

技术开发报道

复杂结构可靠度的数值模拟

许特¹ 任新见 江克斌

(解放军理工大学工程兵工程学院, 南京 210007)

[摘要] 针对大型复杂结构分析中极限状态方程难于确定的问题, 基于数值模拟技术探寻了如何利用通用结构分析有限元软件编程实现工程结构的可靠性分析。计算表明, 数值模拟是求解复杂结构可靠度的有效途径。

[关键词] 结构可靠度; 不确定性; 蒙特卡罗法; 响应面法

[中图分类号] TU311.41

[文献标识码] A

[文章编号] 1001-523X(2003)03-0004-03

NUMERICAL VALUE SIMULATION FOR COMPLEX STRUCTURE RELIABILITY

Xu Te Ren Xin-jian Jiang Ke-bin

[Abstract] According to the problem that margin functions for complex structures are difficult to determined, programmes based on general finite element method software are utilized to analyse structure reliability. Examples indicate that numerical value simulation is an effective method for structure reliability analysis.

[Keywords] Structure reliability; Uncertainty; Monte Carlo method; Response surface method

1 结构可靠性定义、来源及可靠性分析的意义

安全性、适用性、耐久性统称为结构的可靠性。可靠性问题源自结构计算时所引用参数(荷载、材质、构件尺寸等基本变量)的不确定性, 如信息资料缺乏导致的统计不确定性、分析中对实际结构简化引入的计算模型不确定性及物理性的不确定性等。

可靠性分析对工程结构的设计、诊断维修等均有重大意义。若某因素对结构失效影响较大, 则在设计制造过程中就要严格加以控制, 使其具有较小的变化, 以保证结构有足够的安全可靠。反之, 如某因素的变异性对结构可靠性的影响不显著, 则在进行结构可靠性分析时, 就可把它当定值处理, 以减少随机变量的数目。这对提高结构可靠性分析的效率很有价值。

另一方面, 如果结构的可靠度或失效概率没有达到预定的水准, 则首先须变化对可靠度有重要影响的输入变量。在结构的可靠性和失效概率可以接受, 输出结果变量的分散程度较小时, 可考虑在不影响可靠性和质量的前提下如何节省经费。这种情况下应首先变更那些影响程度较小的参数。

2 复杂结构可靠性分析的方法

在结构可靠性分析中, 结构的极限状态是由功能函数表达的, 其形式为: $Z = G(X)$ 。

其中随机矢量 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 表征了工程中存在着的不确定信息, 如材料参数与结构几何尺寸的随机性及荷载的随机性等。

当 $G(X) > 0$ 时, 结构处于安全状态;

当 $G(X) = 0$ 时, 结构处于极限状态;

当 $G(X) < 0$ 时, 结构处于失效状态;

结构的失效概率是

$$P_f = P[G(X) < 0] = \int_{(X) < 0} f(X) dX$$

其中 $f(X)$ 为随机矢量的联合概率密度函数。

目前可靠性分析中大多数方法如一次二阶矩法和数值积分法等都要求功能函数明确表达。而实际工程中, 由于结构本身构造复杂, 作用形式多样, 要得到所感兴趣的结构行为, 如最大应力、变形等, 往往须借助结构分析程序。此时无法得到功能函数的明确表达式, 直接应用上述方法就会遇到困难。这时需要借助数值模拟进行结构可靠度分析。蒙特卡罗模拟是可靠性数值模拟中最经典的方法, 在此不多作介绍。蒙特卡罗法根据抽样技术的不同分直接抽样法和拉丁超立方方法等, 算法简明易懂, 虽然需要循环的次数多, 效率较低, 但这一缺陷已为现代高性能的计算机所弥补, 蒙特卡罗法仍有广泛的应用范围。

收稿日期: 2002-12-26

作者简介: 许特(1980-), 男, 山东泰安人, 解放军理工大学工程兵工程学院桥梁与隧道工程硕士研究生。主要从事复合材料、特种结构研究。

响应面法是近几年发展起来的处理复杂结构可靠性问题的另一种有效方法。其思想是通过一系列确定性试验拟合一个响应面来模拟真实的极限状态曲面。以两个变量为例:结构响应 y 与变量 x_1, x_2 具有未知的、不能明确表达的函数关系 $y = g(x_1, x_2)$ 。要得到这个真实函数通常需要大量模拟,而响应面则是用有限的实验来回归拟合一个关系 $y' = g(x_1, x_2)$,并以此代替真实曲面 $y = g(x_1, x_2)$,应用于可靠度分析中。

选择响应面表达形式时,一方面要尽可能简单,另一方面要考虑到能够灵活地反映各种不同的真实曲面形状。对 n 个随机变量 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 的情况,通常取不含交叉项的二次多项式形式: $y' = g(X) = a + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n c_i x_i^2$ 。其中 $a, b_i, c_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 待定。为得到上式中的待定因子,可取一定的状态进行试验。

3 复杂结构可靠度数值模拟的实现

基于通用结构分析有限元软件 ANSYS 利用数值模拟技术和 APDL 语言编程进行可靠度分析,可解决以下问题:根据模型中输入参数的不确定性计算待求结果变量的不确定程度;确定由于输入参数的不确定性导致的结构失效概率数值;已知容许失效概率确定结构行为的范围如最大变形、最大应力等;判断对输出结果和失效概率影响最大的参数,计算输出结果相对于输入参数的灵敏度;确定输入变量、输出结果变量之间的相关系数等。

分析可以采用批处理方式和交互方式,通常由以下主要步骤组成:生成分析文件、可靠性分析阶段、结果后处理。

3.1 生成分析文件

分析文件是可靠性分析中至关重要的一环,包括预处理模块、求解模块、结果提取等内容。结构分析程序通过重复执行分析文件来完成可靠性分析的循环。必须保证分析文件的正确性和完整性并尽量去掉冗余命令。

预处理模块 (/PREP7) 主要工作为设定单元类型、实常数、材质、构建结构实体模型并进行网格划分等,必须采用参数化建模。

求解模块 (/SOLU) 中定义分析类型及相应选项、施加荷载、确定荷载步选项等并求解。分析所需的数据都需要设置,如缩减自由度分析中的主自由度、非线性分析中的收敛准则、谐响应分析中的频率变化范围等。

求解结束后作用 *GET 命令提取结果赋给将在可靠性分析阶段被指定为输入变量、输出结果变量的参数。

3.2 可靠性分析阶段

可靠性分析阶段主要包括:进入可靠性分析模块,指定分析文件;选择、定义输入变量及输入变量之间的相关系数,确定各输入变量遵从的分布类型、分布函数及其参数;指定输出结果变量;选择分析工具和方法(蒙特卡罗法或响应面法等);执行可靠性分析循环。

响应面法中模拟循环的次数取决于输入变量的个数,因此须选择最重要的、对输出结果有重大影响的变量作为输入

变量。如不能确定哪些变量是重要的,可先对所有的随机变量进行一次蒙特卡罗模拟,再选重要的,去掉不重要的。拟合的响应面是否为真实曲面的较好近似,可应用二水平因子设计 (2^n 次试验) 或中心复合设计 ($2^n + 2n + 1$ 次试验) 回归得到待定因子的最小二乘估计,以误差分析判别准则决定是否接受。

3.3 后处理

后处理过程根据计算结果解决本节开始时提出的问题,主要包括失效概率的打印、柱状图、分散程度的显示、灵敏度的图标、相关性矩阵的生成等。具体实现结合算例表述如下。

4 算例

某特种结构计算模型简图如图 1 所示,纵桁、肋骨受分布力作用,荷载示意图如图 2。

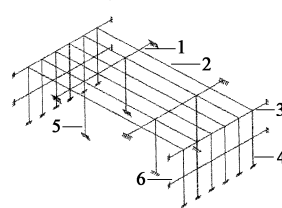


图 1 结构计算模型

1—纵梁;2—横梁;3—角钢;
4—肋骨;5—立柱;6—间断纵梁

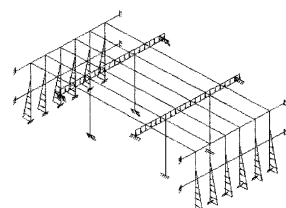


图 2 结构所受荷载示意

将已知条件和待求按可靠性分析、参数化建模要求整理,选取随机输入变量如下:

肋骨高度 (LGGD = 2.05 m)、横梁间距 (HLJJ = 0.5 m)、纵桁间距 (ZHJJ = 2.8 m)、左 (右) 角钢与左 (右) 纵桁间距 (JGZHJJ = 1.6 m);

间断纵梁、肋骨截面面积及轴惯性矩 ($LGA = 4.100 \times 10^{-3} \text{ m}^2$, $LGIz = 1.863 \times 10^{-6} \text{ m}^4$)、角钢截面面积及轴惯性矩 ($JGA = 1.911 \times 10^{-3} \text{ m}^2$, $JGIz = 3.716 \times 10^{-6} \text{ m}^4$)、横梁截面面积及轴惯性矩 ($HLA = 3.990 \times 10^{-3} \text{ m}^2$, $HLIz = 1.098 \times 10^{-6} \text{ m}^4$)、纵梁截面面积及轴惯性矩 ($ZLA = 4.540 \times 10^{-3} \text{ m}^2$, $ZLIz = 1.290 \times 10^{-5} \text{ m}^4$)、立柱截面面积 ($LZA = 3.818 \times 10^{-3} \text{ m}^2$, $LZIZ = 1.010 \times 10^{-5} \text{ m}^4$);

作用在纵桁上的均布力 $FORCEQ = 80 \text{ kN/m}$ 、作用在肋骨上的分布力 $FORCEQ2 = 5.228 \text{ kN/m}$ 。设各随机输入变量服从正态分布,取变异系数 $\delta = 0.1$ 。

输出结果变量为结构的最大竖向变形 DISP、最大等效应力 SMAX。

求解目的如下:

确定输出结果变量对输入变量变化的灵敏度;

确定结构最大变形 DISP 及变形低于 DISP 的概率;确定结构最大等效应力 SMAX 及结构应力小于 SMAX 的概率;

设最大竖向变形不超过 X 的概率为 90%,确定 X 值;设最大等效应力不超过 Y 的概率为 90%,确定 Y 值;

(下转第 16 页)

c) 找形完成后,根据实际的材质属性设置索膜初始预应力值,计算索膜内的应力值。因素膜在整体结构中应力重分配,在分析应力结果后,尚需调整初始预应力值,直到达到理想结果为止。

在应用 ANSYS 有限元软件对本例进行找形分析后,达到了理想的建筑造形结果。通过适当地调整索膜内的预应力值,使膜内第一主应力值控制在 2.01 MPa~4.30 MPa 之间。本例所选为 1 mm 厚膜材,因此膜内受力为 2.0 kN/m~4.3 kN/m 之间,约为膜片强度的 5%~10%,是膜材理想的使用应力状态。笔者使用 ANSYS 进行了多项工程的找形分析工作,均得到了满意的结果,因此,使用 ANSYS 进行索膜结

构的找形分析是方便和可靠的。

参考文献

- 1 沈世钊.膜结构——发展迅速的新型空间结构.哈尔滨建筑大学学报,1999(4)
- 2 郭璐,蓝天.膜结构的初始形状判定与静力分析及其模型试验研究.第七届空间结构学术会议论文集:1994
- 3 R B Haber, J F Abel. Initial equilibrium solution methods for cable reinforced membranes[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1982, 30: 263-284
- 4 M R Branes. Formfinding and analysis of prestressed nets and membranes[J]. Computer & Structures, 1988, 30(3): 685-695

(上接第 5 页)

确定响应面方程组成项及其系数。

根据问题的已知和待求,基于前文思想编制 APDL 程序,求解得:

a) 影响结构最大竖向变形、结构最大等效应力的主要因素为 LGQD、FORCEQ2、HLJJ、HLIZ、HLA、LZIZ (如图 3、图 4)。

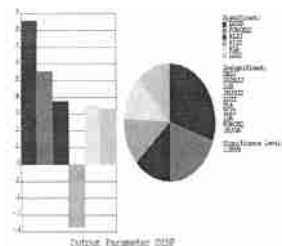


图 3 影响 DISP 取值的主要因素

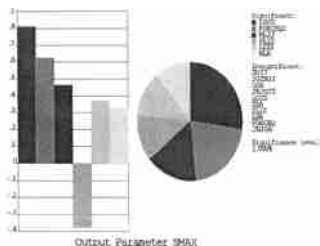


图 4 影响 SMAX 取值的主要因素

b) 从图 5、6(图 5 中横坐标单位:m;图 6 中横坐标单位:Pa)可以看出,结构最大竖向变形低于 1.8×10^{-4} m 的概率为 98%;结构最大等效应力小于 112 MPa 的概率为 98%。

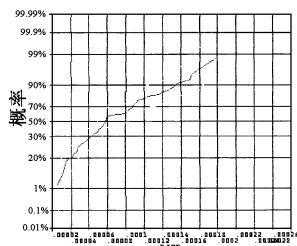


图 5 结构竖向最大变形 DISP 概率分布函数

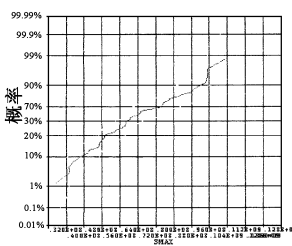


图 6 结构最大等效应力 SMAX 概率分布函数

c) 当 $X = 1.548 \times 10^{-4}$ m 时,最大变形不超过 X 的概率为 90%;当 $Y = 100.783$ MPa 时,最大变形不超过 Y 的概率为 90%;

d) 结构最大竖向位移 DISP(单位:m)响应面方程:

组成项	系数
Constant(常数项)	5.29714×10^{-4}

LGQD	-4.74182×10^{-4}
FORCEQ2	-9.22025×10^{-8}
HLJJ	3.21459×10^{-4}
LGQD * LGQD	1.07618×10^{-4}
FORCEQ2 * FORCEQ2	1.41146×10^{-12}
HLJJ * HLJJ	-5.47095×10^{-4}
LGQD * FORCEQ2	4.02103×10^{-8}
FORCEQ2 * HLJJ	3.76391×10^{-8}
HLJJ * HLIZ	-4.89312×10^{-4}
HLA * LZIZ	-1.11277×10^{-3}

结构最大等效应力 SMAX(单位:Pa)响应面方程:

组成项	系数
Constant(常数项)	4.16876×10^4
FORCEQ2	-1.20156×10^4
LGQD * FORCEQ2	1.28315×10^4
HLJJ * HLIZ	-1.02985×10^{13}

根据图 3、图 4,选取主要影响因素,将非主要因素视为确定值,重新进行分析计算,所得结果与上文结果一致,进一步证明了结果的可靠性、分析方法的准确性。

5 结束语

结构可靠度的数值模拟技术算法明了,易于在通用有限元软件上实现,在解决结构可靠性问题时高效、实用,是结构可靠性分析方法的一个重要组成部分,对于大型复杂结构的可靠性问题优势尤其明显,值得推广应用和深入研究。

参考文献

- 1 王国强.实用工程数值模拟技术及其在 ANSYS 上的实践.西安:西北工业大学出版社,1999
- 2 常大民,江克斌.桥梁结构可靠性分析与设计.北京:中国铁道出版社,1995
- 3 赵国藩,金伟良,贡金鑫.结构可靠度理论.北京:中国建筑工业出版社,2000
- 4 B. Bhattacharyya, S. Chakraborty. Sensitivity Statistics of 3D Structures Under Parametric Uncertainty. Journal of Engineering Mechanics, 2001 (9)