

文章编号:1000-8055(2013)08-1797-06

基于响应面的 BLISS 改进方法

张代雨, 宋保维, 王 鹏, 董华超

(西北工业大学 航海学院, 西安 710072)

摘 要: 在分析研究 BLISS(bi-level integrated system synthesis)方法的基础上,提出了一种 BLISS 改进方法,该方法在子系统级和系统级均引入基于试验设计的响应面进行近似,并设置了可调移动步长参数,不需再进行复杂的灵敏度分析,消除了 BLISS 方法对每步迭代优化移动步长的限制,减少了优化迭代次数和陷入局部最优的可能性.最后给出两个具体算例对上述方法进行了验证并与传统 BLISS 方法进行了对比,结果表明:其优化迭代次数分别减少了 57.9% 和 70.3%,证明了该方法的可行性和有效性.

关 键 词: 多学科设计优化; 两级系统集成一体化; 试验设计; 响应面; 灵敏度分析

中图分类号: V21; TP301.6

文献标志码: A

Improved method of BLISS based on response surface

ZHANG Dai-yu, SONG Bao-wei, WANG Peng, DONG Hua-chao

(College of Marine Engineering,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Based on the analysis of the BLISS (bi-level integrated system synthesis), an improved method of BLISS was proposed, and the response surface based on design of experiments was introduced to make an approximation in both the subsystem and the system-level meanwhile the parameters of moving step were set, making unnecessary for complex sensitivity analysis; the movement limits of each iterative optimization in the BLISS method, and the optimization iterations and the possibility of falling into local optimum were reduced. Finally, two specific examples were given to verify above method compared with traditional BLISS. The results show that the optimization iterations of above methods were respectively reduced by 57.9% and 70.3%, respectively.

Key words: multidisciplinary design optimization (MDO);
bi-level integrated system synthesis; design of experiments;
response surface; sensitivity analysis

多学科设计优化(MDO)是当前复杂系统设计研究中一个最新、最活跃的领域,而多学科设计优化方法是多学科优化技术体系的研究核心.目前常用的 MDO 优化方法包括多学科可行法(MDF)、并行子空间优化方法(CSSO)、协同优化方法(CO)和两级系统集成一体化合成优化方法(BLISS)

等.其中,由于 BLISS 可以处理多变量并具有较容易人为干预优化过程的优点,被广泛应用.

BLISS^[1]方法最先由 Sobieszczanski-Sobieski 等人提出,其执行显示的系统行为,采用全局灵敏度分析和最优灵敏度分析方法实现子系统级和系统级的求解,具有充分的灵活性和自主性,但因其

收稿日期:2012-09-13

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130802.1224.201308.1797_017.html

基金项目:国家高技术研究发展计划(2011AA09A104)

作者简介:张代雨(1988—),男,河南鹤壁人,博士生,主要从事水下航行器总体和多学科设计优化研究.

使用了全局灵敏度分析和最优灵敏度分析,对大型系统来说计算复杂,且每步迭代优化过程均需严格限制移动步长,当初始点选择不佳时,该方法收敛所需的迭代次数较多且易收敛到局部最优解. Kodiyalm 等对 BLISS 方法中的各子系统输出进行响应面近似,提出了 BLISS/RS^[2]方法,消除了对拉格朗日乘子的依赖,收敛速度有一定提高,但其仍采用全局灵敏度分析方法,仍未解决上述 BLISS 方法的缺点. Sobieszczanski-Sobieski 等进一步改进了 BLISS,提出了 BLISS 2000^[3]方法,其支持并行分布式处理,但增加了系统级变量数目,降低了设计效率. XU Lin 和 YAN Lin 等对 BLISS 2000 进行了改进,提出了 EBLISS 2000^[4]方法,使 BLISS 2000 的优化效率得到了提高. 此外,还有一些学者^[5-8]将 BLISS 方法和其他算法相结合,拓宽了 BLISS 的应用范围,提高了 BLISS 的求解效率.

基于上述分析并结合已有的改进方案,本文提出了一种新的 BLISS 改进方法-IBLISS (improved BLISS). 该方法在子系统级和系统级均使用基于试验设计(DOE)的响应面进行近似,并设置了可调移动步长参数 ϵ ,可根据需要来设定每步迭代优化移动步长,较好地解决了上文所述的 BLISS 方法缺点.

1 BLISS 方法描述

参照下图 1 所示的多学科耦合系统,多学科优化问题可表述为

$$\begin{aligned} \min \quad & F(X, Z, Y(X, Z)) \\ \text{s. t.} \quad & G(X, Z, Y(X, Z)) \leq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

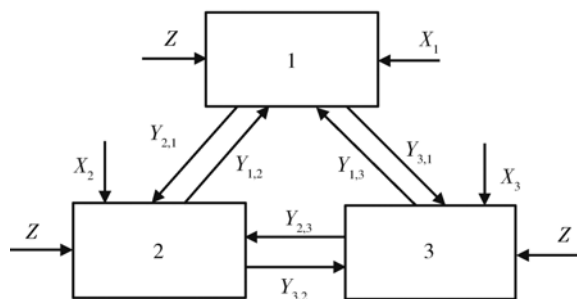


图 1 多学科耦合系统

Fig. 1 Multidisciplinary coupled systems

图 1 中, Z 为系统级设计变量, X_i 为子系统 i 内的局部设计变量, $Y_{i,j}$ 为从子系统 j 输入到子系统 i 的耦合变量. 式(1)中, F 表示目标函数, G 表示约束, Z 为系统级设计变量, X 为局部设计变

量(也称子系统级设计变量,为所有子系统内局部设计变量的总和), Y 为子系统状态变量.

BLISS 方法的主要优化流程如下:

- 1) 初始化 X, Z .
- 2) 执行系统分析得到状态变量 Y 和约束函数 G .
- 3) 检查收敛性,如果满足收敛性,则输出系统级目标函数 F ,否则重载结果、修改问题表述,继续执行.
- 4) 执行子系统灵敏度分析,得到局部灵敏度导数(偏导数),然后通过全局灵敏度方程(GSE)求得系统级灵敏度导数(全导数) $D(Y, X)$ 和 $D(Y, Z)$.
- 5) 使用泰勒一阶展开表述各子系统的目标函数,执行子系统最优化,获得优化值 ΔX^* 和拉格朗日乘子 L .
- 6) 利用子系统级优化的得到的 ΔX^* 和拉格朗日乘子 L 得到 F 关于 Z 的最优灵敏度.
- 7) 使用泰勒一阶展开表述系统级目标函数,执行系统级最优化,得到优化值 ΔZ^* .
- 8) 更新 $X = X_0 + \Delta X^*, Z = Z_0 + \Delta Z^*$, 转至 1).

对于上述 BLISS 方法,虽然全局灵敏度分析已使成熟的技术,但在实际中,由于复杂系统分析的维数较多,其计算远比学科分析更复杂. 又因在 BLISS 方法中,分别使用泰勒一阶展开来近似表述各子系统和系统级的目标函数,对子系统和系统级交替进行优化求解,故为了保证近似精度, ΔX 和 ΔZ 必须有严格的移动区间限制,即每步迭代优化过程对变量的可移动步长有严格限制,且移动步长通常被限制为一个很小的值. 当最优解离所选的初始点较远时, BLISS 方法收敛所需的迭代次数较多,且容易收敛到局部最优点.

2 IBLISS 方法

IBLISS 方法主要是通过基于试验设计理论的响应面法来构造各子系统目标函数、系统级目标函数和学科间耦合变量的近似模型,不需再对多学科耦合系统进行复杂的全局灵敏度分析和最优灵敏度分析,并设置了可调移动步长参数 ϵ ,可根据需要来设定每步迭代优化移动步长,解除了 BLISS 方法对优化移动步长的限制,减少了优化迭代次数. 又由于响应面方法产生的平滑操作可改进数值优化方法的收敛特性,从而可减少陷入局部最优的可能性. IBLISS 方法详述如下.

2.1 基于 DOE 的响应面法

响应面方法是一种用于开发、改进和优化设计过程的统计和数学方法,其主要过程是用某种方法产生设计变量的样本点,然后对这些样本点进行分析,获得一组输入/输出数据,然后用某种近似方法来拟合这些数据,构造出输入/输出的响应面。

其中,一般采用试验设计方法^[9]来产生样本点,常用的试验设计方法包括全析因试验设计、正交试验设计、中心复合试验设计、均匀试验设计、拉丁方试验设计等。此外,常用的近似方法主要包括多项式响应面模型^[10]、Kriging 模型^[11-12]、径向基神经网络模型^[13-14]、支持向量机^[15-16]等。

2.2 IBLISS 改进思想

IBLISS 方法主要是通过通过在子系统级和系统级均采用 DOE 技术构造响应面进行近似,对 BLISS 方法进行改进,具体描述如下:首先,在 ϵ_Z 移动步长限制内,用试验设计技术对 Z 产生系统级变量设计点。然后,对每个系统级变量设计点,进行各子系统优化设计,得到子系统最优点,并在子系统最优点处进行系统分析,得到每个系统级变量设计点对应的最优目标函数和状态变量。最后,根据得到的数据构造最优目标函数、耦合变量和子系统最优点对 Z 的响应面,并对系统级进行优化设计,得到的最优点 Z^* 和与其对应的子系统最优点 X^* ,并用 X^* 和 Z^* 更新初始点。其中,在对各子系统进行优化设计时,同样使用基于 DOE 的响应面方法,以子系统 $i(i=1, \dots, N)$ 为例,其基本过程为:①在 ϵ_{X_i} 移动步长限制内,用 DOE 技术产生子系统变量设计点,并对每个子系统变量设计点进行系统分析;②根据得到的数据构造子系统目标函数、耦合变量对 X_i 的响应面;③对子系统 i 进行优化设计,得到最优点 X_i^* 。

在上述描述方法中, ϵ_Z 和 ϵ_X 的值可以根据需要具体调节,以避免陷入局部最优。当其值增大时,为了保证响应面精度的要求,在其区域内,DOE 产生的设计点数也相应增多;当其值减少时,在保证响应面精度的前提下,其区域内 DOE 产生的设计点数可相应减少。

2.3 IBLISS 算法流程

在前文所述基础上,下面给出了 IBLISS 方法的具体计算步骤及流程简图(如图 2)。

步骤 1 初始化 X 和 Z 。

步骤 2 在系统级 ΔZ 空间中且在 ΔZ 的 ϵ_Z

移动步长限制内用 DOE 技术产生向量 $\Delta Z_m (m=1, \dots, p)$ 。

步骤 3 保持 Z 为常数,对每个 $Z+\Delta Z_m$ 进行如下操作。

1) 在各子系统 $i(i=1, \dots, N)$ 中:①在 ΔX_i 空间中且在 ΔX_i 的 ϵ_{X_i} 移动步长限制内用 DOE 技术产生向量 $\Delta X_{i,n} (n=1, \dots, q)$;②对每个 $\Delta X_{i,n} (n=1, \dots, q)$ 进行系统分析,得到相应的 F, Y 值;③根据②中得到的数据,生成 F, Y 相对于变量 X_i 的响应面;④分别用子系统中生成的响应面表示子系统目标函数和耦合变量 $Y_{i,j}$,并选择合适的优化算法对 X_i 进行优化,得到相应的 X_i^* 。

2) 用各个子系统得到的最优值 $X_i^* (i=1, \dots, N)$ 组成 X^* ,并在 X^* 处进行系统分析,得到每个 $Z+\Delta Z_m$ 对应的最优目标函数 F^*, Y 值。

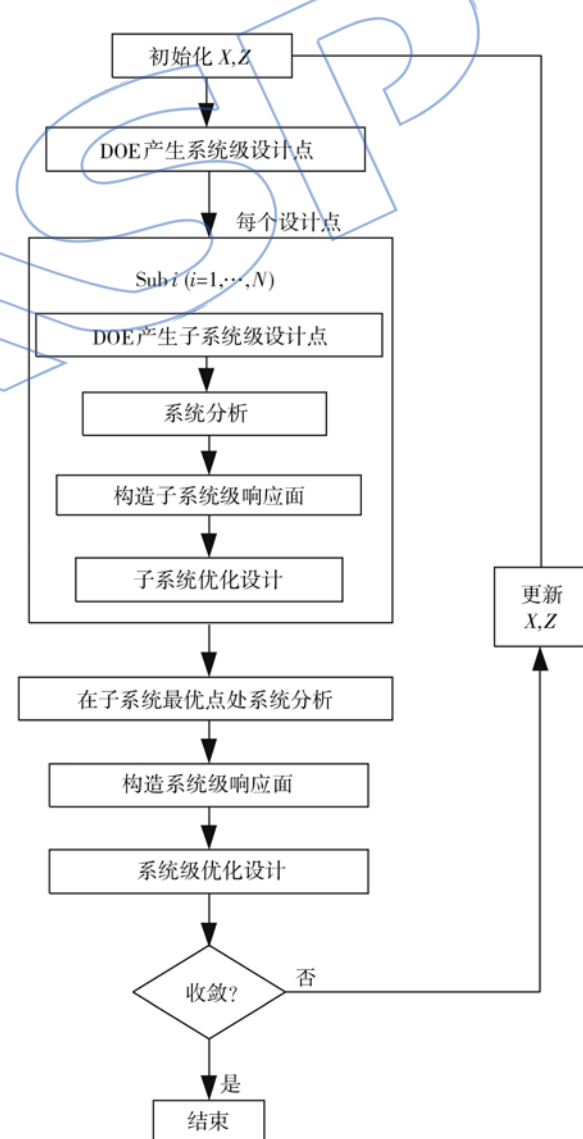


图 2 IBLISS 流程图

Fig. 2 IBLISS flow diagram

步骤4 根据步骤3中得到的 $Z + \Delta Z_m$ 对应的 m 组数据,生成 F^* , Y 和 X^* 对 Z 的响应面.

步骤5 分别用系统级生成的最优目标函数 F^* 和 Y 的响应面表示系统级目标函数与耦合变量 $Y_{i,j}$, 并进行系统级的优化设计,得到 Z^* .

步骤6 取步骤5中得到的 Z^* 值,利用步骤4中生成的 X^* 对 Z 的响应面,计算出 Z^* 对应的 X^* 值;然后在 X^* , Z^* 处进行系统分析,并判断系统是否收敛且满足约束条件.若均满足,优化结束;否则转向步骤1,并用 X^* , Z^* 值更新 X , Z 值.

3 算例

3.1 数学算例

本算例是一个多学科优化方法评估的经典数学实例.其理论最优设计点为 $(3, 1, 1)$, 函数最小值为 -6.75 .

$$\begin{aligned} \min \quad & f = 0.25(x_1^4 + x_2^4 + x_3^4) - \\ & 2(x_1^3 + x_2^3 + x_3^3) - \\ & 6(4y_1 - 2y_2 - 2x_2 - 3x_3) + \\ & 5.5(x_1^2 + x_2^2 + x_3^2) \\ & 3 \leq y_1 \leq 4 \\ & y_2 \geq 1 \\ & y_1 = x_1 + x_3 - y_2 \\ & y_2 = y_1 - x_2 - x_3 \\ & 0 \leq x_1, x_2, x_3 \leq 4 \end{aligned}$$

当使用 IBLISS 方法对此问题进行优化时,将原问题划分为学科1、学科2和系统级三个学科.其中,系统级的设计变量为 x_3 ;学科1的设计变量为 x_1 , 状态变量为 y_1 ;学科2的设计变量为 x_2 , 状态变量为 y_2 . 分别建立各学科的优化模型如下(下标 res 表示构造的响应面)

学科1优化模型

$$\begin{aligned} \min \quad & f_1 = f_{\text{res}}(x_1) \\ \text{s. t.} \quad & 3 \leq y_1 \leq 4 \\ & 0 \leq x_1 \leq 4 \\ & y_1 = x_1 + x_3 - y_{2\text{res}} \\ & -(\epsilon_{x_1}/2) \leq x_1 - x_{10} \leq (\epsilon_{x_1}/2) \end{aligned}$$

学科2优化模型

$$\begin{aligned} \min \quad & f_2 = f_{\text{res}}(x_2) \\ \text{s. t.} \quad & y_2 \geq 1 \\ & 0 \leq x_2 \leq 4 \\ & y_2 = y_{1\text{res}} - x_2 - x_3 \\ & -(\epsilon_{x_2}/2) \leq x_2 - x_{20} \leq (\epsilon_{x_2}/2) \end{aligned}$$

系统级优化模型

$$\begin{aligned} \min \quad & f_z = f_{\text{res}}(x_3) \\ \text{s. t.} \quad & 0 \leq x_3 \leq 4 \\ & -(\epsilon_{x_3}/2) \leq x_3 - x_{30} \leq (\epsilon_{x_3}/2) \end{aligned}$$

对该优化问题,分别使用 BLISS 和 IBLISS 进行优化,得到表1所示优化结果.其中,IBLISS 方法中的移动步长参数 ϵ_{x_1} , ϵ_{x_2} 和 ϵ_{x_3} 均取值为1.

表1 优化结果

Table 1 Optimization results

比较项	BLISS	IBLISS
x_1	3	3.021
x_2	1	0.987
x_3	1	1
目标函数值	-6.75	-6.749
迭代次数	19	8

由表1的优化结果可以看出,使用 IBLISS 计算的优化结果和该数学算例的理论值基本相同,并且其与 BLISS 方法相比,迭代次数更少,减少了57.9%.

3.2 工程算例

减速器优化问题^[17]是 NASA 评估 MDO 优化过程算法性能的10个标准算例之一,其设计目标是在满足减速器中转轴和齿轮大量约束的同时,使减速箱质量最小.具体数学描述如下:

$$\begin{aligned} \min \quad & f(x) = 0.7854x_1x_2^2(3.3333x_3^2 + \\ & 14.9334x_3 - 43.0934) - 1.5079x_1(x_6^2 + x_7^2) + \\ & 7.477(x_6^3 + x_7^3) + 0.7854(x_4x_6^2 + x_5x_7^2) \\ \text{s. t.} \quad & g_1: 27.0/(x_1x_2^2x_3) - 1 \leq 0 \\ & g_2: 397.5/(x_1x_2^2x_3^2) - 1 \leq 0 \\ & g_3: 1.93x_4^3/(x_2x_3x_6^4) - 1 \leq 0 \\ & g_4: 1.93x_5^3/(x_2x_3x_7^4) - 1 \leq 0 \\ & g_5: [(745.0x_4/(x_2x_3))^2 + 16.9 \times 10^6]^{0.5} / \\ & \quad 0.1x_6^3 - 1100 \leq 0 \\ & g_6: [(745.0x_5/(x_2x_3))^2 + 157.5 \times 10^6]^{0.5} / \\ & \quad 0.1x_7^3 - 850 \leq 0 \\ & g_7: x_2x_3 - 40.0 \leq 0 \\ & g_8: x_1/x_2 \geq 5.0 \\ & g_9: x_1/x_2 \leq 12.0 \\ & g_{10}: (1.5x_6 + 1.9)/x_4 - 1 \leq 0 \\ & g_{11}: (1.1x_7 + 1.9)/x_5 - 1 \leq 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
2.6 \leq x_1 \leq 3.6, 0.7 \leq x_2 \leq 0.8 \\
17 \leq x_3 \leq 28, 7.3 \leq x_4 \leq 8.3, \\
7.3 \leq x_5 \leq 8.3, 2.9 \leq x_6 \leq 3.9 \\
5.0 \leq x_7 \leq 5.5
\end{aligned}$$

式中 x_1 为齿宽系数; x_2 为齿轮模数; x_3 为小齿轮齿数; x_4 为轴 1 轴承间距; x_5 为轴 2 轴承间距; x_6 为轴 1 直径; x_7 为轴 2 直径; g_1 为齿的弯曲应力约束; g_2 为齿的接触应力约束; g_3, g_4 为轴的变形约束; g_5, g_6 为轴的应力约束; g_7, g_8, g_9 为几何约束; g_{10}, g_{11} 为由经验得到的设计条件。

文献[17]给出的该算例的优化结果为 $X^* = \{3.5, 0.7, 17, 7.3, 7.71, 3.35, 5.29\}$, 对应的目标函数值为 $f=2996.31$ 。

当使用 IBLISS 方法对此问题进行优化时, 经过分析, 将原问题划分为学科 1、学科 2 和系统级三个学科。系统级的设计变量为 $Z = \{x_1, x_2, x_3\}$, 学科 1 的设计变量为 $X_1 = \{x_4, x_6\}$, 学科 2 的设计变量为 $X_2 = \{x_5, x_7\}$ 。建立各学科的优化模型如下(下标 res 表示构造的响应面)。

学科 1 优化模型

$$\begin{aligned}
\min \quad & f_1 = f_{\text{res}}(X_1) \\
\text{s. t.} \quad & g_i \leq 0 \quad (i = 3, 5, 10) \\
& -(\epsilon_{x_1}/2) \leq X_1 - X_{10} \leq (\epsilon_{x_1}/2) \\
& X_1 = \{x_4, x_6\}
\end{aligned}$$

学科 2 优化模型

$$\begin{aligned}
\min \quad & f_2 = f_{\text{res}}(X_2) \\
\text{s. t.} \quad & g_i \leq 0 \quad (i = 4, 6, 11) \\
& -(\epsilon_{x_2}/2) \leq X_2 - X_{20} \leq (\epsilon_{x_2}/2) \\
& X_2 = \{x_5, x_7\}
\end{aligned}$$

系统级优化模型

$$\begin{aligned}
\min \quad & f_2 = f_{\text{res}}(Z) \\
\text{s. t.} \quad & g_i \leq 0 \quad (i = 1, 2, 7, 8, 9) \\
& -(\epsilon_Z/2) \leq Z - Z_0 \leq (\epsilon_Z/2) \\
& Z = \{x_1, x_2, x_3\}
\end{aligned}$$

对于该优化问题, 选用共同的初始点 $\{3, 0.75, 20, 8, 8, 3, 5.3\}$, 分别使用 BLISS 和 IBLISS 进行优化, 得到表 2 所示优化结果。其中, 取 IBLISS 方法中的移动步长为 $\epsilon_{x_1} = \{0.2, 0.2\}$, $\epsilon_{x_2} = \{0.2, 0.1\}$, $\epsilon_Z = \{0.2, 0.02, 2\}$ 。

由表 2 的优化结果可以看出, 使用 IBLISS 计算的优化结果和文献[17]计算的结果相差很小, 并且其与 BLISS 方法相比, 优化的迭代次数更少, 减少了 70.3%。

表 2 减速箱问题优化结果

Table 2 Gearbox optimization results

比较项	BLISS	IBLISS
x_1	3.5	3.5
x_2	0.7	0.7
x_3	17	17
x_4	7.3	7.3
x_5	7.725	7.715
x_6	3.36	3.358
x_7	5.289	5.289
目标函数值	2998.56	2997.83
迭代次数	37	11

4 结 论

针对 BLISS 方法的缺点, 本文对 BLISS 方法进行了改进, 提出了 IBLISS 方法。该方法具有以下特性:

1) 在子系统级和系统级均使用基于 DOE 方法的响应面来进行近似, 消除了 BLISS 方法对每步迭代优化移动步长的限制, 减少了优化迭代次数且易收敛到全局最优解。

2) 不须再对多学科耦合系统进行复杂的全局灵敏度分析和最优灵敏度分析, 计算相对简单。

3) 设置了可调移动步长参数 ϵ , 可根据需要来设定每步迭代优化移动步长。

4) 通过两个算例验证了该方法的可行性和有效性, 并证明了其具有更少的优化迭代次数。

参考文献:

- [1] Sobieszczanski-Sobieski J, Agte J S, Sandusky R R, Jr. Bi-level integrated system synthesis (BLISS)[R]. AIAA-98-4916, 1998.
- [2] Kodiyalam S, Sobieszczanski-Sobieski J. Bi-level integrated system synthesis with response surfaces[R]. AIAA-99-1306-wip, 1999.
- [3] Sobieszczanski-Sobieski J, Altus T D, Phillips M, et al. Bi-level integrated system synthesis (BLISS) for concurrent and distributed processing[R]. AIAA 2002-5409, 2002.
- [4] XU Lin, YAN Li, CHEN Xiaoqian, et al. Enhanced bi-level integrated system synthesis 2000 (EBLISS 2000) [R]. AIAA 2009-2202, 2009.
- [5] 赵勇, 杨维维, 黄奕勇, 等. 一种改进的混合 BLISS 多学科设计优化方法[J]. 国防科技大学学报, 2011, 33(5): 17-21.

ZHAO Yong, YANG Weiwei, HUANG Yiyong, et al. An

- improved MDO procedure; hybrid bi-level integrated system synthesis[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2011, 33(5): 17-21. (in Chinese)
- [6] Prince A R, Keane J, Holden C M, et al. On the coordination of multidisciplinary design optimization using expert systems[J]. *AIAA Journal*, 2011, 49(8): 1778-1794.
- [7] Amer F R, He L S, Zeeshan Q, et al. Integrated system design of air launched small space launch vehicle using genetic algorithm[R]. *AIAA* 2009-5506, 2009.
- [8] 陈伟, 杨树兴, 赵良玉. BLISS 方法的基本理论及应用[J]. *弹箭与制导学报*, 2006, 27(5): 229-236.
- CHEN Wei, YANG Shuxing, ZHAO Liangyu. The basic theory and application of BLISS[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2006, 27(5): 229-236. (in Chinese)
- [9] Montgomery D C. Design and analysis of experiments[M]. 7th ed. New York: John Wiley & Sons, 2008.
- [10] Giunta A A. Aircraft multidisciplinary design optimization using design of experiments theory and response surface modeling methods[D]. Blacksburg, Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1997.
- [11] Liu W, Batill S. Gradient-enhanced response surface approximations using kriging models[R]. *AIAA* 2000-5498, 2000.
- [12] Koch P N, Wujek B. Facilitating probabilistic multidisciplinary design Optimization using kriging approximation models[R]. *AIAA* 2002-5415, 2002.
- [13] Stelmack M A, Batill S M. Neural network approximation of mixed continuous/discrete system in multidisciplinary design[R]. *AIAA* 98-0916, 1998.
- [14] 王洪元, 史国栋. 人工神经网络技术及其应用[M]. 北京: 中国石化出版社, 2002.
- [15] Suykens J, Gestel T V, Brabanter J D, et al. Least squares support vector machines [M]. London: World Scientific Publishing, 2002.
- [16] Guo Z W, Bai G C. Application of least squares support vector machine for regression to reliability analysis[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2009, 22(2): 160-166.
- [17] Azarm S, Li W C. Optimality and constrained derivatives in two-level design optimization[J]. *ASME Journal of Mechanical Design*, 1990, 112(12): 563-568.