

结构可靠性原理 及其应用

桑国光 张圣坤 编著

上海交通大学出版社

内 容 简 介

本书阐述了结构可靠性原理及其在结构工程中的应用,全书共分九章,内容主要为两部分。第一部分的内容有结构可靠性分析的基本概念和原理,结构系统的静态可靠性分析,载荷模型与结构能力模型,不确定性有限元法可靠性分析等,其中着重讨论了最为实用的第二水平法。第二部分的内容主要涉及可靠性方法在工程结构中的应用,较多地讨论船舶与海洋工程结构的失效模式、载荷、能力以及可靠性校核和局部安全因子。书中每一章都配有适当的例题。

本书可供高等院校有关的结构工程专业的学生和研究生使用,尤其适合于船舶与海洋工程专业的学生。也可作为从事实际工程结构设计、研究、检验工作的科技人员的参考书。

结构可靠性原理及其应用

上海交通大学出版社出版

淮海中路1984弄19号

新华书店上海发行所发行

江苏建湖印刷厂排版印装

开本787×1092毫米 1/32 印张10.625 字数236000

1986年12月第1版 1987年1月第1次印刷

印数1—3000

统一书号: 15324·214 科技书目: 142—251

定价: 1.80元

前 言

自从六十年代以来，结构可靠性理论及其在各个领域（特别是在航空和土木工程）中的应用得到了很大的发展。在船舶工程领域中，虽然早在五十年代就提出了可靠性概念，但研究进展较慢。由于海洋工程的兴起，情况有所改观。至今，挪威、法国船级社及美国石油工业部门已先后采用了以结构可靠性原理制定的海上平台设计规范或标准。几个国际上有影响的船级社，如英国劳氏船级社（L.R.）、美国船舶局（ABS）等，也正在着手研究可靠性方法在船舶建造规范中的应用。

结构可靠性方法的重要意义，在于对结构安全性检验提出了建立在概率分析基础上的一系列新的概念、原理、方法和衡量标准，综合考虑了工程结构中的各种不确定因素，加深了对结构工作性能的认识，对结构可靠性有了一个客观的统一度量，这样就能对结构安全性作出合理的判断，从而设计出更为经济而安全的工程结构，可以说，结构可靠性方法是近年来结构工程的主要发展方向，是结构强度理论和计算结构力学的一个新分支。

船舶结构工程正面临着一个改造和再发展的任务，应用可靠性分析研究强度问题是船舶结构工程达到一个新水平的标志。海洋工程是一门年轻的新学科，涉及面广，在缺少经验的情况下，可靠性要求更高，可靠性分析也更重要。

有鉴于此，我们将近年来在教学和科研中收集到的资料和自己的一些体会汇集起来编写了这本书。由于资料来源的局限以及可靠性原理在船舶与海洋工程中的应用处于不断发展之中，因而本书除了叙述一般的工程结构可靠性基本原理

和方法外，还直接与船舶、海洋工程中的应用相结合来进行介绍。这样做既可照顾到目前的实际情况，又能符合船舶与海洋工程本身的一些传统处理方法的特点。深信随着时间的推移，结构可靠性方法的研究将会取得更多的成果，本书所涉及的内容会有很大的开拓和深化。

本书是为船舶与海洋工程专业的大学生、研究生而编写的教材。但本书的内容不失一般性，亦可作为土木、航空、机械等其他工程专业的教学参考书。本书还可作为从事船舶与海洋工程结构设计、研究工作者的参考书。

全书共分九章，其中第一、第二章，第四章的 § 4-1，4-2、4-3、4-7、4-8 等节，第六、七章由桑国光执笔。第三章，第四章的 § 4-4、4-5、4-6 等节，第五、八、九章由张圣坤执笔。最后由桑国光统稿。

本书如能使读者对结构可靠性方法及其工程应用产生兴趣的话，那就是作者最大的希望了。限于时间和水平，本书一定存在不少缺点，恳切希望读者批评指正。

本书承杨代盛教授审阅并提出宝贵意见，在此深表谢意。

桑国光 张圣坤
于上海交通大学
1986年6月

目 录

第一章 结构可靠性分析的基本概念

§ 1-1	概述	(1)
§ 1-2	基本变量和不确定性	(6)
§ 1-3	结构可靠性与安全检验	(8)

第二章 结构可靠性原理

§ 2-1	基本类型情况	(11)
§ 2-2	一般情况	(15)
§ 2-3	第二水平法	(17)
§ 2-4	改进的第二水平法	(29)
§ 2-5	第一水平法	(39)
§ 2-6	蒙特卡洛法的应用	(42)

第三章 结构系统的静态可靠性分析

§ 3-1	串联结构系统与并联结构系统	(59)
§ 3-2	串联-并联组合系统	(62)
§ 3-3	工程结构系统的可靠性	(66)
§ 3-4	能力相关的结构系统和界值定律	(73)
§ 3-5	实际工程结构的可靠性分析	(89)

第四章 载荷模型与结构能力模型

§ 4-1	载荷类型	(104)
-------	------------	---------

§ 4-2	载荷模型·····	(106)
§ 4-3	载荷的极值分布·····	(123)
§ 4-4	菲里载荷模型和组合模型·····	(129)
§ 4-5	图克斯特拉载荷组合定律·····	(142)
§ 4-6	载荷组合的其他模型·····	(147)
§ 4-7	结构能力基本变量的模型·····	(151)
§ 4-8	结构能力模型·····	(153)

第五章 有限元法在不确定性分析中的应用

§ 5-1	失效模式和有限元模型·····	(158)
§ 5-2	有限元—一阶二次矩法·····	(163)
§ 5-3	有限元-蒙特卡洛法·····	(168)

第六章 船舶在波浪上航行时的载荷

§ 6-1	海浪谱·····	(180)
§ 6-2	船舶在规则波上正浪航行时的波浪载荷·····	(193)
§ 6-3	船体断面的附加质量和阻尼系数·····	(210)
§ 6-4	船舶在规则波上斜浪航行时的波浪载荷·····	(217)
§ 6-5	不规则波上的船舶波浪载荷·····	(232)

第七章 船舶结构的可靠性分析

§ 7-1	船舶结构的失效模式·····	(243)
§ 7-2	船体总纵弯曲可靠性分析中的载荷·····	(246)
§ 7-3	船体梁的抗弯强度·····	(249)
§ 7-4	船体纵弯曲强度的全概率分析·····	(263)
§ 7-5	船体纵弯曲强度的第二水平法·····	(269)
§ 7-6	船体纵弯曲强度的第一水平法·····	(272)

第八章 海洋工程结构可靠性校核标准和局部安全因子

- § 8-1 局部安全因子(一)..... (276)
- § 8-2 海洋工程结构的作用和状态..... (283)
- § 8-3 局部安全因子(二)..... (289)
- § 8-4 局部安全因子计算方法..... (293)
- § 8-5 张力腿平台的可靠性校核..... (305)

第九章 海洋工程结构的动力可靠性分析

- § 9-1 波浪载荷的谱分析..... (308)
- § 9-2 导管架型平台的可靠性分析..... (317)

- 参考文献 (328)

第一章 结构可靠性分析 的基本概念

§ 1-1 概 述

在工程结构强度的常规计算方法和校核中，有关的参量都取为定值。如果以一根承受轴向拉伸的杆为例，它承受的拉力为 P ，杆的断面积为 F ，利用关系式

$$\sigma = P/F \quad (1-1)$$

求得杆断面中的拉应力 σ ，然后利用条件

$$\sigma \leq [\sigma] \quad (1-2)$$

检验杆的强度，(1—2)式中的 $[\sigma]$ 就称为许用应力，它取为

$$[\sigma] = \sigma_s / K \quad (1-3)$$

式中， σ_s 为材料的屈服极限， K 为安全系数。

上述各式中的 P 、 F 、 σ_s 以及 σ 等，都是单一的确定值，这样的方法就称为确定性法 (*deterministic method*)。而安全系数 K ，在形式上表现为一种强度的储备，使人们对结构的设计产生它具有某种安全裕度的印象，甚至使人产生一种错觉，认为结构是绝对安全不会破坏的。这种方法沿用已久，或者用它来检验结构或构件的强度，或者用来设计结构或构件的尺寸。

但是，实际上常会出现这样的事实，按同样确定性法原理设计的一批杆件，会有少量的杆产生破坏，破坏的拉杆数与总数相比，一般说来是个很小的量，从宏观上看它与安全

系数的大小成反比。这个事实按照确定性法的观点似乎是无法解释的，或许会看作是一种偶然的情况。那么，应该怎样来阐明它的原因呢？

原来在杆上作用的载荷大小、杆断面积尺寸的大小以及材料机械性能等等，由于估算、计量、冶炼或加工等一系列原因，都不会是统一的相同的值，它们的真实量在其名义值（或额定值、计算值）附近摆动，而且这种摆动是随机性的。因此，对每一个影响强度的参量，就其总体来看，应该把它作为随机变量。何况，对有些工程结构来说，有些参量（譬如载荷）本身就是随机变化着的，如作用在船舶及海洋工程上的波浪载荷等。

既然这些参量都是随机变量，只有用随机变量的特征参数才能表示它们，如随机变量的期望值、方差或标准偏差以及概率密度函数或分布函数等。同时对问题的求解就要引入概率分析方法。

为了说明这点，仍以上述的拉杆为例。这时拉杆载荷 P 和断面积 F 都是随机变量，而且是相互独立的随机变量。现假设它们都呈正态分布，正态分布随机变量的数字特征有平均值（期望值） μ 和标准偏差 σ 。这样拉力 P 就可以 μ_P 和 σ_P 来表征，断面积 F 就以 μ_F 和 σ_F 来表示。由于计算拉杆应力的基本方程不变，就用(1-1)式来进行随机变量的除法运算，得到的应力也是随机变量，其数字特征有平均值 μ_σ 和标准偏差

σ_σ

$$\begin{aligned}\mu_\sigma &= \mu_P / \mu_F, \\ \sigma_\sigma &= \sqrt{(\mu_P^2 \sigma_F^2 + \mu_F^2 \sigma_P^2) / \mu_F^4},\end{aligned}\quad (1-4)$$

并相应地用某种方法求得其分布。

求得应力之后，再直接应用(1-3)式来检验强度是不适宜的了。这时可把它的分布密度用图表示出来。同时，由于材料的屈服极限也是随机变量，也把它分布密度用图表示出来。因为这两者的量纲相同，可以把它们的概率密度函数 f_c 和 f_D 表示在同一坐标轴上，如图1-1所示。这时由作用载荷所引起的应力，是对结构的要求，简称要求 (Demand)，以符号 D 表示；而材料的屈服极限则表示了结构的承载能力，简称能力 (capability)，以符号 C 表示。当然只要量纲相同，载荷也可直接作为要求，而对应的能力是相应的抗力。

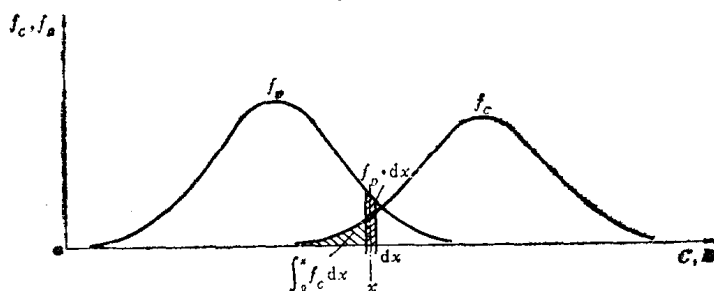


图 1-1

由图1-1可见，对 C 及 D 的可能取值分为三个区域，即 C 、 D 曲线相重迭的区域和在它右侧及左侧的区域。在重迭区域的右侧，是 C 取值较大的区域，无论这时 D 取何值，均将小于在右侧区域内的 C 的可能取值。这就是说在这种情况下要求总是小于能力，结构是安全的。在重迭区的左侧，是 D 取值较小的区域，无论这时 C 取何值，均将大于在左侧区域内的 D 的可能取值。也即此时结构能力总是大于要求，结构也是安全的。至于重迭区域内的 D 的取值，有可能遇到比它

大的 C 的取值,也有可能遇到比它小的 C 的取值。在 D 的取值大于 C 的可能取值的时候,结构将会出现破坏(或失效)。因此,若取 $C/D \leq 1$,或者 $C - D \leq 0$ 来表示结构将产生破坏(或失效)这一事件的话,那么这个事件出现的概率称为破坏概率或失效概率 (probability of failure) p_f ,

$$p_f = \text{Pr. } [C/D \leq 1],$$

或者

(1-5)

$$p_f = \text{Pr. } [(C - D) \leq 0]。$$

对于简单结构 C 及 D 为独立随机变量的情况, C 及 D 是两个独立的事件。 D 在 x 及 $x+dx$ 间取值的概率

$$p_1 = f_D(x)dx,$$

而 C 在小于或等于 x 范围内取值的概率

$$p_2 = F_C(x),$$

$p_1 \cdot p_2$ 为此两事件相交的概率。因此,结构的总失效概率为这两者事件所有可能出现的机会的总和:

$$p_f = P[(C - D) \leq 0] = \int_{-\infty}^{+\infty} F_C(x) f_D(x) dx, \quad (1-6)$$

或者

$$p_f = \int_{-\infty}^{+\infty} (1 - F_D(x)) f_C(x) dx. \quad (1-7)$$

在结构问题中,一般讲负的能力是无意义的,因此上述两积分下限可以用0取代 $-\infty$ 。

由于结构的失效与安全构成全部事件,其概率为1,因而定义

$$R = 1 - p_f = 1 - \int_0^{+\infty} F_C(x) f_D(x) dx, \quad (1-8)$$

或

$$R = 1 - \int_0^{\infty} (1 - F_D(x)) f_C(x) dx. \quad (1-9)$$

R 就称为结构的可靠度 (Reliability)。在以上诸式中的 F_C 及 F_D 分别为 C 和 D 的概率分布函数。

上面所述的这种分析称为结构可靠性分析。而结构的可靠性一般是指结构在某个规定时期内实现其设计目的 (或履行其设计要求) 的能力。对于特定情况而言, 可具体地解释成在规定的参照时期内, 结构将不会达到某一特定极限状态 (如最终的或营运可能状态) 的概率。

强调“规定时期”或“参照时期”的意义, 是由于结构的载荷一般是以某个不确定的方式随时间而变的, 在选择某个固定时期内将出现超过的载荷值的时候, 其超越概率是与此固定时期的长短有关的。有时结构的材料性能也会随时间而变。因此, 结构的可靠性度量与结构暴露在载荷环境中的时间有关。

在结构强度分析中, 这种将有关参量作为随机变量处理, 从而进行分析的方法, 称为概率法 (probabilistic method)。结构安全与否, 用失效概率或可靠度来度量, 即将它们与可接受的失效概率或要求的可靠度相比较。无论是结构还是构件的失效概率或可靠度, 在它们的要求和能力的统计特性已知的时候, 是可以求出来的。

实际结构的安全性以概率形式来表达, 而且认为结构存在着一定的失效可能, 这与确定性法的表述不同, 不过并不难于理解, 以前面的拉杆为例。如果它是按确定性法设计的, 具有安全系数 K , 自然会认为这批拉杆的强度是足够的。但

是，可能由于拉杆在结构中装配不当，所受的真实载荷大于计算时所取之值；也可能由于材料来源不一，标号相同而性能存在差异；也可能加工后的实际断面积，存在着在公差范围内的差异。如果由于这些因素组成了较小能力的拉杆；或者碰上了超出计算值的较大载荷，上述这些可能的组合，都将会导致拉杆出现破坏。这就是在强度足够（按确定性法观点）的杆件中，出现破坏的实际可能性，尽管机会极少。确定性法没有揭示出这个很小的破坏可能，而概率法做到了。因此，概率法比确定性法更能揭示事物的本来面貌。

§ 1-2 基本变量和不确定性

在进行结构可靠性分析时，必然要在分析中引用若干个对结构响应起支配作用的基本量，这种基本量就定义为基本变量，例如环境载荷、材料机械性能以及结构尺度和构件尺寸等等。如前节所述这些变量带有随机性，也就是说它们具有不确定性（*uncertainty*）在结构分析中存在着下述各种类型的不确定性：

物理性的不确定性 指结构可靠性分析中物理量的真实变异，例如载荷、材料机械性能及尺度等。这种变异性可以用随机变量或随机过程（如果它依赖于时间而随机变化的话）的方式来表达。然而，物理性的变异只能用进行考察的样本资料来定量，由于样本数实际上是有限的，必然会包含某种统计上的不确定性。

统计性的不确定性 统计与根据观测样本而作出的推断有关。为了对可靠性分析中某些量的物理性变异建立概率模型要收集一批数据，从而选择适当的概率分布型式并求得

其分布参量的数值。但是对参量的数值作出可信的估计时要求有大量的样本。对于一组给定的数据，分布参量本身也是随机变量，它的不定性依赖于样本数据的多少和某种经验。这种不确定性称为统计性的不确定性，它是由于缺乏信息资料而造成的。

模型不确定性 在结构设计及结构分析中，总要对结构建立数学模型，将欲求的结果（输出量）与给定的参量（输入量或基本变量）联系起来。这种模型或者根据力学原理或者根据经验建立之后，它们对结构响应量的预报或多或少有一定的误差，这就是说结构响应中还包括一种不确定性成分，附加在基本载荷及能力变量的不确定性之上。这种附加不确定性称为模型不确定性，它是由模型的简化假设、未知的边界条件、没有包括在模型中的其他变量的未知效应及其相互作用等等引起的。例如由金属结构中构件的加工、装配以及焊接等一系列因素造成的结构中的残余预应力或材料机械性能变化等。

为了便于将这些不确定性计入分析之中，可以将不确定性分为两类：客观不确定性和主观不确定性。所谓客观不确定性是指与基本变量有关的不定性，通过对相关的统计资料的收集及检验而求得。主观不确定性是与知识及资料缺乏有关的不定性，只能根据经验积累和主观判断确定。这样就可作下述的分类。

客观不确定性。包括材料机械性能（如屈服极限、杨氏模量等）的不定性，构件尺寸（如板厚、型材断面积等）的不定性，结构建造尺寸（结构的长、宽、高及构件位置）误差所反映的不定性，与焊接残余应力有关的不定性以及建造不完善性（如板的不平整性等）有关的不定性等等。

主观不确定性包括结构强度分析所作的假设，环境条件及转化为载荷的近似性以及结构分析方法及结构模型化精度等等的定性。

无论是哪种定性，都具有随机变化的特点，参量可作为随机变量看待，那么表征随机变量的数字特征如平均值和标准偏差就可用来描述定性。例如材料的屈服极限，按照一批试样得到的屈服极限的平均值，与该材料的额定值之差，代表一种不同于额定值的倾向性误差，称为系统误差。而该批试样的标准偏差，表示试件的屈服极限相对于平均值的误差，称为随机误差。如果在分析中利用屈服极限的平均值，取代了它的额定值，得到了计算结果的平均值，就在分析中计及了系统误差的影响。同理，如果在分析中计及了屈服极限的标准偏差，那么也就得到计算结果的标准偏差，反映了随机误差的影响。依此类推，这样就在分析中反映了各个不定性的影响。

通常利用变异系数 ($C.O.V$) 来表示随机变量相对于平均值的变异。它定义为

$$v = \sigma / \mu \quad (1-10)$$

式中， σ 为标准偏差； μ 为变量的平均值。

§ 1-3 结构可靠性与安全检验

在 § 1-1 中曾经指出，结构的可靠度是指在规定时期内，结构将不会达到各个特定极限状态的概率。现在对此作进一步的讨论。

现仍以前述之拉杆为例。当拉力 P 在杆断面内产生的效应 D 大于杆的抗拉强度 C 时，拉杆就破坏。如果进一步假

设, C 和 D 这两个随机变量经过长期的系列测量, 得到它们的精确统计分布。 C 代表一批名义上同样的拉杆的抗拉强度变异的变量, D 代表连续 T 年内的最大载荷效应的变量。若令 $M = C - D$, M 亦是一随机变量, 则拉杆经历任一参照周期 T 内的失效概率为

$$p_f = \text{Pr. } [M \leq 0] = \int_{-\infty}^{+\infty} F_C(x) f_D(x) dx, \quad (1-11)$$

在这里利用了按照 C 、 D 这两个变量取值的出现频率、且当取样数很大时所逼近的概率密度 f_C 及 f_D , 因此上式求得的概率, 是指过去大量 $M \leq 0$ 事件出现时所逼近的概率。同时, 也用它来估计在将来在同样条件下出现同样事件的概率。类似地, 按下式定义的可靠度 R :

$$R = 1 - p_f, \quad (1-12)$$

可解释为经过长期观测后所得的拉杆的生存频率, 或者称为拉杆的可靠度。

然而, 如果讨论对象是一个特定结构, 例如是一根拉杆, R 是该结构 (拉杆) 可靠性的一个量度。这时失效概率 p_f 就表示这个结构 (拉杆) 所具有的某个确定的、不过还是未知的抗力 c (它是服从 $f_C(x)$ 密度分布律 C 的取值) 将被未来参照周期内极值载荷效应 D 所超过的概率。这种型式的概率已不具有相对频率的含义, 通常就称为主观概率, 相对应的可靠度称为主观可靠度。

在特殊情况下当 c 变成已知时, 由 (1-11) 式给出的失效概率就变为

$$p_f = \text{Pr. } [c - D \leq 0] = 1 - F_D(c), \quad (1-13)$$

式中, $F_D(c)$ 表示载荷效应自其最小值到取值等于 c 时的概

率。这种特殊形式也可写成

$$p_i = \text{Pr. } [C - D \leq 0 | C = c], \quad (1-14)$$

即 C 的取值为 c 时的条件失效概率。

由上述讨论可知，失效概率从过去事件出现的相对频率的含义，过渡到某一同类结构将来出现失效可能的估计（主观概率）上来。

结构可靠性原理近年来得到很大发展，并被用来检验结构的安全性。安全检验的方法可分为三类：

1. 全概率分析 这种方法要求为那些对结构响应起作用的各方面的量，作出联合出现的全概率描述，利用这种联合概率密度函数，并考虑到失效域的真实性质，求得结构或构件的“精确”失效概率。这种从数学意义上讲严格地按联合概率密度并遍及失效域进行积分的方法，称为全概率分析。并且以它应用了最高水平的概率分析而称为第三水平法。但除了极为简单的情况而外，要对结构响应作出全概率的描述是极为困难的。

2. 第二水平法 (*level 2 methods*) 一般要对失效域进行理想化处理，相应地对诸变量的联合概率密度作简化表达，用某种近似迭代计算方法以求得结构或结构系统失效概率的近似值，因而也称为近似概率法。有时它通过安全指数或可靠性指数来表示。

3. 第一水平法 是应用一系列局部安全因子，与事先定义的主要结构变量及载荷变量的特征值或名义值联系起来，从而对构件或结构提供适当的结构可靠度的设计方法。一个第一水平法的结构设计，要考虑一系列独立的极限状态，故有时也称为极限状态设计。