

高等学校教材

胡云昌 郭振邦 编著

结构系统可靠性 分析原理及应用

天津大学出版社

TB114.3
H68

425376

高等学校教材

结构系统可靠性分析原理及应用

胡云昌 郭振邦 编著

天津大学出版社

田宝荣

内 容 提 要

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设计上的应用。全书共九章，前两章在介绍了结构可靠性理论的发展、意义、主要概念的基础上，重点讨论在工程上最为实用的一次二阶矩法。第三章至第六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，着重介绍当前结构系统可靠性分析的两种代表性方法，即分枝限界法和 β 分枝法。第七章介绍基于可靠性分析的结构系统最优设计的各种方法。最后两章介绍结构系统可靠性理论在船舶与海洋工程结构物设计上的应用。

本书是为船舶与海洋工程专业研究生编写的教材，也可作为相近专业的研究生与本科高年级学生和从事工程结构设计、研究的工程技术人员的参考书。

(津)新登字012号

结构系统可靠性分析原理及应用

郭云昌、郭振邦 编著

*

天津大学出版社出版

(天津大学内)

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店天津发行所发行

*

开本：787×1092毫米1/16 印张：16¹/₂；字数：409千字

1992年12月第一版 1992年12月第一次印刷

印数：1—1000

ISBN 7-5618-0399-0

TV·7

定价：4.70元

出版说明

根据国务院国发(1978)23号文件批转试行的“关于高等学校教材编审出版若干问题的暂行规定”，中国船舶工业总公司承担了全国高等学校船舶类专业教材的编审、出版的组织工作。自1978年以来，完成了两轮教材的编审、出版任务，共出版船舶类专业教材116种，对解决教学急需，稳定教学秩序，提高教学质量起到了积极作用。

为了进一步做好这一工作，中国船舶工业总公司成立了“船舶工程”、“船舶动力”两个教材委员会和“船电自动化”、“惯性导航及仪器”、“水声电子工程”、“液压”四个教材小组。船舶类教材委员会(小组)是有关船舶类专业教材建设的研究、指导、规划和评审方面的业务指导机构，其任务是做好高校船舶类教材的编审工作，并为提高教材质量而努力。

中国船舶工业总公司在总结前两轮教材编审出版工作的基础上，于1986年制定了《1986年—1990年全国高等学校船舶类专业教材选题规划》。列入规划的教材、教学参考书等共166种。本规划在教材的种类和数量上有了很大增长，以适应多层次、多规格办学形式的需要。在教材内容方面力求做到两个相适应：一是与教学改革相适应；二是与现代科学技术发展相适应。为此，教材编审除贯彻“打好基础，精选内容，逐步更新，利于教学”的原则以外，还注意了加强实践性教学环节，拓宽知识面，注重能力的培养，以适应社会主义现代化建设的需要。

这批教材由各院校推荐，同行专家评阅，教材委员会(小组)评议，完稿后又经主审人审阅，教材委员会(小组)复审。本规划所属教材分别由国防工业出版社、人民交通出版社以及各有关高等学校的出版社出版。

限于水平和经验，这批教材的编审出版工作还会有许多缺点和不足，希望使用教材的单位 and 广大师生积极提出宝贵意见，以便改进工作。

中国船舶工业总公司教材编审室

1988年3月

前 言

可靠性理论最早是为解决电子元件与设备失效问题而成长起来的,之后在各个领域得到了广泛应用与进一步发展。结构可靠性理论则是60年代以后才迅速发展起来的一门新兴学科。结构可靠性理论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,综合考虑了结构工程中的多种不确定因素。这样便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判断,从而设计出经济合理且安全可靠的结构物。

近年来船舶与海洋工程界对可靠性理论的应用给予了极大的关注。其原因之一是,船舶与海洋工程系统的结构日趋复杂,工作范围不断扩大,环境条件越发恶劣,对可靠性的要求越来越高。所以,对结构系统可靠性的分析、设计与保证措施已成为不可忽视的重要问题。另一原因是,由于新船型与新型结构系统的不断出现,传统的设计方法已不适应,因此,对结构系统开展基于可靠性分析的直接设计的要求,也越来越迫切。基于上述原因,现在挪威、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和标准。英国劳氏船级社与美国船舶局也在着手研究可靠性理论在船舶建造规范中的应用。

近年来,我国在结构可靠性理论及其应用方面的研究也取得了长足进步。许多大学针对本专业的特点,开设了现代可靠性理论的课程。本书是根据船舶及海洋工程专业研究生教学需要而编写的论述结构系统可靠性理论及其在船舶及海洋工程结构物设计上应用的教材。

为了适应结构系统可靠性研究工作发展的需要,并考虑到国内,特别是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,也考虑到船舶及海洋工程专业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,致力于在结构系统可靠性分析与应用方面提供一个较为全面、系统的基础。全书以结构系统可靠性分析为主体,以第二水平法为重点,通过具体实例,对结构系统可靠性分析的方法、步骤及结构系统最优可靠性设计等内容,从结构系统的整体性、关联性、综合性和实践性角度,作了较为详细的论述。

结构系统可靠性理论是一门十分复杂且涉及许多科学领域的综合性新兴学科,因此本书不可能涉及各个方面。其它有关问题,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在船舶与海洋工程结构物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。

本书第四章由郭振邦执笔,余建星参与了第八章的编写工作,梁军参与了例题计算、资料整理与分析工作,其余均由胡云昌执笔。

本书的主要对象是船舶与海洋工程专业的研究生与本科高年级学生,也可作为土木、航空、机械等专业的研究生和从事工程结构设计与研究的工程技术人员的参考书。

本书是在中国船舶工业总公司教材编审室和船舶工程教材委员会指导下编写的。各院校同行及教材委员会委员们对本书的初稿进行了审查与评议,上海交通大学张圣坤教授作为本

书的主审，在综合了教材委员会及有关专家的评审意见后，对本书的初稿提出了许多宝贵的修改意见，在此一并表示衷心的感谢。

胡云昌

于天津大学

1991年3月

目 录

第一章 结构可靠性理论的概述	(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	(1)
§ 1-3 结构可靠性分析的方法论	(2)
§ 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	(3)
第二章 结构可靠性的基本原理	(6)
§ 2-1 极限状态及其描述	(6)
§ 2-2 结构的可靠度与失效概率	(8)
§ 2-3 结构的可靠性指标	(12)
§ 2-4 均值一次二阶矩法 (FOSM)	(16)
§ 2-5 改进的一次二阶矩法(AFOSM)	(18)
§ 2-6 JC 法	(23)
§ 2-7 相关变量的变换	(28)
第三章 结构系统可靠性分析的基础	(33)
§ 3-1 结构系统可靠性分析的理想化处理	(33)
§ 3-2 多元失效模式的概念及其数学模型	(34)
§ 3-3 延性破损和脆性破损	(35)
§ 3-4 塑性铰与失效机构	(35)
§ 3-5 失效形式的产生概率及结构系统的失效概率	(37)
§ 3-6 结构系统失效形式间的相关性	(39)
§ 3-7 结构系统的基本模型	(41)
§ 3-8 桁架及刚架结构系统可靠性分析的特点	(47)
第四章 结构系统可靠性分析的基本方法	(49)
§ 4-1 结构系统失效概率的计算方法及分析	(49)
§ 4-2 分布函数的数值计算	(56)
§ 4-3 程序框图及说明	(63)
§ 4-4 算例及其分析	(66)
第五章 分析结构系统可靠性的分枝限界法	(76)
§ 5-1 桁架结构系统安全裕度的自动生成	(76)
§ 5-2 刚架结构系统安全裕度的自动生成	(80)
§ 5-3 主要失效路径的选择	(96)
§ 5-4 大型结构系统可靠性分析程序	(102)
第六章 分析结构系统可靠性的β分枝法	(120)
§ 6-1 综述	(120)

§ 6-2	单个要素的可靠性预测	(121)
§ 6-3	水准 1 上的结构系统可靠性预测	(124)
§ 6-4	水准 2 上的结构系统可靠性预测	(127)
§ 6-5	水准 $N > 2$ 上的结构系统可靠性预测	(139)
§ 6-6	机构水准上的结构系统可靠性预测	(148)
第七章	结构系统的最优可靠性设计	(156)
§ 7-1	最优可靠性设计的基本形式	(156)
§ 7-2	各种类型的最优可靠性设计问题	(165)
§ 7-3	基于结构要素可靠性分析的最优设计	(170)
§ 7-4	利用 β 分枝法的最优可靠性设计	(184)
第八章	船舶结构的可靠性分析	(193)
§ 8-1	船体损伤、破坏的模式及其规律性	(193)
§ 8-2	船舶纵弯曲的可靠性分析	(200)
§ 8-3	基于最终强度的船体横框架及立体舱段的可靠性分析	(213)
第九章	海洋结构物的可靠性分析	(228)
§ 9-1	海洋结构物的荷载与响应	(228)
§ 9-2	基于最终强度的海洋结构物的可靠性分析	(240)
§ 9-3	海洋平台的期望总费用最小化设计	(242)
参考文献		(254)

第一章 结构可靠性理论的概述

近20年来,世界上很多大学都开设了现代可靠性理论课程,同时从事结构可靠性理论研究的学者,差不多以每10年增加一个数量级(大约10倍)的速度在增加,足见这一理论发展的势头和它的应用价值了。船舶及海洋工程结构物结构复杂,使用期限长,造价高,环境条件极为严酷。一旦出现事故,就将造成极为恶劣的社会影响及巨大的经济损失。因此,结构的可靠性是工程设计中必须考虑的重要问题之一。

现在结构可靠性理论已发展成为一门独立的学科。

§ 1-1 结构可靠性的定义

作为一门学科,结构可靠性是有其确切含义的。在规定时间内和规定条件下,结构能完成规定功能的能力称为结构的可靠性。

“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、环境条件和操作技术。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抑或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与不可靠的标准。

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、正常使用时能承受出现的各种作用的能力。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,以及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作出定量分析。

对于结构设计中的不确定因素,很早以来就非常重视,但由于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(σ),而

$$[\sigma] = \sigma_s / K$$

(1-1)

其中 σ_s 为材料的屈服强度, K 为安全系数。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作随机变化。因此, 对每一个影响强度的参量都应看作是随机变量。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, 其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。

一、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、构件尺寸的不确定性、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等。这种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。

二、主观不确定性

主观不确定性包括对结构强度进行分析所作的假定、环境条件及转化为荷载的近似性和结构分析方法及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 $CV = \sigma/\mu$ 来描述其不确定性, 并从概率意义上定义它们, 且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。

结构可靠性理论处理不确定性时, 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用可靠度、失效概率(或破损概率)和可靠性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

多年的实践经验已使人们认识到, 要想较为精确地预测结构的可靠性, 必须使用系统工程学的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来预测结构系统的可靠性是可行的。例如静定结构, 一构件失效就会引起结构系统的失效。而超静定结构, 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, 必定要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, 如弯矩过大、切力过大、挠度过大、失稳等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 and 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，但实际上是不可能也是没必要的。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。一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 型分布。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。极限状态联结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。

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、失效概率及可靠性指标等。

§ 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进展。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实用方法。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安系数法很相似，故也称为杂交半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作出直接定量估计，但由于其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统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分析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作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,这种方法只有理论上的意义,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定量化,分析结构的安全性,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,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)、Khotsyalov(1929年)二人的论文。之后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,以美国与欧洲学者的研究为主体的。

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。

$$P_f = P(R < S) \leq P_{fa} \quad (1-2)$$

其中 P_f 可由下式给出:

$$\begin{aligned} P_f &= \int_0^\infty \int_0^\infty f_{SR}(s, r) dr ds \\ &= \int_0^\infty f_S(s) F_R(r) ds \end{aligned} \quad (1-3)$$

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;

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析两个方向发展。

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 $h(\tau)$ 表示。

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

在静态可靠性分析中, 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。当用 $Z=R-S$ 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 $\hat{R}$ 、 $\hat{S}$ 时产生的误差。这时, 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。

和洪华生提出广义可靠性理论差不多同时, 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, 不考虑分布形式的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性指标 β 。当 $Z = R-S$ 时, 则可靠性指标

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

其中 μ 、 σ 为均值及标准差。与此相类似, 罗森布鲁斯 (Rosenblueth) 和埃斯特伐 (Esteva), 提出了基于 $Z = \ln(R/S)$ 的可靠性指标, 即

$$\beta = \mu_{\ln z} / \sigma_{\ln z} = \ln(\mu_R / \mu_S) / \sqrt{CV_R^2 + CV_S^2} \quad (1-7)$$

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性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)。为了改进二阶矩法的缺点, 在广义可靠性理论中, 欧洲学者又提出了一种称为FOM (Full Distribution) 的方法。

不仅设计思想与方法论, 而且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, 对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。以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) 及美国船舶局 (ABS) 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, 也是以可靠性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方法。这是今后应着重研究的重要课题。

第二章 结构可靠性的基本原理

包括船舶及海洋工程结构物在内的任何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、可靠度及可靠性指标等。

本章就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的不同而异。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。

一、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。它主要包括如下几种。

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。这种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言的失效状态。它相应于混凝土结构临界截面产生开裂和有超

量变形。

二、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，而影响结构工作的有效性的一种失效状态。

3. 振动失效

如果结构物的振动响应（如加速度、振幅和噪声等）使人体感到不舒适，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，只要在结构设计时尽量避免达到这种极限状态。

三、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 $\bar{X}$ 。 $\bar{X}$ 包括构件的几何尺寸、材料强度及荷载效应等，即

$$\bar{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (2-1)$$

其中 X_i （ $i = 1, 2, \dots, n$ ）是第 i 个随机变量， $\bar{X}$ 是随机向量。设 $\bar{X}$ 的一个现实为 $\bar{x}$ ，即

$$\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$$

$\bar{X}$ 构成一个 n 维空间，而 $\bar{x}$ 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 $\bar{X}$ ，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

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

它又称为安全裕度，而

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

称为极限状态方程。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 $\bar{x}$ 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：

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

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。

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

即为极限状态方程。图2-1对上述内容进行了清楚地描述。

§ 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重要指标。

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。

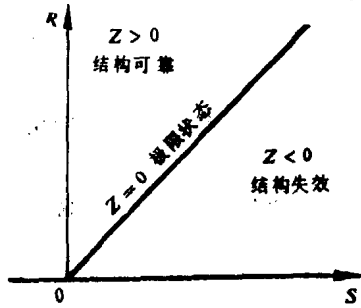


图 2-1

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 。

一、求解 P_R 与 P_f 的一般公式

现在考虑荷载落在 ds 区间内的概率（图 2-2(b)）：

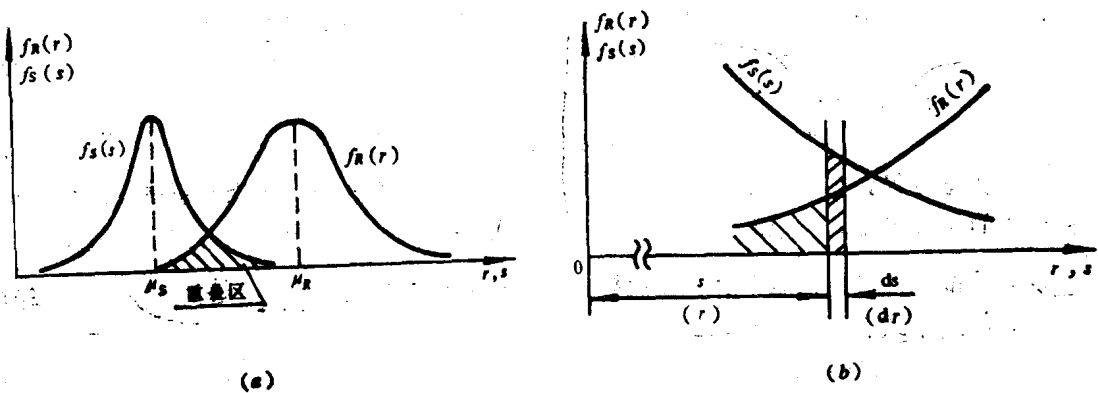


图 2-2

$$P\left[s - \frac{ds}{2} \leq S \leq s + \frac{ds}{2}\right] = f_S(s)ds$$

而能力大于荷载的概率

$$P(R > S) = \int_{-\infty}^{\infty} f_R(r) dr$$

假设 R 与 S 相互独立, 则上两式的事件同时发生的概率

$$f_S(s) ds \int_{-\infty}^{\infty} f_R(r) dr$$

由于可靠度对全区间所有可能的 S 均成立, 故可靠度

$$P_R = \int_{-\infty}^{\infty} f_S(s) \left(\int_{-\infty}^{\infty} f_R(r) dr \right) ds \quad (2-9)$$

当然, 也可以先考虑 R 落在 dr 区间内的概率

$$P \left[r - \frac{dr}{2} \leq R \leq r + \frac{dr}{2} \right] = f_R(r) dr$$

则荷载小于能力的概率

$$R(S < R) = \int_{-\infty}^r f_S(s) ds$$

则上两式的事件同时发生, 并对 R 在全区间内考虑, 则有

$$P_R = \int_{-\infty}^{\infty} f_R(r) \left[\int_{-\infty}^r f_S(s) ds \right] dr \quad (2-10)$$

如果在两个随机变量中, 已知其中一个概率密度函数和另一个的分布函数, 则可应用式 (2-11) 及 (2-12) 计算失效概率。

由式 (2-8) 和式 (2-9), 则有失效概率

$$\begin{aligned} P_f &= 1 - P_R = 1 - \int_{-\infty}^{\infty} f_S(s) \left[\int_{-\infty}^{\infty} f_R(r) dr \right] ds \\ &= 1 - \int_{-\infty}^{\infty} f_S(s) (1 - F_R(r)) ds \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} F_R(s) f_S(s) ds \end{aligned} \quad (2-11)$$

类似地, 由式 (2-8) 和式 (2-10), 则有失效概率

$$\begin{aligned} P_f &= 1 - \int_{-\infty}^{\infty} f_R(r) \left[\int_{-\infty}^r f_S(s) ds \right] dr \\ &= 1 - \int_{-\infty}^{\infty} f_R(r) F_S(r) dr \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} (1 - F_S(r)) f_R(r) dr \end{aligned} \quad (2-12)$$

式中的 $F_R(\cdot)$ 和 $F_S(\cdot)$ 分别为 R 与 S 的分布函数。

在实际中, R 与 S 都大于零, 故在式 (2-9) ~ 式 (2-12) 中的积分下限 $(-\infty)$ 均可改为零。

分析图 2-2 可知, 结构失效概率的大小与 $f_R(r)$ 及 $f_S(s)$ 两条曲线重叠区的大小有关。重叠区越小则 P_f 越小; 反之, 重叠区越大则 P_f 越大。曲线 $f_R(r)$ 与 $f_S(s)$ 的相对位置可以用它们各自均值的 $SF = \mu_R / \mu_S$ 衡量。 SF 称为中心安全系数。而重叠区的大小也与 $f_R(r)$ 和 $f_S(s)$ 的