

建筑结构设计新方法

——近似概率法

陈建伟 编著

成都科技大学出版社

一九八七年·成都

建筑结构设计新方法

——近似概率法

陈建伟 编著

成都科技大学出版社

一九八七年·成都

内 容 简 介

本书针对国家计委批准执行的《建筑结构设计统一标准》(GBJ68—84)和即将颁布的新的《钢筋混凝土结构设计规范》、《钢结构设计规范》采用的结构近似概率设计法,介绍其基本理论、设计公式、设计方法和步骤,并以工程结构设计实例说明公式的应用和计算方法。

全书共分七章。前两章简介建筑结构设计理论的发展与可靠度理论、可靠度分析中的概率论基础,第三、四、五章介绍结构可靠度的计算方法、建筑结构上的作用和结构构件抗力的统计分析方法,第六章着重介绍概率极限状态设计法在我国新编标准和规范中的具体应用和各项规定的依据、新旧规范的实质区别。最后一章简述要保证结构具有预期的可靠度水准对材料性能在设计与生产中的质量要求和控制。

本书可供工民建、水利水电、港工、铁道、公路桥涵、国防基建等专业的工程技术人员和大专院校师生参考。

建筑结构设计新方法

——近似概率法

陈建伟 编著

成都科技大学出版社出版

四川省新华书店发行

成都科技大学印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张, 6.625 插页 1

1987年5月第1版 1987年5月第1次印刷

印数: 1—6,500 字数: 143,000

ISBN7-5616-0037-2/T·12

统一书号: 15475·33 定价: 1.14 元

前 言

当前，国际上在工程结构设计方面出现了两个趋向：其一，是以概率理论为基础的结构近似概率设计法已进入实用阶段，以可靠度指标直接度量结构构件的可靠性。其二，是一些国家，特别是一些国际组织，例如国际“结构安全度联合委员会”（JCSS）正在致力于结构设计原则的统一化和标准规范的系列化。

我国现行的建筑结构设计规范，包括荷载规范以及钢结构、薄钢结构、钢筋混凝土结构、砖石结构、木结构等设计规范，都是1974年前后修订颁发的。目前看来均存在两个急待解决的问题，一是改进评估结构可靠程度的分析方法，二是使各种结构的设计理论、设计原则、设计表达式统一化和设计规范系列化。

为了提高我国建筑结构设计规范的先进性和统一性，国家计委批准执行的《建筑结构设计统一标准》（GBJ68—84）就是以可靠度理论和近似概率设计法的基本原理制定的，是今后制定或修订有关工业与民用建筑结构设计规范应共同遵守的准则，其它工程（如水利水电、港工、铁道、公路桥涵等）结构的标准、规范也应尽量符合它所规定的有关原则。故有“规范之规范”之称。新的《钢筋混凝土结构设计规范》（草案）和《钢结构设计规范》（草案），正是以《统一标准》为准则对现有的《钢筋混凝土结构设计规范》（TJ10—74）和《钢结构设计规范》（TJ17—74）进行修

目 录

第一章	建筑结构设计理论的发展与可靠度理论简介	(1)
§1-1	建筑结构设计方法的演变	(1)
§1-2	建筑结构可靠性评价	(4)
第二章	可靠度分析中的概率论基础	(6)
§2-1	随机变量及其概率分布	(6)
§2-2	随机变量的统计参数	(14)
§2-3	建筑结构可靠度常用的几种概率分布	(18)
§2-4	随机变量函数	(29)
第三章	工程结构可靠度的计算方法 ...	(33)
§3-1	结构可靠度的有关概念	(33)
§3-2	计算结构可靠度的方法	(38)
第四章	建筑结构上作用的统计分析 ...	(83)
§4-1	概述	(83)
§4-2	荷载的代表值	(98)

§4-3	荷载的概率模型.....	(103)
§4-4	常用荷载的统计分析结果.....	(109)
§4-5	荷载效应的组合.....	(112)

第五章 结构构件抗力的统计分析..... (117)

§5-1	抗力统计分析的基本概念.....	(117)
§5-2	影响结构构件抗力的因素.....	(118)
§5-3	结构构件抗力的统计参数和概率分布类型	(129)

第六章 概率极限状态设计法的应用... (141)

§6-1	建筑结构设计两种情况.....	(141)
§6-2	概率极限状态设计法的设计原则.....	(149)
§6-3	结构构件的实用设计表达式.....	(161)
§6-4	设计表达式中各分项系数的确定.....	(168)
§6-5	设计表达式的应用和评价.....	(178)

第七章 结构材料的质量要求和质量控制

..... (183)

§7-1	概述.....	(183)
§7-2	材料性能质量与可靠度指标的关系.....	(183)
§7-3	设计对材料性能的质量要求.....	(185)
§7-4	材料性能的质量控制与验收.....	(187)

附 录 (189)

附表 I	标准正态分布的密度函数表.....	(189)
------	-------------------	-------

附表Ⅱ	标准正态分布的分布函数表·····	(192)
附表Ⅲ	χ^2 分布的临界值表·····	(198)
附表Ⅳ	柯尔莫哥洛夫检验法的临界值表·····	(199)
主要参考文献 ·····		(201)

第一章 建筑结构设计理论的发展与可靠度理论简介

§ 1-1 建筑结构设计方法的演变

一、概述

建筑结构设计主要包括选择合适的结构方案和型式，进行结构或构件截面内力或应力分析，据此计算截面尺寸和材料用量等。

一个合理的结构设计，应该要求在现有技术水平的基础上，用较少的材料和费用获得安全、适用和耐久的结构。在进行结构构件设计时，需要对作用在结构物上的荷载种类及大小，结构物的工作情况和破坏形态，施工质量的影响，以及所用材料的强度和变形性能等做出判断与假定，作为设计的前提条件，以便把外界作用对结构的效应与结构本身的抵抗能力加以比较，使结构在满足使用条件的前提下，既安全又经济。但由于对上述前提条件认识上的局限性和无法预料与控制的不定性，故在进行设计时总要留有余地而引入必要的安全储备。这种安全储备的大小，长期以来用所谓安全系数值来考虑。

很明显，结构物安全储备太大，虽可达到安全使用的目的，但会多用材料，造成人力和物力的浪费；反之，安全储

备过小，虽结构物所用的材料减少了，当减少到不合理的程度时，则将影响正常使用，甚至造成重大事故。因此在结构设计中，安全和经济是对立的统一，既矛盾，又统一，而且在一定条件下还可以互相转化。设计人员的职能就在于正确而合理的处理好这个矛盾的两个方面。

二、建筑结构设计方法的发展过程

随着人们对结构材料性能认识的不断深化、新材料的发展与更新、结构破坏教训的积累，建筑结构设计方法也不断演变与发展。如我国钢筋混凝土结构设计就先后采用过容许应力设计法、破坏阶段设计法、极限状态设计法。这三种方法的共同特点都是把影响结构安全的各种因素看成是固定不变的，设计时也是将影响结构安全的某些参数按经验取值，并考虑一定的经验安全系数来表示结构在正常设计、施工和使用情况下安全储备的大小，这样似乎结构就百分之百地安全可靠了。实际上，在使用过程中，作用在结构上的荷载和结构抵抗荷载作用的能力都并非固定不变，而是因各种偶然因素的影响随时间或空间而变动的非定值的变量。因此，上述三种方法都属于定值设计法，按此法设计的结构物并不能真实反映其实际安全储备的大小。近三十年来，国内外都在致力于研究一种较为合理的、以概率论为基础的“概率设计法”，即将影响结构安全的各种参数看成随机变量，用概率论和数理统计学来全面或部分分析这种变量，再以结构的失效概率来度量结构的安全储备。按这种方法设计建筑结构的规范，我国已有1985年1月1日由国家计委批准执行的《建筑结构设计统一标准》（以下简称《统一标准》）和即将颁

布执行的新的《钢筋混凝土结构设计规范》、《钢结构设计规范》。显然,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的运用统计学,从而使结构的安全储备从定性处理发展到定量分析,即建筑结构设计正逐步由经验设计法转变为概率设计法,这无疑是建筑结构设计方法上的一个重大飞跃。

根据运用概率理论处理结构安全储备问题的广度和深度,可将概率设计法划分为三个水准:

水准 I ——半概率设计法。此法是对影响结构安全的某些参数,用数理统计进行分析,并引入某些经验系数。此法对结构的可靠程度还不能作出定量估计,只是一种半概率设计法。我国在70年代制定的各种结构设计规范都属于水准 I 的范畴。如工民建的《钢筋混凝土结构设计规范》(TJ10—74)和《水工钢筋混凝土结构设计规范》(SDJ20—78)在确定材料强度时,采用了概率原则,而荷载取值则一般沿用传统的经验值;超载系数是根据和以往的“定值法”设计对比反演算出来的。所以,荷载取值和超载系数都是由经验确定的。因此,上述规范基本上都属于“半概率设计法”。

水准 II ——近似概率设计法。它是运用概率论和数理统计对建筑构件或截面设计的可靠程度用失效概率或可靠指标来估算。为了简化,有时将其间的某些关系采用近似的处理方法,所以,仍然只是一种近似的概率法。但它比“水准 I”前进了一步。我国的《统一标准》和即将颁布执行的新的《钢筋混凝土结构设计规范》、《钢结构设计规范》都属于这一水准。

水准 III ——全概率设计法。此法是将影响结构安全的各

种参数分别采用随机变量或随机过程的概率模型来描述，对整个结构体系进行精确的概率分析后，能得出结构的失效概率以直接度量整个结构的安全性。

在现阶段，由于各种统计资料短缺，用以评估建筑结构可靠程度的比较合理且可行的方法，显然是水准Ⅰ的近似概率法。建筑结构设计方法从水准Ⅰ向水准Ⅱ过渡，这是近期内要完成的目标；而水准Ⅲ只是一个研究方向。

§ 1-2 建筑结构可靠性的评价

一、结构可靠性

建筑结构设计的基本要求是以最经济的手段获得在预定条件下具有各种预期功能的结构。为此，首先要明确结构可靠性的定义；其次，应掌握影响结构可靠性的各种因素的变异性及其相互关系；最后，要在此基础上改进和完善结构的设计方法，并相应修订设计标准与设计规范，以便在工程设计中应用。

结构可靠性“是指结构在规定的时间内，在规定的条件下，完成预定功能的能力”（《统一标准》）。所谓“规定时间”，是指设计所假定的结构使用时间，即设计基准期。按《统一标准》规定，建筑结构设计基准期一般为50年。

所谓“规定条件”，是指正常设计、正常施工、正常使用等条件。凡是在设计中可能由于设计错误、施工质量低劣以及不合理使用等所造成的不利影响均不予以考虑。

所谓“预定功能”，系指：

（1）安全性 建筑结构在规定条件下应能承受可能出

现的各种“作用”（包括荷载、外加变形和约束变形等），以及遇到偶然事件应能保持必需的整体稳定性。

（2）适用性 建筑结构在正常使用时应能满足预定的使用要求。例如，不应有过大的变形和过大的开裂等。

（3）耐久性 建筑结构在正常维护下，材料性能虽随时间变化，但仍应能满足预定的功能要求，例如在基准期内，结构材料的锈蚀或其它腐蚀均不应超过规定限值等。

由上可见，结构可靠性是结构安全性、适用性和耐久性的总称。显然，安全性不等于可靠性，但可靠性中却包含有安全性。建筑结构在规定的正常使用条件下，在规定的基准使用期内，如果其安全性、适用性、耐久性均能得到保证，就意味着这个结构是可靠的。衡量结构可靠性大小的指标是结构可靠度。

二、结构可靠度

《统一标准》对结构可靠度的定义是：“结构在规定的时间内，在规定的条件下，完成预定功能的概率，称为结构可靠度”。由此可见，结构可靠性是一种定性概念，而结构可靠度才是结构可靠性的定量描述，即结构可靠度是关于结构可靠性的概率度量。只要结构能够完成预定功能的概率适当大，也就是结构失效的概率适当小，小到能为人们所接受时，就认为设计的结构是可靠的。至于，确定建筑结构的可靠度水平，主要是在可靠与经济之间选择最佳的平衡，当然还要考虑到对社会的影响，因此它是一个综合的决策过程。

第二章 可靠度分析中的 概率论基础

§ 2-1 随机变量及其概率分布

一、随机变量

自然界和社会上发生的一切客观现象，可分为两类：

1. 确定性现象 在一定条件下必然发生或必然不发生某种结果的现象叫做“确定性现象”。例如：在地面向上抛掷的石子必然下落；纯水在标准大气压下加热到 100°C 必然沸腾等现象。

2. 非确定性现象（随机现象） 在一定条件下可能出现多种结果，但事先不能预测“究竟出现哪种结果”的现象叫做“随机现象”。例如投掷一枚硬币，事先不能断定哪一面向上；又如，事先不能断定某办公楼所实际承受的楼面活荷载数值；试验前不知某种材料的实际强度等现象。

确定性现象有其内在规律性，这容易被人们所理解，而随机现象表面上看来好象是属偶然性，似乎无规律可循，但经过长期实践证明：随机现象虽然就每次试验或现场观察结果来说，它具有不确定性，但在大量重复试验或观察下，它的结果却呈现出某种规律性。这种随机现象所具有的内在规律性称为统计规律性。概率论和数理统计学就是研究和揭示

同类随机现象数量的统计规律性的一门数学分支。

随机现象有一个共同的特点，就是每次试验结果都可以用一个数值来表示，这个数值在试验之前是无法确知的，而一旦试验之后，就变成确知的了。在概率论中，把这种随着试验的结果不同而变化的量称为随机变量。例如在 100 件产品中有 5 件是次品，现在从这 100 件产品中分几次抽样检查，每次随便抽取 20 件，则每次抽得次品的件数，可能是 1，也可能是 2 或 3 或 4 或 5，甚至可能是零（即没有抽到次品）。由此可见，抽到的次品数可能随着各次的抽样而有所不同。但是，抽到的次品数究竟是多少？是无法在抽样前预先知道的。由此可见，抽到的次品数就是一个随机变量。

又如某一根钢材试件在试验前是无法确知其强度的，而做了试验之后，它的强度便是一个确切的数值了。某日的风速，在该日到达之前，无法确知其最大值，但到了该日并实测之后，该日的最大风速便是一个确切的数值了。诸如以上各例中的次品数、钢材试件的材料强度、日风速等等均是随机变量。一般用符号 X 表示某随机变量，其可能的种种取值以小写符号 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 表示之。

一般，随机变量可分为两大类：

1. 离散型随机变量 如果试验结果的随机变量 X 可能取得的值能够一一列举出来，则这种随机变量 X 就叫做离散型随机变量。例如上面所说的每次抽到的次品数，就能够一一列举出来（0 或 1，或 2、或 3、或 4、或 5）。

2. 连续型随机变量 如果试验结果的随机变量 X 可以取得的值不能一一列举出来，是充满某一区间的，则这种随机变量 X 就叫做连续型随机变量。例如，在研究我国办公室

建筑楼面活荷载 L 的数据中, 实测到的楼面活荷载的范围为: $0 < L \leq 300 \text{ kg/cm}^2$, 也就是说, 随机变量 L 是充满在 $0-300 \text{ kg/cm}^2$ 这一区间的, 并且是不能一一列举出来的。

二、随机变量的概率分布

所谓概率就是用数量来标志某些随机事件或某随机现象的某种结果出现的可能性大小。而概率分布则是某种随机现象中所有试验结果取值与其概率的对应关系。

(一) 离散型随机变量的概率分布

对于一般情形的离散型随机变量 X 的概率分布可用下表所示的“分布列”表示:

表2-1

X: 试验结果取值	x_1	x_2	x_3	...	...	x_n
$P(X) = \frac{m}{n}$: 与试验结果相对应的概率	p_1	p_2	p_3	...	...	p_n

表中 n ——试验的总次数

m ——某试验结果取值出现的次数 (频数)

〔例2-1〕 某射手射击环靶, 击中环数用随机变量 X 表示, X 可能取的值为: $0, 1, 2, \dots, 9, 10$ 。又通过大量的、反复的射击, 求出了与击中各环相对应的概率, 则可用表 2-1 的“分布列”来表示 X 的概率分布。

X	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P(X)	0	0	0	0	0.01	0.01	0.06	0.09	0.28	0.3	0.25

概率分布在可靠度的计算中, 是十分有用的, 现在只介绍它的概念, 至于它的具体应用, 详见以后有关章节。

(二) 连续型随机变量的概率分布

在建筑结构的可靠度及荷载组合理论分析中，遇到的基本变量大多数是取值非常之多的，难以用离散型随机变量来描述，例如作用在建筑物上的风压、楼面活荷载、大型屋面板及多孔板的重量、钢筋的性能（硬度、抗拉强度等）等，它们的取值一般都充满某一区间，这就需要用连续型随机变量概型来描述。下面以具体实例介绍连续型随机变量概率分布的基本概念。

1. 直方图和概率密度曲线

〔实例〕 对某市一个大楼抽取了六十个房间 ($n=60$) 的楼面活荷载 X 进行测定。将所得的60个数据适当分组（分区间——每一个区间叫做一个组距 c ，本例是以每 20kg/m^2 作为一个区间，例如第一个区间为 $<45\text{kg/m}^2$ 的楼面活荷载；第二个区间为 $45\sim65\text{kg/m}^2$ 的楼面活荷载，……），然后计算各组的频数 m （区间荷载出现次数）和概率 p

表2-2

组 别	1	2	3	4	5	6
X的范围 (kg/m^2)	<45	$45\sim65$	$65\sim85$	$85\sim105$	$105\sim125$	>125
频数(出现次数) m	2	11	20	18	7	2
概率: $p = \frac{m}{n}$ ($n=60$)	0.033	0.183	0.333	0.300	0.117	0.033
累积频数	2	13	33	51	58	60
累积概率	0.033	0.216	0.549	0.849	0.966	1.000
概率密度 $f(x) = \frac{\text{概率}}{\text{组距}}$ (组距 $c=20$)	0.00165 ($= \frac{0.033}{20}$)	0.00915 ($= \frac{0.183}{20}$)	0.01665	0.0150	0.00585	0.00165

$(p=\frac{m}{n})$ ，其数据见表2-2。

对于一般情形的连续型随机变量 X ，可列表如下：

X 的范围	$x_1 \sim x_2$	$x_2 \sim x_3$		$x_i \sim x_{i+1}$		$x_{n-1} \sim x_n$
概率 $P\{x_i < x < x_{i+1}\}$	p_1	p_2		p_i		p_n

为了直观地了解随机变量 X 落在每个组距内的概率的全面情况，可用〔实例〕中 X 的取值为横坐标，以概率/组距为纵坐标，作出“概率密度直方图”如图 2-1 所示。在此，“概率/组距”叫做概率密度 $f(x)$ 。由此可得 $p=f(x) \times c$ 。

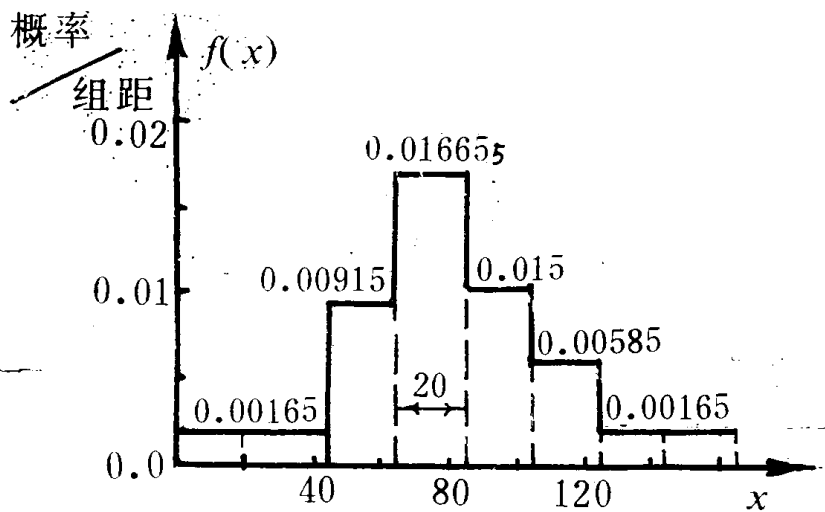


图 2-1

现以图 2-1 为例来说明这一关系：

图 2-1 中每个区间上的长方形面积值=该区间的 $f(x) \times c=p$ ， p 就是 X 落在该区间的概率值。例如，当 X 的范围为