第 30 卷 第 1 期 力 学 进 展 Vol. 30 No. 1
2000 年 2 月 25 日 ADVANCES IN MECHANICS Feb. 25, 2000

大型结构可靠性优化设计的大系统方法 *

宋笔锋 李为吉 吉国明 唐继武

西北工业大学飞机工程系 120 信箱，西安 710072

摘 要 首先回顾了基于可靠性的结构设计方法并对其进行了简要的评述；其次介绍了目前正处于热点的大系统设计方法，并提出了应用大系统方法进行大型结构可靠性设计的策略. 该策略的主要思路是从结构方案阶段即考虑结构可靠度指标及重量指标的最优分配. 一个大型结构可以分解成一系列子系统，而该系统中的每一个又可以分解成一系列二级子系统，直至最基本的子系统. 建议对于大型复杂结构，最基本的子系统并非结构元件，而应是能用有限元模型进行基于可靠性优化设计的子结构.

关键词 大型结构，可靠性，优化，大系统方法

1 基于可靠性的结构优化方法的回顾及评述

基于可靠性的结构优化设计方法的研究已有 30 年的历史，其发展过程可以分为两大阶段. 第一阶段实际上是以结构元件或单失效模式的失效概率为约束条件 (或目标函数) 来建立数学模型的；第二阶段则是以结构系统的失效概率为约束条件 (或目标函数) 来建立数学模型的. 每一发展阶段又可根据所采用的求解失效概率的方法不同划分为若干小阶段. 对各发展阶段的主要特征简要描述如下.

1.1 以元件可靠度或以各失效模式的可靠度为约束条件的结构优化设计方法

该阶段没有考虑或者没有直接考虑整个系统的可靠度约束，是基于可靠性优化设计的第一个基本发展阶段.

1.1.1 随机约束规划技术 (chance constraint programming technique-CCP)

这是第一个基本发展阶段的第一个小阶段，其代表文献有： Charnes and Cooper (1958)[1], J.W. Davidson (1977)[2], S.S. Rao (1980)[3], S.S. Rao (1986)[4], S.S. Rao (1984)[5].

在第一基本阶段，可靠性优化的数学模型为

$$\begin{aligned} &\min W(\bar{b}, \bar{x}) \\ &\text{S.T } P[g_j(X) \geq 0] \geq P_j \quad j = 1, 2, \cdots, m \end{aligned} \tag{1}$$

式中， X 是随机变量， $\bar{x}$ 是 X 的均值向量， $\bar{b}$ 是设计变量向量， $g_j(X)$ 是第 j 个安全余量函数， P_j 是第 j 个失效模式所要求的安全度.

收稿日期：1998-03-23, 修回日期：1998-08-31

* 国家自然科学基金资助项目 (19972056)

CCP 方法中计算 $P[g_j(X) \geq 0]$ 的方法是均值一次二阶矩方法 (mean value first-order second-moment, 简称 MVFOSM, 有些文献上也称 FOSM). 其基本思路是，将 $g_j(X)$ 在 $\overline{x}$ 点线性展开 (泰勒展开式的线性项).

在 X 是正态分布的情况下， $g_j(X)$ 近似于正态分布且其均值和方差由展开式所确定.

MVFOSM 方法的主要缺陷是用泰勒展开式来代替 $g_j(X)$ 会对失效概率带来很大的误差且解不是唯一的. 因此，相应的 CCP 方法之结果在很多情况下并不十分可信 D.M. Frangopol (1985)[6].

1.1.2 安全指标优化方法 (safety index optimization approach-SIO)

这是第一个基本发展阶段的第二个小阶段，其代表文献有： D.M. Frangopol (1985)[6], Hasofer and Lind (1974)[7], J.S. Yang and E. Nikolaidis (1990)[8], B.M. Kwark and T.W. Lee (1987)[9] 等一大批文献.

SIO 与 CCP 不同之处在于应用改进的一次二阶矩方法 (advanced first-order second moment-AFOSM) 方法来估计 $P[g_j(X) \geq 0]$. 其基本做法是将 $g_j(X)$ 转换成标准正态空间中的函数 $\overline{g_j}(\boldsymbol{U})$ ($\boldsymbol{U}$ 是与 X 相对应的标准正态随机向量), 求出 $\overline{g_j}(\boldsymbol{U}) = 0$ 上离原点最近的点 (通常称其为设计点 “design point”), 将 $\overline{g_j}(\boldsymbol{U})$ 在 design point 线性泰勒展开，然后用与 MVFOSM 相同的方法计算 $P[g_j(X) \geq 0] = P[\overline{g_j}(U) \geq 0]$, 其误差较 MVFOSM 小得多，且解决了 FOSM 解的不唯一性问题.

在 $\overline{g_j}(\boldsymbol{U})$ 在 design point 附近曲率较小时， AFOSM 精确度较高. 换言之，当 $\overline{g_j}(\boldsymbol{U})$ 在设计点附近曲率较大时， AFOSM 方法误差仍然很大. 另外，求 design point 也需要花费一定附加计算量.

目前， AFOSM 方法在可靠性优化设计中被广泛采用. 这是因为以快速积分法为代表的 Level III 方法虽然所得的可靠性分析结果较 AFOSM 好，但是其计算量较 AFOSM 大得多，而且更重要的是 AFOSM 方法进行敏度分析是较为方便的，在 Level III 方法中不能进行敏度分析，优化迭代过程中只能用有限差分法计算约束梯度的近似值，因此，计算量是巨大的. 按文献 [8] 提供的飞机机翼的例子，以 Level III 为可靠性分析手段的可靠性设计之计算时间是 SIO 方法的 45 倍.

前面已经指出，单纯从可靠度计算的角度来看， AFOSM 方法并非十全十美，但是就目前的水平而言，在可靠性优化过程中，AFOSM 无疑仍是计算效率和计算精度相互折衷后的选择.

实质上，人们目前也正在探索比 AFOSM 更好的方法. 例如，M.V. Reddy 等 (1994)[10] 提出了一个修改均值方法 (advanced mean value, 简称 AMV), 它可以减少 AFOSM 方法中求 “design point” 的迭代次数. 冯元生 (1990)[11] 提出了组合超平面方法以求得更加精确的可靠度值. 以上两种方法都可以直接对可靠度约束条件进行敏度分析，从而避免了 Level III 的有限差分法，但其应用效果尚需经过实际应用的检验 (该类方法一般称修正的安全指标法 ——simplified safety index approach——SSI). 值得指出的是，在国内以赵国藩教授为首的研究组等也提出了一系列计算精度高于 AFOSM 的针对单失效模式情况的可靠度计算方法 [12~14]. 文献 [12] 和 [14] 的方法均是基于基本随机变量或失效模式安全余量函数的前四阶矩，文献 [13] 的方法则属二次二阶矩类方法，因此，从概念上讲都可以进行敏度分析，从而可以提高最终优化结构的精度.

1.2 以系统可靠度为约束条件的结构优化设计方法

该方法以整个结构系统的可靠度为约束，是基于可靠性优化设计的第二个基本发展阶段. 系统的可靠性优化模型可以写成

$$\text{Min } W(\bar{\boldsymbol{b}}, \bar{\boldsymbol{x}})$$
$$\text{S.T } P_f \le P_f^* \qquad (2)$$

式中， P_f 是整个结构系统的失效概率， P_f^* 是规定的结构失效概率值.

1.2.1 以一阶上界 (first-order upper bound) 为特征的方法

其代表文献有 [15, 16] 等，系统的失效概率可以用一阶边界的上阶来近似，即系统的失效概率简单地近似为各失效模式的概率和.

由于该类方法未考虑模式间的相关性，所以当模式间相关性很大时， P_f 的误差很大. 以模式间相关性 $\rho = 1$, 且 $P_1 = P_2 = P_i = \cdots = P_m$ 为特例. 这时由 first-order upper bound 得 $P_f = mP_i$, 而由模式相关性的基本概念知，这时 P_f 应为 P_i, 两者相差 m 倍. 因此，基于 first-order upper bound 的系统可靠性优化结果误差是很大的，这也是在早期的基于结构可靠性优化方法研究中人们将注意力集中在单失效模式情况的理由.

1.2.2 以二阶上界 (second-order upper bound) 为特征的方法

代表性文献有 [8] 和 [17~20]. 在该方法中，系统的失效概率可以用 Ditlevsen 的二阶边界的上界来近似.

对于系统可靠度计算而言，目前已有各种积分方法、等价线性化方法等，这些方法所得失效概率结果均较 second-order upper bound (简称 SOUB) 为优，但是这些方法不宜在可靠性优化设计中采用，因为这些方法都无法进行敏度分析，只能用差分法进行. 而 SOUB 则可进行约束的敏度分析，从而使优化过程中的计算量大为减少. 因此，从计算效率与计算精度的综合效果来看，在基于可靠性的优化设计中采用 SOUB 无疑是明智的选择，这一结论已被 J.-S. Yang 等人所证实.

目前，在结构可靠性分析中除以上方法外，还有各种准则方法，例如文献 [21, 22] 等，这些方法仍需要对可靠度约束条件进行差分处理.

需要指出的是， O. Ditlevsen 已经证实，在模式间相关系数较大时 (比如大于 0.6), SOUB 也可能会导致较大的误差. 针对这种情况，文献 [23, 24] 分别提出了四阶和三阶边界方法. 在这类方法中分别含有四阶和三阶共失效概率，因此其精度高于 SOUB, 但敏度分析的工作量需要进一步研究.

1.3 方法的评述

根据以上讨论，我们可以得出以下几点结论:

(1) 在可靠性优化中，计算单模式的可靠度时，目前仍以 AFOSM 方法为好，这是大多数研究者所共认的. 但 AFOSM 方法有时误差较大，需要进一步发展.

(2) 在可靠性优化中，计算系统的可靠度时，目前以 SOUB 为好，这也是许多研究者的共同认识. 但当失效模式间相关系数较大时，应发展更好的方法.

(3) 结构可靠性优化方法的发展过程实质上是结构可靠性分析方法的发展过程. 例如，在以单模式可靠度为约束条件的优化模型中，可靠性分析方法由 MVFOSM→AFOSM→AMV, 而相应的可靠性设计方法也由 CCP→SIO→SSI; 在以系统可靠度为约束条件的优化方法中，可靠性分析方法由 first-order upper bound→second order upper bound, 则相应的可靠性优化方法也在发展. 但是，合适的可靠性方法以能对可靠度约束进行敏度分析为条件，否则计算量过大.

(4) 对于简单结构的简单失效模式情况，如悬臂梁结构的自由端位移、简单结构的固有频率等等不需要用有限元素法求解结构响应的情况. 目前的方法已相当有效，对于必须用有限元素法求解结构响应的中小型结构，目前的方法亦很有效. 例如桁架结构、刚架结构、翼盒结构

等等. 但是对于超大型结构，特别是多个结构部件构成的组合结构，笔者认为目前方法仍有许多不足之处. 具体理由如下:

(i) 在大型复杂结构可靠性分析中，枚举主要失效模式是关键性的步骤，而这一步骤对基于可靠性的优化设计更具有重要意义. 这时若以元件强度和外载作为基本随机变量，AFOSM 方法是精确的，敏度分析的工作量直接与主要失效模式的数目有关. 而对于象整架飞机这样的大型组合结构，单纯的有限元分析就要占有大量的计算机内存和耗费大量的计算机时，因此对于充满结构重分析的主要失效模式的枚举过程根本无法进行，更别说结构的优化设计了.

(ii) 对于以位移 (或刚度) 为失效模式的可靠性分析问题. 若该结构必须用有限元素法来求结构的变形响应，一般地讲，不可能直接写出位移与基本随机变量的解析关系式. 若应用响应面法，则每写一个刚度失效模式的近似表达式，需要若干次全结构的有限元分析以确定近似表达式中的系数，这对于组合结构的多刚度失效模式情况，由于工作量太大而不现实. 众所周知，结构优化过程要反复地进行可靠度计算，其工作量是非常大的.

(iii) 目前结合有限元素法的结构可靠性静强度分析方法中，有限元与可靠性分析单元是二位一体的，这对于中、小型结构而言是可行的，因为这样的单元体既可以保证应力应变的精度又具有承载和传载的功能. 但是，对于大型组合结构，应力应变分析单元体与可靠性分析单元体不一定统一. 因为应力应变单元体的目的是要保证应力应变分析的精度，因此常常是较小的 (相对于分析对象而言), 而可靠性分析单元要具有承载和传载的功能，其尺寸一般要求较大，可能包含若干甚至十几个、几十个应力应变分析单元体，这一问题目前仍没有很好地得以研究和解决.

综上所述，无论从计算量而言还是从可靠性分析的现实可能性而言，目前的结合有限元素法的结构可靠性分析理论只能解中等规模的可靠性优化问题.

(5) 目前的可靠性优化甚至一般性的结构优化问题，大多数是用以确定结构设计变量，绝大多数是用以确定结构元件的尺寸，但是对于该阶段之前的诸如可靠度指标和重量指标的分配这一个非常重要的环节不仅没有分析计算方法，甚至没有科学的思考程序，这是工程设计理论中的一个大漏洞 [25]. 以机体结构为例，在结构设计的方案阶段，目前并不考虑可靠性指标最优地分配给各结构部件; 重量分配也是仅仅依据飞机总体设计的要求简单进行的. 目前正在处于研究热点的大系统理论与方法给这些问题的解决已经提供了强而有力的手段 [26~29].

2 大型结构可靠性设计的大系统方法

2.1 大系统方法的基本思想

根据 Sobieski 的大型工程系统多学科优化方法 (MDO-multidisciplinary design optimization) 的概念，大系统方法主要具有以下特点: 面向设计的系统分析方法 (敏度分析、简易的、耗费 - 精度折衷的重分析方法及数据管理及可视化) 、系统近似概念、系统数学模型，系统的离散化、设计空间搜索方法，优化程序及人 - 机程序界面.

本文第一节中对目前的基于可靠性的优化设计方法所作的分析评述的大部分实质上都是基于以上特点进行的. 本文下面的论述也可以看成是以上特点中的大部分在基于可靠性的结构优化设计问题中的具体化. 应当指出的是，本文所阐述的问题仅仅是引用大系统化方法解决基于可靠性的大型结构优化设计问题的可能性及基本思路，还未涉及到这些大型结构的多学科优化问题.

在国内, 王光远为首的研究组等利用优化方法求解结构的造价与其可靠度的函数关系 [30,31], 这种思路也适合推导结构重量指标与可靠度指标的关系. 其对大型工程结构的优化设计具有的重要意义是可以根据结构的重量或造价指标迅速得到结构系统的可靠度指标，或者根据结构的

可靠度指标得到结构的重量或造价指标，为合理地确定大型结构设计指标提供依据. 本文所讨论的问题侧重于如何将给定的设计指标值 (结构重量或可靠度，且已假定它们是合理的) 优化地分配给各级子系统，而暂不涉及这些指标的合理性问题.

2.2 大型结构的层次性和分解性

对于一个工程系统，大系统化方法的可行性受该系统的可分解性制约，具有层次性的系统是比较适合用大系统化方法的，因为这时并不需要解耦就可分解. 大型结构的一个共同特点就是它具有明显的层次性. 所谓大系统的层次性也就是说大系统的各个单元可组成若干子系统，若干子系统还可以组成更高级的子系统，直至组成最终大系统.

象飞机机体这样的大型薄壁结构即显著地具有层次性并且可以进行分解，图 1 是一个初步分解框图.

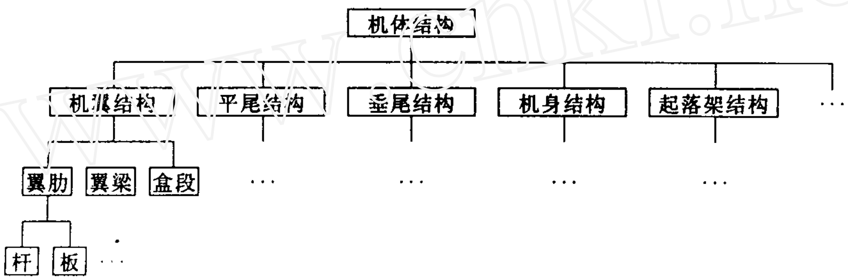

图 1 机体结构一种可能的分解型式示意图

在图 1 中最基本的结构子系统是结构元件即杆或板. 而板可以是纯剪板，也可以是能够同时承受正应力和剪应力的板. 该结构元件最好是有限元素法中的有限单元体. 图 1 仅仅是为了说明机体结构具有层次性而举的一个例子. 至于一架真实的机体结构如何分解，要根据具体情况并遵循下面提到的若干原则而定.

2.3 大型结构分解的若干基本原则

由于大型结构的分解直接关系到结构设计条件的最优性分配的难易和方法. 因此，从可靠性指标和重量指标的分配的立场，我们初步提出以下几个原则:

(1) 同一级子系统失效之间要有较强的独立性，这样子系统的可靠度与上一级子系统的可靠度之间可以用较为简单的公式表达. 以一个二层系统为例:

(a) 子系统串联　　(b) 子系统并联

图 2

图 2(a) 所示的二层系统表示只要有一个子系统失效，顶系统 (高一级子系统) 就会失效，图 2(b) 所示的系统表示只有当两个子系统都失效时顶系统才能失效. 如果在对结构进行分解时同级子系统失效间的独立性条件能得到较好的满足，则

$$\text{按图 2(a)}\quad R_S = R_1 \cdot R_2 \tag{3a}$$

$$\text{按图 2(b)}\quad R_S = 1 - (1 - R_1)(1 - R_2) \tag{3b}$$

(2) 子系统失效相关性很强时应适当合并成一个子系统．如飞机中的两个机翼，若假定其中之一已经失效，则另一个机翼在平飞过程中的承载会加倍，失效可能性增大，因此是失效相关的两个子系统，这时应当将两个机翼看成一个子系统以保证与同级子系统间的相互独立性．至于两个机翼组成的子系统之可靠度可用下式求得：

$$R_S = 1 - P(A_2/A_1)P(A_1) \tag{4}$$

式中 A_1, A_2 分别表示机翼失效这两个随机事件， $P(A_1) = 1 - R_1$, $P(A_2/A_1)$ 是需要计算的．

(3) 本文建议，在大型复杂结构的层次性分解中，最基本的子系统可以不是图 1 所示的结构元件，而应当是用目前已经发展的基于可靠性的结构优化设计理论可以完全解决的中小型结构，如加强框、翼肋、翼梁、盒段等．这样做的好处是一系列的．当子结构间没有明显的分离面时，若将结构元件看成基本的子系统，这时将有大量的子系统间的失效将是相关的， (4) 式必须被大量地反复应用，而且在更复杂的情况下，可靠度指标的最优分配将无法进行．因为对于一个复杂的子系统 (特别指联结关系复杂的高静不定结构) 很难将其分解成低一级的子系统．若直接将这样的子系统看成基本子系统，则完全回避上面问题，可靠度和重量的分配由优化方法在各个有限单元间自动完成 (通过优化迭代)．另外，目前已发展的方法和技术完全可以解决该问题，因此，可以很好地继承目前的研究成果．

2.4 设计指标分配的过程描述

以图 3 所示的三级系统为例说明重量指标的分配．图中 W 表示结构总重量，是要分解的目标． W_i $(i = 1, 2)$, W_{ij} $(i = 1, 2,\ j = 1, 2)$ 分别表示一级、二级子系统的重量； R_S 表示系统的可靠度， R_i $(i = 1, 2)$, R_{ij} $(i = 1, 2,\ j = 1, 2)$ 表示一、二级子系统的可靠度．

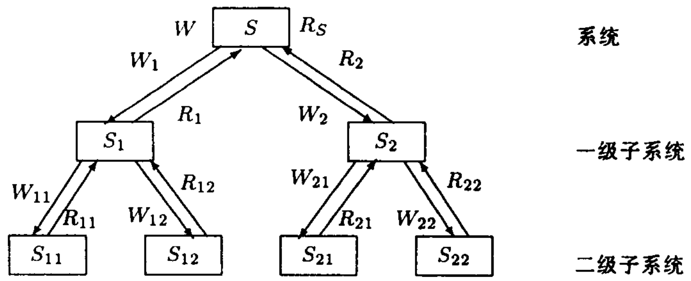

图 3 某结构系统重量指标分配简图

目前面临的任务就是将 W 合理地分解到各个子系统之中，以确保总系统具有高可靠度．在下面所描述的数学模型中，假定各级子系统间是串联关系且失效是相互独立的，因此，两级系统间的可靠度按公式 (3a) 计算；若在实际分析中有子系统间是并联关系，则可靠度公式按 (3b) 计算即可；若两个子系统失效是相关的，则合并成一个子系统，其系统综合可靠度按公式 (4) 进行计算．

图 3 所示结构的重量指标分配问题可用图 4 的数学模型框图表示．在主规划 MP 中，目标函数值及其导数值可由 SP-1 提供的 $R_i(W_i)$ 及 $R'_i(W_i)$ $(i = 1, 2)$ 得到，因此，可以由任何约束规划法求解；同样在子规划 SP-1 中的目标函数值及其导数值由 SP-2 提供的 $R_{ij}(W_{ij})$, $R'_{ij}(W_{ij})$ 获得 $(i, j = 1, 2)$; 而 $R'_{ij}(W_{ij})$ 在 SP-2 中通过对约束条件中的常数 W^*_{ij} 进行摄动而得到． MP 是通过最优得重量指标 W_i 来控制 SP-1, 而 SP-1 又通过最优的 W_{ij} 来控制 SP-2. SP-2 就是目前研究较多的结合结构有限元素法的最大可靠度设计问题．

根据陈树勋在文献 [28] 中建议的求解方法，上面系列规划问题的主要求解思路如下：

(1) 给定重量的初始分配方案 $W \to W_1$, $W_2 \to W_{11}, W_{12}; W_{21}, W_{22}$.

(2) 由 SP-2 得 $R_{ij}^{(1)}, R_{ij}^{(1)\prime}$;

(3) 由 SP-1 得 $R_i^{(1)}, R_i'$;

(4) 由 MP 得 $W_i^{(1)}$;

(5) 由 SP-1 得 $W_{ij}^{(1)}$;

(6) 由 SP-2 得 $R_{ij}^{(2)}, R_{ij}^{(2)\prime}$ 返回 (3), 直至所有规划解都收敛.

值得指出的问题是, 在产品总体设计阶段, 根据总体设计的要求, 对各部件的重量比例有一定的要求, 例如, 飞机各部件必须满足全机重心要求. 这相当于飞机结构各子系统重量之间存在一定的约束条件, 只要将这些约束条件加入到相应的主规划或子规划中去即可.

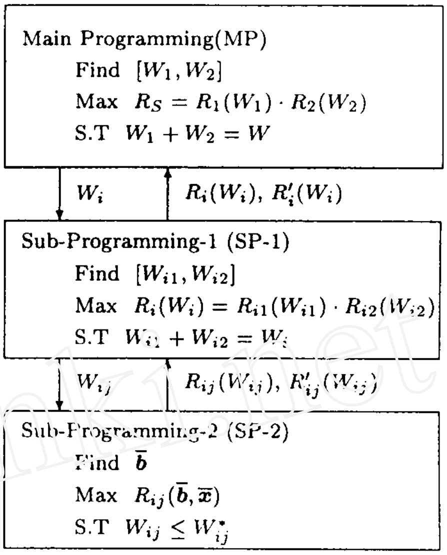

图 4 重量指标分配的数学模型

下面简单探讨一下上面规划方案的计算量问题. 对于图 3 所示的规划问题有一个主规划, 二个一级子规划, 四个二级子规划问题, 似乎计算量很大. 其实只要认真分析一下各级规划问题的目标函数及约束条件不难发现, 由于 MP 及 SP-1 中目标函数和约束条件都非常简单, 设计变量数目也较少, 因此所占计算机时很少, 所需存储量也很少, 其主要工作量在 SP-2 阶段, 即目前已发展为较成熟的基于可靠性的结构优化过程. 由于 SP-2 中的对象已是二级子系统 (在实际问题中可能是更低级的子系统), 它的典型结构是加强框、翼肋、翼梁、翼盒、桁架、刚架等. 前面已经指出, 对于这些子结构只采用有限元素法和 second-order upper bound 相结合的方法, 计算量并不很大. 因此, 完全有理由相信: 本文的多级规划方案是可行的.

对于可靠度指标的最优性分配 (这时, 结构重量为约束条件), 其整个计算过程与重量指标的分配过程基本相同, 这里不再赘述.

参 考 文 献

1 Charnes A, Cooper W W. Chance constrained programming. *Management Science*, 1958, 73~78

2 Davidson J W, Felton L P, Hart G C. Optimum design of structures with random parameters. *Computers & Structures,* 1977, 7: 481~486

3 Rao S S. Structural optimization using chance constrained programming technique. *Computers & Structures,* 1980, 12: 777~781

4 Rao S S. Automated optimum design of wing structures: a probabilistic approach. *Computers & Structures,* 1986, 24(5): 799~808

5 Rao S S. Multiobjective optimization in structural design with uncertain parameters and stochastic processes. *AIAA Journal,* 1984, 22(11): 1670~1678

6 Frangopol D M. Structural optimization using reliability concepts in design. *Journal of Structural Engineering, ASCE,* 1985, 111(11): 2288~2296

7 Hasofer A M, Lind N C. Exact and invariant second moment format code. *Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE,* 1974, 100(EM!): 111~121

8 Yang Y S, Nikolaidis E. design of aircraft wings subjected to gust loads: a safety index based approach. *AIAA Journal,* 1990, 29(5): 804~812

9 Kwark B M, Lee T W. Sensitivity analysis for reliability-based optimization using an AFOSM method. *Computers & Structures,* 1987, 27(3): 399~406

10 Mahidhar V Reddy, Ramana V Grandhi, Dale A Hopkins. Reliability Based Structural Optimization: A Simplified Safety Index Approach. AIAA- 93-1418-CP

11 Feng Y S. The computation of failure probability for nonlinear safety margin equation. *Journal of Reliability Engineering and System Safety,* 1990, 27: 323~331

12 李云贵，赵国藩．结构可靠度的四阶矩分析法．大连理工大学学报，1992, 4
13 李云贵，赵国藩，张保和．结构可靠度的渐近分析法．大连理工大学学报，1994, 4
14 佟晓利，赵国藩．改进的 Rosenblueth 方法及其在结构可靠度分析中的应用．大连理工大学学报，1997, 3
15 Moses F, Kinser D E. Optimum structural design with failure probability constraints. *AIAA Journal*, 1967, 5(6): 1152~1158
16 Nakib R, Frangopol D M. RESA and RBSA-OPT: two computer programs for structural system reliability analysis and optimization. *Computers & Structures*, 1990, 36(1): 13~17
17 Ditlevsen O. Narrow reliability bounds for structural systems. *Journal of Structural Mechanics*, 1979, 7: 453~472
18 Li W J, Li Yang. An effective optimization procedure based on structural reliability. *Computers and Structures*, 1994, 52(5): 1061~1067
19 唐继武．结构系统静强度可靠性分析及优化方法研究．［硕士论文］．西安：西北工业大学，1994, 3
20 杨力．结构可靠性优化设计方法研究．［硕士论文］．西安：西北工业大学，1991, 3
21 Feng Y S, Moses F. A method of structural optimization based on structural system reliability. *Journal of Structural Mechanics*, 1986, 14(4): 437~453
22 Feng Y S, Song B F. Reliability analysis and design for multi-box structures. *Computers & Structures*, 1990, 37(4): 413~422
23 伍朝晖，赵国藩．数论方法在结构体系可靠度计算中的应用．大连理工大学学报，1998, 1
24 Zhang Yongcang. High-order reliability bounds for series system and application to structural systems. *Computers & Structures*, 1993, 46(2): 381~386
25 王光远．工程软设计理论．北京：科学出版社，1992
26 Jaroslaw, Sobieszczanski-Sobieski. Multidisciplinary design optimization: an emerging new engineering discipline. In: Advances in Structural Optimization. Kluwer Academic Publishers, 1995, 483~496
27 Rogers J L. A Knowledge-Based Tool for Multilevel Decomposition of A Complex Design Proplem. NASA TP-2903, 1989
28 陈树勋，霍达，黄海．工程大系统优化设计的设计条件最优分配．系统工程理论与实践，1993, (4)
29 陈禹六．大系统理论及其应用．北京：清华大学出版社，1988
30 王光远，谭东耀．工程系统最优可靠度的决策．工程力学，1990, (1)
31 王光远，张淑华，谭东耀．考虑结构失效相关时串联工程系统造价与可靠度间的关系．哈尔滨建筑工程学院学报，1992, (4)

A RELIABILITY-BASED MULTI-LEVEL OPTIMIZATION METHOD FOR LARGE-SCALE STRUCTURE

Song Bifeng　Li Weiji　Ji Guoming　Tang Jiwu

Aircraft Engineering Department, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

Abstract Based on Multi-level optimization theory, a reliability-based optimum strategy is presented to solve the large-scale structure problem. The main idea is that the optimum distributions of structural reliability design index and weight design index are involved in the optimization process from the conceptual design. A large-scale structure is decomposed into a multi-level sub-structure system, in which the reliability-based optimum solution of the lowest-level sub-structures can be obtained by the present methods.

Keywords multi-level optimization, reliability, structure