# 飞机总体协同优化中的一种混合混沌算法

周盛强 向锦武

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100083)

**摘 要**: 针对协同优化应用中所碰到的计算困难,分析了现有改进方式。将系统级优化转化成无约束优化问题,选择智能优化算法是一种有效的解决方法,但应注意计算量的控制. 将混沌优化和单纯形法相结合,构造出一种混合混沌算法. 混沌能有效地跳出局部最优解而接近全局最优点,同时利用单纯形法在混沌优化解的邻域内局部寻优. 用协同优化方法对某型干线客机进行总体方案设计;同时各学科级采用序列二次规划法,系统级采用混合算法寻优. 计算结果表明此方法是有效的.

**关 键 词**: 协同优化; 飞机设计; 混沌; 单纯形法

**中图分类号**: TP 391; V 221$^{+}$.6

**文献标识码**: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)08-0908-04

# Chaos-simplex-based hybrid algorithm to collaborative optimization of aircraft design

Zhou Shengqiang Xiang Jinwu

(School of Aeronautic Science and Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**Abstract**: Corresponding to computational difficulties encountered in the applications of CO(collaborative optimization), existing solutions were concluded. With transformed the system level optimization to unconstrained optimization problem, intelligence optimization algorithms should be chosen, but the computational burden should be controlled. A hybrid search algorithm was composed of chaos optimization and simplex method. Chaos could escape from local minima and approach the global minima, and simplex method was used to perform the local search in the neighborhoods of chaos optimization results. It was studied how to apply the CO to the conceptual design of a trunkliner. The subsystem levels were optimized by SQP(sequential quadratic programming), and the system level by the hybrid search algorithm. The numeric result indicates that the approach is effective.

**Key words**: collaborative optimization; aircraft design; chaos; simplex method

飞机设计是一个循序渐进的过程,可分为方案设计(也称概念设计)、初步设计和详细设计三个阶段[1]. 飞机方案设计的最终目的是给定最优的飞机总体方案,其基础是方案分析. 由于方案分析的复杂性,一般根据专业领域将分析模型划分为若干个模块,组成模块之间存在着耦合关系,因此方案分析是一个迭代过程,对于复杂的分析模型,方案分析将花费较多的计算时间.

协同优化 CO(Collaborative Optimization)[2]从基于分布式分析思想的一致性约束优化方法发展而来,是一种多级优化方法. 各学科(子系统)之间无直接联系,仅通过系统级交换信息,消除了复杂的系统分析过程,可以实现并行分布式设计,较好地解决了多学科设计优化问题面临的计算复杂性和组织复杂性这两大难题.

本文首先简单介绍协同优化方法,综述了针对协同优化应用中计算困难问题的改进方式,提出使用将单纯形嵌入混沌优化的一种混合优化算法,以提高计算效率和有效获得全局最优解. 然后以干线客机的方案设计为例,对含气动、重量两个

**收稿日期**: 2005-09-26

**基金项目**: 新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET204201Q)

**作者简介**: 周盛强(1975-),男,江西安福人,博士生, zsq@ase.buaa.edu.cn.

学科级的协同优化问题进行求解;并在系统级优化中,使用混合优化算法. 最后对计算结果进行了讨论.

## 1　协同优化及其改进方法

协同优化方法,将原优化设计问题分为两层,一个系统级和并行的多个学科级. 将多学科变量 $z$(共享设计变量和耦合状态变量)放在系统级进行优化. 在学科级优化中,优化变量为与本学科相关的多学科变量的副本变量 $x$、及只属于本学科的局部设计变量 $\bar{x}$,只需满足本学科级的约束,优化目标是减少与系统级提供的目标变量之间的差异. 系统级优化的目标是使整个系统目标最优,并通过等式约束条件来保证多学科变量的一致性. 通过系统级优化和学科级优化之间的多次迭代,最终找到一个各学科级之间的耦合状态变量和共享设计变量一致的最优设计. 其基本构架如图 1.

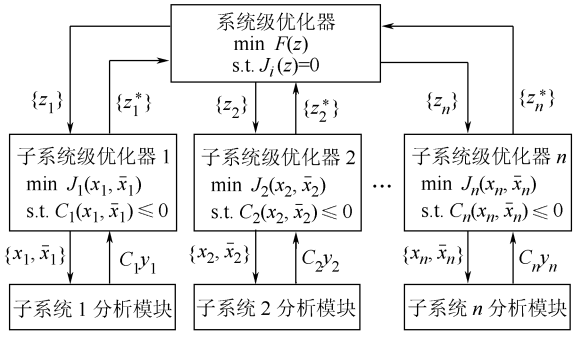



图 1　协同优化的基本构架

应用中发现,使用某些优化算法求解分解后的协同优化问题,优化结果对初始点的选取敏感,效率低甚至无法收敛. 计算困难不是这些优化算法本身的问题,而在于它们不适合于协同优化的特定表述方式. 由于系统级优化的一致性约束函数 $J_i(z)$ 与优化变量 $z$ 之间没有直接的关系,约束函数可能是非光滑的,甚至是不连续的;而且由于一致性等式约束使得系统级优化问题一般不满足 Kuhn-Tucker 条件[3].

此问题的一种解决方式是改变协同优化表述形式,如约束松弛类[3]、约束近似类[4]、子空间近似类[5]. 另一种措施是,系统级设计空间的搜索算法采用无须要求目标函数和约束函数是光滑的这一条件的优化算法[6]. 同时,协同优化是一种层次优化体系,系统级优化迭代一步需要各学科级多次寻优,因而系统级优化的规模应该有所控制,对全局搜索能力和协同优化的整体计算量进行权衡,如遗传的种群大小、模拟退火的温度参数等. 智能优化与传统优化算法相结合的混合优化算法能有效达成这一目的.

## 2　混合混沌算法

混沌优化算法利用了混沌运动的遍历性和内在"规律性"等特点. 由于混沌变量能在一定范围内不重复地遍历所有的状态,因此在一定意义上,混沌优化能够达到全局最优.

虽然混沌运动具有遍历性,但某些状态可能需要较长时间才能达到. 而且,用混沌序列来更新候选解,对搜索过程中最优状态的有效信息(启发式信息)没有加以利用,在局部最优区域附近搜索效率较低,甚至会出现类似穷举法的求解过程.

本文将单纯形法(Simplex Method)嵌入变尺度混沌优化中,形成一种混合混沌算法. 变尺度混沌优化[7],采用减缩搜索区间和多次搜索来提高混沌搜索的效率. 单纯形法,属于直接类无约束最优化方法,通过反射、收缩、延伸等策略搜索最优,算法简洁. 在相邻的两次混沌搜索之间嵌入单纯形寻优,混沌搜索并不需要较长的迭代过程以获得精确解,只需接近最优解;以混沌搜索的最好状态为初值,用单纯形法进行局部搜索;再以单纯形所得的最优解为中心,一定范围内减缩搜索区间;并在相应的最优混沌变量上附加小扰动量,作为下次混沌搜索的初始值;以上过程反复多次. 算法描述如下:

```
Begin
X_B[i]=[]; //最优解初始化为空(i=1,…,n)
F_B=Inf; //最优解对应的目标函数值初始化为较大量
Y[i]=rand(); //混沌变量随机初始化(i=1,…,n)
For (j=1;j<=R;j++) //多次搜索
{
    For (k=1;k<=K;k++) //混沌搜索
    {
      Y[i]=4*Y[i]*(1-Y[i]); //Logistic迭代式(i=1,…,n)
      X[i]=X_L[i]+(X_U[i]-X_L[i])*Y[i]; //混沌变量 Y[i]映射为优化变量 X[i](i=1,…,n)
      If (f(X)<=F_B)//混沌搜索到的最好状态及其相应的目标函数值
        {F_B=f(X);X_B[i]=X[i];}
    }
    X_B=Simplex(X_B); F_B=f(X_B); //最
```

优点附近的单纯形寻优

$\boldsymbol{X}_\mathrm{LN}[i]=\boldsymbol{X}_\mathrm{B}[i]-\alpha*(\boldsymbol{X}_\mathrm{U}[i]-\boldsymbol{X}_\mathrm{L}[i])$;//缩小各优化变量的搜索范围($i=1,\cdots,n$)

$\boldsymbol{X}_\mathrm{UN}[i]=\boldsymbol{X}_\mathrm{B}[i]+\alpha*(\boldsymbol{X}_\mathrm{U}[i]-\boldsymbol{X}_\mathrm{L}[i])$;

If ($\boldsymbol{X}_\mathrm{LN}[i]>\boldsymbol{X}_\mathrm{L}[i]$) {$\boldsymbol{X}_\mathrm{L}[i]=\boldsymbol{X}_\mathrm{LN}[i]$;}//越界判断处理($i=1,\cdots,n$)

If ($\boldsymbol{X}_\mathrm{UN}[i]<\boldsymbol{X}_\mathrm{U}[i]$) {$\boldsymbol{X}_\mathrm{U}[i]=\boldsymbol{X}_\mathrm{UN}[i]$;}

$\boldsymbol{Y}_\mathrm{T}[i]=(\boldsymbol{X}_\mathrm{B}[i]-\boldsymbol{X}_\mathrm{L}[i])/(\boldsymbol{X}_\mathrm{U}[i]-\boldsymbol{X}_\mathrm{L}[i])$;//更新最好状态对应的混沌变量($i=1,\cdots,n$)

$\boldsymbol{Y}[i]=(1-\beta)*\boldsymbol{Y}_\mathrm{T}[i]+\beta*\boldsymbol{Y}[i]$;//最优混沌变量附近的扰动 ($i=1,\cdots,n$)

}

End

其中:数组 $\boldsymbol{X}_\mathrm{U}$,$\boldsymbol{X}_\mathrm{L}$ 存放混沌搜索区间的 $n$ 维优化变量的上下限(随搜索过程不断减缩);数组 $\boldsymbol{Y}$ 存放 $n$ 维混沌变量,初始值为[0,1]区间相异的随机变量,一般不能取为 Logistic 映射的不动点 0.25,0.5,0.75;$K$ 为混沌搜索参数;$R$ 为多次搜索参数;$\alpha$ 为区间减缩参数,取值区间是[0,0.5],搜索区间最慢将以 $2\alpha$ 的速率减小;$\beta$ 为扰动参数,随变尺度搜索次数增加而逐渐减小,其设置可以采用类似模拟退火的温度衰减机制. 数组 $\boldsymbol{X}_\mathrm{B}$和 $F_\mathrm{B}$ 存放的是搜索到的最优解和对应的目标函数值.

## 3 干线客机方案设计

### 3.1 设计问题描述

参考文献[8-9],将上述方法应用于干线客机方案设计.

方案设计中涉及的目标有两个:巡航升阻比 $L_{\mathrm{D_cr}}$和有用载荷系数 $f_{\mathrm{ul}}$. 巡航升阻比反映飞机的气动效率,主要取决于机身长度、翼展、展弦比等飞机几何外形参数;有用载荷系数则反映结构设计和经济性效率,取决于起飞总重量、有效载荷、航程、发动机耗油率和飞机几何外形参数.

选取机翼面积 $S$、机身长度 $l$、机翼展长 $b$、起飞总重量 $W_{\mathrm{to}}$、发动机地面安装推力 $T_{\mathrm{i}}$ 这 5 个量作为优化变量,而将其他影响量作为固定参数.

方案分析由 4 个分析模块构成,分别是阻力特性计算(Drag)、气动计算(Aero)、重量计算(Weight)和性能计算(Perf). 分析模块之间的耦合关系和各模块所涉及的设计变量,如图 2 所示.

图 2 中有两个反馈环,巡航速度 $V_{\mathrm{cr}}$由 Aero 模块根据巡航阶段的飞机平衡方程给出,同时又反馈给 Drag 模块;需用燃油系数 $f_{\mathrm{R\text{-}r}}$由 Weight 模块根据 Breguet 航程公式给出,同时又反馈给Aero 模块. 所以一次系统分析需要多次调用这些分析模块,迭代求解达成一致性设计.

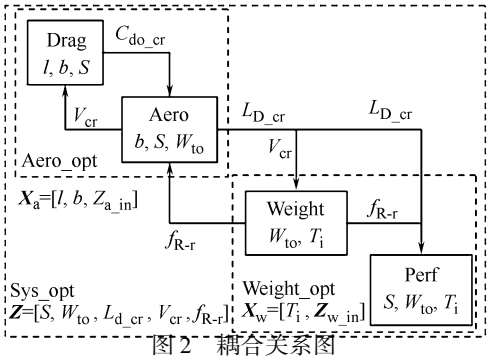



图 2 耦合关系图

5 个优化变量及其变化范围为:机翼面积($\mathrm{m}^2$):$111\leqslant S\leqslant 232$;机身长度(m):$32\leqslant l\leqslant 61$;机翼展长(m):$26\leqslant b\leqslant 43$;全机起飞总重量(kg):$63\,504\leqslant W_{\mathrm{to}}\leqslant 113\,400$;发动机地面安装推力(kg):$12\,587\leqslant T_{\mathrm{i}}\leqslant 24\,948$.

8 个约束条件分别是:巡航速度(m/s):$V_{\mathrm{cr}}\geqslant 195$;巡航升阻比:$L_{\mathrm{D_cr}}\geqslant 18$;巡航阻力系数:$C_{\mathrm{do_cr}}\geqslant 0.015$;展弦比:$R_{\mathrm{A}}\leqslant 10$;全局燃油平衡系数:$f_{\mathrm{R}}\geqslant 1$;有用载荷系数:$f_{\mathrm{ul}}\geqslant 0.3$;起飞滑跑距离(m):$S_{\mathrm{tf}}\leqslant 1\,981$;着陆距离(m):$S_{\mathrm{ld}}\leqslant 1\,372$.

优化目标是最大化巡航升阻比 $L_{\mathrm{D_cr}}$和有用载荷系数 $f_{\mathrm{ul}}$,这里采用直接加权和,取两指标权值相同,考虑到量级统一,目标表示为:$\min\ O_{\mathrm{bj}}=-(f_{\mathrm{ul}}/0.5+L_{\mathrm{D_cr}}/24)$.

### 3.2 问题的协同优化表述

按图 2 中虚线划分成一个系统级 Sys_opt 优化和两大学科级优化. Aero_opt 学科包含 Drag 和 Aero 2 个分析模块,前 4 个约束构成本学科约束组 $C_{\mathrm{a}}$;Weight_opt 学科包含 Weight 和 Perf 2 个分析模块,后 4 个约束组成本学科约束组 $C_{\mathrm{w}}$.

由于学科间互相耦合,共享设计变量 $S$,$W_{\mathrm{to}}$和耦合状态变量 $L_{\mathrm{D_cr}}$,$V_{\mathrm{cr}}$,$f_{\mathrm{R\text{-}r}}$不能由单学科优化器确定,需要进行多学科协调,它们共同构成系统级优化变量 $\boldsymbol{Z}$.

在 Aero_opt 学科,由局部设计变量 $\boldsymbol{X}_{\mathrm{la}}=[l,b]$和与分析模块输入相关的系统级优化变量 $S$,$W_{\mathrm{to}}$,$f_{\mathrm{R\text{-}r}}$的副本变量 $\boldsymbol{Z}_{\mathrm{a_in}}$组成本学科优化变量 $\boldsymbol{X}_{\mathrm{a}}=[\boldsymbol{X}_{\mathrm{la}},\boldsymbol{Z}_{\mathrm{a_in}}]$,经学科分析 $f_{\mathrm{a}}(\boldsymbol{X}_{\mathrm{a}})$得到耦合输出变量 $\boldsymbol{Z}_{\mathrm{a_out}}=[L_{\mathrm{D_cr}},V_{\mathrm{cr}}]$,耦合输入和输出合并组成 $\boldsymbol{Z}_{\mathrm{a}}=[\boldsymbol{Z}_{\mathrm{a_in}},\boldsymbol{Z}_{\mathrm{a_out}}]$与系统级优化变量 $\boldsymbol{Z}$ 对应. 在 Weight_opt 学科,由局部设计变量 $\boldsymbol{X}_{\mathrm{lw}}=[T_{\mathrm{i}}]$和与

分析模块输入相关的系统级优化变量 $S$, $W_{to}$, $L_{D_cr}$, $V_{cr}$ 的副本变量 $Z_{w_in}$ 组成本学科优化变量 $\boldsymbol{X}_w = [\boldsymbol{X}_{lw}, \boldsymbol{Z}_{w_in}]$,经学科分析 $f_w(\boldsymbol{X}_w)$ 得到耦合输出变量 $\boldsymbol{Z}_{w_out} = [f_{R\text{-}r}]$,耦合输入和输出合并组成 $\boldsymbol{Z}_w = [\boldsymbol{Z}_{w_in}, \boldsymbol{Z}_{w_out}]$ 与系统级优化变量 $\boldsymbol{Z}$ 对应.

### 3.3　优化计算

参照图 1 的计算构架. 在寻优算法的选取上,学科级采用序列二次规划法,系统级采用混合混沌算法.

系统级优化无约束化处理:引入罚因子 $M$ (本文取为 $10^3$),将各学科相应的一致性约束条件、系统级优化变量变化范围对应的不等式约束罚项并入目标函数,如式(1)所示:

$$\min E(\boldsymbol{Z}, M) = O_{bj} + M\sum_{k=1}^{2} J_k(\boldsymbol{Z}) + M\sum_{i=1}^{5}\left[\max(\boldsymbol{Z}_i - \boldsymbol{Z}_i^u, 0) + \max(\boldsymbol{Z}_i^l - \boldsymbol{Z}_i, 0)\right] \quad (1)$$

由于混沌算法带有随机性,为了客观地对待计算结果,分别采用本文的混合混沌算法和变尺度混沌优化作为系统级的优化算法计算 20 次,统计情况列于表 1. 表中,混合算法中 $K=100$, $R=6$;变尺度混沌中 $K=200$, $R=8$. 其他参数设置相同,区间减缩参数 $\alpha=0.4$,扰动参数 $\beta=0.6^R$. 可以看出混合算法的标准差较小、最优解相对集中,这说明算法的数值稳定性较好.

**表 1　求解结果的统计**

| 统计量 | $O_{bj}$ | |
|---|---|---|
| | 混合混沌 | 变尺度混沌 |
| 最大 | −1.848 1 | −1.775 8 |
| 最小 | −1.858 3 | −1.856 4 |
| 平均 | −1.856 2 | −1.812 4 |
| 标准差 | 0.003 2 | 0.042 7 |

采用多学科可行 MDF(Multi-Disciplinary Feasible)方法,在系统分析的基础上,用标准遗传算法(群体规模 40,复制概率 0.15,交叉概率 0.8,变异概率 0.15,进化 30 代),然后串联序列二次规划寻优得到的最优解与本文方法所得最优解接近,如表 2 所示.

**表 2　MDF 与 CO 的对比**

| 参数 | MDF | CO |
|---|---|---|
| $S/m^2$ | 146.32 | 147.12 |
| $l/m$ | 46.521 | 45.765 |
| $b/m$ | 38.197 | 37.973 |
| $W_{to}/kg$ | 85 893 | 85 901 |
| $T_i/kg$ | 14 138 | 14 138 |
| $O_{bj}$ | −1.859 4 | −1.855 1 |

## 4　结 束 语

协同优化方法将原设计优化问题分解为一组互相关联的优化模型,并采用层次组织方式. 子系统间无信息交换,仅仅通过系统级交换信息,有效地保证了各学科的自治性,子系统可并行设计,子系统设计模块化、扩展性强,可方便集成各种专业分析代码,尤其适合于大型松耦合系统的分布式求解. 结合了传统优化局部收敛速度快特性的混合混沌算法,能避免混沌运动要遍历搜索区域内几乎所有状态的缺点,算法实现简单,易于实现全局搜索,可用于求解协同优化的系统级优化问题.

## 参考文献 (References)


[1] Raymer D P. Aircraft design: a conceptual approach [M]. Washington DC: AIAA Inc, 1989

[2] BraunR D. Collaborative optimization: an architecture for large-scale distributed design [D]. Stanford, California: Dept. of Aeronautics and Astronautics, Stanford University, 1996

[3] AlexandroxN M, Lewis R M. Analytical and computational aspects of collaborative optimizationK [R]. TM-2000-210104, NASA, 2000

[4] Sobiesk I P, Manning V M, Kroo I M. Response surface estimation and refinement in collaborative optimization[C]// Proceedings of 7th AIAA/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization, St. Louis, 1998:59-370

[5] 胡峪. 飞机多学科设计优化及其应用研究[D]. 西安:西北工业大学航空学院,2001
Hu Yu. Aircraft multidisciplinary design optimization and its application[D]. Xi'an: School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, 2001(in Chinese)

[6] 余雄庆,薛飞,穆雪峰,等. 用遗传算法提高协同优化方法的可靠性[J]. 中国机械工程, 2003,14(21): 1808-1811
Yu Xiongqing, Xue Fei, Mu Xuefeng, et al. Improving robustness of the collaborative optimization using genetic algorithms[J]. China Mechanical Engineering, 2003, 14(21): 1808-1811(in Chinese)

[7] 张彤,王宏伟,王子才. 变尺度混沌优化方法及其应用[J]. 控制与决策,1999,14(3):285-288
Zhang Tong, Wang Hongwei, Wang Zicai. Mutative scale chaos optimization algorithm and its application[J]. Control and Decision, 1999, 14(3):285-288(in Chinese)

[8] Lewis K. An algorithm for integrated subsystem embodiment and system synthesis[D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 1996

[9] 方卫国,师瑞峰. 飞机方案多目标优化的 Pareto 遗传算法[J]. 北京航空航天大学学报,2003,29(8):668-672
Fang Weiguo, Shi Ruifeng. Pareto genetic algorithms for multi-objective optimization of aircraft conceptual design[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(8):668-672(in Chinese)


(责任编辑:朱丽萍)