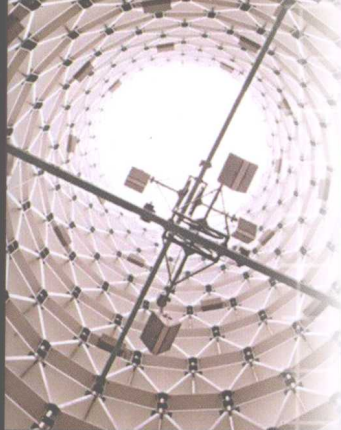
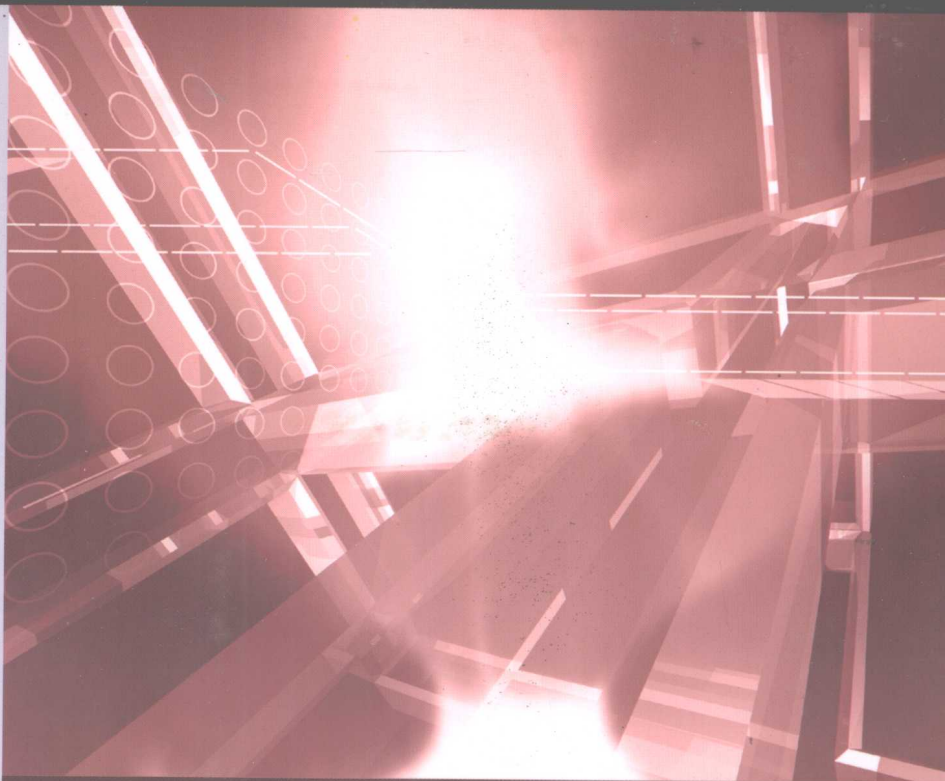




张伟 主编

结构可靠性理论与应用

THEORY AND APPLICATION OF STRUCTURAL RELIABILITY



科学出版社
www.sciencep.com

内 容 简 介

本书全面介绍了结构可靠性计算的理论和应用,既有可靠性的基本理论,又有结构可靠性发展的最新研究成果和最新应用。本书首先介绍了结构可靠性计算的基本理论,包括结构可靠性计算方法和结构可靠性分析中灵敏度因子的计算等,详细介绍了可靠性计算的直接积分法,提出了新的灵敏度因子计算理论,给出了研究各因素对结构失效影响大小的灵敏矢量计算理论;然后对圆柱壳结构、厚壁筒结构、钢框架结构进行了结构可靠性与灵敏性分析;最后结合大型桥梁及板梁类结构对结构损伤理论进行了研究与探讨,并介绍了圆柱筒结构的可靠性优化设计。

本书可作为结构工程、工程力学、船舶与海洋工程、机械、化工、建筑、水利等相关专业工程技术人员的参考资料,也可作为相关专业的本科生和研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

结构可靠性理论与应用=Theory and Application of Structural Reliability/张伟主编. —北京:科学出版社,2008

ISBN 978-7-03-020204-8

I. 结… II. 张… III. 建筑结构-结构可靠性-研究 IV. TU311.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第172655号

责任编辑:耿建业 杨 然/责任校对:陈丽珠

责任印制:刘士平/封面设计:耕者设计室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008年1月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2008年1月第一次印刷 印张:15 3/4

印数:1—2 500 字数:302 000

定价:41.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

前 言

结构可靠性设计是一种先进的设计方法,它从设计的初始阶段,就考虑了结构在后续设计、制造、使用过程中的各种不确定性因素,是一种全生命周期的设计方法。这种先进的结构设计法迟早或多或少将代替传统的安全系数设计方法。目前,可靠性分析的理论研究已基本成熟,我国也进行了大量的结构可靠性设计研究工作,制定了一些可靠性设计标准,但要实现可靠性理论在实际结构设计中的应用,许多问题还有待于进一步研究和探索。另外,要实现可靠性理论在实际设计中的应用,还要向工程设计人员和相关学科学生普及这方面的理论知识。希望本书的出版能在这方面起到一点作用。

本书在系统阐述结构可靠性分析方面的基本理论和方法的基础上,着重介绍了作者深入研究的可靠性计算的直接积分法和灵敏度因子计算理论,并将可靠性理论应用于圆柱筒结构、圆柱壳结构、厚壁筒结构、钢框架结构的可靠性分析之中,最后还阐述了结构损伤的识别方法,介绍了可靠性优化设计。

全书共分9章,由张伟担任主编,其中第2章的2.1~2.3节、第5章的5.6节、第8章的8.3节及第9章的9.1节由河南科技大学建筑工程学院张伟编写;第3章和第4章及第9章的9.2节由河南科技大学理学院李雪玲编写;第8章的8.1节、8.2节、8.4~8.6节由南阳理工学院土木工程系的陈孝珍编写;第1章的1.3节、第6章的6.1~6.3节、第7章由河南科技大学建筑工程学院谢镭编写;第1章的1.2节、第5章的5.1~5.5节和第6章6.4节、参考文献及附录D、E由河南科技大学建筑工程学院杨茹萍编写;第1章的1.1节、第2章的2.4~2.6节及附录A、B、C由河南科技大学建筑工程学院于英霞编写;最后由张伟负责统稿。

本书在编写过程中得到中国船舶科学研究中心徐秉汉院士的指导和建议,在此表示最衷心的感谢!同时对中国船舶科学研究中心的崔维成研究员、万正权研究员及王永军高级工程师等提供的帮助和支持表示真诚的感谢。在编写过程中,也引用了许多专家、学者积累的资料,在此一并表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免有不妥之处,恳请广大读者批评指正。

张 伟

2007年8月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 结构可靠性研究的内容和意义	1
1.1.1 结构可靠性分析	1
1.1.2 结构可靠性设计	2
1.1.3 结构的可靠性优化	7
1.1.4 已有结构的可靠性评估	7
1.1.5 不定性模型化的一般原则	9
1.2 可靠性计算方法的分类	11
1.2.1 可靠性计算的基本公式	12
1.2.2 可靠性计算的分类	12
1.3 可靠性指标与失效概率	13
第 2 章 结构可靠性计算方法	16
2.1 一阶二次矩法	16
2.1.1 引言	16
2.1.2 一阶二次矩法基本原理及计算方法	16
2.1.3 失效状态函数形式对均值一阶二次矩法计算结果的影响	18
2.1.4 计算过程对均值一阶二次矩法计算结果的影响	21
2.1.5 先进一阶二次矩法和 Hasofer-Lind 一阶二次矩法的局限性	22
2.1.6 一阶二次矩法在计算船舶结构可靠性时的误差	24
2.1.7 解决多模态相关问题的局限性	25
2.1.8 总结和讨论	25
2.2 直接积分法	25
2.2.1 引言	25
2.2.2 结构失效概率计算的基本理论	26
2.2.3 直接积分法的优越性	30
2.3 数值模拟法计算结构可靠性的理论基础	31
2.3.1 数值模拟法的基本原理	31
2.3.2 直接 Monte Carlo 法	31
2.3.3 重要性样本法	33
2.3.4 改进样本法	34
2.4 响应面法	34

2.4.1 结构可靠度响应面法模拟的基本原理	34
2.4.2 混合模拟法 (hybrid simulation method, HSM) 的基本原理	40
2.5 系统可靠性	41
2.6 可靠性计算方法的选取	42
第3章 结构可靠性分析中灵敏度因子的计算	44
3.1 引言	44
3.2 传统灵敏度因子概论	44
3.3 新灵敏度因子和灵敏度矩阵	46
3.3.1 确定性变量的灵敏性	46
3.3.2 随机变量的灵敏度和灵敏度因子	46
3.3.3 计算实施	48
3.4 圆柱筒结构强度的灵敏性分析	50
3.5 简单载荷和强度失效模式下的灵敏度矩阵计算	51
3.6 混合设计变量的结构可靠性灵敏度矩阵计算	52
第4章 圆柱壳结构的可靠性分析	55
4.1 引言	55
4.2 圆柱壳结构的基本形式及其失效模式	55
4.3 圆柱壳结构的不确定性及随机变量的处理	57
4.3.1 圆柱壳结构设计变量的不确定性	57
4.3.2 截尾分布的概率统计特性处理	58
4.3.3 根据规范确定随机变量近似概率统计特性	59
4.3.4 根据统计数据进行随机变量的概率特性处理	60
4.4 目标可靠度的建立	61
4.4.1 目标可靠度	61
4.4.2 目标可靠度大小的确定	61
4.5 实际工程圆柱壳结构的可靠性分析	63
4.5.1 引言	63
4.5.2 失效区域 D 的确定	64
4.6 耐压圆柱壳结构的可靠性分析实例	67
4.6.1 引言	67
4.6.2 基本公式	68
4.6.3 失效区域 D 的确定	68
4.6.4 基本随机变量的确定	69
4.6.5 计算机程序的编制和使用	69
4.6.6 实例计算	69
4.7 小结	72

第 5 章 厚壁筒结构的可靠性灵敏性分析	73
5.1 引言	73
5.2 厚壁筒结构的可靠性分析	73
5.2.1 失效模式分析	73
5.2.2 随机变量的选取及联合概率密度函数的确定	74
5.2.3 可靠性计算方法	74
5.2.4 厚壁筒结构的可靠性计算与设计	74
5.3 耐压厚壁筒结构的可靠灵敏性分析	76
5.3.1 耐压厚壁筒结构的失效概率计算	76
5.3.2 随机变量的选取及耐压厚壁筒结构的可靠性计算	76
5.3.3 耐压厚壁筒结构的可靠灵敏性计算与分析	77
5.4 厚壁筒结构混合变量的灵敏性分析	78
5.4.1 厚壁筒结构强度的灵敏性分析	78
5.4.2 混合设计变量的厚壁筒结构可靠性灵敏性分析	79
5.5 不同设计变量情况下厚壁筒结构疲劳断裂寿命的灵敏性分析	81
5.5.1 厚壁筒疲劳断裂寿命的计算	81
5.5.2 确定性变量下厚壁筒疲劳断裂寿命的灵敏性分析	81
5.5.3 混合变量下厚壁筒结构概率疲劳断裂寿命的计算及灵敏性分析	82
5.6 厚壁筒结构疲劳寿命的可靠性分析	83
5.6.1 引言	83
5.6.2 疲劳寿命计算的理论基础	84
5.6.3 计算机实施	89
5.6.4 实际结构分析	90
5.6.5 小结	92
第 6 章 钢框架结构可靠性理论	93
6.1 钢框架结构可靠度分析方法现状	93
6.1.1 现行钢框架体系可靠度设计方法的缺陷	94
6.1.2 钢框架体系分析与设计方法的研究与发展趋势	96
6.2 钢框架结构强度可靠性研究	98
6.2.1 基于荷载增量的失效模式识别办法	99
6.2.2 基于系统临界强度的失效模式识别方法	103
6.3 结构可靠度数值模拟的 ANSYS 实现	105
6.3.1 结构可靠度数值模拟分析的 ANSYS 实现	105
6.3.2 结构可靠度数值模拟方法的对比分析	109
6.4 钢框架结构可靠度分析与计算方法	111
6.4.1 体系可靠度评价	111
6.4.2 整体可靠度设计方法及其实用公式	113

6.4.3 小结	118
第7章 钢框架结构可靠性计算与分析	119
7.1 框架结构可靠性有限元分析	119
7.2 钢框架结构可靠度的数值模拟分析计算	120
7.2.1 钢框架的基本条件	120
7.2.2 钢框架结构有限元建模	122
7.2.3 钢框架结构可靠度的 Monte Carlo 模拟分析	124
7.2.4 钢框架结构可靠度的响应面法模拟分析	126
7.3 钢框架结构可靠度的参数分析	129
7.3.1 参数统计分析	129
7.3.2 参数趋势分析	135
7.4 小结	139
第8章 结构的损伤识别	141
8.1 基于静态测量数据的结构损伤定位理论	141
8.1.1 基于灰色相关性分析的结构静力损伤定位理论	142
8.1.2 灰色位移曲率关联系数	143
8.1.3 静态位移曲率置信因子	144
8.1.4 运用静态位移曲率置信因子进行损伤定位	145
8.2 基于改进的多目标遗传算法的结构损伤大小识别理论	147
8.2.1 基于模糊优选理论的改进的多目标遗传算法	150
8.2.2 基于静态测量数据与改进的遗传算法的结构损伤大小识别	152
8.2.3 基于改进的多目标遗传算法的结构损伤大小识别	158
8.3 梁类结构损伤识别数值研究	158
8.3.1 划分为 10 个单元的悬臂梁	158
8.3.2 划分为 6 个单元的悬臂梁	166
8.4 板类结构损伤识别数值研究	170
8.4.1 划分为 192 个单元的两端固支桥梁	170
8.4.2 划分为 48 个单元的两端固支桥梁	179
8.5 大型桥梁结构损伤识别的数值研究	185
8.5.1 划分为 454 个单元的沂河大桥	185
8.5.2 划分为 584 个单元的沂河大桥	195
8.6 小结	200
第9章 圆柱筒结构的可靠性优化设计	202
9.1 圆柱筒结构的可靠性优化设计	202
9.1.1 引言	202
9.1.2 厚壁筒结构的计算模型和失效模式分析	202
9.1.3 可靠性计算方法	203

9.1.4 随机变量的选取及联合概率密度函数的确定	203
9.1.5 厚壁筒结构的可靠性分析与可靠性优化设计	204
9.1.6 小结	211
9.2 目标可靠度约束下的圆柱壳结构优化设计	211
9.2.1 引言	211
9.2.2 设计变量和失效模式	212
9.2.3 优化设计	213
9.2.4 实例分析	217
参考文献	218
附录 A 主要符号	225
附录 B 概率设计的两种近似算法	228
附录 C 常见随机变量	231
附录 D 标准正态概率密度和分布函数值	235
附录 E 球缘钢结构	239

第 1 章 绪 论

1.1 结构可靠性研究的内容和意义

在进行结构设计时,应使所设计的结构在其使用期内满足下列各项功能的要求:①能够承受在施工和使用期内可能出现的各种载荷,保证结构有足够的安全性;②在正常使用时具有良好的工作性能;③具有足够的耐久性;④在偶然事件发生时及发生后,能够保持整体稳定;⑤设计的结构经济、合理。如何评估结构的安全性、适应性、耐久性就成为结构设计和使用的关键问题。结构的设计到建造,荷载、材料尺寸及其特性的确定,建立计算模型、计算结构中的应力情况和确定结构的实际抵抗能力(强度)等,都不可避免地受到各种因素的影响,许多设计变量成为随机变量,从而自然而然地把评估结构可靠性的方法归结到用概率的方法。

目前关于结构可靠性方法的理论已发展得基本成熟,其主要应用于如下两个方面:

(1) 对现有的结构进行可靠性研究,决定它是否可以继续安全可靠地被使用。

(2) 对新结构进行可靠性设计及可靠性优化。

1.1.1 结构可靠性分析

结构的可靠性是指结构在规定条件下和规定时间内完成规定功能的能力。在实际应用中,为了对结构可靠性进行定量的分析,引入了结构的可靠度概念:结构的可靠度是指结构在规定条件下和规定时间内,完成规定功能(结构不破坏)的概率。

结构的可靠性分析是研究结构在各种因素作用下的安全性问题,其实质是计算结构完成规定功能的概率大小,它包括对现有结构的可靠性评估和新设计结构的可靠性分析。

影响结构可靠性大小的因素主要可分为三个方面:

(1) 时间因素的影响。在结构可靠性的定义中,强调了结构在预定时期内完成规定功能的能力,实际上,这种能力是随着时间的变化而变化的。一般情况下,随着使用时间的延长,这种能力也就逐渐降低。因此,研究结构的可靠性必定是在预定的时期内研究的,脱离开具体的时期,谈论可靠性是无意义的。

(2) 使用条件对结构可靠性的影响。结构的可靠性是与预定的使用条件密切相关的。这种使用条件主要是指作用在结构上的载荷效应以及结构抵抗载荷的能力。一般情况下, 如果载荷的类型众多, 数量较大, 结构性能变异显著, 那么结构在预定的使用时间内完成规定功能的能力就较低。由此, 不同的使用条件, 其可靠性程度也不相同。

(3) 规定功能的影响。可靠性定义中的规定功能是根据使用要求和生产水平以及技术标准(或失效标准)确定的。不同的规定功能, 其结构的可靠性也是不同的。

结构可靠性是结构作用及其效应与结构抗力的纽带, 是反映结构安全性、耐久性的一个综合性指标。结构的安全与否, 关系到工农业生产, 关系到人民的生命财产, 关系到社会的进步, 甚至关系到国家的安危及信誉。进行结构可靠性分析的目的, 就是将结构可靠性或失效可能的大小, 用概率的方法定量地表示出来, 以保证结构具有足够的安全水平。概率统计认为, 只要有随机变量(不确定量)的存在, 结构总有失效的可能性, 绝对安全的结构是没有的。对现有结构进行可靠性分析, 不仅对现役结构的使用情况提供必要的资料, 而且为新结构设计提供诸如目标可靠度的确定等参考资料。例如, 通过可靠性分析, 计算求得某潜艇结构的可靠度为 99.99%, 则说明此潜艇在出航执行任务时, 有 99.99% 的可能性不会破坏, 其破坏的可能性为 0.01%。由此我们就可以决定此潜艇是否可以出航, 出航的危险性有多大。通过对一系列在役潜艇可靠度大小的研究, 就可以确定新设计潜艇的目标可靠度大小。

1.1.2 结构可靠性设计

设计是为了满足人们的某种需要而制定的一项计划。设计是一个做出决策的过程, 其基本目的是获取一种能满意地执行它的任务的工作系统。在进行结构设计时, 有两种常用的方法, 第一种方法是传统的定值设计法, 它假定各设计变量为确定的量, 依据一定的安全系数进行结构的设计; 第二种方法是可靠性设计方法, 又称为概率设计, 这种设计方法认为, 作用于结构上的真实外载荷及结构的真实承载能力, 都是概率意义上的量, 设计时不可能精确地确定它们, 它们服从一定的分布。以此为出发点进行结构设计, 能够与客观实际更好地符合, 它能够根据结构的可靠性要求, 把结构失效控制在一个可接受的水平。对现有结构, 通过可靠性分析可以确定其失效的可能性。

随着科学技术的发展, 现代的结构设计逐渐从第一种方法向第二种方法过渡, 最终, 将以可靠性设计方法代替传统的安全系数设计方法。下面首先对极限设计原则进行介绍, 接着对这两种设计方法进行对比分析。

1. 极限状态设计原则

本节先介绍文献(陈定外译 1999; 赵国藩 2000)中的极限状态设计原则。

1) 极限状态

结构或结构构件的性能应以极限状态为基准进行衡量。极限状态的定义为:把整个结构或部分结构的性能从期望状态(可靠)与不期望状态(失效)分隔开来的一种状态。极限状态分为两类。

(1) 承载能力极限状态, 包括:

① 结构或结构的一部分去作为刚体失去平衡(如倾覆);

② 截面、构件或连接因断裂(在某些情况中由于疲劳、腐蚀等影响)或过度变形而达到最大抵抗能力;

③ 结构或部分结构转变为机动体系;

④ 结构或部分结构丧失稳定;

⑤ 原来的结构体系突然变成新体系(如突然完全折断)。

(2) 正常使用极限状态, 包括:

① 可能减少结构工作寿命或影响结构或非结构构件性能或外观的局部损坏, 重复荷载可能影响局部损坏;

② 不可接受的变形;

③ 使人感到不舒服或影响非结构构件或设备功能的过大振动。

除了这两种划分方法外, 根据结构或结构构件超越后的状态划分为:

(1) 不可逆极限状态。引起超越的作用撤除后仍将长期保持超越效应的极限状态, 也即因超越极限状态而引起的损坏和功能失常不能自动恢复。

(2) 可逆极限状态。引起超越的作用撤除后, 将不再保持超越效应的极限状态, 即结构自身功能由不期望状态转变为期望状态。

超过承载能力极限状态的过程一般是不可逆的, 一旦出现将会引起结构失效; 超过正常使用极限状态的过程一般是可逆的, 但有些情况下是不可逆的, 如永久性的局部损坏和永久性的不可接受变形。

2) 设计原则

在设计中应考虑各种极限状态, 对每种极限状态的基本变量应分别加以确认, 这些基本变量应该能够描述下列因素: 作用环境影响、材料性能、几何参数。对于每种极限状态, 应当建立相应的分析模型, 包括描述结构性能的力学模型以及描述环境对材料性能影响的物理或化学模型。以 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 表示各种基本变量, 以 t 表示时间, 则结构的极限状态方程为

$$g(x_1, x_2, \dots, x_n, t) = 0$$

当 $g(x_1, x_2, \dots, x_n, t) > 0$ 时, 结构处于可靠状态; 当 $g(x_1, x_2, \dots, x_n, t) < 0$ 时, 结构处于失效状态。

设计计算(或原型设计)的目的是为了保证结构具有足够的可靠度。可采用两种设计计算模式: 分项系数模式和概率模式。通常所采用的设计计算模式是分项系数模式, 而对特殊的设计问题则采用概率模式可能更为方便些, 对分项系数模式的校准也可以采用概率模式。

除设计计算外, 细部构造措施也是保证结构具有充分可靠性的一个重要方面。由于各种作用、环境影响以及大多数情况下预期的结构性能都是随时间而变化的, 这些变异性存在于结构的整个寿命期中, 因此应选择合适的设计状况。设计状况分为持久状况、临时状况和偶然状况。

2. 传统的定值设计

在传统的定值法设计中, 将结构强度和施加于结构上的应力视为确定量, 它们是基本设计变量或设计变量的函数, 同时在某种程度上也考虑了计算模型、设计变量、制造误差和载荷的不确定性引起的误差, 这些都靠引入一个安全系数加以处理。于是, 公认的结构设计准则可写成如下形式:

$$R_R > r_R S_R$$

式中, R_R 表示结构的确定性强度; S_R 表示确定的应力; r_R 表示结构设计的安全系数(文中符号如无特殊说明时, 其意义见附录 A)。这种安全系数, 是在大量设计实践基础上, 总结以往的设计实践得出的, 它反映了一定的统计特性。对不同的结构, 安全系数的取值也不同。一般情况下, 如果结构失效将引起严重的事故, 那么为保证安全, 其安全系数就取得高一些, 但是这种安全系数既不能保证所设计结构的绝对安全, 又不能给出结构安全可靠的程度。其主要不足之处可归纳如下:

(1) 把各种设计变量都作为定值, 忽视了在设计过程中各设计变量的不确定性, 而实际的工程设计变量均为随机变量, 这是根本的缺点。

(2) 以确定的设计变量和安全系数作为结构设计安全程度的依据, 这与定量的结构可靠度没有联系。由于把设计变量视为定值, 没有分析设计变量的离散情况对结构可靠度的影响, 因而使结构的安全程度具有不确定性, 所以安全系数不能代表结构的可靠程度。

(3) 由于安全系数的确定是根据经验确定的, 难免有较大的主观随意性, 缺乏严格的理论分析, 这样, 对同一安全系数, 结构的可靠度偏大或偏小的可能性都存在。

(4) 传统设计中的安全系数大小并不能决定结构可靠性的水平, 安全系数的实际值并不表明结构特定的安全水平。在结构设计问题中, 不能期望用一个单一

的安全系数,对一切偶然事故均提供合理的保护。

在结构设计及现役结构的安全性评估中,由于不确定性因素在所难免,大量的未知因素及参数变化用传统的定值设计方法很难正确处理。因而,如何正确地模拟实际问题中的不确定性因素,如何做出正确的分析决策,就成为可靠性设计的主要内容,也是目前结构设计理论与方法的主要发展方向之一。

3. 可靠性设计的特点与步骤

基于概率论的可靠性设计,能够考虑以下三方面的问题:①根据随机变量的概率分布,包括应力和强度的分布,进行结构的可靠性分析,可以得出失效模式类型、应力情况、失效模式数、它们的统计相关性及必要的计算模型;②在给定失效概率或可靠性指标的情况下,在参数(成本或余量)容许范围内进行结构设计;③进行结构各变量的灵敏度分析,并确定它们对结构失效的影响程度。

结构可靠性设计的特点可归纳如下(何水清 1993):

(1) 在可靠性设计中,首先要确定一个合理的目标可靠性指标,用它来保证结构应有多大的安全裕度,代替传统设计中用安全系数表示安全裕度的不足。

目标可靠性指标需要根据结构的不同特点、结构的重要程度以及现役和在建的同类结构的可靠性指标等合理地确定大小。在结构可靠性设计中,由于涉及的影响因素较多,因此对不同的结构、不同的破坏形式,不可能用一个统一的单个可靠性指标来描述。

(2) 可靠性设计要在设计阶段把可靠性直接设计到元件中去,它由设计决定而由制造和管理得以保证。

(3) 可靠性设计必须考虑环境的影响。环境对应力有很大的影响,从而影响结构可靠度的大小。

对于结构的可靠性设计,在不能确定有关基本设计变量具体分布的情况下,往往做出正态分布的假设。这是因为:

(1) 在理论上,若影响某一数量指标(随机变量)的随机因素很多,而每个因素所起的作用又不大,则这个指标服从正态分布,这点可以利用概率论的极限定理来加以证明。

(2) 正态分布具有许多良好的性质,许多分布可用正态分布来近似模拟,另外一些分布又可以通过正态分布来导出。

(3) 在实际工程上,正态分布的数学形式易于处理,根据正态假设而拟定的步骤在概念上和计算上往往很简单,正态分布的分布形式完全可用均值和均方差来确定。对于正态分布,现已有很多根据正态假设而建立的统计方法,其中包括用这些方法所需要的表格。分析表明,正态分布比较能合理地描述工程结构中各设计变量的统计特性。

结构可靠性设计的具体步骤,可概括如下:

(1) 根据所设计结构的功能、用途、制造过程、加工工艺以及经济条件、环境因素等的要求,提出初步的设计概念、设计草图。

(2) 定量估算所施加的或结构承受的载荷。预估载荷时,必须确定载荷的数值范围和各种数值出现的相对频数,从而全面地、系统地统计分析,给出这些载荷的均值、标准差及分布类型等统计特性。

(3) 根据材料的物理和力学性能、结构零件的表面粗糙度要求、结构设计的目的以及由经济性和可行性决定的公差要求等选择结构的材料、热处理方法等制造加工工艺。

(4) 用科学的统计方法描述材料的主要强度特性。根据实验数据、文献资料或标准手册,确定强度的均值、方差及分布类型。

(5) 根据结构可能破坏的各种形式,如强度、刚度、稳定性、疲劳等,选取合适的结构失效模式。

(6) 确定目标可靠度 P_r (或可靠性指标 β , 或失效概率 P_f), 它可以根据在役和在建的同类结构的可靠度以及结构构件的重要性程度等来确定。

(7) 对给定的 P_r (或 β 、 P_f), 把按上述方法确定的各统计量代入 P_r (或 β 、 P_f) 的方程中, 再加上有关其他约束条件, 求出设计参数的值。

(8) 校核。若上述各项要求不满足目标可靠度 P_r 的要求, 则重复上述过程修改相关因素。

结构可靠性设计是一种更为合理的设计方法, 附录 B 给出了可靠性设计两种简化方法, 但是应用可靠性设计目前仍有一定的困难。其主要原因有:

(1) 缺乏足够的统计数据。可靠性设计方法是以大量统计数据为依据的, 原有设计用的数据, 由于当时的认识和要求不同, 不一定能满足可靠性设计的要求, 而且可靠性数据的积累需要长期的、大量细致的工作, 有些可靠性设计要求的重要数据可能没有很好地进行统计, 或在长期的数据统计期间被遗漏。

(2) 工程技术人员对可靠性设计方法还不够熟悉。由于结构可靠性设计起步较晚, 设计人员对各种设计任务早已习惯于用传统的安全系数方法设计, 对新的设计方法实行起来感到困难重重, 而且任何新方法的应用都不免要承担一定的风险, 因此使得可靠性设计方法在工程中实施进展缓慢。

(3) 验收上的困难。到目前为止, 对于可靠性设计还没有一套行之有效的设计规范和验收准则, 这也是可靠性设计方法难以应用的重要原因之一。由于无设计规范和验收准则, 所以设计人员无章可循, 而使用单位也难以判断产品是否达到了预期的目标。当然, 可以通过试验来验证, 但这种试验要保证有较高的置信度, 需要大样本、长时间, 代价是昂贵的, 有些情况甚至是不可行的。

1.1.3 结构的可靠性优化

结构设计的目的是完成预定的功能, 结构设计的条件是在现有的制造加工工艺条件下使设计出的结构具有工作性能优良、制造方便、工艺性较好、价格低廉等特点。由于结构的可靠性设计具有比传统的定值法设计更多的优点, 因此, 随着结构可靠性分析和结构可靠性评估的不断发展, 必然成为结构设计的一个重要方法。

结构的可靠性优化常常是以结构的某些性能如船舶的航行速度最快、造价最低, 飞机结构的重量最轻等作为目标函数, 以结构的稳定性、强度、刚度等作为约束条件, 使设计出的结构满足一定的可靠性要求。

随着结构可靠性分析的不断深入, 以结构可靠度 (目标可靠度) 为约束条件, 对结构主尺度优化必然得到广泛的发展。

1.1.4 已有结构的可靠性评估

本节介绍已有结构可靠性评估知识 (陈定外译 1999; 赵国藩 2000)。

1. 需要评估的原因

在下列情况下需要对已有结构的可靠性进行评估:

- (1) 对已有结构进行修复, 修复时新的结构构件增加至已有承载体系上。
- (2) 在拟改变使用用途或延长设计工作寿命时判断结构是否能抵抗已变化了的各种荷载。
- (3) 由于环境影响而引起老化或偶然作用的损坏。
- (4) 对结构的可靠性持怀疑态度。

2. 评估原则

对已有结构的评估必须符合文献中的规定。结构设计时使用的旧规范只能作为参考性文件。

对不受结构变化、修复、修缮、改变用途影响以及没有明显损坏或对可靠性无怀疑结构的部分, 可以不进行可靠性评定。

3. 基本变量

为符合可靠度要求, 各基本变量必须按下列原则采用:

- (1) 已有结构的尺寸必须在适当范围内进行验证, 若符合原始设计要求, 则在分析中应与原设计相一致。
- (2) 荷载特征值必须符合实际情况。若在结构的使用过程中发现有超载情

况,则在评估时可以适当增大荷载代表值;若某些荷载已经减小或全部卸载,则荷载代表值可以适当折减或对分项系数进行调整。

(3) 各种材料性能必须按结构实际状态考虑,如果有原始设计文件,结构材料没有严重退化,也没有设计、施工错误,则可以使用原设计中关于材料性能的一些数据,在必要时应该进行破损或无损检测并进行统计分析。

(4) 应当按与设计时相同的方式考虑模型不定性,除非已有结构的性能发生了变化(特别是损坏)。在有些情况下,可根据对已有结构的检测结果确定模型、系数和其他设计假定,如风压系数、有效宽度等。

4. 调查研究

为了对结构当前的状态有明确的认识,以便采取相应的措施使其适应新的要求,必须对结构进行调查研究,包括定性检查和定量检查。定性检查是对已有结构形成一个初步的印象。对结构损坏通常用没有、较轻、中等、严重、破损、不知道等术语描述,这类结论通常由专家在经验的基础上凭直觉作出。定量检查可以获得结构工作状态的一组数据。另一类特殊的调查是校验荷载,其目的是明确在试验荷载条件下所试验构件的承载能力、其他相关构件的承载能力、其他荷载条件以及已有结构体系的性能等。承载力的概率密度函数可以通过在校验荷载时对原概率密度函数截尾获得,校验荷载次数及构件均可视条件而定。为了避免由校验荷载引起结构不必要的损坏,应该采用逐级加载的方式并测量变形。校验荷载一般不涉及持续效应,这些效应可以通过计算来补偿。

根据调查研究的结果,可以通过两个步骤来估计结构的性能和可靠性:

(1) 更新单个变量的多维概率分布。这种方法可以用于确定在分项系数模式或比较作用效应与各种限值(裂缝、位移)时所需要的新设计值。

(2) 更新结构的失效概率。

5. 损坏情况的评估

对受损结构的评估,建议采用下列步骤:

(1) 肉眼检查。这是对已有结构损坏情况的第一感觉,主要缺陷可被检测出,对严重缺陷要立即采取措施。

(2) 对观察现象的解释。采用合适的结构模型以及各种荷载强度或物理化学作用来模拟损坏或观察到的性能,如果计算与观察不一致,则应注意寻找设计和施工中的误差。

(3) 可靠性评定。根据已有结构当前状态和所得到的资料,可以借助于失效概率或分项系数法计算结构的可靠度。注意已有结构的计算模型可能与原始的模型有所区别。若可靠度满足,则不必采取进一步的措施。

(4) 附加资料。若可靠性不满足要求,则可以按文献(陈定外译 1999; 赵国藩 2000)中取得结构模型、荷载强度等附加资料,再进行评定。

(5) 最后决策。若可靠度仍然太低,则可有四种选择:①出于经济上的原因接受目前状况;②减小结构上的荷载;③对结构进行维修;④拆除结构。

一般情况下,可以通过降低概率设计中的 β 值和降低分项系数模式的 γ 值来建立较低的可靠度可接受水平。

1.1.5 不定性模型化的一般原则

不定性模型化的一般原则许多文献已作了大量的研究(陈定外译 1999; 赵国藩 2000),此处的不定性是指对结构可靠性有影响的因素的变异性,如基本变量、计算模式等变异性。

1. 不定性的由来

(1) 固有的随机变异性。主要包括受人类活动影响的和不受人类活动影响的两类。前一类如材料强度和几何尺寸;后一类如地面雪荷载、风速、地震加速度、土的参数等。前一类不定性可采用生产和质量控制等方法进行控制,其水准可以按经济后果选定。

(2) 知识不足引起的变异性。一类是作用效应模型和抗力模型的不定性,可以通过加强研究或其他方式来降低;另一类是取决于未来发展的不定性,如交通荷载、楼面荷载等,其降低的可能性是有限的。

(3) 统计不定性。它关系到概率分布和参数估计的精度。这类不定性来源于试验结果数量的限制、变量系统的变异性、忽略变量之间的相关性以及统计分布不能完全反映统计特性造成的偏差等,它可以通过增加试验数量和加强观测而降低。

2. 获得基本数据的途径

可以通过以下途径获得模型各参数的数值和它的不定性:①观察和测量;②分析;③决策;④判断。如果采用前两种途径,基本变量不定性的特征参数一般通过统计分析确定,其结果可以用平均值、标准差、相关性、概率分布等统计术语来表达。如果采用后两种途径,在假定全部基本变量均能用概率方法处理后,对其也需赋予统计参数,统计参数是完全由主观方式确定的。由测量误差、尺寸偏差等引起的不定性,应采取质量保证措施来尽量减小。模型不定性和统计不定性一般都存在,如果可能,这两种不定性应采用统计方法加以区分。