computing in multidisciplinary aerospace design—new directions for research[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2002, 38(1):1–21.
- [4] 罗亚中. 系列化运载火箭总体优化技术研究[D].长沙:国防科学技术大学,2003.[LUO Ya-zhong. System optimization design technology for series launch vehicle[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2003,1.
- [5] 李晓斌, 陈小前, 张为华. 多学科设计优化中搜索策略研究[J]. 战术导弹技术, 2004(2):1–6.[LI Xiao-bin, CHEN Xiao-qian, ZHANG Wei-hua. Study of search strategy for multidisciplinary design optimization[J]. Tactical Missile Technology, 2004(2):1–6 (in Chinese).]
- [6] 陈刚, 万自明, 徐敏, 等. 遗传算法在航天器轨迹优化中的应用[J]. 弹道学报, 2006, 18(1):1–5.[CHEN Gang, WAN Zi-ming, XU Min, et al. Overview of spacecraft trajectory optimization using genetic algorithm[J]. Journal of Ballistics, 2006, 18(1):1–5 (in Chinese).]
- [7] Holland J H. Adaptation in Natural and Artificial System[M]. Ann Arbor:MIT Press,1975.
- [8] 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,2002.[WANG Xiao-ping, CAO Li-ming. Genetic Algorithm—Theory, Application and Implementation[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002(in Chinese).]
- [9] Coverstone-Crroll V. Near-optimal low-thrust trajectories optimization via microgenetic algorithms[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1996, 20(1):196–198.
- [10] Crain T P, Bishop R H, Fowler W T, et al. Interplanetary flyby mission optimization using a hybrid global/local search method[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2000, 37(4):468–473.
- [11] Adam W, Tim C, Ellen B. Genetic algorithm and calculus of variations-based trajectory optimization technique[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2003, 40(6): 882–888.
- [12] Nobuhiro Yokoyama, Shinji Suzuki. Trajectory optimization via modified genetic algorithm[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Austin, Texas, 2003: 1–9.
- [13] Robin G J Biesbroek, Biagio P Ancarola. Study of genetic algorithm settings for trajectory optimization[C]//54th International Astronautical Congress of IAF/IAA/IISL, Bremen, Germany, 2003: 1–10.
- [14] 陈刚, 万自明, 胡莹, 等. 基于遗传算法的RLV再入轨迹优化设计[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(8): 1240–1243.[CHEN Gang, WAN Zi-ming, HU Ying, et al. Genetic algorithm optimization of RLV reentry trajectory[J]. Systems Engineering and Electronics, 2006, 28(8):1–5(in Chinese).]
- [15] 罗亚中, 唐国金, 周黎妮. 混合遗传算法及其在运载火箭最优上升轨道设计中的应用[J]. 国防科技大学学报, 2004, 26(2): 5–8.[LUO Ya-zhong, TANG Guo-jin, ZHOU Li-ni. Hybrid genetic algorithm and its application to the optimal ascent trajectory design of the vehicle[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2004, 26(2):5–8(in Chinese).]
- [16] 周浩, 周韬, 陈万春, 等. 高超声速滑翔飞行器引入段弹道优化[J]. 宇航学报, 2006, 27(5): 970–973.[ZHOU Hao, ZHOU Tao, CHEN Wan-chun, et al. Trajectory optimization in injection phase for hypersonic gliding vehicle, 2006, 27(5): 970–973 (in Chinese).]
- [17] 朱建丰, 徐世杰. 基于自适应模拟退火遗传算法的月球软着陆轨道优化[J]. 航空学报, 2007, 28(4): 806–812.[ZHU Jian-feng, XU Shi-jie. Optimization of lunar soft landing trajectory based on adaptive simulated annealing genetic algorithm[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(4): 806–812(in Chinese).]
- [18] Doorly D J, Jpeiro. Supervised parallel genetic algorithm in aerodynamic optimisation[C]//13th AIAA Computational Fluid Dynamics FD Conference, Snowmass villiage, CO, 1997: 210–216.
- [19] Frederic Thivet, Yan Kergaravat, Doyle D, Knight. Toward aerody-

- namical optimization of a supersonic airplane using genetic algorithm and a PNS solver [C]//20th AIAA Applied Aerodynamics Conference, St. Louis, Missouri, 2002: 1 – 8.
- [20] Abdurrahman. Augmented genetic algorithm with neural network and implementation to the inverse airfoil design [C]//10th AIAA/SSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, Albany, New York, 2004: 1 – 8.
- [21] Volkan Y, Abdurrahman. Inverse design of 2 – D airfoil via vibrational genetic algorithm [J]. *Journal of Aeronautics and Space Technologies*, 2006, 2(4): 7 – 14.
- [22] Sriram K Rallabhandi, Dimitri N Mavris. Simultaneous airframe and propulsion cycle optimization for supersonic aircraft design [J]. *Journal of Aircraft*, 2008, 45(1): 38 – 55.
- [23] Richard A Hull. Application of a genetic algorithm to the optimization of missile autopilot controller for performance criteria with non-analytic solutions [D]. Orlando: University of Central Florida, 1993.
- [24] Mario G, Perhinschi. A modified genetic algorithm for the design of autonomous helicopter control system [C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Boston, MA, 1997: 1646 – 1656.
- [25] Daisuke Kubo, Shinji Suzuki. Transitional flight control using a neural network optimized with a variable environment genetic algorithm [C]//46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, 2008: 1 – 11.
- [26] Anderson M B, Burkhalter J E, Jenking R M. Design of a guided missile interceptor using genetic algorithm [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2001, 38(1): 28 – 35.
- [27] Roy J Hartfield, Rhonald M Jenkins, J E Burkhalter. Optimizing a solid rocket motor boosted ramjet powered missile using genetic algorithm [C]//41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Tucson, Arizona, 2005: 1 – 10.
- [28] Douglas J Bayley, Roy J Hartfield, J E Burkhalter, et al. Design optimization of a space launch vehicle using genetic algorithm [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2008, 45(4): 733 – 740.
- [29] Varanelli J M. On the acceleration of simulated annealing [D]. USA: University of Virginia, 1996.
- [30] Tong S S, Powell D, Goel S. Integration of artificial intelligence and numerical optimization techniques for the design of complex aerospace systems [C]//Aerospace Design Conference, 1992: 1 – 11.
- [31] Ping Lu, M Asif Khan. Nonsmooth trajectory optimization: an approach using continuous simulated annealing [J]. *Journal of Guidance, Control and Dynamic*, 1994, 17(4): 685 – 691.
- [32] Karsli G, Tekinalp. Trajectory optimization of advanced launch system [C]//Recent Advances in Space Technologies, Proceedings of 2nd International Conference, 2005: 374 – 378.
- [33] 陈刚, 徐敏, 万自明, 等. 具有内点状态约束的机动再入弹道优化设计 [J]. *固体火箭技术*, 2006, 29(2): 79 – 82. [CHEN Gang, XU min, WAN Zi-ming, et al. Maneuver reentry trajectory optimization with inner state constraints [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2006, 29(2): 79 – 82 (in Chinese).]
- [34] Ozan Tekinalp, Muge Bingol. Simulated annealing for missile optimization: developing method and formulation techniques [J]. *Journal of Guidance, Control and Dynamic*, 2004, 27(4): 616 – 626.
- [35] Mischa Kim. Continuous low-thrust trajectory optimization: techniques and application [D]. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2002.
- [36] Sherif Aly, Madara Ogot, Richard Pelz. Stochastic approach to optimal aerodynamic shape design [J]. *Journal of Aircraft*, 1996, 33(5): 956 – 961.
- [37] Jenn-Long Liu. Novel taguchi-simulated annealing method applied to airfoil and wing planform optimization [J]. *Journal of Aircraft*, 2006, 43(1): 102 – 109.
- [38] Wang X, Damodaran M. Aerodynamic shape optimization using computational fluid dynamics and parallel simulated annealing algorithms [J]. *AIAA Journal*, 2001, 38(8): 1500 – 1508.
- [39] Tushikazu Motoza, Robert F Stengel, Yushikazu Miyazawa. Robust control system design using simulated annealing [J]. *AIAA Journal*, 2002, 25(2): 267 – 274.
- [40] Rizk, M R M. Learning Air-to-ground integrated fuzzy guidance system using simulated annealing [C]//National Radio Science Conference, 2008: 1 – 10.
- [41] Shi Y, Emberhart R C. Fuzzy adaptive particle swarm optimization [C]//Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation, 2001, 1: 101 – 106.
- [42] Emberhart R C, Shi Y. Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization [C]//Proceedings of the the 2000 Congress on Evolutionary Computation, 2000, 1: 84 – 88.
- [43] Bessette C R, Spencer D B. Optimal space trajectory design: a heuristic-based approach [C]//AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting, Tampa, FL, 2006: 1 – 8.
- [44] Roberto Armellin, Michele Lavagna, Ryan P Starkey, et al. Aero-graviyy-assist maneuvers: coupled trajectory and vehicle shape optimization [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2007, 50(168): 113 – 120.
- [45] Mateen-ud-Din Qazi, He Linshu, Tarek Elhajian. Rapid trajectory optimization using computational intelligence for guidance and conceptual design of multistage space launch vehicles [C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, San Francisco, California, 2005: 1 – 18.
- [46] Al-Garni Ahmed, Kassem Ayman Hamdy. On the optimization of aerospace plane ascent trajectory [J]. *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, 2007, 50(168): 113 – 120.
- [47] Venter G, Sobieszczanski-Sobieski J. Multidisciplinary optimization of a transport aircraft wing using particle swarm optimization [C]//9th AIAA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization, Atlanta, Georgia, 2002: 1 – 11.
- [48] Kazuhisa Chiba, Yoshikazu Makino, Takeshi Takatoya. Multidisciplinary

- nary design exploration of wing shape for silent supersonic technology demonstrator[C]//25th AIAA Applied Aerodynamics Conference, Miami, FL, 2007: 1-19.
- [49] 王允良, 张勇, 李为吉, 唐伟. 可重复使用运载器机翼外形优化[J]. 宇航学报, 2004, 25(5): 488-491. [WANG Yun-liang, TANG Wei, ZHANG Yong, LI Wei-ji. Wing shape optimization of the reusable launch vehicle[J]. Journal of Astronautics, 2004, 25(5): 488-491(in Chinese).]
- [50] WANG Yun-liang, TANG Wei, ZHANG Yong, LI Wei-ji. Aerodynamic configuration optimization of a common aero vehicle[J]. Journal of Astronautics, 2006, 27(4): 709-713.
- [51] Byoung-Mun Min, Hyeok Ryu, Daekyu Sang, et al. Autopilot design using hybrid PSO-SQP algorithm[C]//3rd International Conference on Intelligent Computing, Qingdao, China, 2007: 596-604.
- [52] Tae Won Hwang, Chang-Su Park, Min-Jea Tahk, Hoyochoong Bang. Upper-stage launch vehicle servo controller design considering optimal thruster configuration[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Austin, Texas, 2003: 1-18.
- [53] 段佳佳, 徐世杰, 朱建丰. 基于蚁群算法的月球软着陆轨迹优化[J]. 宇航学报, 2008, 29(2): 476-481. [DUAN Jia-jia, XU Shi-jie, ZHU Jian-feng. Optimization of lunar soft landing trajectory based on ant colony algorithm[J]. Journal of Astronautics, 2004, 25(5): 488-491(in Chinese).]
- [54] ZHANG Qing-zhen, LIU Cun-jia, YANG Bo, et al. Reentry trajectory planning optimization based on ant colony algorithm[C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Sanya, China, 2007: 1064-1068.
- [55] 段海滨, 王道波, 于秀芬. 基于改进蚁群算法的飞行仿真转台控制优化[J]. 中国空间科学技术, 2007, 27(4): 28-34. [DUAN Hai-bin, WANG Dao-bo, YU Xiu-fen. Study on the improved ACA based parameters optimization of NLPID controller for flight simulator[J]. Chinese Space Science and Technology, 2007, 27(4): 28-34(in Chinese).]
- [56] Hadi Nobahari, Said H Pourtakdoust. Reentry an optimal fuzzy two-phase CLOS guidance law design using ant colony optimisation[C]. Aeronautical Journal, 2007, 111(1124): 621-636.
- [57] Wolpert David H, William G Macready. No free Launch theorems for optimization[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1997, 1(168): 67-82.
- [58] 王凌. 智能优化算法及其应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2001. [HUANG You-rui. Intelligent Optimization Algorithm and Its Application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001(in Chinese).]
- [59] 汪定伟, 王俊伟, 王洪峰, 等. 智能优化方法[M]. 北京:高等教育出版社, 2007. [WANG Ding-wei, WANG Jun-wei, WANG Hong-feng, et al. Intelligent Optimization Methods[M]. Beijing: Higher Education Press, 2007(in Chinese).]

作者简介:杨希祥(1982-),男,博士研究生,研究方向为飞行器总体优化设计。
通信地址:长沙国防科技大学一院六队(410073)
电话:(0731)84576482
E-mail:nkyangxixiang@163.com

Overview of Intelligent Optimization Algorithm and Its Application in Flight Vehicles Optimization Design

YANG Xi-xiang¹, LI Xiao-bin², XIAO Fei¹, ZHANG Wei-hua¹

(1. College of Aerospace and material engineering, NUDT, Changsha 410073, China;

2. Scientific Research Post-doctor Workstation of Unit 92493 CPLA, Huludao 125000, China)

Abstract: Flight vehicles optimization design using intelligent optimization algorithm is a highlighted research direction, however, papers about the overview of this field are very few. Based on the systematic research on related literatures, the paper presented the basic principle of several intelligent optimization algorithms widely used in flight vehicles optimization design, analyzed the advantages and disadvantages, discussed the method for improving them, and summarized their applications in the optimization design of trajectory, aerodynamics and control system of flight vehicles. Meanwhile, the paper introduced the principle and applications of several promising new intelligent optimization algorithms used in flight vehicles optimization design. In the end, the paper discussed the development directions of intelligent optimization algorithm in flight vehicles optimization design.

Key words: Intelligent optimization algorithm; Flight vehicle; Optimization design; Overview