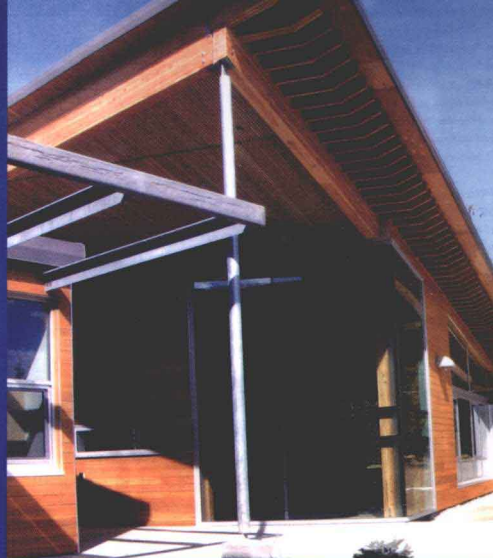


高等学校规划教材

工程结构可靠性原理 及其优化设计

余建星 主编

中国建筑工程工业出版社

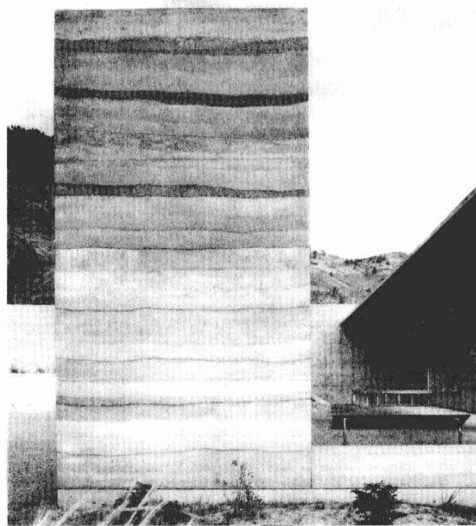
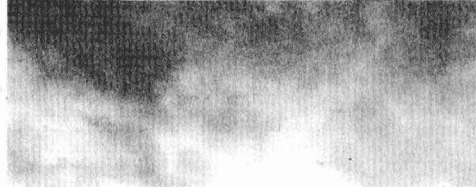
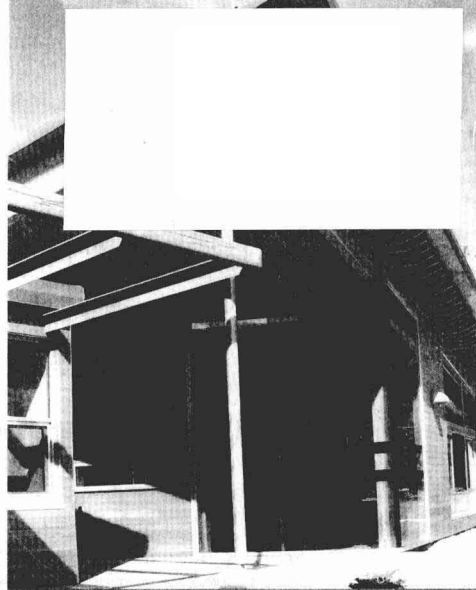


高等学校规划教材

工程结构可靠性原理 及其优化设计

余建星 主编

中国建筑工程工业出版社



图书在版编目 (CIP) 数据

工程结构可靠性原理及其优化设计/余建星主编. —北京: 中国建筑工程工业出版社, 2012. 12
(高等学校规划教材)
ISBN 978-7-112-14940-7

I. ①工… II. ①余… III. ①工程结构-结构可靠性-结构设计 IV. ①TU311.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 284719 号

本书论述了结构系统可靠性理论及其在船舶与海洋工程结构物、大型土建结构设计上的应用。全书共 6 章, 前两章在介绍结构可靠性理论的发展、意义、主要概念的基础上, 重点讨论一次二阶矩法和蒙特卡洛法; 第 3 章在全面介绍结构系统可靠性理论与计算系统失效概率的基本方法之后, 着重介绍分支限界法和分解法; 第 4 章介绍大型土建结构的可靠性分析方法; 第 5 章介绍船舶与海洋结构物的可靠性分析方法; 第 6 章介绍结构可靠性优化设计方法。

本书可作为土木工程、船舶与海洋工程、港口航道与近海工程、水利工程及桥梁与隧道工程等专业学生的教材使用, 也可作为相近专业的工程技术人员设计施工的参考书。

* * *

责任编辑: 王 跃 吉万旺
责任设计: 张 虹
责任校对: 张 颖 陈晶晶

高等学校规划教材
工程结构可靠性原理及其优化设计
余建星 主编

*

中国建筑工程工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)
各地新华书店、建筑书店经销
霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版
北京市书林印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 14 1/4 字数: 308 千字
2013 年 4 月第一版 2013 年 4 月第一次印刷

定价: 32.00 元

ISBN 978-7-112-14940-7
(22993)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换
(邮政编码 100037)

前言

结构可靠性理论是 20 世纪 60 年代以后才迅速发展起来的一门新兴学科。它之所以能取得迅速发展,成为当前结构工程的主要研究方向之一,并成为结构强度理论与计算结构力学的一个新分支,除了工程实践的要求外,主要在于它对结构系统安全性评价提出了建立在概率分析基础上的一系列新概念、原理、方法与衡量标准,科学地考虑了结构工程中的多种不确定因素。这样使人们加深了对结构系统工作性能的认识,对结构系统可靠性有了客观的统一度量,于是就可以对结构系统的安全性作出合理的评价,从而设计出有最佳经济效益又安全可靠的结构。

近十几年,我国在工程结构可靠性理论研究方面取得了诸多重要的研究成果,并编制和修订了工程结构可靠度设计的统一标准及各专业的设计规范。同时,船舶与海洋工程界对可靠性理论的应用也给予了很大的关注。挪威、法国的船级社与美国石油工业部门已先后制定了以可靠性理论为基础的海洋平台设计规范 and 标准。

为了适应结构系统可靠性研究发展的需要,并考虑国内土建行业及船舶与海洋工程学科在结构可靠性理论研究与应用上的现状,也考虑到研究生培养目标的要求,本书在论述结构可靠性理论一般原理的基础上,对结构系统可靠性进行了深入分析并在实际应用方面提供一个较为全面、系统的方法。全书以结构系统可靠性分析为主体,以第二水平法为重点,通过具体事例,对结构系统可靠性分析的方法、步骤及结构系统可靠性优化设计等内容,从结构系统的整体性、关联性、综合性和实践性角度,做了较为详细的论述。

本书详细论述了结构系统可靠性理论及其在船舶与海洋工程结构物、大型土建结构设计上的应用。全书共 6 章,前两章在介绍结构可靠性理论的发展、意义、主要概念的基础上,重点讨论一次二阶矩法和蒙特卡洛法;第 3 章在全面介绍结构系统可靠性理论与计算系统失效概率的基本方法之后,着重介绍分支限界法和分解法;第 4 章介绍大型土建结构的可靠性分析方法;第 5 章介绍船舶与海洋结构物的可靠性分析方法;第 6 章介绍结构可靠性优化设计方法。

结构系统可靠性理论是一门十分复杂且涉及许多领域的综合性新兴学科,因此本书不可能涵盖各个方面。其他有关问题,请参阅国内外已出版的专著。本书如果能对我国结构系统可靠性理论的发展及其在工程结构设计上的应用方面有所促进的话,我们将感到无限欣慰。限于水平,书中难免有缺点错误,热诚希望广大读者批评指正。

本书可作为土木工程、船舶与海洋工程、港口航道与近海工程、水利工程及

桥梁与隧道工程等专业的研究生与本科高年级学生的教材使用，也可作为相近专业的工程技术人员设计施工的参考书。

本书由余建星统一定稿，王尔芳、张英、周健状等参与了本书的编写工作。

余建星

2012 年 7 月于天津大学

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 结构可靠性的定义	1
1.2 结构可靠性理论对不确定因素的处理	2
1.2.1 客观不确定性	2
1.2.2 主观不确定性	2
1.3 结构可靠性分析的方法论	3
1.4 结构可靠性分析的过程	3
1.5 结构可靠性理论的发展	4
第 2 章 结构可靠性的基本原理	7
2.1 极限状态及其描述	7
2.1.1 最终极限状态	7
2.1.2 可服务性极限状态	8
2.1.3 条件性极限状态	8
2.2 结构的可靠度与失效概率	9
2.2.1 求解 p_r 与 p_f 的一般公式	10
2.2.2 R 与 S 都服从正态分布	11
2.2.3 R 与 S 都服从对数正态分布	12
2.2.4 R 服从正态分布, S 服从指数分布	12
2.3 结构的可靠指标	13
2.3.1 可靠指标 β 的导出及其物理意义	13
2.3.2 β 的几何意义及哈索弗—林德的可靠指标	15
2.4 均值一次二阶矩法 (FOSM)	17
2.5 改进的一次二阶矩法 (AFOSM)	18
2.5.1 两个随机变量的情况	19
2.5.2 多个随机变量的情况	19
2.5.3 极限状态函数为线性的情况	23
2.6 JC 法	24
2.6.1 JC 法的基本思路	24
2.6.2 求解当量正态变量的方法	25
2.7 蒙特卡罗法	29
2.7.1 基本原理	29
2.7.2 随机变量的取样	30

2.7.3 计算举例	33
2.7.4 改进的蒙特卡罗法	34
2.8 相关变量的变换	37
第3章 结构系统可靠性分析的基本理论	42
3.1 结构系统可靠性分析的基础	42
3.1.1 结构系统可靠性分析的理想化处理	42
3.1.2 多元失效模式的概念及其数学模型	43
3.1.3 延性破损和脆性破损	43
3.1.4 塑性铰与失效机构	44
3.1.5 失效形式的产生概率及结构系统的失效概率	46
3.1.6 结构系统失效形式间的相关性	48
3.1.7 桁架及刚架结构系统可靠性分析的特点	51
3.2 结构系统可靠性分析的基本方法	52
3.2.1 结构系统失效概率的计算方法及分析	52
3.2.2 分布函数的数值计算	60
3.3 分析结构系统可靠性的分支界限法	67
3.3.1 桁架结构系统安全裕度的自动生成	67
3.3.2 刚度结构系统安全裕度的自动生成	71
3.3.3 主要失效路径的选择	84
3.4 分析结构系统可靠性的 β 分解法	92
3.4.1 综述	92
3.4.2 单个要素的可靠性预算	94
3.4.3 水准1上的结构系统可靠性预测	97
3.4.4 水准2上的结构系统可靠性预测	99
3.4.5 水准 $N>2$ 上的结构系统可靠性预测	110
3.4.6 机构水准上的结构系统可靠性预测	119
第4章 大型土建结构可靠性分析方法	127
4.1 斜拉桥可靠性分析	127
4.1.1 梁结构非线性动力可靠性研究	127
4.1.2 风致颤振非线性动力可靠性研究	130
4.1.3 纺锤形桥塔非线性涡激动力可靠性研究	134
4.1.4 计算实例	138
4.2 异形桥可靠性分析	141
4.2.1 考虑因素	141
4.2.2 计算方法	141
4.2.3 计算实例	141
4.3 管桥结构系统的可靠性分析	150
4.4 高层建筑抗震可靠性分析	157
4.4.1 结构系统的三维可靠性分析方法	157
4.4.2 地震力的计算方法	157

4.4.3	阻尼矩阵	161
4.4.4	计算实例	161
4.5	塔式容器结构抗震可靠性分析	163
4.5.1	结构系统动力可靠性分析原理	163
4.5.2	地震作用下塔式容器安全裕度方程的建立	164
4.5.3	典型塔的可靠性计算	167
第5章	船舶与海洋结构物可靠性分析方法	170
5.1	船舶结构物的可靠性分析方法	170
5.1.1	船体总纵强度可靠性分析	170
5.1.2	船体横向强度可靠性分析	174
5.1.3	船体局部强度可靠性分析	176
5.1.4	舵装置系统可靠性分析	176
5.1.5	螺旋桨装置可靠性分析	178
5.2	海洋结构物的可靠性分析方法	181
5.2.1	波浪载荷计算模型	181
5.2.2	结构的动力响应模型	185
5.2.3	安全裕度自动生成与失效概率计算	190
5.2.4	海洋平台结构系统的疲劳可靠性分析	192
第6章	结构可靠性优化设计方法	195
6.1	船体横框架的可靠性优化设计方法	195
6.1.1	失效概率的求法	195
6.1.2	船体横框架的可靠性优化设计方法	197
6.1.3	算例	200
6.1.4	计算分析	202
6.2	基于神经网络理论的船舶纵向结构可靠性优化设计方法	202
6.2.1	神经网络理论简介	203
6.2.2	SA 算法及其改进措施	205
6.2.3	可靠性优化方法	206
6.2.4	计算分析	209
6.3	基于遗传算法的海洋结构可靠性优化设计方法	211
6.3.1	遗传算法的基本原理	211
6.3.2	计算分析	215
6.3.3	几点说明	218

第 1 章 概 述

结构设计的基本目的是以最经济的手段使结构在预定的使用期限内具备预定的各种功能。

当前, 结构设计理论正处于从定值设计法向概率设计法过渡的重要阶段。自 20 世纪 70 年代以来, 以概率为基础的可靠性分析方法与极限状态设计方法的研究和运用不断深入, 许多国家的结构设计, 特别是建筑结构的设计, 已采用以概率为基础的承载能力极限状态设计方法。我国 1984 年的《建筑结构设计统一标准》GBJ 68—84 就是在此背景下制定的。各种工程结构设计规范、标准均应遵守它, 或向它所规定的原则靠拢。在此之后我国所制定的一些专业规范, 如钢结构、混凝土、铁路、桥梁、港口、水坝及建筑物抗震设计规范等, 都已采用了以概率为基础的极限状态设计法, 构筑物抗震设计规范也已部分地采用了这一设计方法。

船舶及海洋工程结构物结构复杂、使用期限长、造价高、工作环境条件极为恶劣, 一旦出现事故, 将造成极为恶劣的社会影响及巨大的经济损失。因此, 结构的可靠性原理分析是工程设计中必须考虑的重要问题。近 10 多年来, 上海交通大学张圣坤教授、肖熙教授、胡敏仁教授等, 大连理工大学郭吕捷教授等, 天津大学胡云昌教授等均做了许多工作, 从而为本书的编写奠定了坚实的理论基础。

1.1 结构可靠性的定义

结构可靠性是指在规定时间内和规定条件下, 结构能完成规定功能的能力。

“规定时间”是可靠性定义中的重要前提。一般说来, 结构的可靠性是随时间的延长而逐渐降低的, 所以一定的结构可靠性是对一定的时间而言的。规定时间的长短, 随结构物的不同及使用目的不同而异。船舶及海洋结构物要求在几十年内可靠。规定时间通常是指设计基准期。

“规定条件”通常是指使用条件、维护条件、环境条件和操作条件。这些条件对结构的可靠性有着重要的影响。在不同条件下, 结构系统的可靠性是不同的。在结构物设计时, 确定合理的设计基准期和设计条件, 是一项非常重要的工作。只有确定得合理, 才能使设计达到既经济又可靠的目的。

“规定功能”通常用结构的各种性能指标来描述。评价结构物是处于正常功能状态还是处于失效状态的标志是极限状态, 即极限状态是区分结构物工作状态是可靠还是不可靠的标准。

由上述定义可知, 结构可靠性定义的外延显然比安全性大。所谓安全性是指结构物在正常施工、正常使用时能承受各种作用的能力。而结构可靠性不仅仅包

括安全性,还包括适用性与耐久性。

1.2 结构可靠性理论对不确定因素的处理

为评价结构物的可靠性,必须掌握材料强度及荷载的随机性,掌握设计计算误差和施工误差等不确定因素,进而对这些不确定因素做出定量分析。

对于结构设计中的不确定因素,很早以前人们就非常重视,但由于受当时科学技术水平的限制,不能提出一个合理的处理方法。在结构分析理论还没有建立的年代里,只能提出“为保证安全必须留有余地”的设计思想。随着结构分析理论的发展,人们提出了用安全系数来笼统考虑不确定因素的确定性设计方法。这种设计法要求在荷载作用下,结构或构件某断面的应力不应超过材料的许用应力 $[\sigma]$,而

$$[\sigma] = \sigma_y / K \quad (1-1)$$

式中 σ_y ——材料的屈服强度;

K ——安全系数。

在这个方法中,外力、结构尺寸及材料的能力等都是作为确定值来处理的,只是用安全系数 K 来表示强度储备。而 K 又多是凭经验确定的,缺乏合理的科学依据。

长期的实践及理论分析已证实,作用于结构上的荷载及断面尺寸和材料的力学性能等,由于设计、施工、计量等一系列原因,都不会是确定的常量,它们的真实值在名义值附近随机变化。因此,对每一个影响强度的参量都应看做是随机变量。而有些参量,特别是荷载,例如作用于船舶及海洋结构物上的波浪荷载,本身就是随机变化的。因此,安全系数不能作为评价结构可靠性的合理依据。

结构可靠性理论是把所有的工程变量都作为随机变量来处理。包含在这些随机变量中的不确定性可以分为下述两类。

1.2.1 客观不确定性

客观不确定性是指与基本变量有关的不确定性。它包括材料力学性能的不确定性,尺寸的不确定性以及制造误差、建造不完善性及焊接残余应力等引起的不确定性等。不确定性可以通过实物或试样的测定结果进行统计分析,找到它们的分布特性。

1.2.2 主观不确定性

主观不确定性是指对结构承载力进行分析所作的假定、环境条件及转化为荷载的近似性、结构分析方法、结构模型化精确程度等引起的不确定性。这种不确定性主要取决于人们对它们的认识程度及人们所掌握的知识水平。

上述两种不确定性,都具有随机变化的特点,其参量可作为随机变量看待。于是在可靠性设计中就用表征随机变量的数字特征,如均值 μ 和标准差 σ 或变异系数 $CV = \sigma/\mu$ 来描述不确定性,并从概率意义上定义它们。通过进行概率分析

和计算,得到概率意义上的结构安全检验结果。

应用结构可靠性理论处理不确定性,克服了传统的确定性设计法的缺点,因而更符合客观实际。在结构可靠性设计中是用可靠度、失效概率(或破损概率)和可靠指标等来评价结构的可靠性。以结构的失效概率为依据的概率设计法即可靠性设计法,正在逐渐取代传统的确定性设计方法。从确定性概念转变为非确定性概念,这是结构设计思想上的一个重要演变与设计方法学上的一个飞跃。

1.3 结构可靠性分析的方法论

多年来的实践已使人们认识到,要想较为精确地预测结构的可靠性,必须使用系统工程学理论把结构物作为一个系统来看待,使用系统分析的方法进行可靠性分析。

在某些情况下,用一个构件的可靠性预测结构系统的可靠性是可行的。例如,在静定结构中,一个构件失效就会引起结构系统的失效;而在超静定结构中,某一个局部失效并非总能导致结构系统失效。因为剩余部分可通过内部荷载效应的重新分配来支承外部荷载。这种结构的失效,必定由两个以上的局部失效才能产生。

另外,一个结构系统会同时存在多种可能导致失效的模式,只要其中一种处于失效状态,则结构系统就会失效。例如,一个构件的失效是由下述情况之一,即弯矩过大、剪力过大、挠度过大、失稳等引起,或由几种情况的结合而引起的。这就构成了多元失效模式。对结构系统来讲就更为复杂,因为一个结构系统是由许多构件组成的,同时还要考虑地基承载力不足与不均匀沉陷等等,这就构成了彼此有联系的多层次的多元失效模式。因此,研究结构系统的失效问题,实际上是对一种包含多个失效模式的系统进行分析和综合的问题。

为计算结构系统在某种失效模式下的失效概率,从理论上讲,应当找出某一失效模式下的全部失效形式甚至所有失效路径,但实际上这是不可能也是没有必要的。因为在这众多失效形式中,大多数失效形式的产生概率是很小的,也就是说,只有少数的失效形式对结构系统失效的贡献是大的。因此,在预测结构系统的可靠性时,只要考虑这些主要失效形式就可以了。

上述分析问题的思维方法便构成了结构可靠性分析的方法论。

1.4 结构可靠性分析的过程

结构可靠性分析的过程大致分为以下三个阶段。

可靠性分析的第一阶段是搜集与结构有关的随机变量的观测或试验资料,并对这些资料用概率统计的方法进行分析,确定其分布概率及有关统计量,以此作为可靠度或失效概率计算的依据。与结构有关的随机变量大致可分为三类:①外来作用,如荷载等;②材料的机械性质;③构件的几何尺度及其在整个结构中的位置。

上述随机变量的统计分布多为正态分布、对数正态分布及极值 I 分布,而相应的统计量主要有均值 μ 、标准差 σ 及变异系数 CV 等。

可靠性分析的第二阶段是用结构力学的方法计算构件的荷载效应,通过实验与统计获得结构的能力,从而建立结构的失效衡准。荷载效应指的是在荷载作用下,构件中的应力、内力、位移及变形等。结构能力指的是结构抵抗破坏与变形的能力,如屈服强度、抗拉强度、容许变形和位移等。结构的失效衡准用极限状态表示。极限状态连接结构能力与荷载效应,组成了进行结构可靠性分析的极限状态方程。对于结构系统,极限状态方程一般极为复杂,可借助结构力学、塑性力学、弹性力学及有限元分析的理论建立起来。

可靠性分析的第三阶段是计算评价结构可靠性的各种指标。当构件或结构系统的失效衡准建立之后,便可根据这些衡准,计算评价构件或结构系统可靠性的各种指标,如可靠度、失效概率及可靠指标等。

1.5 结构可靠性理论的发展

结构可靠性理论近年来有了长足的发展。现在已根据随机变量的局部信息、概率理论及局部经验,建立了一些基本上能满足工程设计需要的使用方法。目前结构可靠性分析方法大致有三种。

1. 第一水平法 (局部安全因子法)

这种方法是把一系列局部安全因子与事先定义的主要结构变量及荷载变量的特征值联系起来,从而对构件或结构提供适当的可靠性的设计方法。因为用这种方法进行结构设计时,要考虑一系列独立的极限状态,所以有时也称为极限状态设计。由于它在形式上与传统的系数法很相似,故也称为杂交概率法或半经验概率法。此法不能对结构的失效概率或可靠度做出直接定量估计,但由于表达形式与传统方法很相似,易为广大工程技术人员所接受,所以在各种设计规范、标准中得到较为广泛的应用。

2. 第二水平法 (近似概率法)

这种方法一般要求对失效域进行理想化处理,并对各变量的联合概率密度作简化表达,进而用某种近似迭代方法计算构件或结构系数的失效概率的近似值。本书应用的方法就是第二水平法及为了解决结构系统的可靠性而发展了的第二水平法。由于这种方法所需要的与基本变量有关的信息少,应用简便,且能满足工程设计需要,所以得到较为广泛的应用。

3. 第三水平法 (全概率法)

这种方法要求为那些对结构可靠性有影响的一切基本变量做出联合出现的全概率描述,即建立起联合概率密度函数,再在失效域上对它进行多重积分运算,以求得结构系统的失效概率或可靠度。由于获得分析所需要数据十分困难,所以联合概率密度函数很难建立,即使建立起来,计算工作量也将是十分惊人的。所以,这种方法只不过存在理论上的意义,而实际很少应用。

下面就以这三种方法为脉络。回顾一下结构可靠性理论的发展与演变过程。

从1920年起,人们就试图用概率统计理论把结构设计中的不确定因素量化,分析结构的安全性,最终建立起一种统一的设计方法。但由于这种初期的可靠性分析多是以严密的概率统计理论为基础的,所以在解决实际工程问题时遇到了许多无法解决的困难。另外,由于当时一般工程技术人员对概率论还不太熟悉,所以结构可靠性分析的重要性并没有引起人们广泛的注意。自从1945年美国的弗劳任脱(Freudental)发表了题为“结构的安全度”的论文后,关于结构可靠性分析的讨论才广泛地开展起来。在这篇论文中作者讨论了结构设计中的各种不确定因素,同时又从这些不确定性的相互作用观点,论述了荷载与强度的随机性。当然最早论述材料强度统计性质的应属Mayer(1926年)和Khotsyalov(1929年)二人的论文。之后,前苏联在结构按极限状态设计方面的研究取得了长足的进展,在安全度理论方面也取得重要成果。概括地讲,结构可靠性研究的历史是以弗劳任脱的论文为开端,以美国与欧洲学者为研究的主体。

弗劳任脱的论文发表之后,根据概率统计理论,使用失效概率 P_f 评价结构物的安全性的研究工作便很快地开展起来。此项研究工作的实质是把荷载效应 S 与结构能力 R 作为随机变量,把失效概率限制在容许值 P_{fa} 之内的一种设计工作,即

$$p_f = P[R < S] \leq p_{fa} \quad (1-2)$$

其中 p_{fa} 可由下式给出:

$$p_{fa} = \int_0^\infty \int_0^\infty f_{SR}(s, r) dr ds = \int_0^\infty f_S(s) F_R(r) dr ds \quad (1-3)$$

式中 f_{SR} —— S 和 R 的联合概率密度函数;

f_S —— S 的概率密度函数;

p_{fa} ——临界失效概率;

F_R —— R 的概率分布函数。

之后,把失效概率作为安全性标准的古典可靠性理论,根据作用于结构物上荷载的特性及失效模式的不同,又向动力可靠性分析及静态可靠性分布两个方向发展。

动力可靠性分析理论,又可大致分为概率过程论及随机振动论。动力可靠性分析理论是用首次通过概率及累积损伤度为基础的可靠性函数 $L(t)$ 来评价结构物的安全性。 $L(t)$ 可用危险函数 $f(\tau)$ 表示为:

$$L(t) = L(0) \exp \left[- \int_0^t f(\tau) d\tau \right] \quad (1-4)$$

在静态可靠性分析中,20世纪60年代中期,洪华生根据弗劳任脱的基本思想,提出了把各种不确定因素分为客观不确定因素与主观不确定因素的广义可靠性理论。当以 $Z=R-S$ 作为失效条件时,引入修正系数 N ,则失效概率可用下式给出:

$$p_f = P[R-S] = P[N_R \hat{R} < N_S \hat{S}] \quad (1-5)$$

其中 N_R 、 N_S 表示把 R 、 S 模型化为随机变量时产生的误差。这里,客观不确定性用 $\hat{R}$ 、 $\hat{S}$ 表示,主观不确定性用 N_R 、 N_S 表示。这样便使失效概率对分布形式的敏感性变得和缓。

几乎与洪华生提出广义可靠性理论的同时,柯涅尔(Cornell)考虑积累数据

和确定变量的概率密度之困难,提出了只用均值、方差(标准差或变异系数)表示变量的概率统计性质,不考虑分布形式评价结构可靠性的二阶矩法。作为评价安全性的标准,这种方法不是使用失效概率,而是使用失效条件 Z 的变异系数的倒数所定义的可靠指标 β 。当 $Z=R-S$ 时,则可靠指标

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} = (\mu_R - \mu_S) / \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \quad (1-6)$$

式中 μ_z ——安全裕方程的均值;
 σ_z ——安全裕方程的标准值;
 μ_R ——抗力的均值;
 σ_R ——抗力的标准值;
 μ_S ——荷载的均值;
 σ_S ——荷载的标准差。

与此相类似,罗森布鲁斯(Rosenbluh)和埃斯特伐(Esteva)提出了基于 $Z=\ln(R/S)$ 的可靠指标,即

$$\beta = \frac{\mu_{\ln z}}{\sigma_{\ln z}} = \ln(\mu_R - \mu_S) / \sqrt{CV_R^2 + CV_S^2}$$

其中 CV 表示变异系数。之后洪华生和柯涅尔又分别发表了一些研究成果。

林德等为解决柯涅尔、罗森布鲁斯及埃斯特伐的初期可靠指标存在的不变性问题及由于线性化而使精度降低等问题,提出了改进一次二阶矩法(AFOSM)。为了克服二阶矩法的缺点,在广义可靠性理论中,欧洲学者又提出了一种称为 FOM(Full Oistribution)的方法。

除了设计思想与方法论,可靠性分析在设计上应用的研究也都在继续发展。广义可靠性理论及一次二阶矩法是从实用角度提出的方法。现在人们已深刻认识到在结构设计中不确定因素采用概率统计的处理方法的必要性,同时力图把可靠性分析方法直接反映到实际设计中去。世界各国都以可靠性分析理论为基础,着手制定更加合理的结构设计规范。就船舶及海洋工程界而言,挪威及法国船级社、美国石油工业部门已先后采用了以结构可靠性理论制定的海上平台设计规范或标准。另外英国的劳氏船级社(LR)、美国船舶局(ABS)、中国船级社(CCS)等,也正着手研究可靠性方法在船舶建造规范中的应用问题。

通常,在结构设计中直接应用的可靠性分析的计算公式,都假定荷载不随时间变化,即都是以静态可靠性分析为基础的。但是,对于像海洋工程结构物与船舶结构等使用期限长的结构物,时间因素的影响就非常重要了。所以,研究荷载、能力随时间的变动对安全性的影响是非常必要的。这种随时间变动的特性,也是以可靠指标的形式予以考虑的,即把变动特性与静态分析求得的公式结合起来。结构能力随时间的变化,主要是由于腐蚀与疲劳引起的。但是这种变动性与荷载随时间的变动性相比是较小的,在很多情况下是可以忽略的。而在荷载随时间的变动中,最重要的问题是如何正确地评价各种荷载的组合问题。这是一个非常重要而又困难的问题。目前还没有找到一个既简单而精度又很高的计算办法。这是今后着重研究的重要课题。

第2章 结构可靠性的基本原理

船舶及海洋工程结构物等工程设计都具有要求与能力两个方面。这两个方面都具有不确定性。设计的目的，就是在一定的经济条件下和规定的时间内，使具有不确定性的能力，能在一定的概率保证下满足不确定性的要求。例如，船舶承受的波浪荷载就是要求；而船舶本身的各种抗力，由于材料性能和构件尺寸具有不确定性，因而抗力也具有不确定性。抗力就是能力。如果船舶在规定的使用时间内，在一定的概率下，能力能抵抗荷载的作用，它就是安全的，即船舶处于保持正常功能状态，反之则处于失效状态。如前所述，评价结构物是处于保持正常功能状态还是处于失效状态的标志是极限状态。

对结构物进行可靠性分析时，必须首先找出赖以进行分析的极限状态。为此就要讨论结构系统或构件的失效模式，然后按所定义的极限状态确定极值荷载和临界强度，并求得相应的失效概率、可靠度及可靠指标等。

本章按上述思路介绍结构可靠性理论的基本原理。

2.1 极限状态及其描述

评价结构物是处于保持正常功能状态还是处于失效状态的标志是极限状态。极限状态是多种多样的，它根据结构物的种类、使用目的及使用方式不同而异。就是对于同一极限状态，失效模式也是不同的。但概括而言，极限状态有如下三种。

2.1.1 最终极限状态

此种极限状态对应于结构物的最大承载能力，主要包括如下几种。

1. 屈服失效

这是指在弹性分析中，结构某些点的应力超过或达到材料的屈服强度的失效状态。极限状态是所有钢结构都必须考虑的。

2. 屈曲失效（弹性或塑性）

这是指结构系统中的受压构件在达到某一临界值时不能再保持原有平衡位置的失效状态。目前各国的规范及标准中都考虑了这一极限状态。但由于对屈曲的理解存在分歧，所以还不能对这种状态进行满意的分析。

3. 机构失效（塑性分析的最终强度）

这是假定结构的材料处于理想刚塑性或理想弹性状态情况下，当结构中一些构件截面进入全塑性状态，形成塑性铰，最后由于塑性铰的数目达到一临界值，使结构变成几何可变机构，变形无限增加而引起的失效状态。

4. 疲劳失效

这是在结构物的长期服务过程中, 由于应力的循环变化, 使损伤积累而引起的结构系统或构件破坏的失效状态。

5. 开裂失效

这是仅针对混凝土结构而有的失效状态。它相应于混凝土结构临界截面产生开裂和有超量变形。

2.1.2 可服务性极限状态

这种极限状态对应于正常持续使用的承载能力, 包括下述几种失效状态。

1. 局部失效

当结构系统中出现若干局部损伤而导致构件腐蚀时, 就认为结构达到了极限状态。

2. 超变形失效

这是指在正常工作条件下, 结构变形超过规定值而影响结构有效性的一种失效状态。

3. 振动失效

如果因结构物的振动响应(如加速度、振幅和噪声等)使人体感到不舒服或使结构与设备失去有效性, 便认为达到了极限状态。

由于可服务性极限状态不导致整个结构系统完全失效, 所以对其规定不十分严格, 只要求在结构设计时尽量避免达到这种极限状态。

2.1.3 条件性极限状态

这是在某些特殊场合下, 结构发生局部破损而导致人员伤亡或环境严重破坏的失效状态。此种失效状态的发生具有极大的偶然性, 难于考虑, 在一般的可靠性分析中不予讨论。

上面列举的一系列极限状态都可用极限状态函数(失效函数)描述。

设与结构可靠性分析有关的一组随机变量为 X 。 X 包括构件的几何尺寸、材料强度及荷载效应等, 即

$$X = [X_1 \quad X_2 \quad \cdots \quad X_n] \quad (2-1)$$

其中 X_i ($i=1, 2, \cdots, n$) 是第 i 个随机变量。设 X 的一个现实为 x , 即

$$x = [x_1 \quad x_2 \quad \cdots \quad x_n]$$

X 构成一个 n 维空间, 而 x 就是 n 维基本变量空间中的一个点。

针对上述基本随机变量 X , 可以建立起表示这 n 个基本随机变量关系的极限状态函数为:

$$Z = g(X_1, X_2, \cdots, X_n) \quad (2-2)$$

它又称为安全裕度, 而

$$Z = g(X_1, X_2, \cdots, X_n) = 0 \quad (2-3)$$

称为安全裕度方程。它在 n 维基本变量空间内确定了一个 $(n-1)$ 维的超曲面, 称为所讨论情况下的失效界面。它把所有可能引起失效的 X 的组合与不引起失

效的组合分开来。

设安全裕度仅与结构能力 R 、荷载效应 S 两个随机变量有关，则判断结构是否可靠的安全裕度 Z 可用下式表示：

$$Z = g(R, S) = R - S \quad (2-4)$$

当 $Z > 0$ 时，结构处于可靠状态；当 $Z < 0$ 时，结构处于失效状态；当 $Z = 0$ 时，结构处于极限状态，即

$$Z = g(R, S) = R - S = 0 \quad (2-5)$$

为安全裕度方程。图 2-1 对上述内容进行了清楚的描述。

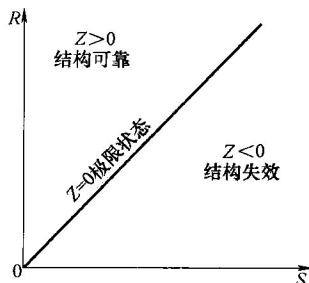


图 2-1

2.2 结构的可靠度与失效概率

结构的可靠度与失效概率是结构可靠性理论中的两个重要概念，在实践中它们又是可靠性的指标。

结构可靠度的定义是：结构在规定时间和规定条件下，完成规定功能的概率，以 p_r 表示。而结构不能完成规定功能的概率，称为失效概率，以 p_f 表示。 p_r 与 p_f 都能用来度量结构的可靠性，但习惯选用 p_f 度量。 p_f 大，可靠性低； p_f 小，可靠性高。

如上节所述，评价结构安全与否的衡准是安全裕度 Z 。当 $Z < 0$ 时，结构处于失效状态； $Z > 0$ 时，结构处于可靠状态。因此， $Z < 0$ 的事件的概率就是结构的失效概率；而 $Z > 0$ 的事件的概率就是结构的可靠度。如果以随机变量 R 代表能力，以随机变量 S 代表荷载，则

$$p_r = P[Z = R - S > 0] \quad (2-6)$$

$$p_f = P[Z = R - S < 0] \quad (2-7)$$

显然， p_r 与 p_f 有互补关系：

$$p_r + p_f = 1 \quad (2-8)$$

如果 R 与 S 是连续型随机变量，它们的概率密度函数分别为 $f_R(r)$ 和 $f_S(s)$ ，则可通过应力—强度干涉理论求解 p_r 与 p_f 。图 2-2 中的两条曲线出现相互重叠的情况。这种现象称为干涉。在重叠区内，如果 $R > S$ ，则意味安全；如果 $R < S$ ，则意味失效。下面应用不同分布的干涉理论，求解 p_r 与 p_f 。

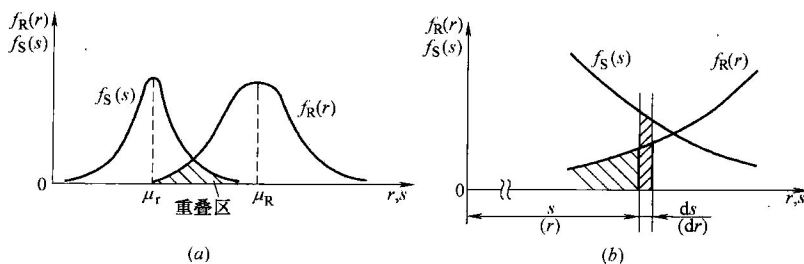


图 2-2