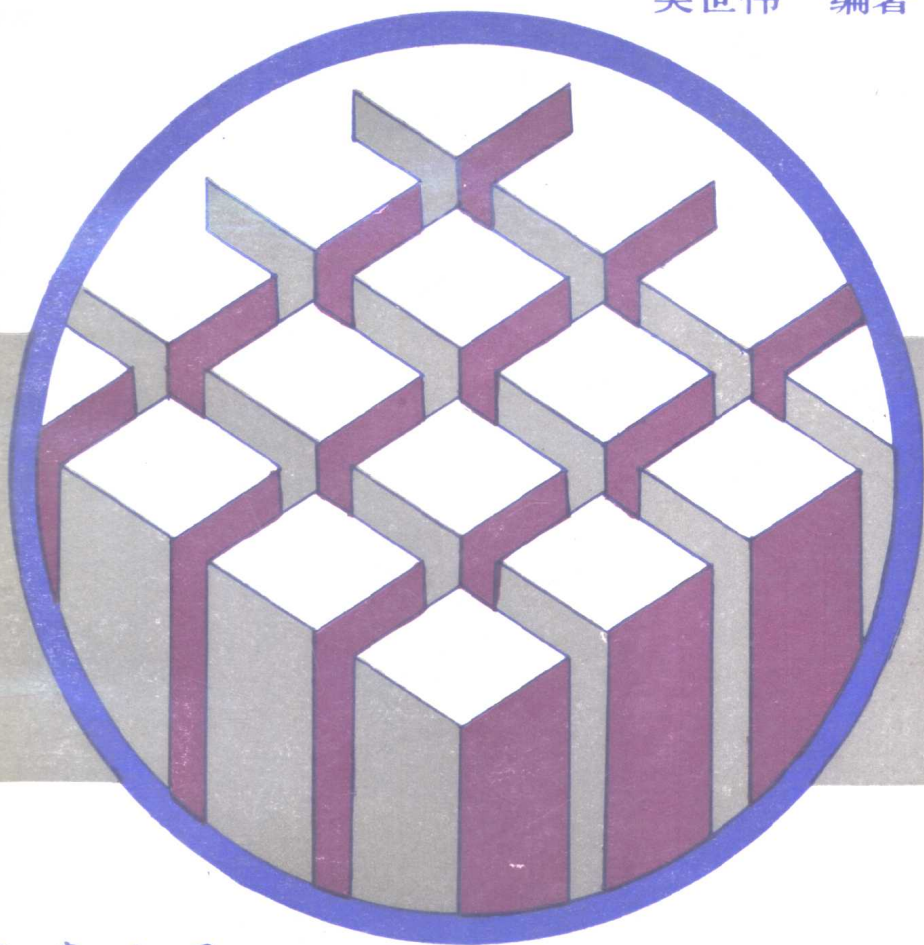


结构可靠度分析

STRUCTURAL RELIABILITY ANALYSIS

吴世伟 编著



人民交通出版社

86.29
9101289

结构可靠度分析

Jiegou Kekaodu Fenxi

吴世伟 编著

人民交通出版社

结构可靠度分析

吴世伟 编著

正文设计：崔凤莲

责任校对：刘素燕

人民交通出版社出版发行

(北京和平里东街10号)

各地新华书店经销

人民交通出版社印刷厂印刷

开本：850×1168 $\frac{1}{32}$ 印张：8.875字数：191 千

1990年8月 第1版

1990年 8月第1版 第1次印刷

印数：0001—3,600册 定价：7.00元

内 容 提 要

本书在介绍概率统计必要知识的基础上，着重阐述结构可靠度理论、计算方法及其在工程结构设计中的应用。书中还配有较多的例题和必要的习题。

本书可供高等院校土木、水利、建筑及工程力学等专业的学生和研究生使用，也可供有关教师和从事工程设计、研究的科学技术人员参考。

前 言

本书包括七章和习题，书后还附有较为完整的概率统计计算用表。

本书在总结必要的概率统计基本知识的基础上，着重讨论结构构件可靠度计算方法和结构体系可靠度计算方法。编写时考虑了由浅入深、由易到难、循序渐进的原则。书中反复强调了结构可靠度基本理论、基本概念和基本方法。先从结构可靠度分析中的若干基本概念出发，阐述了可靠度、失效概率同可靠指标的关系，再从一次二阶矩法入手，逐步深入到JC法、帕罗黑莫法、蒙特卡罗法，最后对目前工程结构可靠度分析中发展出来的验证荷载法、变量分布截尾下的JC法、变量相关下可靠度算法以及基于有限元的结构可靠度算法，也作了介绍。这样可以使读者逐步加深对结构可靠度分析法的理解。此外，本书对基于可靠度的结构设计也作了简要的介绍。

本书在编写过程中，得到张思俊副教授以及吕泰仁、高而坤、李同春、武清玺、叶军、李宏等同志很大的帮助，还得到河海大学工程力学系结构力学教研室全体同志的支持，我的研究生也做了不少工作，在此谨向他们致以深切的谢意。

编著者

目 录

第一章 绪论	1
第一节 概述	1
第二节 结构可靠度研究历史简介	4
第三节 结构可靠度分析的目的和过程	6
第二章 随机变量的概率统计基础	9
第一节 事件与概率	9
第二节 概率的基本公理与法则	10
第三节 随机变量概率分布	16
第四节 随机变量的数学特征	20
第五节 结构可靠度分析中常用的概率分布	24
第六节 统计独立正态分布变量的和与差	38
第七节 中心极限定理简述	40
第八节 线性函数的均值和方差	41
第九节 随机变量概率分布中参数的估计	43
第十节 随机变量分布类型的假设检验	60
第三章 结构可靠度分析中的若干基本概念	71
第一节 结构可靠度与极限状态	71
第二节 结构可靠度与失效概率	72
第三节 结构可靠度与可靠指标	77
第四节 可靠指标 β 的两个常用公式	80
第五节 可靠指标的几何涵义	84
第六节 可靠度结构可靠指标与安全系数的关系	89
第七节 可靠度结构可靠指标与分项系数的关系	91
第四章 结构可靠度计算方法	97
第一节 一次二阶矩法	97

第二节	JC法	111
第三节	帕罗黑莫法	122
第四节	蒙特卡罗法	127
第五节	验证荷载法	140
第六节	变量分布截尾下的JC法	146
第七节	变量相关下结构可靠指标的计算	154
第八节	基于有限元的结构可靠度计算	163
第五章	荷载效应、构件抗力和基于可靠度理论的结构设计	172
第一节	荷载的概率模型	172
第二节	荷载的代表值	177
第三节	荷载的统计分析	178
第四节	荷载效应的组合	183
第五节	结构构件抗力的统计分析	189
第六节	基于可靠度理论的结构设计	194
第六章	结构体系可靠度的计算	196
第一节	概述	196
第二节	结构体系的破坏形式	197
第三节	结构体系的可靠度	197
第四节	结构体系中两个功能函数的相关性	200
第五节	结构体系的失效模式	204
第六节	结构体系可靠度的计算方法	208
第七节	静定结构可靠度计算示例	215
第八节	超静定刚架可靠度的计算示例	225
第九节	超静定桁架可靠度的计算示例	232
第十节	重力坝、挡土墙、桩基等结构可靠度的计算示例	235
第七章	小结与展望	245
第一节	结构可靠度分析小结	245
第二节	结构可靠度发展中的几个问题	247

参考文献	249
附录I	254
附表一 正态分布表	254
附表二 Γ 函数表	256
附表三 t 分布的双侧分位数(t_α)表	257
附表四 χ^2 分布表	258
附表五 参数已知的柯尔莫哥洛夫检验临界值 $D_{n\alpha}$ 表	260
附表六 参数未知的柯尔莫哥洛夫检验临界值 $D_{n\alpha}$ 表	261
附录II 习题	262
索引	268

第一章 绪 论

第一节 概 述

结构设计时，应使所设计的结构在其使用期内，力求在经济合理前提下满足下列各项功能的要求：

- 一、能承受在施工和使用期内可能出现的各种作用；
- 二、在正常使用时具有良好的工作性能；
- 三、具有足够的耐久性；
- 四、在偶然事件发生时及发生后，能保持整体稳定。

上述要求中，第1、4两项，关系到人身安全，结构具有的这种性质一般用结构的安全性来描述。第2项关系到结构的适用性，第3项则关系到结构的耐久性。结构的安全性、适用性和耐久性这三者总称为结构的可靠性。可靠性的数量描述一般用可靠度；安全性的数量描述则用安全度。可见，可靠度比安全度的含义更广泛，更能反映结构的可靠程度。《建筑结构设计统一标准》〔1〕中就采用可靠度一词度量结构的上述工作状态。本书中，在某些情况下，可靠度一词隐含着可靠性的涵义。

早期工程结构设计一般采用容许应力法。它要求在荷载作用下，结构或构件某截面的应力不超过材料的容许应力 $[\sigma]$

$$[\sigma] = \frac{R}{K} \quad (1-1)$$

式中： K ——安全系数；

R ——材料强度。

随着结构分析方法的发展，出现了按破坏阶段设计法。它与前面容许应力法的主要区别在于考虑材料的塑性性质，以计算截面或构件甚至整个结构的承载能力。如受弯构件的承载能力为

M_p ，要求构件承受的弯矩 M 乘以安全系数 K 后不超过 M_p ，即

$$KM \leq M_p \quad (1-2)$$

上述设计结构的两种方法中，为保证结构设计的安全，都引入大于1的安全系数 K 。这种设计方法简称为安全系数法。长时间的实践证明，安全系数法设计结构不够科学，原因是：

1. 由于安全系数是根据经验进行粗略确定的数值，结果使结构设计非常粗糙。例如，往往由于人为地选择不同安全系数而与精确的计算方法不相匹配。

2. 安全系数法不能作为度量结构可靠度的统一尺度。理论和实践都证明了安全系数的大小只能反映同一类型的某种受力状态下结构的安全度，但对不同类型结构或不同受力状态的同一结构同一截面，即使用同一安全系数，也不能使之具有相同的安全度。例如，现行规范规定砖石结构偏心受压构件的设计安全系数为2.3，钢筋混凝土构件的安全系数为1.55，但并不能说明前者的安全度比后者高；钢筋混凝土轴心受压构件与受剪构件的设计安全系数都规定为1.55，但也并不说明两者的安全度相同。其原因在于规范中的安全系数主要是根据工程经验确定的，并没有考虑到影响构件安全系数的各种值的不确定性。

3. 加大结构的安全系数，不一定能按比例地增加结构的安全度。对于那些存在着不同符号应力叠加情况的结构，这问题更突出。这问题可从下例看出。

用安全系数法设计图1-1a所示结构时，拉、压强度各自取

$$R_{\text{压}} = 1260 \text{ N/cm}^2$$

$$R_{\text{拉}} = 140 \text{ N/cm}^2$$

安全系数为2。在这个安全系数下，设计用的恒载、风载以及叠加后的应力分布见图1-1b。表面看来，由于考虑了安全系数2，设计中拉压强度都有50%的保留。但如果进一步分析，就会发现此结构安全系数2对应的50%强度保留是一种假象。因为在某种情况下，这并不意味着该结构抵抗外来作用的能力增加100%。例如，由于恒载保持常量，而风载是变化的，当它增加20%后，即有图

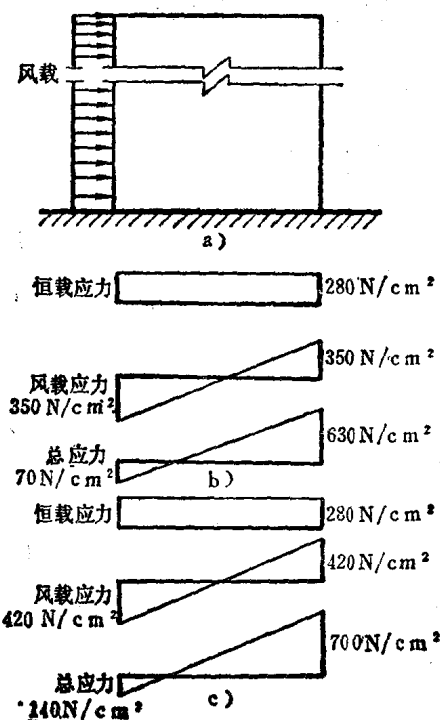


图 1-1

1-1c中的应力情况。这时，虽然材料尚未到达抗压强度，但已到达抗拉强度。由此可见，对于整个结构而言，其保留的强度只有20%，而不是原来设计时所想象的50%。

这种假象的危害在工程上有过不少的实例，英国的浮桥(Ferrybridge)冷却塔就是由于这种原因破坏的〔2〕。

传统安全系数法设计中之所以存在上述问题，其原因在于没有考虑到如下的事实：材料性能、构件尺寸以及结构的外来作用都是随机的几何量或物理量，而不是确定的单值量。安全系数法只是把这些不确定量用一个笼统的安全系数掩盖起来。为克服这些缺点，人们发展一门新的学科——结构的可靠度。它承认几乎

所有的工程变量都是随机变量，在这基础上发展出一整套基于可靠度理论的计算方法，最后算出概括结构安全性与可靠性的各种量值（可靠度、可靠指标），以设计或校核结构。

结构的可靠度指的是结构或构件在规定的时间内，在规定的条件下具备预定功能的概率。可靠度设计是以承认结构有失效（或破坏）的可能性为前提的。在结构的可靠度问题中，较多碰到的是强度的可靠度问题，它是从结构材料强度大于荷载引起的应力的概率出发进行可靠度设计的，而不是用一个笼统的安全系数。这种出发点更符合人们对问题的认识，易为人们所接受。例如，当飞机或汽车设计师告诉人们坐飞机或乘汽车有冒每小时为百万分之一失事的可能性（大体上与常见病死亡率相当）时，人们是很容易理解的。如果将这种指标作为结构设计指标，人们自然也会放心，因为较之常规设计方法中采用的安全系数，它要明确得多。

结构从安全系数法设计到基于可靠度理论的设计，有一个过渡阶段。在此过渡阶段中，人们对设计方法又分为水准Ⅰ、水准Ⅱ和水准Ⅲ三种设计方法。水准Ⅰ法就是“半经验半概率法”，也就是对影响结构可靠度的某些参数进行数理统计分析，并与经验结合，然后引入某些经验系数。该法对结构可靠度还不能作出定量的估计。水准Ⅱ法就是一次二阶矩法，又称“近似概率法”。它采用概率论的方法对结构可靠度进行计算，不过不是采用精确的计算方法，而是采用近似的方法计算结构的可靠度。它是目前结构可靠度实际计算中应用最多的方法。水准Ⅲ法，亦称“全概率法”，是完全基于概率论的结构可靠度精确分析法。由于引用这种方法进行可靠度计算，会使问题变成非常复杂，因此目前还很少直接使用这种方法。

第二节 结构可靠度研究历史简介

可靠度的研究早在30年代就开始，当时主要是围绕飞机失效

进行研究。第二次世界大战中，德国曾用可靠度方法分析过火箭。美国也对B-29飞机进行过可靠度分析。50年代开始，美国国防部专门建立了可靠度研究机构（AGREE^①），对一系列可靠度问题进行研究，促进了空间研究计划。

可靠度在结构设计中的应用大概从40年代开始。1946年，弗罗伊詹特（A. M. Freudenthal）发表题为《结构的安全度》的论文^[3]，开始较为集中地讨论这个问题。同期，苏联的尔然尼钦（А. Р. Ржаницын）提出了一次二阶矩理论的基本概念和计算结构失效概率的方法及对应的可靠指标公式^[4]。但那时以及从那以后的研究都还局限于古典可靠度理论，设计中随机变量完全为其均值和标准差所确定。显然，这只有在随机变量都是正态分布条件下才是精确的。美国柯涅尔（C. A. Cornell）在尔然尼钦工作的基础上，于1969年提出了与结构失效概率相联系的可靠指标 β 作为衡量结构安全度的一种统一数量指标，并建立了结构安全度的二阶矩模式。1971年加拿大的林德（N. C. Lind）对这种模式采用分离函数方式，将可靠指标 β 表达成设计人员习惯采用的分项系数形式。这些进程都加速了结构可靠度方法的实用化。美国伊利诺斯大学洪华生（A. H. S. Ang）在结构可靠度研究方面有较大的贡献。他对各种结构不定性作了分析，提出了广义可靠度概率法。他同邓汉忠（W. H. Tang）合写的《工程规划和设计中的概率概念》一书^[5]在世界上已广为应用。他正致力于结构体系的可靠度问题的研究工作^{[6][7]}。1976年，国际“结构安全度联合委员会”（JCSS），采用拉克维茨（Rackwitz）和菲斯莱（Fiessler）等人提出的通过“当量正态”的方法以考虑随机变量实际分布的二阶矩模式。这对提高二阶矩模式的精度意义极大。至此，二阶矩模式的结构可靠度表达式与设计方法开始进入实用阶段。

在我国，结构可靠度问题的研究工作开展较晚。50年代中期，开始采用苏联提出的极限状态设计法。60年代，土木工程界

① 电子设备可靠性咨询组。

曾广泛开展结构安全度的研究与讨论。70年代开始把半经验半概率的方法用到六种有关结构设计的规范中去。此后，有关建筑部门开始组织大量科研人员从事结构可靠度设计方法的研究。1983年提出的《建筑结构设计统一标准》（草案）就完全采用国际上正在发展和推行的以概率统计理论为基础的极限状态设计方法。该标准统一了建筑结构设计的基本原则，规定了适用于各种材料结构的可靠度分析方法和设计表达式。此外，铁道、公路、水运和水利各有关部门也都先后成立专门机构，分别进行编制《铁道工程结构设计统一标准》、《公路工程结构设计统一标准》、《港口工程结构设计统一标准》和《水工结构设计统一标准》。同时，上述五个部门还联合进行编制《工程结构可靠度设计统一标准》。可以预料，这种完全崭新的规范的通过与实施，将使我国结构设计方法进入一个新的阶段。

第三节 结构可靠度分析的目的和过程

图1-2给出了结构可靠度分析过程，其中大概可以分为如下三个阶段：

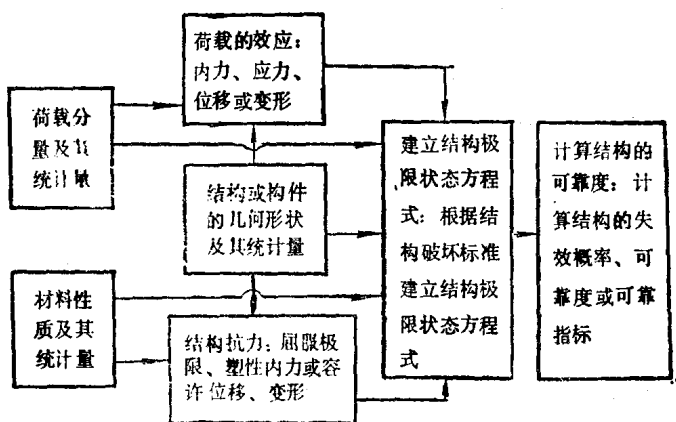


图1-2 结构可靠度分析过程

1. 搜集结构随机变量的观测或试验资料，用统计方法进行统计分析，求出其分布规律及有关的统计量，作为可靠度计算的依据。与结构有关的随机变量很多，但大致可以分为三类，即外来作用（如荷载等）、材料性质和结构的几何尺寸。结构随机变量的统计分布较多的是正态、对数正态和极值 I 型分布，相应的统计值为均值、标准差或变异系数等。

2. 用力学的方法计算结构的荷载效应，通过实验与统计获得结构的抗力，从而建立结构的破坏标准。荷载的效应指的是荷载作用下结构中的内力、应力、位移、变形等量值，它们可以用力学方法求解。结构抗力指的是结构抵抗破坏或变形的能力，如屈服极限、强度极限、容许变形和位移等，它们可以由实验或资料统计获得。结构的破坏标准完全由规范所规定。不同类型结构有不同的标准，建筑结构的设计目前一般用极限状态设计，因此破坏标准就用极限状态表示。破坏标准联结了结构抗力与荷载效应，它组成了结构可靠度计算的极限状态方程。对于结构体系，极限状态方程一般相当复杂，需要用结构力学中的平衡法或虚功原理建立。

3. 用概率理论计算满足结构破坏标准下结构的可靠度。根据结构的随机变量以及破坏标准，即可用可靠度计算方法算出结构的可靠度。工程上目前一般不用可靠度而直接用反映结构可靠度的所谓可靠指标。

可靠指标已作为结构可靠度设计的依据。许多规范都规定了适用于各种结构具体条件下的目标可靠指标，据此，可以进行结构可靠度设计。

结构可靠度设计的目的大概可分为三类：

1. 已知结构尺寸、荷载、材料特性以及目标可靠指标，校核结构的可靠度。

2. 校核现行规范，给出规范中有关系数所对应的安全水准。

3. 在给定目标可靠指标下，计算现行规范设计式中的系数（即分项系数），得出具有新的分项系数下的设计表达式，以供

设计使用。

由以上讨论可知，为了解结构可靠度计算方法，首先需要掌握概率论及数理统计中的基本原理与方法。为此，在讨论结构可靠度计算方法之前，在第二章给出了必要的概率设计基础知识。从第三章起将从构件到体系分别讨论其可靠度的计算方法。

第二章 随机变量的概率统计基础

第一节 事件与概率

概率论是研究随机现象所具有的内在规律性，而概率是指与其它事件有关的某一事件发生的可能性。从定量上讲，概率是与一组事件有关的某事件发生的可能性的数值度量。

设随机事件 E 在 n 次试验中发生了 m 次，则 $\frac{m}{n}$ 称为随机事件发生的相对频率。如果重复试验多次， $\frac{m}{n}$ 的变化则有一定的稳定性。这个描述随机事件 E 在试验中发生可能性程度的少于1的正数，就称为该随机事件的概率。

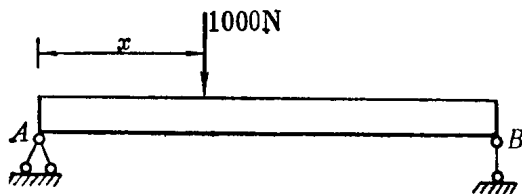


图 2-1

以图2-1所示简支梁 AB 为例，梁上作用着 1000N 移动荷载，这时支座 A 的反力 R_A 可以是 0 至 1000N 之间的任何值，因此 0 和 1000N 之间的任何数都是反力 R_A 的可取值。在概率论上称这种随机变量的可取值的范围为概率空间。一个事件可以看成是在概率空间内的某固定域的值，在本例中，这种值就是反力 R_A ，如 $100\text{N} \leq R_A \leq 200\text{N}$ 或 $R_A > 500\text{N}$ 等。因此，当荷载移动，若 R_A 的个别值落在此区间，则 R_A 这事件就发生了，反之，则不发生。 R_A