

工程结构可靠度

赵国藩 曹居易 张宽权编著



水利电力出版社

前 言

本书是为高等学校土木、水利、建筑等专业高年级学生及研究生编写的教学参考书，也可供有关专业的科技人员参考。在本书中，简要地介绍了工程结构可靠度、安全度理论的发展简史和以往规范及现行规范使用的设计方法，并着重介绍了近年来国际上新发展起来的，以概率论为基础的极限状态设计法（一次二阶矩理论）、荷载及抗力的统计分析方法、材料性能的质量控制，以及今后结构可靠度的研究动向等。为便于学习，从工程实用出发，结合本书内容，在附篇中对概率论及数理统计学作了简要介绍。

本书附有例题，便于自学。

本书第一、二、四、五、六章由大连工学院赵国藩执笔，第三、七、八章由四川建筑科学研究所曹居易、张宽权执笔，附篇由张宽权执笔。赵国藩担任本书主编。华东水利学院周氏同志审阅了全书，大连工学院应用数学系林安西同志审阅了附篇，谨此致谢。

书中存在的缺点和错误，热忱期望读者及时批评指正。

编著者

1983年12月

内 容 提 要

本书共分八章。内容包括：工程结构可靠度研究历史简介，传统设计方法和半概率设计方法，中心点法——一次二阶矩理论之一，验算点法——一次二阶矩理论之二，荷载及抗力的统计分析，近似概率法的应用，材料性能的质量要求和控制，以及工程结构可靠度理论发展中的几个问题。

书末并有附篇：工程概率及数理统计概要。

本书是高等学校土木、水利及建筑等专业高年级学生及研究生的教学参考书，也可供有关专业的科技人员参考。

工程结构可靠度

赵国藩 曹居易 张宽权编著

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 8.75印张 192千字

1984年12月第一版 1984年12月北京第一次印刷

印数0001—9320册 定价 1.60元

书号 15143·5563

目 录

前 言

第一章 工程结构可靠度研究历史简介	1
第一节 概述	1
第二节 概率论及数理统计学在结构安全度研究中的 应用	5
参考文献	12
第二章 传统设计方法和半概率设计方法	17
第一节 概述	17
第二节 容许应力设计法	19
第三节 破坏阶段设计法	22
第四节 多系数极限状态设计法	24
第五节 单系数极限状态设计法	32
第六节 国际上的多系数极限状态设计法	37
参考文献	40
第三章 中心点法——一次二阶矩理论之一	42
第一节 失效概率	43
第二节 可靠指标	47
第三节 分离函数和分项系数	52
第四节 公称安全系数及设计表达式	65
参考文献	68
第四章 验算点法——一次二阶矩理论之二	70
第一节 两个正态变量情况	71
第二节 多个正态变量情况	74
第三节 非正态变量情况	84

第四节	近似概率极限状态设计法	107
参考文献	.....	117
第五章	荷载及抗力的统计分析	118
第一节	荷载的统计分析	118
第二节	抗力的统计分析	136
参考文献	.....	145
第六章	近似概率法的应用	147
第一节	安全度的验算	147
第二节	截面设计	150
第三节	实用设计表达式	151
第四节	中心点法在正常使用极限状态可靠度分析中的 应用	153
第五节	近似概率法在水工结构安全度分析中的初步 应用	156
第六节	应用近似概率法需要注意的一些问题	160
参考文献	.....	163
第七章	材料性能的质量要求和控制	165
第一节	质量要求	165
第二节	质量控制	172
第三节	质量检验	186
参考文献	.....	187
第八章	工程结构可靠度理论发展中的几个问题	189
参考文献	.....	195
附 篇	工程概率及数理统计概要	196
第一节	概率论的基本概念	196
第二节	随机变量及其分布函数	202
第三节	随机变量的数字特征	207
第四节	工程结构可靠度常用的概率分布	215
第五节	随机过程	229

第六节 数理统计	235
参考文献	262
附 录	264
附表 1 正态分布的密度函数表	264
附表 2 正态分布表	266
附表 3 χ^2 分布表	270
附表 4 t 分布的双侧分位数 (t_α) 表	271
附表 5 柯尔莫哥洛夫 (Колмогоров) 检验的临界值 ($D_{n\alpha}$) 表	272

第一章 工程结构可靠度研究

历史简介

第一节 概 述

钢、木、砖石、混凝土及钢筋混凝土等建造的工业及民用建筑的承重结构，公路和铁路的桥梁涵洞，港口工程的码头，水利工程的堤坝、渡槽、水闸，给水排水构筑物的水池、水管等，统称为工程结构。它们在相当长的使用期内，需要安全地承受设备、人群、车辆等使用荷载，经受风、雪、冰、雨、日照等气象作用，以及波浪、水流、土压力、地震等自然作用。它们的安全与否，不但影响工农业生产，而且还关系到人身安危，特别是对一些重要的纪念性建筑物，作为一个时代的文化特征，将留传后世，对安全、适用、美观、耐久等方面，还有更高的要求。

工程结构的设计大致可以分为两个步骤：第一步是调查研究，分析对比，在满足预定功能的条件下，选择合适的结构方案和型式；第二步是根据选定的结构型式，设计结构或构件的截面。第二步的内容主要包括结构或构件截面内力或应力的分析，以及根据截面的内力或应力，选择截面尺寸、确定材料用量等，通常称为结构计算。本书主要是讨论在结构计算中，截面或构件设计的安全性和可靠性问题。

截面或构件的设计，应使所设计的结构在设计基准期内，经济合理地满足下列要求：①能承受正常施工和使用期间可能出现的各种作用(包括荷载及外加变形或约束变形)；

- ②在正常使用时具有良好的工作性能；③具有足够的耐久性；
④在偶然事件发生及发生后，能保持必要的整体稳定性。

结构的安全性和可靠性是有区别的。如上述要求的第①、④两项，关系到人身安全，属于结构的安全性；第②项关系到结构的适用性；第③项关系到结构的耐久性。安全性、适用性和耐久性三者总称为结构的可靠性。用来度量安全性的指标称为安全度，度量可靠性的指标称为可靠度。可靠度比安全度的含义更为广泛。但是，安全度是可靠度中最重要的内容，它直接关系到人身安全和经济效益等问题，是今后各章讨论的重点。

在材料力学及弹性力学方法发展以后，早期的工程结构设计方法是容许应力法。它假设材料为匀质弹性体，用结构力学及材料力学的方法分析结构或构件在使用荷载作用下的应力，要求最大应力不超过材料的容许应力。容许应力 $[\sigma]$ 为材料强度 R 除以安全系数 K ，即 $[\sigma]=R/K$ 。

随着结构分析方法的发展，进一步考虑材料的非弹性及几何的非线性，以及考虑时间因素（如混凝土的蠕变等），内力分析日趋完善。从1938年起，苏联钢筋混凝土结构设计规范，首先采用所谓“破坏阶段”的设计方法，与前述容许应力法的主要区别是在考虑材料的塑性性质的基础上，计算截面或构件甚至整个结构的承载能力。如受弯构件的正截面承载能力为 M_p ，要求构件承受的使用弯矩 M 乘以安全系数 K 后，不超过 M_p ，即 $KM \leq M_p$ 。

经典的弹性计算方法或考虑材料塑性的破坏阶段算法，可以用结构试验进行检验。在结构试验时，荷载 P 的数值和作用点位置可以相当准确地确定，构件材料的力学指标（如 R_g 、 R_e 等），也可以用比较准确的方法事先测定。根据

P 、 R_g 、 R_a 等量测值，可以比较这两种计算方法，何者更接近试验结果，从而改进力学分析。

但是，在结构设计时，不能取用一次试验结果，就作为设计的依据。这是因为：①所设计的结构，在今后相当长的使用期内承受的荷载，不同于在试验室中所施加的破坏荷载，它可能大，也可能小，是在一定范围内变动。②结构设计所采用的材料，也不可能与试验室事先检验而预知其强度的材料完全一样，所用材料的强度，可能比设计时预定的数值大或者小，也在一定范围内波动。③此外，还存在其它一些因素，如实际的钢筋施工位置、截面尺寸等都可能与设计的预定数值有或大或小的偏离，计算假定也与实际情况有一定的偏离等等，这些都会影响结构的安全性和可靠性。

因此，设计时除了要进行结构力学分析外，还要对结构的安全度提出要求。例如，在容许应力法及破坏阶段法中，引入安全系数 K （称为单一安全系数）以考虑上述因素的“不定性”对结构安全度的影响。

所以，结构计算主要解决两个方面的问题，一方面是如何考虑材料固有的性能，使结构的力学分析日趋完善；另一方面是如何合理地选择影响结构安全度的参数，如荷载值、材料强度值以及安全系数 K 等。

古代建造各种建筑物时，只能依靠实践经验。1638年，伽利略作了梁的强度试验。1660年，虎克建立了弹性定律，材料力学才逐渐发展起来。但是，当时的力学计算方法，以及对荷载、材料强度等“不定性”的认识，还处于初始阶段。因此，那时安全系数 K 的选定是极为慎重的，所取的数值也比较大。以后，随着力学计算方法的发展，才逐渐降低。例如，德国在1907年的规范，混凝土的安全系数 K 为

10, 1916年减小为5, 以后又降为3。到本世纪五十年代, 苏联和我国的钢筋混凝土结构的K值约为2左右。近年来, 尽管力学分析由于考虑了材料的非线性, 应用电子计算机和日益完善的结构试验方法而更趋精确; 但是, 另一方面的问题, 即荷载、材料强度等的不定性, 对结构安全度的影响却远远还没有得到解决。所选取的参数, 如荷载、材料强度或安全系数K等, 仍然是依据设计经验近似判断的数值, 这就与日益精确的力学分析不相匹配。

例如, 一简支木梁, 矩形截面, 承受“均布”荷载 $q = 300$ 公斤/米, 跨中“集中”荷载 $P = 500$ 公斤, 跨长为 l 。如果按容许应力法设计, 木材容许弯曲拉应力取 $[\sigma] = 100$ 公斤/厘米², 则可按 $M = \frac{1}{8} ql^2 + \frac{1}{4} Pl$, 及 $\sigma = \frac{M}{W} = \frac{6M}{bh^2} \leq [\sigma]$ 设计该梁的截面尺寸: b (宽度) 和 h (高度)。

M 及 σ 是力学计算, 可以有很高的精度, 还可以用试验进行验证。但是, 计算 M 的前提是 q 为“均布”荷载, P 为“集中”荷载且作用于跨中。然而为什么取 q 为 300 公斤/米、取 P 为 500 公斤, 就带有一定的任意性。其次, q 为“均布”作用, P 为“集中”作用, 也并不一定完全符合实际情况。至于跨度为 l , 支承为简支, 往往与实际情况也有差异。这些因素: q 、 P 、 l 以及“简支”都带有或大或小的“不定性”, 都不能在设计时就“预先”确知。这种取值上的差异, 就给“精确”的力学计算 (M 及 σ) 带来“不精确”的影响。此外, 力学方法算出的应力 σ 还要与容许应力 $[\sigma]$ 相比较, 以便评定构件是否安全; 或者是根据 $[\sigma]$, 设计截面尺寸 b 和 h 。这里, 容许应力 $[\sigma]$ 是材料极限强度与经验安全系数 K 的比值, 其取值显然也是比较粗略的。

从上述例子可见，在结构计算中，一方面是相当“精确”的力学计算，一方面是相当“粗糙”的荷载、材料强度以及安全系数 K 或容许应力 $[\sigma]$ 的取值，两者的精度不相适应。安全系数取大些，荷载值取大些，就多用材料；安全系数取小些，荷载值取小些，就少用材料。如何解决安全与经济的矛盾，是结构计算中需要妥善解决的问题。

第二节 概率论及数理统计学在 结构安全度研究中的应用

概率论及数理统计学是分析影响结构安全度各种参数不定性的有力工具。它的应用开始于二十世纪初，以后逐渐发展。现将国内外关于这方面的研究简况概述于后。

一、苏联和东欧

1911年，匈牙利布达佩斯的卡钦奇（Качинчи）提出用统计数学研究荷载及材料强度。1928年，苏联哈奇诺夫（Н.А.Хаццалов），1935年斯特列律茨基（Н.С.Стрелецкий），1947年尔然尼钦（А.Р.Ржаницын）等人相继发表了这方面的文章，结构安全度的研究开始进入了应用概率论和数理统计学的阶段。

苏联斯特列律茨基在1947年提出了将安全系数分项研究的方法^[30]，他是苏联五十年代极限状态设计法的主要倡议人之一。他的建议促进了苏联五十年代极限状态设计法的建立。这个设计方法计算承载能力的力学模型仍与破坏阶段法相同，但对影响结构安全度的各项系数，采用分项分析，区别对待的原则。其中某些系数引用了数理统计法，进行了比较科学而不是单凭经验的分析，这是设计方法中的一大

变革。

同期，苏联的尔然尼钦在1947年就提出了一次二阶矩理论的基本概念^{[29][31][35]}。他提出计算结构失效概率 P_f 的方法，给出与 P_f 相对应安全指标 β （原文用 γ 表示）的计算公式。当抗力 R 与荷载效应 S 服从正态分布时：

$$\beta = \frac{m_R - m_S}{\sqrt{D_R - 2D_{RS} + D_S}} \quad (1-1)$$

式中， m_R 、 m_S 为 R 、 S 的平均值， $D_R = \sigma_R^2$ 、 $D_S = \sigma_S^2$ 为 R 、 S 的方差， σ_R 、 σ_S 为标准差， D_{RS} 为 R 、 S 的协方差；当 R 与 S 互相独立时，协方差 $D_{RS} = 0$ 。

又当 R 与 S 独立，且服从对数正态分布时：

$$\beta = \frac{\ln\left(\frac{m_R}{m_S}\right) - \frac{1}{2}\ln\left(\frac{1+V_R^2}{1+V_S^2}\right)}{\sqrt{\ln[(1+V_R^2)(1+V_S^2)]}} \quad (1-2)$$

式中， $V_R = \sigma_R/m_R$ 、 $V_S = \sigma_S/m_S$ 为变异系数。

上述计算 β 的公式，在二十年之后又由康乃尔（C.A. Cornell）给出，在美国称 β 为康乃尔指标。

尔然尼钦还给出，以抗力平均值 m_R 与荷载效应平均值 m_S 的比值表达的安全系数 K_0 （称为中心安全系数）：

$$K_0 = \frac{m_R}{m_S} \quad (1-3)$$

对于正态分布：

$$K_0 = \left\{ (1 - \beta^2 V_{RS}^2) + [\beta^2 (V_S^2 + V_R^2 - 2V_{RS}^2) - \beta^4 (V_R^2 V_S^2 - V_{RS}^4)]^{\frac{1}{2}} \right\} \div (1 - \beta^2 V_R^2) \quad (1-4)$$

当 R 与 S 独立时，式中 $V_{RS} = (D_{RS}/m_R m_S)^{\frac{1}{2}} = 0$ 。

对于对数正态分布，且 R 与 S 独立时：

$$\ln K_0 = \ln\left(\frac{m_R}{m_S}\right) = \beta \sqrt{\ln[(1+V_R^2)(1+V_S^2)]} + \frac{1}{2} \ln\left(\frac{1+V_R^2}{1+V_S^2}\right) \quad (1-5)$$

显然，当 V_R 、 V_S 值较小时，式(1-5)可化简为康乃尔后来所给出的公式(参见本书第三章式3-16b)：

$$K_0 = \exp(\beta \sqrt{V_R^2 + V_S^2}) \quad (1-6)$$

尔然尼钦还给出了 R 、 S 为正态分布时，荷载 n 次重复作用的分布曲线的平均值 $m_s^{(n)}$ 、标准差 $\sigma_s^{(n)}$ 与变异系数 $V_s^{(n)}$ 的近似计算公式，以及在使用期 T 年内连续变化的荷载的平均值 $m_s^{(T)}$ 及方差 $D_s^{(T)}$ 的计算公式；讨论了多层房屋活荷载组合计算问题， n 杆组成的静定结构的强度分布问题，以及正态和对数正态分布之外的其它分布曲线的概率计算问题^[29]。

苏联的莫列尔(P. A. Муллер)在安全度的论著中^[32]，认为二阶矩方法不够精确，特别是在失效概率较小时，误差较大，主张采用三阶矩方法计算失效概率。他建议采用考虑三阶矩的皮尔逊III型曲线或克利茨基-门克列(Крицкий-Менкель)曲线。经过计算比较，按三阶矩法(皮尔逊III型曲线)和按二阶矩法(正态或对数正态曲线)，所算得的 P_f 值相差颇大。莫列尔方法计算相当复杂，如何付诸实际应用，需要进一步研究。

莫列尔在另一篇文献^[35]中，讨论了三阶矩法计算超载系数、匀质系数和构件几何尺寸变异的概率密度分布(均匀分布、三角形分布及梯形分布等)，以及荷载问题(考虑结构等级、加载次数、连续作用和荷载组合等)。

七十年代，苏联加强了安全度方面的工作，举行了多次

学术会议。如1974年到1976年，在右比雪夫召开了第三、四、五次科学技术会议，讨论了钢筋混凝土结构安全度问题。1976年的会议指出，近年来钢筋混凝土结构概率计算方法已经进入实用阶段，提出要研究各种参数变异性的统计特征，如混凝土强度和极限压缩变形、结构安装偏差、桥式吊车侧压力荷载等。

波兰的维日比茨基（В.Вержбицкий）在五十年代就建议用半概率法研究结构的安全度^[15]。罗马尼亚布加勒斯特土木工程学院的格赫凯尔（Dan Ghiocel）对风、雪、温度作用进行了研究^[44]。

二、北美和西欧

五十年代，由于缺乏基本参数的统计数据，以及对一些因素（如破坏后果，生命损失）还无法作出客观的分析计算。因此，英国结构工程师协会建议采用全凭经验估计的“判分法”^[36]。该法是将影响结构安全度及破坏后果的因素，分为两大类：①X类：影响结构安全度的因素，如 A_1 ——荷载情况及可控制程度， A_2 ——材料的均匀性，……， A_m ——结构分析的精确程度；②Y类：破坏后果的因素，如 B_1 ——对生命的危害，……， B_n ——经济的考虑。然后比较各个项目的重要性，分别判以分数，最后给出总安全系数。

美国的弗罗伊詹特（A.M.Freudenthal），在四十年代开创了美国安全度的研究工作。他的研究工作，与同时代苏联尔然尼钦的工作，有某些相似之处。他在1951年提出，破坏概率的选择，应使结构建造费与期望的破坏损失费的总和最小^[38]。

美国混凝土学会（ACI）于1964年成立了结构安全度委

员会 (ACI348委员会), 开展了系统的研究。

洪华生 (A.H-S.Ang) 发展了弗罗伊詹特的工作, 对各种结构的不定性作了分析, 提出了广义可靠性概率法。康乃尔于六十年代后期提出了与尔然尼钦相同的一次二阶矩法及安全指标 β 的概念, 对安全度研究的实际应用作出了贡献。艾林伍德 (B.Ellingwood) 在荷载方面^[39], 董启超 (C.C.Tung) 在桥梁动力分析的概率计算方面^[40], 盖拉姆波斯 (T.V.Galambos) 在钢结构方面^[41], 均发表了有关的论文。特别值得提出的是姚治平 (James T.P.Yao) 应用“模糊数学”, 评价受地震等灾害幸存结构的破坏程度的修复问题^[42], 以及博洛克利 (David Blockley) 应用“模糊数学”研究结构设计及安全度^[43], 是值得注意的发展方向。

加拿大的林德 (N.C.Lind) 提出了分项系数的概念, 便于给出与现行设计规范相联系的多系数的设计表达式^[45]。

加拿大的麦克格雷柯尔 (J.G.MacGregor) 主要研究了影响钢筋混凝土安全度的各种不定性问题, 讨论了按现行规范进行“校准”而确定设计安全指标的问题。

欧洲混凝土委员会 (CEB) 和国际预应力混凝土协会 (FIP), 在安全度研究方面, 近年来作了大量的工作。这两个学术组织于1970年编制的《CEB-FIP混凝土结构与施工统一建议 (第二版)》, 提出了多系数极限状态设计法。1971年, 由CEB倡议, CEB、CECM (欧洲钢结构协会)、CIB (国际房屋建筑协会)、FIP、IABSE (国际桥梁与结构工程协会)、RILEM (国际材料与结构研究所联合会) 赞助, 成立了结构安全度联合委员会 (JCSS), 着手编制《结构统一标准规范的国际体系》, 共分六卷。第

一卷是由罗威 (R.E.Rowe) 主持编制的《对各类结构和材料的共同统一规则》，第二卷至第六卷分别为混凝土结构、钢结构、钢和混凝土组合结构、砖石结构及木结构。第一卷于1976年11月在巴黎召开的 JCSS 上通过，推荐采用半经验半概率法，但在附录中介绍了“近似概率法”。这些工作对各国安全度的研究及规范编制影响很大。北欧五国（丹麦、芬兰、冰岛、挪威及瑞典）房屋建筑规程委员会（NKB），于1978年提出了“结构荷载与安全设计规程建议”，其精神与 JCSS 编辑的第一卷内容基本一致。1981年6月在挪威的特隆赫姆举行了第三次国际结构安全度及可靠度学术讨论会，由莫恩 (T.Moan) 和辛罗佐卡 (M.Shinozuka) 编辑了会议论文集^[46]。

三、中国

我国从五十年代初期开始，大连工学院、中国科学院土木建筑研究所、同济大学、清华大学、冶金工业部建筑科学研究院等单位开展了极限状态设计法的讨论和研究，并用数理统计学确定超载系数和材料强度系数^[1~14,22,23]，它们曾分别建议用克-门氏曲线、皮尔逊III型曲线、对数正态曲线等研究我国荷载（主要是风、雪荷载），以及材料（钢、混凝土）强度的匀质系数。

1954年，大连工学院在文献[2]提出用数理统计学中的误差传递公式，计算各种荷载组合的总超载系数 n_s 及构件总匀质系数 k_R ，以代替各分项系数。计算公式形式为： $n_s \sum N_i \leq k_R R$ ；1960年，文献[7]提出用数理统计法计算的安全系数与经验系数相结合，设计钢筋混凝土结构构件。假定随机变量服从正态分布，推导了辅助安全系数（相当于现在的中心安全系数）的表达式：

$$K_0 = \frac{1 + \sqrt{1 - (1-D)(1-A)}}{1-D} \approx \frac{1 + \sqrt{D+A}}{1-D} \quad (1-7)$$

式中， $D = \beta^2 V_R^2$ ， $A = \beta^2 V_S^2$ ， β 为安全指标（文献[7]用符号 γ ）。对各种常用的钢筋混凝土构件，给出了 A 及 D 的表达式，并讨论了安全指标 β （相应于失效概率）的取值问题，是一次二阶矩理论在我国应用的开始。

文献[11]及[24]，讨论了超静定结构塑性破坏的数理统计计算问题。文献[21]讨论了将数理统计法应用于钢筋抽样检验问题。

1962年，中国土木工程学会开展了安全度问题的讨论，文献[18~20]分别对我国极限状态法安全度的表达式进行了讨论。

七十年代，我国在制订工业和民用建筑、水利水电工程、港口工程、公路桥梁和铁路桥梁设计规范时，也对安全度问题作了大量的工作，采取了不同的表达方法（参见第二章）。工业及民用建筑的《钢筋混凝土结构设计规范(TJ10-74)》采用了半经验半概率的单系数极限状态设计法^[26]。但是，同时期颁布的砖石结构、钢木结构等设计规范，在安全度的表达形式上以及材料强度的取值原则上，与钢筋混凝土结构设计规范没有统一，因而在设计中仍感不便。为此，原国家建委于1978年成立了工业和民用建筑各规范的《建筑结构统一标准》编委会和专题研究组，组织有关单位开展了研究工作。编委会参考了国际上的研究成果，特别是JCSS编制的《结构统一标准规范的国际体系》，采用了水准II的概率极限状态设计法，进行了大量的工作^[27,28]。在此期间，四川省建筑科学研究所一般分离法、预应力混凝土构