

846231

建筑设计新编

概率极限状态设计

殷志建 杨俊悌 编

曹宏杰 许祖心

殷志建 主编
郑洪国 审校



JIAN ZHU JIE GOU SHE JI XIN BIAN

安徽科学技术出版社

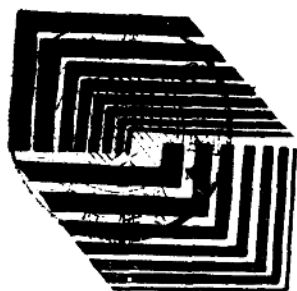
丛书
之一

建筑结构设计新编

概率极限状态设计

殷志建 杨俊悌 编
曹宏杰 许祖心

殷志建 主编
郑洪国 审校



安徽科学技术出版社

责任编辑：解安华 陈小秀

封面设计：王士龙

建筑结构设计新编(丛书之一)

概率极限状态设计

殷志建 杨俊悌 曹宏杰 许祖心 编

殷志建主编 郑洪国审校

*

安徽科学技术出版社出版

(合肥市跃进路1号)

新华书店经销 安徽新华印刷厂印刷

*

开本：787×1092 1/32 印张：8.25 字数：140,000

1987年10月第1版 1987年10月第1次印刷

印数：00,001—14,000

ISBN7-5337-0037-6/TU·2 定价：1.35元

前 言

根据国家建委(79)建发设字第67号文的要求,由中国建筑科学研究院会同国务院有关部和省、自治区、直辖市所属的有关设计、科研和高等院校等单位共同编制了《建筑结构设计统一标准》(以下简称《统一标准》)。1984年6月9日经国家计划委员会批准为国家标准,即《GBJ68—84》,并于1985年1月1日起试行。这是建筑领域中的一件大事。它大大地促进了各类结构设计规范的全面修订,将结构设计改革推向一个新的高度。

《统一标准》是制定工业与民用建筑结构荷载规范和钢结构、薄壁型钢结构、混凝土结构、砌体结构、木结构设计规范,以及地基基础和抗震等设计规范应遵守的准则。从这个意义来说,《统一标准》应是标准的标准,规范的规范。本书就是以《统一标准》为依据,以概率极限状态设计为中心内容,对建筑结构的可靠性分析进行较系统、较全面的介绍。

当前,我国各类结构设计规范正在按《统一标准》的原则进行全面修订,预计从1987年起,各类结构设计新规范即可陆续颁发执行。

在国际上结构设计也向统一化和标准化方向发展。国际标准化组织(ISO)设计依据委员会以及其他有关的技术委员会已经提出了《结构可靠性设计总原则》草案以及钢和钢筋混凝土结构国际规范的讨论文本。许多重要的国际组织,例如欧洲国际混凝土委员会(CEB)、国际预应力联合会(FIP)、欧

洲钢结构协会(CECM)、国际建筑研究与文献委员会(CIB)、国际桥梁与结构工程协会(IABSE)、国际壳体与特种结构协会(IASS)、国际材料与结构试验研究所联合会(RILEM)等组织,通过国际合作,编制了《结构统一标准规范的国际体系》,已从1978年开始分六卷陆续出版。这种“国际体系”促使各国结构设计趋向统一化和标准化。

结构设计全面改革的新高潮和国际结构设计的总潮流,引起了全国高等院校师生及广大土建工程技术人员极大关注。编者曾多次参加过有关这个方面的专题报告会和短期培训班,也在金陵职业大学所开设的“结构优化设计”中讲授了概率极限状态设计原理,在南京建筑工程学院开设的“系统工程”课中,讲授了概率极限状态设计的优化过程。在这些讲稿的基础上,参考了有关文献和资料编写了本书,以适应广大读者的急需。限于时间和篇幅,不可能对上述所提出的问题进行深入探讨,加上编者的水平所限,粗浅和错误之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编 者

1986年9月于南京

目 录

第一章 建筑结构可靠性的基本概念	1
第一节 可靠性科学的基本内容	1
第二节 建筑结构可靠性理论的基本内容及其发展	2
第三节 概率极限状态设计的基本概念与基本原则	13
第四节 现行结构设计规范存在的主要问题	18
第五节 现行规范中结构构件强度安全水平分析	21
第二章 统计数学基础知识	25
第一节 事件与概率	25
第二节 随机变量及其概率分布	37
第三节 随机变量的统计参数	44
第四节 参数估计与假设检验	48
第五节 回归分析	61
第六节 随机过程	66
第三章 作用效应和结构抗力的统计特征	75
第一节 结构作用的统计特征	75
第二节 荷载效应的组合	92
第三节 结构构件抗力的统计特征	97
第四节 结构构件抗力统计参数的确定方法与实例	101
第四章 概率极限状态设计	114
第一节 结构可靠性的基本概念	114
第二节 结构可靠度的一般计算方法	118

第三节	概率极限状态设计方法	135
第四节	概率极限状态设计实用表达式及其分项系数的确定	138
第五章	钢筋混凝土构件可靠性分析	155
第一节	钢筋混凝土结构设计准则	155
第二节	钢筋混凝土结构设计实用表达式	158
第三节	钢筋混凝土结构材料强度取值	163
第四节	钢筋混凝土结构概率极限状态设计	179
第五节	钢筋混凝土结构构件可靠度分析方法	185

第一章 建筑结构可靠性的基本概念

第一节 可靠性科学的基本内容

一、可靠性科学的产生

自古以来，人们就广泛采用“可靠性”一词来作为衡量产品质量的指标之一。但那时只能定性地反映这一指标，人们根据使用经验，得出某一物品很可靠，比较可靠，不大可靠或根本不可靠这样一些抽象的评价。第二次世界大战末期，德国的火箭研究者之一 R. Lusser 首先提出了利用概率乘积法则，把一个系统的可靠度看成为该系统的子系统的可靠度乘积，从而算得 V—II 型火箭诱导装置的可靠度为 75%，第一次定量地表达了产品的可靠性。从五十年代初期开始，可靠性问题就作为一门新的学科被系统地加以研究，形成了所谓可靠性科学。

可靠性科学的发展大大推动了建筑结构可靠性的研究。

二、基本内容

可靠性学科所包含的内容是相当广泛的，大致可分为可靠性理论基础、可靠性应用技术、可靠性组织管理、可靠性教育与交流四个方面。

可靠性理论基础包括可靠性数学、可靠性物理、可靠性

设计技术、预测技术、环境技术、数据处理技术、基础实验以及人在操作过程中的可靠性等。

可靠性应用技术包括使用要求的调查，现场数据的收集与分析，失效分析，零件、机器、系统的可靠性设计与预测，软件的可靠性，可靠性评价与验证，包装、运输、保管、使用的可靠性规范，可靠性试验，可靠性标准等。

可靠性学科也可分为管理、设计、分析、理论、数据、试验和评价六个分支。

第二节 建筑结构可靠性理论 的基本内容及其发展

结构可靠性理论是以可靠性科学为基础的，它以可靠性科学为发展依据。但是在发展中也有其自身发展的历史和规律。

传统的安全度定义是：“结构安全度是指在正常设计、施工和使用的情况下，结构物对抵抗各种影响安全的不利因素所必须的安全储备的大小。”这个定义指出了结构所处的条件必须是“正常的”，这里的各种不利因素，事实上是对不定性的承认，但最后却规定一个定值的安全储备，这不能真实地反映结构的可靠性，所以仍然脱不出定值设计的范畴。

由于设计方法日益完善，计算相当复杂，往往给人们以一种错觉，似乎只要在设计中采用了某一给定的安全系数，结构就能百分之百地可靠了。实际上与结构安全度有关的各种荷载效应与结构抗力等参数，都具有随机性，并不是定值。按定值法规定的定值安全系数，只不过是工程经验上和常识上对安全度的解释，而不是从定量的角度去规定或计算结

构的可靠度。

结构的荷载与抗力，因各种偶然因素的影响，都是随时间或空间而变动的随机函数。经过几十年来的研究，目前国际工程界比较一致地认为用结构的失效概率来度量结构安全度更为确切。由于传统的安全度概念主要是针对结构的承载能力(特别是强度)而言的，而结构的极限状态有更为广泛的含义，由此相应地提出了结构可靠性的概念，其内涵包含承载能力极限状态、正常使用极限状态、条件极限状态及其所包含的丰富内容。可靠性的定量尺度称为可靠度。

以结构的失效概率为依据的结构设计方法，称为“概率设计法”，这是结构设计思想上的一个重要变革。从长期沿用的定值概念转变为非定值概念，使安全度长期以来主要依靠直观经验变为系统地运用统计数学，从而使结构安全度从以往的定性处理阶段发展到定量分析的阶段，这是结构设计方法上的一个飞跃。

国外通常把各国规范安全度的理论水准分为水准一：半概率法；水准二：近似概率法；水准三：全概率法。我国在七十年代制定的各种结构规范(例如BJG21—66及TJ10—74等)与世界各国的七十年代大多数规范(例如苏联规范СНП 21—75，英国规范 CP110 和美国规范 ACI—318—83 等)一样，都属于水准一。而现在我国规范又顺应国际工程界的总潮流，从水准一向水准二过渡。在水准一之前，则谈不上什么概率设计的概念，可称为全经验法。下面，就以这几个水准为脉络，回顾一下安全度理论的发展与演变过程。

一、全经验法

荷载与抗力的随机性这是不以人们意志为转移的客观规

律。我们可以把荷载对某一结构的效应和相应的结构抗力取同一量纲来加以比较，例如把荷载效应化算到应力，抗力取为强度，二者都是 N/mm^2 。也可以在内力水平上加以比较，例如荷载引起的弯矩多少 $N \cdot m$ ，截面承载能力为多少 $N \cdot m$ 。这样，我们就可以把 R 和 S 的分布密度函数画在同一个坐标上，如图1-1所示，但是，古代和直至今日的许多设计者并不知道 R 和 S 的统计规律，只能凭经验来进行结构设计。

全经验法对荷载与抗力的取值是凭经验，而所规定的安全度指标也是凭经验的。

设计者根据个别或相当多的材料试验，对某种结构材料规定一个强度的约定值，容许应力的早期取值就是凭经验选定的，再经验地取某一结构可能出现的荷载值。然后，根据经验，按照某一规定的安全度指标，如安全系数来控制设计是否安全。

本世纪四十年代之前，人们仍然停留在全经验法上。人们认为安全系数 K 可以表达为：

$$\text{安全系数} = \frac{\text{极限抗力}}{\text{使用荷载}} \geq \text{经验所规定的安全系数}$$

即

$$K = \frac{R}{S} \geq [K], [K] S \leq R \quad (1-1)$$

但 R 与 S 的选定是经验的， $[K]$ 也是经验的。

二、半概率法——水准一

随着工程实践的积累，人们的理论知识与试验手段日益发展，于是开始试图摆脱纯经验地决定 R 和 S 。

如把荷载对某一结构的效应 S 和相应的结构抗力 R 取同

一量纲来加以比较,就可以把R和S的分布密度画在同一个坐标上(图1-1),并要求

$$S \leq R \iff KS = R \quad (1-2)$$

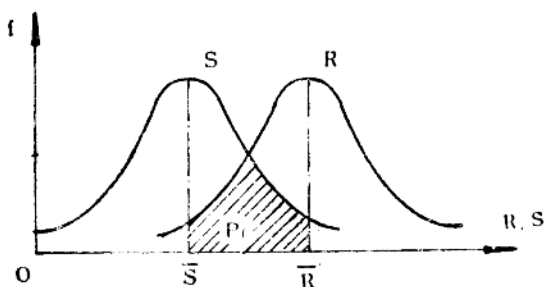


图1-1 结构失效概率 p_f

这就产生了确定结构安全度的两个要素:

- (1) R和S的设计取值;
- (2) 安全系数K的取值。

在积累了较多的试验资料以后,人们自然而然地想到可以选用R和S的平均值,而用这些平均值来计算安全系数,即中心安全系数 $\bar{K}$,

$$\text{中心安全系数} = \frac{\text{平均抗力}}{\text{平均荷载}}$$

即

$$\bar{K} = \frac{\mu_R}{\mu_S} = \frac{R}{S}$$

这种方法是最初步统计的方法,可以称为一阶矩方法,即只考虑平均值(一阶矩)这个最简单的统计特征。

中心安全系数最明显的缺点是未能很好地考虑荷载和抗

力的变异性。同样的中心安全系数，其实际上的失效概率大小差距是很大的。

首先达到实际应用的是通过对荷载和抗力进行统计分析，即用正态分布去拟合它们的实际分布。这样，我们不仅得到了它们的平均值，而且还得到了标准差（即二阶矩）。并由此得到结构的安全系数为

$$K = \frac{R}{S} = \frac{\mu_R - n_R \sigma_R}{\mu_S + n_S \sigma_S} \quad (1-3)$$

其中，抗力与荷载效应的设计值分别为各自的统计平均值 μ_R 和 μ_S 减去或加上各自标准差 $\sigma_R \sigma_S$ 的若干(n_R 、 n_S)倍。这样就在一定程度上考虑了这两个因素的变异性(图1-2)。然而它仍然不能与破坏概率相联系，因为在这里 K 的取值依然是经验的。因此，它只能称为半概率法。

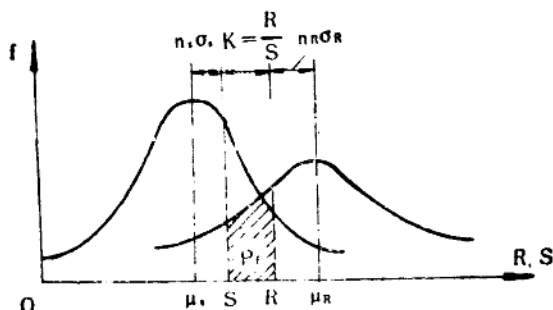


图1-2 半概率法

半概率法的设计表达式可归结为

$$K(\mu_S + n_S \sigma_S) \leq (\mu_R - n_R \sigma_R) \quad (1-4)$$

其中 μ_S 、 μ_R 、 σ_S 、 σ_R 都是由概率统计得到的，而 K 仍然是经验的。这也就是我国(TJ10—74)规范所采用的。

应当指出, 不论安全度表达为单一系数还是多系数, 只要 R 与 S 考虑了某种概率分布而 $[K]$ 仍是经验地决定, 那么它们就都属于半概率法的范畴。

三、近似概率法——水准二

从上面的分析已经可以看出, 安全度与失效概率是有关系的。各国学者不断作出努力使结构安全度理论更全面地转移到概率理论的基础上来。

1969年美国的柯涅尔(Cornell)从实用角度改进与发展了苏联尔然尔尼采早在1954年就提出过的建议, 提出了以 β 为衡量结构安全性的统一数量指标, 称它为“可靠指标”(西方国家通称之为Cornell系数)。而将 β 与失效概率 P_f 直接建立联系。鉴于真实失效概率与结构可靠性相联系, 必须确定作用效应与结构抗力的真实分布, 这在实际上是极为复杂的, 所以柯涅尔等人发展了一次二阶矩的方法, 近似地予以解决。

我国解放以来安全度的研究和认识可分为四个阶段: 第一阶段(1949~1962年), 从学习英、美转向学习苏联, 设计规范从容许应力到破损阶段(最大荷载)到1962年转向三系数极限状态; 第二阶段(1963~1970年), 出版了有关荷载、钢筋混凝土、预应力混凝土、轻钢结构等四本小册子, 安全度表达式不统一, 对影响安全度的诸因素进行了较为详细的分析, 但在表达上采用了容许应力法或最大荷载法; 第三阶段(1971~1975年), 制定了荷载、钢、轻钢、钢筋混凝土与砖石等五本规范。采用多系数分析的半概率极限状态方法, 而分别用容许应力和最大荷载加以表达。安全度设计原则未能协调一致; 第四阶段(1976年以后), 1979年2月国家建委下

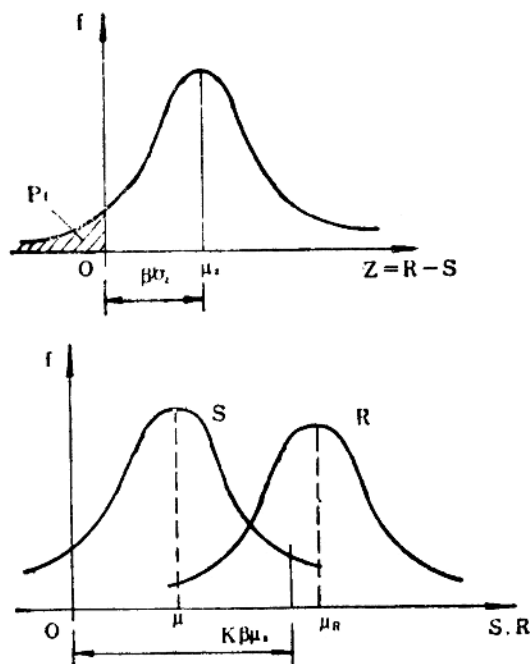
达了制定“建筑结构设计统一标准”的任务。由中国建筑科学院领导下成立领导小组下属设计、荷载、材料三个分组，其任务是研究和合理统一设计计算方法，决定荷载值、荷载系数和各种材料的统计参数。几年来作了大量的工作，研究了概率模式，决定采用近似概率法，并使之转化为多系数的设计准则。在荷载方面，测试和统计分析了恒载和办公室、住宅、商店等方面活荷载以及风载、雪载等，并研究了荷载组合。在材料方面，统计分析了钢、混凝土、木和砖石等的材料的统计参数，确定了标准值取值概率和材料质量控制的原则和方法。1981年2月在昆明召开了专门会议，对1980年编制的《统一标准》(送审稿)进行审查。1984年6月经国家计划委员会批准，并于1985年1月1日起试行。所以我国设计规范正面临一个由定值法向概率法全面过渡的大变革时期。这本《统一标准》采用了国际标准化组织(ISO)颁布的国际通用符号和国际单位制。近年来，各国结构工程的标准与规范的研究和编制正向国际统一化发展。我国《统一标准》的制定，也正是顺应这一国际潮流的。

国际标准化组织(ISO)设计依据委员会以及其他有关的技术委员会已经提出了《结构可靠性设计总原则》(草案)以及钢和钢筋混凝土结构国际规范的讨论文本。

许多重要的国际组织，通过国际合作，编制了《结构统一标准规范的国际体系》，已从1978年开始分六卷陆续出版。参加这项合作的组织有：欧洲国际混凝土委员会(CEB)、国际预应力联合会(FIP)、欧洲钢结构协会(CECM)、国际建筑研究与文献委员会(CIB)、国际桥梁与结构工程协会(IA BSE)、国际壳体与特种结构协会(IASS)、国际材料与结构试验研究所联合会(RILEM)等，他们组成了“土木工程国

际协会联络委员会”。这种“国际体系”的目的，是使欧洲经济共同体(EEC)、经互会(CMEA)和北欧房屋建筑规程委员会(NKB)的结构工程规范逐步趋于统一，并与国际标准化组织(ISO)和联合国欧洲经济委员会(FCE)相协调，以促进国际贸易发展与技术交流。

近似概率法是本书的重点，在下面给予简要叙述，并在以后各章中还要详细讨论。其基本概念如图1-3所示：



1-3 概率法基本概念示意图

按概率理论，结构的失效概率为

$$p_f = p(Z < 0) \quad (1-5)$$

因 S 、 R 均为正态变量，故 $Z = R - S$ 也服从正态分布。从而 p_f 可表达为

$$p_f = p\left\{\frac{Z - \mu_Z}{\sigma_Z} < -\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}\right\} = \Phi\left(-\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}\right) \quad (1-6)$$

式中 $\Phi(\cdot)$ ——标准正态分布函数；

μ_Z 、 σ_Z ——分别为 Z 的平均值和标准差。

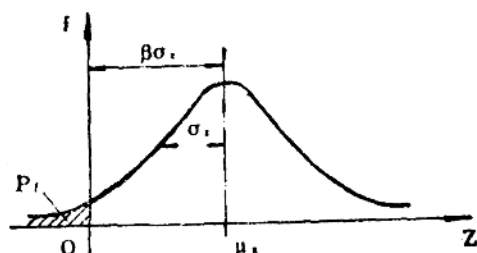
若定义 $\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z}$ ，则有

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (1-7)$$

从而式(1-6)可写为

$$p_f = \Phi(-\beta) \text{ 或 } \beta = \Phi^{-1}(1 - p_f) \quad (1-8)$$

公式(1-8)表明， β 与 p_f 具有数值上的一一对应关系，也具有与 p_f 相对应的物理意义。已知 β 后，即可求得 p_f 。由于 β 越大， p_f 就越小，即结构越可靠，所以 β 也就被称为“可靠指标”（图1-4）。



1-4 结构构件失效概率与可靠指标的关系