

文章编号:1001-2486(2011)05-0017-05

一种改进的混合 BLISS 多学科设计优化方法*

赵勇,杨维维,黄奕勇,王振国

(国防科技大学 航天与材料工程学院,湖南 长沙 410073)

摘要:针对 BLISS 2000 优化过程中权值系数的引入给实际应用带来的困难,提出一种改进的 BLISS 优化过程——混合 BLISS (Hybrid BLISS, HBLISS)。该方法在保持 BLISS 2000 的基本算法结构的基础上取消权值系数,利用耦合变量的最小残差协调子系统级和系统级优化,给出了 HBLISS 的算法结构和基本流程。减速度应用算例测试表明了改进的有效性,并在学科自治性和收敛性能方面具有优势。

关键词:多学科设计优化;BLISS 2000;HBLISS;权值系数

中图分类号:V423 **文献标识码:**A

An Improved MDO Procedure: Hybrid Bi-Level Integrated System Synthesis

ZHAO Yong, YANG Wei-wei, HUANG Yi-yong, WANG Zhen-guo

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

Abstract: An improved MDO procedure for BLISS 2000 (Bi-Level Integrated System Synthesis 2000), which is named HBLISS (Hybrid BLISS) to find a way out of a difficulty in applications because of the weighting factor, is proposed. The basic algorithm structure of BLISS 2000 was kept and the weighting factor was cancelled, in which the minimum residual error of coupled variables was utilized to coordinate system level optimization and sub-system level optimization. The algorithm structure and flowchart were introduced. The results of Reducer optimization problem show that HBLISS has the superiority in the disciplinary autonomy and convergence, and the improvement is valid.

Key words: Multidisciplinary Design Optimization (MDO); Bi-Level Integrated System Synthesis 2000; Hybrid BLISS; weighting factor

多学科设计优化 (Multidisciplinary Design Optimization, MDO) 方法已经在工业界尤其是航空航天领域得到广泛应用,并以其显著的应用成果得到了重视与认可。国内外飞行器设计经验表明,是解决多学科耦合问题的有效手段,但 MDO 方法同时也带来了计算复杂性和组织复杂性问题^[1-3]。MDO 优化过程降低计算复杂性和组织复杂性的有效手段。BLISS 优化过程由 Sobieszczanski-Sobieski 等^[1,4]于 1998 年提出,是一种基于分解协调的两级 MDO 优化过程。其主要特点是:系统级优化控制数量相对较少的系统设计变量 Z ,子系统级(学科)优化控制数量相对较多的学科设计变量 X ,子系统级优化可实现高度自治,适合分布式操作,易于在大规模复杂应用中采用并行计算。因此它适合于系统级优化变量

相对较少,而子系统级优化存在大量局部设计变量的非层次型系统。

BLISS 优化过程的演变过程经历了三个主要阶段^[1],形成了三种有代表性的基本 BLISS 优化过程,即:基于灵敏度分析的标准 BLISS 优化过程^[4],基于响应面的 BLISS/RS (Response Surface) 优化过程^[5]和 BLISS 2000 优化过程^[6]。此外,还有针对具体问题的 BLISS 改进,如针对结构两级优化问题的 BLISS/S^[7]优化过程等。相对其它形式的 BLISS, BLISS 2000 实现更简单,优化效率更高。BLISS 2000 采用响应面和权值系数协调两级优化,系统级优化中用权值系数作为控制参数,以保证子系统级优化与系统级优化目标的一致;子系统级进行优化后,通过响应面连接系统级优化与子系统级优化,同时在系统级优化中引入一致

* 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);国防科技大学科研计划资助项目(JC-08-01-07)

作者简介:赵勇(1977—),男,副教授,博士。

性约束,以保证与子系统级设计的一致^[8-11]。但 BLISS 2000 存在一些缺陷^[1,6,8,10,12]: (1) 系统级优化变量多,因而 BLISS 2000 比较适合全局设计变量及耦合设计变量数量相对较少的情形,应用实例也表明,如果变量超过 20 个,响应面的构造将受到严重影响^[9]; (2) 设计变量的分解或划分对 BLISS 2000 优化求解的影响非常大; (3) BLISS 2000 的求解效率严重依赖于响应面质量; (4) 计算量大。

替代权值系数,采用新的子系统输出控制策略,以利于系统优化目标^[5-6]是 BLISS 2000 重要的改进措施之一。BLISS 2000 优化过程中,权值系数的引入会给实际应用带来两个主要问题:其一,权值系数作为系统级优化变量会加大优化变量的维数,增大系统级优化问题的困难性;其二,权值系数的初值及其取值范围需根据具体问题预先给定,而权值系数的取值将影响整个优化过程的收敛性能。

因此,本文提出针对 BLISS 2000 的改进形式——HBLISS (Hybrid BLISS 2000),其基本思想是在保持 BLISS 2000 优化过程的基本算法结构基础上,借鉴 CO (Collaborative Optimization) 优化过程的思路,利用耦合变量的最小残差连接子系统级和系统级优化。

1 HBLISS 优化过程

1.1 算法结构

HBLISS 优化过程与 BLISS 2000 相似,仍分为子系统级优化、子系统级响应面构造以及系统级优化三部分。

(1) 子系统级优化

在系统级给定 $Q = \{Z, Y^*\}$ 的条件下,子系统级优化问题表述如下:

$$\begin{aligned} & \text{find } U = \{X | Y^\wedge\} \\ & \text{min } f(U) = k_1 \|Y^\wedge - Y^*\| + k_2 Y_s^\wedge \quad (1) \\ & \text{s. t. } G(U) \leq 0, U_L \leq U \leq U_U \end{aligned}$$

其中, k_1 和 k_2 为常值系数,当学科输出包含系统目标 Y_s^\wedge 时,取常值系数 $k_1 = 0, k_2 = 1$; 当学科输出不包含 Y_s^\wedge 时, $k_1 = 1, k_2 = 0$ 。优化结果输出 Y_{opt}^\wedge 和 X_{opt} 。 $\{X | Y^\wedge\}$ 表示学科设计空间 U, Y^* 为系统级给定的学科输出耦合变量, Y^\wedge 为子系统级输出的耦合变量,下标 U, L 表示取值上下限。

(2) 子系统级响应面构造

针对 Y_{opt}^\wedge 中每个元素构造响应面,其子系统最优输出的近似模型如下:

$$\begin{cases} Y_{opt}^\wedge = Y_{opt}^\wedge [SRS(Q)] \\ X_{opt}^\wedge = X_{opt}^\wedge [SRS(Q)] \end{cases} \quad (2)$$

其中, $Q_L \leq Q \leq Q_U$, SRS 为响应面族 (Sheaf of RS), 上标“a”表示近似值。 Q 的边界根据各边界约束和内部迭代所需的移动限制 (扩展或收缩边界) 估算获得。响应面的构造需在响应面精度与计算量之间作好权衡。响应面更新的频率以及试验点的数量视具体问题而定,各学科模块应根据最大允许误差选择不同响应面近似模型以及响应面更新的频率。

(3) 系统级优化

给定各学科的响应面族后,系统级优化表述为

$$\begin{aligned} & \text{find } Q = \{Z, Y^*\} \\ & \text{min } F(Q) = Y_{s,opt}^\wedge \\ & \text{s. t. } c(Q) = Y^* - Y_{opt}^\wedge = 0 \\ & \quad Q_L \leq Q \leq Q_U \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $Y_{s,opt}^\wedge$ 为 SRS 获得的系统目标近似值。

1.2 收敛条件

HBLISS 优化过程的终止判断条件,即收敛条件会影响求解精度及收敛速度,故应根据具体问题特点在求解精度与收敛速度间进行权衡。HBLISS 的收敛条件包括:收敛精度、响应面精度、可行解条件 (即约束精度) 和允许的最大循环迭代次数。收敛精度是指连续两次 (或多次) 迭代所得结果的误差要求,响应面精度是指根据响应面近似所得的目标函数值与实际计算值的误差要求,约束精度是指可行设计点违反约束条件的误差要求。

1.3 算法比较

以一个简单优化问题为例,比较 CO/RS、BLISS 2000 以及 HBLISS 三者的区别。系统设计变量和学科设计变量为 $\{Z, X\}$, 系统目标为 $F = F(Z, X)$, 耦合变量为 $Y^* = Y^*(Z, X)$, 约束为 $G = G(Z, X)$ 。设学科 r 的输出为 $Y_r^\wedge = \{y_{r1}, y_{r2}, \dots, y_{rk}\}$ (为比较一般性,假设 $F \notin Y_r^\wedge$), 其它学科的输出为 Y_j^\wedge , 系统级给定值 $Y^* = \{Y_r^*, Y_j^*\}$ 。算法结构比较结果如表 1 所示^[1]。

1.4 基本流程

HBLISS 优化过程的基本流程如图 1 所示,其具体步骤如下:

Step 1 初始化。初始化系统级优化空间,确定 Q_L 和 Q_U ; 初始化参数 $i = 0$ (连续不更新当前最优解的次数,即重复加点代数) 和 $Count$ (允许

最大重复加点代数)。

表 1 CO/RS、BLISS 2000 和 HBLISS 优化过程比较
Tab. 1 Comparison of CO/RS, BLISS 2000 and HBLISS

	CO/RS	BLISS 2000	HBLISS
系统级优化变量	$Q = \{Z, Y^*\}$	$Q = \{Z, Y^*, w\}$	$Q = \{Z, Y^*\}$
子系统级优化变量	$U = \{Z, X, Y^*\}$	$U = \{X\}$	$U = \{X\}$
学科 r 优化目标	$J_r = \ Z^\wedge - Z\ + \ Y_r^\wedge - Y_r^*\ $	$f_r = \sum_{i=1}^k w_{ri} Y_{ri}$	$f_r = k_1 \ Y_r^\wedge - Y_r^*\ + k_2 Y_s^\wedge$
学科 r 响应面 [#]	$J_{r,opt} = J_{r,opt}^a(Z, Y^*)$	$Y_{r,opt}^\wedge = Y_{r,opt}^\wedge(Z, Y_j^*, w_r)$	$Y_{r,opt}^\wedge = Y_{r,opt}^\wedge(Z, Y^*)$
学科 r 响应面数量 [#]	1	k	k
学科 r 优化数量	试验点总数	试验点总数	试验点总数
系统级一致性约束	$J = J_{opt}^a(Z, Y^*) = 0$	$Y^* - Y_{opt}^\wedge(Z, Y^*, w) = 0$	$Y^* - Y_{opt}^\wedge(Z, Y^*) = 0$
系统级一致性约束数量	子系统级学科总数	耦合变量总数	耦合变量总数

[#]注:表中未考虑学科设计变量的响应面。 w 为权值系数。

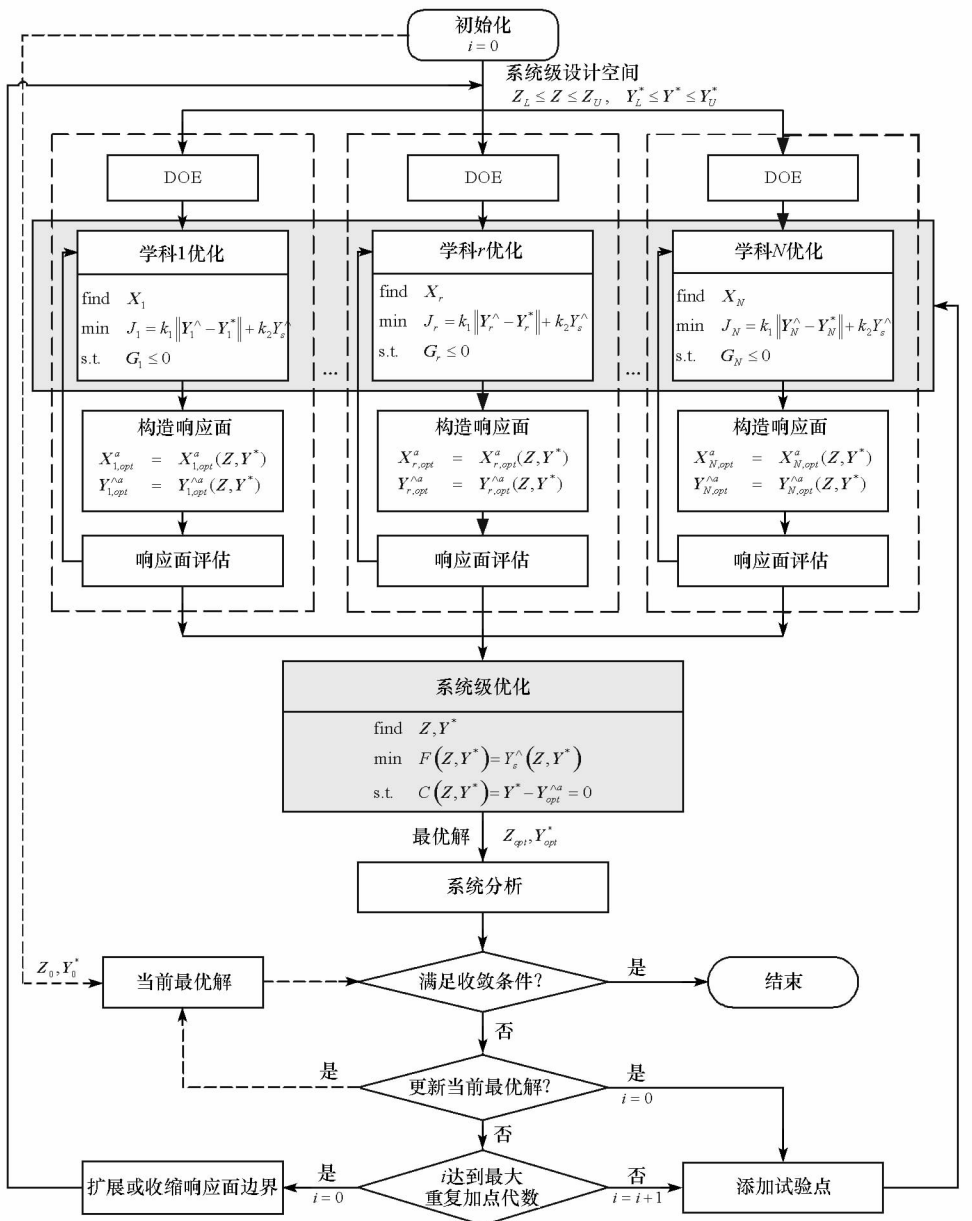


图 1 HBLISS 基本流程
Fig. 1 Basic flowchart of HBLISS

Step 2 学科优化并构建响应面。a) 根据系统级传递的 Q_L 和 Q_U , 采用 DOE 抽取 Q 空间响应面近似所需的试验点 $\{Z, Y^*\}$ 。b) 对给定的试验点 $\{Z, Y^*\}$, 各学科在 U 空间 ($U_L \leq U \leq U_U$) 进行优化。学科优化的目标是在满足自身约束的条件下, 使学科输出的耦合变量尽可能靠近系统级给定的期望值 (即试验点的值), 优化结果为 X_{opt} 和 Y^{\wedge} , 各试验点优化可同时进行。c) 构造 X_{opt} 和 Y^{\wedge} 关于 $\{Z, Y^*\}$ 的 SRS。d) 评估响应面的质量, 若响应面质量不满足要求, 则在包含当前最优解 $\{Z_{opt}, Y^*_{opt}\}$ 的小范围设计空间内随机添加新试验点, 返回 b)。

Step 3 根据各学科构造的 SRS, 在 Q 空间进行系统级优化。

Step 4 根据系统级优化结果进行系统分析。系统分析需把系统级优化结果传递给各学科进行优化, 从而得到各学科局部设计变量的最优值 X_{opt} 。

Step 5 判断是否满足收敛条件。若满足, 则终止退出循环; 若不满足, 则转入 Step 6。

Step 6 判断本次优化结果是否满足更新当前最优解的条件。若满足, 则更新当前最优解, 重置 $i=0$, 在包含当前最优解的小范围设计空间内添加新试验点, 并返回 Step 2 的 b); 若不满足, 则转入 Step 7。

Step 7 若 $i < Count$, 则 $i = i + 1$, 并在包含当前最优解的小范围设计空间内随机添加新试验点, 返回 Step 2 的 b); 否则, 重置 $i=0$, 参考当前最优解收缩或扩展设计空间 $Q(Q_L, Q_U)$, 返回 Step 2 的 c)。

2 算例测试

选取减速器优化问题测试 HBLISS 优化过程性能。该算例的具体数学模型详见文献 [1, 13]。该模型不存在耦合方程, 为便于 BLISS 2000 及 HBLISS 表述, 构造三个耦合变量 $Y^* = \{A, B, C\}$, 其中, $A = x_2 x_3$, $B = x_4 / (Ax_6)$, $C = x_5 / (Ax_7)$ 。系统设计变量 $Z = \{x_6, x_7\}$, 学科变量及约束的组织如表 2 所示。

表 2 HBLISS 求解减速器优化问题的学科及变量分解

Tab.2 Subjects and variables of HBLISS for speed reducer optimization problem

学科模块	输出变量 Y^{\wedge}	输入变量			学科约束
		Z	X	Y^*	
BB ₁	A^{\wedge}, f^{\wedge}	x_6, x_7	x_1, x_2, x_3	B^*, C^*	g_1, g_2, g_7, g_8
BB ₂	B^{\wedge}	x_6	x_4	A^*, B^*	g_3, g_5, g_9
BB ₃	C^{\wedge}	x_7	x_5	A^*, C^*	g_4, g_6, g_{10}

注: 学科模块在 BLISS 中定义为黑箱 (Black Box, BB)。

HBLISS 求解该问题的组织结构如图 2 所示。采用正交拉丁方试验设计方法, BB₁ 取 7 水平 49 个试验点, BB₂ 和 BB₃ 取 3 水平 9 个试验点。优化结果如表 3 所示, 并取第 7 次计算结果作为典型收敛过程, 如图 3 所示。其中收敛条件为: 收敛精度 10^{-6} , 响应面精度 10^{-4} , 约束精度 10^{-6} 。每次计算中优化均采用混合微粒群优化算法^[1], 采用基于二次多项式的响应面 (Quadratic Polynomial Based-Response Surface, QPB-RS) 进行协调。

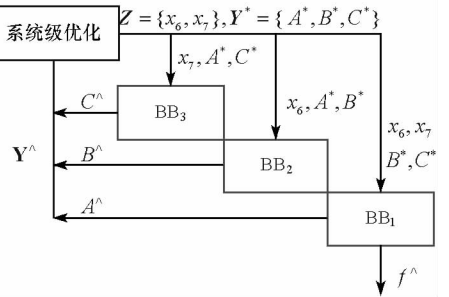


图 2 HBLISS 求解减速器优化问题的组织结构

Fig.2 Structure of HBLISS for speed reducer optimization problem

表 3 HBLISS 与 BLISS 2000 求解减速器优化问题结果比较

Tab.3 Comparison of optimal results using HBLISS and BLISS 2000

		BLISS 2000	HBLISS
满意解	获取次数/运行次数	10/10	10/10
	平均收敛循环次数	127.7	93.6
	平均运算时间(s)	664.8	581.0
目标	最小值	2994.355026	2994.355027
	最大值	2994.359115	2994.355061
	平均值	2994.355955	2994.355034
约束	平均最大约束违反量	5.63×10^{-5}	1.20×10^{-8}

可以看出, HBLISS 与 BLISS 2000 均得到满意解, BLISS 2000 的 10 次运算中有 6 次收敛到 2994.355026, HBLISS 的结果略逊于 BLISS 2000, 10 次运算的收敛解均在 2994.355026 附近, 但差值范围较小, 且收敛过程明显较为平缓, 循环次数及收敛时间均低于 BLISS 2000。HBLISS 在收敛性能上有局部提高, 因此说明对 BLISS 2000 的改进是可行的。

3 结论

HBLISS 保持了 BLISS 2000 的基本结构, 继承了其最大优势, 即学科自治。系统级传递当前优化空间范围给子系统级, 子系统级提交输出耦合变量及局部设计变量的响应面, 子系统级的各学科间无直接交换信息, 学科优化可并行完成。HBLISS 的复杂性要低于 BLISS 2000。系统级优

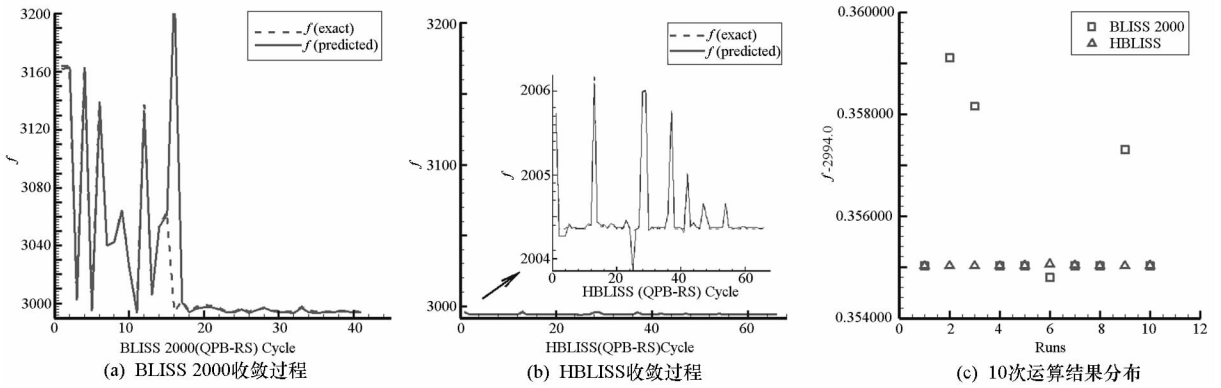


图 3 HBLISS 与 BLISS 2000 求解减速器优化问题结果比较
Fig. 3 Comparison of optimal results using HBLISS and BLISS 2000

化取消了权值系数,降低了优化空间维数。利用各学科提交的响应面进行优化,因而系统级对搜索策略要求不高。HBLISS 的鲁棒性与 BLISS 2000 相同,取决于所采用的搜索与添点策略以及响应面构造与更新策略。

相对于 BLISS 2000, HBLISS 的优势在于:

- ① 取消了权值系数,降低了系统级优化空间的维数,从而简化了算法结构;
- ② 子系统级目标函数的修改使得流程易于理解,组织简单,并易于实现;
- ③ 由于将子系统级的优化目标与系统级一致性约束关联,一定程度上增强了近似最优解的稳定性。同时,与 BLISS 2000 类似, HBLISS 具有一定的适应范围:① 子系统级学科计算相对简单,系统级计算相对复杂;
- ② 学科局部设计变量较多,系统级全局设计变量与耦合变量相对较少;
- ③ 对最优解精度要求不是很高。

参 考 文 献:

[1] 赵勇. 卫星总体多学科设计优化理论与应用研究[D]. 长沙:国防科技大学,2006.
 [2] Potsaid B, Bellouard Y, Wen J T. A Multidisciplinary Design and Optimization Methodology for the Adaptive Scanning Optical Microscope (ASOM) [J]. 2006;62-89.
 [3] Hassan R, Crossley W. Spacecraft Reliability-based Design Optimization under Uncertainty Including Discrete Variables [J]. Journal of Spacecraft and Rocket, 2008,45 (2): 394-405.
 [4] Sobieszcanski-sobieski J, Agte J S, Sandusky R R. Bi-level

Integrated System Synthesis (BLISS) [R]. NASA/TM-1998-208715, 1998.
 [5] Kodiyalam S, Sobieszcanski-sobieski J. Bi-level Integrated System Synthesis with Response Surfaces [C]//AIAA 99-1306-wip, 1999.
 [6] Sobieszcanski-sobieski J, Altus T D, Phillips M, et al. Bi-level Integrated System Synthesis (BLISS) for Concurrent and Distributed Processing [C]//AIAA 2002-5409, 2002.
 [7] Sobieszcanski-sobieski J, Kodiyalam S. BLISS/S: A New Method for Two-level Structural Optimization [C]//AIAA 99-1345, 1999.
 [8] Brown N F, Olds J R. Evaluation of Multidisciplinary Optimization (MDO) Techniques Applied to a Reusable Launch Vehicle [C]//AIAA 2005-707, 2005.
 [9] Kim H, Ragon S, Soremekun G, et al. Flexible Approximation Model Approach for Bi-Level Integrated System Synthesis [C]//AIAA 2004-4545, 2004.
 [10] Kodiyalam S, Yuan C. Evaluation of Methods for Multidisciplinary Design Optimization (MDO), Part II [R]. NASA/CR-2000-210313, 2000.
 [11] De Baets P W G, Mavris D N, Sobieszcanski-sobieski J. Aeroelastic Design by Combining Conventional Practice with Bi-Level Integrated System Synthesis (BLISS) [C]//AIAA 2004-4431, 2004.
 [12] Sobieszcanski-sobieski J, Emiley M S, Agte J S, et al. Advancement of Bi-Level Integrated System Synthesis(BLISS)[C]//AIAA 2000-0421, 2000.
 [13] Padula S L, Alexandrov N, Green L L. MDO Test Suite at NASA Langley Research Center [C]//AIAA 96-4028, 1996.