

结 构 可 靠 度

JIE GOU KE KAO DU

李桂青 编著

武汉工业大学出版社

7U311.2

2

结构可靠度

李桂青 编著

江苏工业学院图书馆
藏书章

武汉工业大学出版社

结 构 可 靠 度

李桂青 编著

武汉工业大学出版社出版发行

新华书店湖北发行所经销

湖北科学技术出版社黄冈印刷厂印刷

开本: 850×1168毫米 1/32 印张: 8.4375 插表 1 字数: 210千字

1989年4月第一版 1989年4月第一次印刷

印数: 1—10000册

ISBN 7—5629—0168—6 / TU·0016

定价: 3.20元

4588484

内 容 简 介

我国的建筑结构、荷载、抗震规范均已全面修订,改为以可靠度为目标的设计方法。本书结合这一重大变革,着重阐述结构可靠度的理论基础、计算方法和设计应用。本书共分五章:第一章结构理论 and 设计方法的新发展,扼要介绍了结构可靠性、结构控制、结构识别、模糊结构理论及专家系统等新兴分支学科的发展,和值得进一步研究的问题;第二章可靠性理论的数学基础;第三章结构静力可靠度;第四章结构动力可靠性理论;第五章抗震结构的可靠性。

本书可供大专院校工业与民用建筑、结构工程、水利工程、建筑力学专业的本科生、研究生、教师及土建科技人员参考。

2074/11

序 言

本书是在著者的一本讲义《结构可靠度理论》的基础上写成的。这本讲义或其部分内容曾在湖北、云南、沈阳、武汉等省市的建筑、水利学会和我校讲授过多次，这次出版时又作了一些修改。

结构可靠度理论是结构理论与概率理论、模糊数学相结合的一门新兴学科，具有重大的理论和实用意义。我国即将颁布的各种结构设计新规范均改为以可靠度为目标的设计方法，这是一个很大的变革，很大的发展。为了使广大工程技术人员能适应这种重大变革，能正确理解和执行新规范，本书以较大的篇幅着重阐述了新规范的理论基础，主要是与随机变量和随机过程有关的可靠度理论基础。至于模糊可靠度或广义可靠度的问题，本书只在有关章节作了一点简单介绍。

近二十年来，结构理论和设计方法有很大发展，出现了许多新的分支，如结构控制理论、系统识别和参数估计理论、模糊结构理论和结构设计的专家系统等。为了使广大读者对这些新理论、新方法有一个概括性的了解，著者在本书第一章中作了扼要介绍，并提出了一些值得进一步研究的问题。

本书第二章对概率论和随机过程的理论基础作了比较通俗的介绍。书中着重阐述概念与实际应用，未过分强调定义、定理及其推论的严密性。凡具备一般高等数学基础的同志是可以读懂的。

本书第三章是结构静力可靠度。我国近年来在这方面做了大量的试验和研究工作，取得了举世瞩目的成果。在众多有贡献的专家中，邵卓民同志是我较为熟悉的一位，他及其合作者的著

作是我在撰写第三章时的主要参考资料。第四、五章是关于结构动力可靠性的问题，近年来我及我的研究生在这方面做过一些研究工作，发表过30余篇论文。但本书还不是这方面的系统总结，而只是介绍一些理论基础及其在抗震结构中的应用，是与博士研究生曹宏、李秋胜合写的。

结构可靠度分析涉及许多不确定性因素，包括随机性、模糊性和不完整性等因素，目前还缺乏充分的资料，因而其计算值并非真实的可靠度，而是具有相对意义的运算值。但本书并未特别强调这一点，因为绝对意义下的结构可靠度精确值是永远找不到的，它只能是相对意义的精确值。结构可靠度分析具有较大的难度，故编著本书的指导思想是力求概念清晰，密切结合规范，深入浅出，通俗易懂。从我在各地讲学的经验及《结构可靠度理论》讲义的多次使用情况来看，这本书是便于自学的，主要内容是可以为广大工程技术人员和大专院校师生所掌握的。

本书由张晓红、李松华等同志绘图和抄写，谨致谢意。

由于著者水平所限，书中必定存在某些缺点，甚至错误，敬请读者指正。

武汉工业大学
工程结构抗震研究所

李桂青

常用符号

除特殊说明者外，各符号代表意义如下：

T ——结构的设计基准期或时间间隔

P_f ——结构或构件的失效概率

P_S ——结构或构件的可靠概率

β ——结构或构件的可靠指标

S ——结构或构件的作用效应

R ——结构或构件的抗力

μ_x ——随机变量 X 的平均值（期望值）

$M[X]$ ——随机变数 X 的期望值

σ_x ——随机变量 X 的标准差

X_K —— X 的标准值

f ——材料的性能

G ——永久荷载

Q ——可变荷载

α ——结构或构件的几何参数

Ψ_c ——荷载组合值系数

Ψ_l ——荷载准永久值系数

C_G ——永久荷载效应系数

C_Q ——可变荷载效应系数

γ_F ——结构上作用分项系数

γ_G ——永久荷载分项系数

γ_Q ——可变荷载分项系数

γ_k ——结构或构件抗力分项系数

γ_f ——材料性能分项系数

γ_0 ——结构重要性系数

$\|A\|$ 或 $[A]$ ——矩阵符号

$[A]^T$ —— $[A]$ 的转置矩阵

$[A]^{-1}$ —— $[A]$ 的逆矩阵

$|A|$ —— A 的绝对值或行列式符号

$\dot{X}(t)$ —— $X(t)$ 对 t 的一阶导数

$\ddot{X}(t)$ —— $X(t)$ 对 t 的二阶导数(类推)

$Y'(x)$ —— $Y(x)$ 对 x 的一阶导数

$Y''(x)$ —— $Y(x)$ 对 x 的二阶导数(类推)

$f(x)$ —— X 的概率密度函数

$F(x)$ —— X 的概率分布函数

目 录

第一章 结构理论和设计方法的新发展.....(1)

§ 1-1 概述.....	1
§ 1-2 结构系统的识别和参数估计.....	1
§ 1-3 结构可靠性理论.....	3
§ 1-4 模糊结构理论.....	5
§ 1-5 结构控制与控制结构.....	6
§ 1-6 抗震结构的概念设计.....	20
§ 1-7 结构设计的专家系统.....	26

第二章 可靠性理论的数学基础.....(30)

§2-1 随机事件与随机变量的概念	30
§2-2 随机变量的分布函数与分布密度	33
§2-3 随机变量的数字特征	36
§2-4 随机变量系	43
§2-5 随机变量的函数	56
§2-6 几种常用的分布曲线	66
§2-7 随机函数的基本概念	95
§2-8 随机函数的特征.....	101
§2-9 平稳随机函数.....	104
§2-10 平稳随机函数的谱密度.....	105
§2-11 各态历经过程.....	111
§2-12 随机函数的联合特征.....	113
§2-13 平稳线性系统在平稳随机函数作用下的反应.....	115

第三章 结构静力可靠度.....(119)

§3-1 概述.....	119
--------------	-----

§3-2 结构设计的半概率方法——“水准1”	121
§3-3 结构可靠度的二阶矩理论——“水准2”	123
§3-4 结构可靠度计算的JC方法	133
§3-5 荷载分类及统计分析	153
§3-6 结构构件抗力的统计特性	157
§3-7 结构可靠指标的校准法	179
§3-8 结构的概率极限状态设计法	182
§3-9 建筑结构的实用设计表达式	184
§3-10 结构体系的可靠度	193

第四章 结构动力可靠性理论

(197)

§4-1 概述	197
§4-2 平稳正态窄带过程在幅域中的统计特性	205
§4-3 随机过程的交差问题	209
§4-4 峰值分布	213
§4-5 基于首次超越机制的动力可靠性	213
§4-6 基于累积损伤的疲劳可靠性	219
§4-7 单自由度线性体系的动力可靠性分析	221
§4-8 多自由度或无限自由度线性体系的动力可靠性分析	225
§4-9 值得进一步研究的问题	229

第五章 抗震结构的可靠性

(230)

§5-1 抗震设计的总则和基本要求	230
§5-2 抗震结构可靠性概述	237
§5-3 随机反应分析的反应谱法	241
§5-4 非线性滞变体系的随机地震反应分析	243
§5-5 结构抗力的研究	247
§5-6 基于各种破坏准则的可靠性分析	249

参考文献

(256)

第一章 结构理论和设计方法的新发展

§1-1 概 述

近三十年来，随着科学技术的发展，特别是电子计算机的问世，结构理论和设计方法有了很大发展，出现了一些新的分支。例如，结构分析的有限元法；结构设计的优化方法；结构系统识别和参数估计；结构可靠性理论；模糊结构理论；结构控制和控制结构理论；结构概念设计以及结构设计的专家系统等。

本章只拟对上述部分问题以及我们所取得的部分成果作点简要介绍。

§1-2 结构系统的识别和参数估计

系统识别是一门研究由系统的试验或运行数据来建立该系统数学模型的学科。若数学模型为已知，仅利用试验数据来确定其中的参数，则称为参数估计或参数识别。具体地说，系统识别就是根据系统的输入、输出数据，用一定的优化算法在某一类模型中确定一个模型及其参数，使其在一定准则下，与实际系统符合最优。

结构动力学的系统识别与参数估计，是根据对振动系统的已知（通常由实测求得）干扰（输入）及其动力反应（输出）来建立结构的动态数学模型，并确定其中的参数，包括动态模型参数（频率、振型等）与物理参数（质量、阻尼、刚度等），这是结

构动力学的第一类“逆问题”。由已识别的结构数学模型及实测的结构反应来确定荷载，称为“荷载识别”，是结构动力学的第二类逆问题。

数学模型可以用表格、图线、代数方程、微分方程、积分方程等多种形式来表示。通常分为参数模型与非参数模型，线性模型与非线性模型，确定性模型与随机性模型，连续型模型与离散型模型，时变模型与非时变模型等。

由系统的输入、输出建立的数学模型和估计的参数，是否符合实际系统，需要有一个判别准则，称为识别准则。常用的识别准则有最小二乘法，极大似然法，极大熵法等。识别方法是按准则命名的。

最近几年来，我们在参数识别方面也做了一些研究工作，对于单自由度体系，我们提出了：

(1) 由估计的传递函数的相位差确定体系的固有频率及阻尼。

(2) 在频率比的一定范围内 ($0 \leq \beta \leq 0.8$) 估计体系的刚度系数。

(3) 用最小二乘法曲线拟合估计体系的脉冲响应函数中的参数。

(4) 用回归分析估计机械阻抗函数的参数。

对多自由度体系，我们提出了：

(1) 用估计的机械阻抗矩阵的实部识别体系的振型。

(2) 根据已识别的振型，用振型分解法将多自由度体系化为一系列单自由度体系进行识别。

(3) 直接用回归分析估计机械阻抗矩阵中的参数。

(4) 对剪切型多自由度体系，提出了逐层识别的方法，相当于将一 n 个自由度体系化为 n 个单自由度体系进行识别，从而使计算工作量大为减少。

§1-3 结构可靠性理论

结构的可靠性，是指结构在规定的时间内，在规定的条件下，完成预定功能的特性。

《建筑结构设计统一标准》规定，建筑结构必须满足下列各项功能要求：

- (1) 能承受在正常施工和正常使用时可能出现的各种作用；
- (2) 在正常使用时，具有良好的工作性能；
- (3) 在正常维护下具有足够的耐久性能；
- (4) 在偶然事件发生时及发生后，仍然能保持必需的整体稳定性。

所谓“作用”，实际上就是一种广义荷载，除包括各类通常意义下的荷载外，还包括因温度变化、材料收缩、徐变、地基变形和基础运动等引起的结构变形、内力的各种作用。

所谓“规定的时间”，一般是指设计基准期，即50年。

所谓“规定的条件”，一般是指正常设计、正常施工、正常使用条件，在结构可靠性分析中，至今还未考虑人为灾害的作用。

以上所述的四个功能，实质上就是安全性（第1、4条）、适用性（第2条）和耐久性（第3条）。这就是说，只有结构的安全性、适用性和耐久性都得到了保证，才能称之为可靠的。但应指出，迄今为止的可靠性理论，主要还是研究结构的安全度。

结构可靠性的测度是可靠度。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。

由此可见，结构可靠性理论是结构理论与概率论相结合的学科。用这种新学科理论设计工程结构时，必须综合考虑以下几个

主要的随机因素:

1. 荷载 (结构上的作用)

包括荷载大小及其沿空间的分布和随时间变化的随机性。

2. 荷载效应

所谓效应, 就是结构反应, 指在荷载作用下的内力、变形等。荷载效应的随机性, 包括荷载转化为结构反应的随机性以及内力分析的随机性。

3. 材料强度

包括强度本身的随机性和试验方法、操作技术、数理统计等的随机性, 以及试件强度和构件中材料强度之间差异的随机性等。

4. 施工误差

包括在制作、安装过程中产生的结构和截面几何形状、尺寸、缺陷的随机性, 以及其它影响结构抗力的随机因素。

5. 抗力分析

主要考虑结构的计算抗力与实际抗力之间差异的随机性。实际抗力与实际荷载有时需用 § 1—2 中所述的识别与估计方法来确定。

根据运用概率理论处理结构可靠度问题的广度和深度, 可将概率设计方法划分为三个水准:

水准1 分别在荷载效应和结构抗力的基本变量的设计取值上考虑了概率原则, 而设计安全系数则主要是根据经验确定的。这种方法称为半概率法。我国现行结构设计规范中采用的单一安全系数法, 容许应力法均属于这一水准。

水准2 将极限状态函数中有关荷载效应和结构抗力的基本变量均视为随机变量, 并考虑了两者的联合分布, 以此建立与结构失效概率有内在联系的安全指标, 作为衡量结构安全度的尺度。这样的方法本是一种严格的概率方法, 但因在分析中忽略或

简化了基本变量随时间变化的关系，在处理极限状态方程和非正态随机变量时采用了近似的线性化方法，以及由于统计数据不够充分，从而确定基本变量的分布类型时有相当的近似性等，所以这种方法通常称为近似概率法。当前，国内外已经开始在规范中应用的二阶矩法、JC法，均属于这一水准。

水准3 对各种基本变量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概率分析，使其具有最大的可靠度。这种方法称为全概率法。

应当指出，以上所述的基本概念、三个水准以及《建筑结构设计统一标准》，主要是针对静荷载作用下的结构设计及其可靠度分析而言的，至于结构动力可靠性问题，我们将在第四、五章介绍。

§1-4 模糊结构理论

结构设计所需要的信息，一般都具有不同程度的不确定性，即随机性、模糊性和不完整性。

模糊性是由于某些事物缺乏明确定义和评定标准而形成的不确定性。模糊问题的特点是其中某些事物的边界不清晰。

在离散论域

$$X = \{ x_1, x_2, \dots, x_n \}$$

上的模糊子集 $\tilde{A}$ 通常表示为

$$\tilde{A} = \sum \mu_{\tilde{A}_i} / x_i \quad (1-1)$$

在连续论域

$$X = [x_1, x_2]$$

上的模糊子集 $\tilde{A}$ 通常表示为

$$\underline{A} = \int_{x_1}^{x_2} \underline{\mu}_A(x) / x \quad (1-2)$$

式中 $\underline{\mu}_A$ 表示元素 x_i 隶属于模糊子集 $\underline{A}$ 的程度，称为隶属度； $\underline{\mu}_A(x)$ 为 x 对 $\underline{A}$ 的隶属度，称为隶属函数。隶属度或隶属函数在 $[0, 1]$ 区间上连续取值，一般用统计方法或根据经验确定；“ Σ ”及积分号均表示合并的意思，并非通常意义下的求和与积分。

工程设计中的模糊因素，主要有设计目标函数（方案优劣标准）、各种约束条件（失效准则以及强度、刚度、变形速度、加速度、频率等约束条件）、计算简图、决策效用函数、地震烈度和场地土等级、以及风荷载计算中的地面粗糙度等因素中包含的信息的模糊性。模糊数学在土建工程中已成功地应用于以下领域：

- （1）地震烈度的二级模糊综合评定；
- （2）结构的模糊优化设计；
- （3）系统的模糊随机可靠性理论；
- （4）系统的模糊统计决策；
- （5）模糊随机振动；
- （6）模糊随机控制。

可以预计，全面考虑各种模糊因素的结构理论研究工作的进一步深入和完善，必将导致一门新学科——模糊结构理论的产生和发展。

§1-5 结构控制与控制结构

一、引言

结构控制是最近几年才发展起来的一门新兴学科，主要研究

结构控制的理论、方法和措施。

结构控制分为**被动控制**(*Passive Control*, 无外部能源, 又称**无源控制**)与**主动控制**(*Active Control*, 有外部能源, 又称**有源控制**), 或二者的组合。它可以降低结构的重量, 改善结构的力学性能, 提高结构承载能力和可靠度。这门新兴学科涉及以下几个方面:

- (1) 结构系统识别;
- (2) 结构的静力与动力可靠度;
- (3) 现代控制理论;
- (4) 被动控制与主动控制, 以及二者的最优组合。

因为要想对结构反应进行有效控制, 就必须首先对结构系统和结构参数进行识别, 而为了判别采取控制措施前后的结构可靠度的变化, 就必须研究结构损伤、破坏机理和准则, 结构随机反应及动力可靠度的分析方法。特别是为了对结构进行实时控制, 提高结构动力可靠度, 研究结构的微观损伤机理和准则是一个值得重视的方向。可见, 结构控制是一门交叉学科, 涉及结构理论、振动理论、控制理论、结构设计和材料科学等多门学科。

“控制结构”是一种有控制措施的结构工程学, 是根据给定的控制条件, 将控制措施和结构作为一个整体进行优化设计。按照控制结构理论设计的结构, 不仅可以控制其变形在给定的范围内, 而且可以控制结构的破坏模式, 塑性铰出现的部位和顺序等。

“控制结构”的概念是著者首次提出的, 它与“结构控制”既有密切联系而又有所区别。“控制结构”是从控制的观点和条件来研究结构、设计结构, 它不仅可以通过主动、被动控制措施来限制结构变形, 也可以通过改变结构的刚度、质量分布和配筋来达到某种控制目的。例如, 适当调整顶部突出物的质量、刚度, 增强其延性, 可以大大降低主体结构的地震反应。“结构控制”