

邻域加强的并行子空间优化过程*

欧阳琦, 陈小前, 黄奕勇

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:针对基于响应面的并行子空间优化(CSSO-RS)过程的不足,提出了基于邻域加强的改进 CSSO-RS 优化过程。其主要思路是在子空间优化后,在得到的最优解附近进行全部变量的优化,以更好地协调系统级优化与子空间优化。用经典测试函数及通用航空飞机参数优化问题对该算法进行测试,测试结果表明该算法使 CSSO-RS 优化效率得到较大的改善。

关键词:并行子空间优化;响应面;邻域加强;飞机参数优化

中图分类号:V221 **文献标识码:**A

Neighborhood Strengthened Concurrent Subspace Optimization Based on Response Surface

OUYANG Qi, CHEN Xiao-qian, HUANG Yi-yong

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

Abstract: A neighborhood strengthened CSSO-RS is proposed to improve the disadvantages of the Concurrent Subspace Optimization based on Response Surface (CSSO-RS). This algorithm gives rise to an optimization between the system level optimization and subspace level optimization, which greatly improves the coordination affection between these two levels. The optimization region of this algorithm is the neighborhood of the optimal solution obtained by the subspace optimization, and all the design variables are involved in this optimization. The classical test function and an aircraft concept sizing problem were tested, and the efficacy of the algorithm was proved.

Keywords: Concurrent Subspace Optimization (CSSO); response surface; neighborhood strengthen; aircraft concept sizing optimization

并行子空间优化(Concurrent Subspace Optimization, CSSO)最早是由 Sobieski 在 1988 年提出的,目前并行子空间优化主要有两种形式,即基于灵敏度分析的并行子空间优化(CSSO Based on Sensitivity Analysis, CSSO-GSE)以及基于响应面的并行子空间优化(CSSO Based on Response Surface, CSSO-RS)。CSSO-RS 算法是目前较常用的 CSSO 算法,由于该算法不需要进行系统灵敏度分析,它可以大大减少系统分析的次数,同时也为解决连续离散混合变量的多学科设计优化问题提供了一条有效的途径^[1]。

对于 CSSO-RS,系统级优化中所有的状态变量和目标值都通过响应面计算,而在子空间优化中,子学科只对分配到该学科的变量进行优化,其他变量固定不变,本地状态向量采用本学科的精确模型计算,而非本地状态向量采用响应面近似计算。由于响应面近似存在误差,使得系统级优化找到的最优解往往是不可行的,但却较为靠近

全局最优解。子空间优化由于引入了本学科的高精度模型,并将其他学科变量固定,往往能找到可行解,但正是由于其他学科变量未参与优化,使得其找到的最优解往往不具备全局最优性。在 CSSO-RS 中,子空间优化的作用主要是为系统级响应面的构建提供较好的方案,而优化结果主要依赖于系统级优化。针对现有 CSSO-RS 的不足,本文提出了邻域加强的改进 CSSO-RS 优化过程(Neighborhood Strengthen CSSO-RS, NSCSSO-RS),该优化过程将系统级优化和子空间优化有效的联系起来,加强了子空间优化在 CSSO-RS 优化过程中的作用,加速了系统级响应面的逼近。

1 邻域加强的 CSSO-RS

1.1 基本思想

CSSO-RS 过程的主要由优化初始准备和优化循环两大部分组成。在优化初始准备阶段,完成

* 收稿日期:2011-03-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50975280);教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-08-0149)

作者简介:欧阳琦(1986—),女,博士生。

系统整体设计优化问题的子空间划分,试验设计以及响应面模型的构建,同时确定系统的初始基线方案。优化循环主要包括以下几步^[2]:

(1)各子空间在设计空间内进行并行优化。优化过程中,只对分配到该空间的变量进行优化,其它变量固定不变。在计算过程中,本空间的状态向量及约束用精确模型进行计算,目标函数以及其他空间的状态向量及约束采用响应面模型计算。

(2)所有子空间优化结束后,对优化结果进行系统分析。将优化结果中所有的可行方案加入方案数据库中,并从中选出最优的方案作为下一步系统级优化的基线方案。数据库更新后,重新构造响应面,开始进行系统级优化。

(3)系统级对全部设计变量进行优化。计算过程中,所有状态变量及目标值都由响应面模型计算。

(4)系统优化完成后,进行系统分析。如果优化结果方案可行且符合收敛条件,则循环结束,输出结果。如果方案可行但不符合收敛条件,则将该方案加入方案数据库,重新构造响应面,并以此优化方案作为基线方案,开始下一次循环。

在 CSSO-RS 优化过程中,由于子空间只对本空间的变量进行优化,从整个设计空间来看该解并不一定是优的,甚至离最优解较远,以该值作为迭代的初值会造成迭代收敛速度慢。而系统级优化所有模型都采用近似模型,在优化初期由于近似模型精度较低,系统级优化往往找不到可行解,不能为系统的优化方向提供有效的指导。但是,子空间优化由于对变量进行了降维处理,往往能够找到可行解,而系统级优化在后期能够有效指导系统的优化方向。

基于上述 CSSO-RS 中系统级优化与子空间

优化的不足与优势,本文提出邻域加强的 CSSO-RS 优化过程,其主要思路是在子空间优化后,在得到的最优解附近进行全部变量的优化,以更好地协调系统级优化与子空间优化。优化的设计域为子空间优化得到的最优解的邻域,优化变量为所有设计变量,该子空间的状态变量及约束由精确模型计算,而目标函数值以及其他子空间的状态变量及约束都由响应面模型计算得到。

在此,我们称邻域内的优化为邻域加强优化。子空间优化由于能找到可行解,其邻域内的解通常也是可行的。在该邻域内进行优化,得到的最优解一般是可行解,在此区域将所有变量同时优化,有利于搜索出系统较好的下降方向。因此,在优化开始阶段,邻域加强的优化能够代替系统级优化起到指导优化方向的作用,而在后期,由于其加入了各个子空间的高精度模型,也能够为系统级响应面的构建提供较好的设计点,加快优化的收敛。

1.2 数学表述及流程图

对于一个非线性优化问题(1),其中 F 为优化目标, X 为设计变量, Y 为状态变量, P 为参数向量, g 表示不等式约束, h 表示等式约束, N_g 为不等式约束的数目, N_h 为等式约束的数目,上标 L 和 U 分别表示下限和上限值。若将其划分为 n 个子空间,则 NSCSSO-RS 数学描述如表 1 所示^[3]。

$$\begin{aligned}
 & \text{Find } X \\
 & \min F(X, Y, P) \\
 & \text{s. t. } g_i(X, Y, P) \leq 0, \quad i = 1, \dots, N_g \quad (1) \\
 & \quad h_i(X, Y, P) = 0, \quad i = 1, \dots, N_h \\
 & \quad X^L \leq X \leq X^U
 \end{aligned}$$

表 1 领域加强的 CSSO-RS 数学描述

Tab. 1 The mathematic expression of NSCSSO-RS

子空间 i 的优化	邻域加强优化	系统级优化
Find X_i	Find X	Find X
$\min \bar{F}(X_i, \bar{X}_j, Y_i, \bar{Y}_j, P), j \neq i$	$\min \bar{F}(X, Y_i, \bar{Y}_j, P), j \neq i$	$\min \bar{F}(X, Y, P)$
s. t. $g_k(X_i, \bar{X}_j, Y_i, \bar{Y}_j, P) \leq 0, g_k \in G_i$	s. t. $g_k(X_i, \bar{X}_j, Y_i, \bar{Y}_j, P) \leq 0, g_k \in G_i$	s. t. $\tilde{g}_i(X, P) \leq 0, i = 1, \dots, N_g$
$\tilde{g}_k(X_i, \bar{X}_j, P) \leq 0, g_k \notin G_i$	$\tilde{g}_k(X_i, \bar{X}_j, P) \leq 0, g_k \notin G_i$	$\tilde{h}_i(X, P) = 0, i = 1, \dots, N_h$
$h_k(X_i, \bar{X}_j, Y_i, \bar{Y}_j, P) = 0, h_k \in H_i$	$h_k(X_i, \bar{X}_j, Y_i, \bar{Y}_j, P) = 0, h_k \in H_i$	$X^L \leq X \leq X^U$
$\tilde{h}_k(X_i, \bar{X}_j, P) = 0, h_k \notin H_i$	$\tilde{h}_k(X_i, \bar{X}_j, P) = 0, h_k \notin H_i$	
$X_i^L \leq X_i \leq X_i^U$	$(1 - \delta)X_{iopt} \leq X_{iopt} \leq (1 + \delta)X_{iopt}$	

其中, G_k 和 H_k 分别为子空间 k 的不等式约束及等式约束。带有“~”上标的目标函数与状态变量由响应面求出。带有“-”上标的设计变

量为其它学科的设计变量,取值由优化基线方案给定,在该子空间优化过程中为固定值。

邻域加强的 CSSO-RS 优化过程的流程图如

图 1 所示。

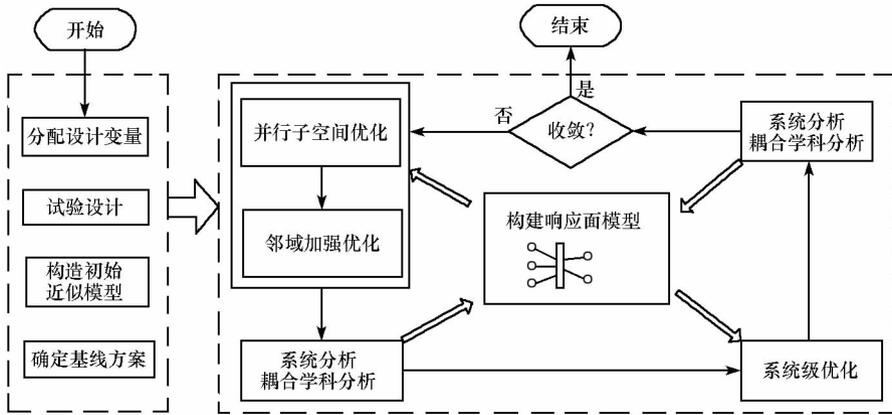


图 1 邻域加强的 CSSO-RS 优化过程流程图
Fig. 1 The flowchart of strengthen CSSO-RS

2 算例分析

2.1 减速器优化问题

选取减速器优化问题作为算例,对本文提出的改进策略进行测试,其数学模型参见文献[4-5]。

将该问题划分为三个子空间,分别为子空间 1: $X_1 = \{x_1, x_2, x_3\}$, $G_1 = \{g_1, g_2, g_7, g_8\}$; 子空间 2: $X_2 = \{x_4, x_6\}$, $G_2 = \{g_3, g_5, g_9\}$; 子空间 3: $X_3 = \{x_5, x_7\}$, $G_3 = \{g_4, g_6, g_{10}\}$ 。该优化问题包含 7 个设计变量,除 g_8 之外,目标函数及其它约束均为设计变量的高度非线性函数。该函数在约束条件下的全局最优点为 (3.500000, 0.700000, 17.000000, 7.300000, 7.715320, 3.350215, 5.286654),对应的目标函数值为 2994.355026。在此,子空间优化、邻域加强优化以及系统级优化都采用 Powell 法。

图 2 和图 3 分别为 CSSO-RS 和 NSCSSO-RS 的优化迭代过程。表 2 对两种优化过程进行了对比。由表 2 可知,加入邻域加强优化后迭代次数以及系统分析次数都有所减少,表明该算法能有

效提高 CSSO-RS 优化过程的优化效率。

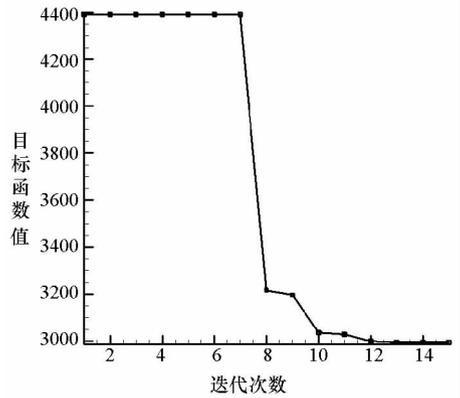


图 3 NSCSSO-RS 迭代过程
Fig. 3 The iteration of strengthen NSCSSO-RS

表 2 CSSO-RS 与 NSCSSO-RS 结果对比

Tab. 2 The results comparison of CSSO-RS and NSCSSO-RS

优化方法	迭代次数	最优目标值	系统分析次数
CSSO-RS	35	2994.355026	165
NSCSSO-RS	15	2994.355026	145

2.2 某通用航空飞机总体参数优化

本算例借鉴文献[6]中的航空飞机总体参数优化问题,以飞机的起飞总质量 W_{total} 最小为目标,满足失速速度和航程的约束要求,即航程必须大于最小航程,失速速度小于允许的最大失速速度。相关固定参数有机组人数 $N_p = 2$,发动机数量 $N_{engines} = 1$,发动机效率 $\eta = 0.85$,发动机重量 $W_{engine} = 89.3592\text{kg}$,发动机耗油率 $c = 7.45 \times 10^{-4}/\text{km}$,最大升力系数 $C_{Lmax} = 1.7$,有效载荷 $W_{payload} = 180.5328\text{kg}$,最小航程 $R_{required} = 901.23\text{km}$,最大过载 $N_{Zult} = 5.7$,最大失速速度 $V_{stallrequired} = 30.48\text{m/s}$ 。设计变量如表 3 所示。根据学科的划分将此问题划分为两个子空间,子空

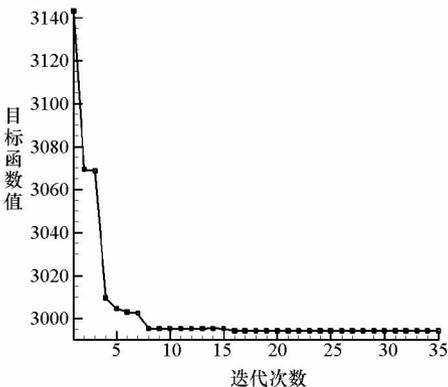


图 2 CSSO-RS 迭代过程
Fig. 2 The iteration of CSSO-RS

间1为气动学科,设计变量为 AR 、 S_w 、 L_f 、 D_f ,约束条件为 $V_c \leq V_{stallrequired}$;子空间2为质量学科,设计变量为 ρ_c 、 V_c 、 W_{fuel} ,约束为航程 $R \geq R_{required}$ 。

表3 设计变量表

Tab.3 List of design variables

设计参数	符号	下限	上限
展弦比	AR	5	9
机翼参考面积(m^2)	S_w	9.29	27.87
机身长度(m)	L_f	6.096	9.144
机身直径(m)	D_f	1.2192	1.524
巡航高度空气密度($kg \cdot m^{-3}$)	ρ_c	0.9792	1.1854
巡航速度($m \cdot s^{-1}$)	V_c	60.96	91.44
燃油质量(kg)	W_{fuel}	45.36	181.44

在此,子空间优化、邻域加强优化以及系统级优化都采用遗传算法,优化结果如表4所示。从优化结果可以看出,NSCSSO不仅得到了更优的结果,迭代次数及系统分析次数方面也得到了提高。该算例中,CSSO-RS算法在第26步得到的最优目标为1305.03kg,在第54步逐步收敛到1302.023kg,表明在优化后期该算法收敛速较慢,NSCSSO-RS在这方面有较大改进。

表4 优化结果

Tab.4 Optimization results

	CSSO-RS	NSCSSO
AR	5.0030	5.135
$S_w (m^2)$	13.911	15.280
$L_f (m)$	6.096	6.136
$D_f (m)$	1.2192	1.232
$\rho_c (kg \cdot m^{-3})$	1.162	1.076
$V_c (m \cdot s^{-1})$	60.96	60.96
$W_{fuel} (kg)$	110.262	109.435
L/D	10.678	10.945
$W_{total} (kg)$	1302.023	1294.673
$R (km)$	910.386	931.35
$V_c (m \cdot s^{-1})$	30.48	30.155
迭代次数	54	18
系统分析次数	265	157

3 结论

本文对CSSO-RS优化过程的基本思想进行了介绍,并总结了CSSO-RS中系统级优化与子空间优化的不足与优势。提出了邻域加强的CSSO-RS优化过程,该优化过程在优化开始阶段,能够代替系统级优化起到指导优化方向的作用,而在后期,能够为系统级响应面的构建提供较好的设计点,加快优化的收敛。通过经典函数及飞机总体参数优化问题对邻域加强的CSSO-RS优化过程进行了测试,测试结果表明,该优化过程有效地提高了CSSO-RS优化过程的优化效率。

另外,子空间优化、邻域加强优化以及系统级优化实际上是同一优化问题的不同复杂度模型,除了这三种模型外,还可以构建其他不同复杂度的模型。本文提出的领域加强的CSSO-RS优化过程是对不同复杂度优化模型的一种组织方式。在本文的研究基础上可以进一步分析不同复杂度的模型的优缺点以及如何有效组织不同复杂度的模型,从而提高优化效率。

参考文献:

- [1] 王振国,陈小前,罗文彩,等.飞行器多学科设计优化理论与应用研究[M].北京:国防工业出版社,2006.
- [2] 姚雯,陈小前,杨维维,等.基于加速响应面逼近的改进CSSO优化过程研究[J].航空计算技术,2006,36(6):5-8.
- [3] Sellar R S, Batill S M, Renaud J E. Response Surface Based, Concurrent Subspace Optimization for Multidisciplinary System Design [C]//34th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit,1996.
- [4] MDO Test Suite [EB/OL]. <http://modob.larc.nasa.gov/mdo.test/index.html>.
- [5] MDO Test Suite Problem 2.4 Golinski's Speed Reducer[EB/OL]. <http://modob.larc.nasa.gov/mdo.test/class2prob4/equations/HOWTO.html>, 1998-03-26/2002-11-01.
- [6] Batill S M, Stelmack M A. Framework for Multidisciplinary Design Based on Response Surface Approximations[J]. Journal of Aircraft, 1999, 36(1):287-297.