

工程结构及 系统的 模糊可靠性 分析

王光远_{院士} 张鹏 著
陈艳艳 于玲

东南大学出版社

工程结构及系统的模糊 可靠性分析

王光远^{院士} 张 鹏 著
陈艳艳 于 玲

内 容 提 要

本书内容为国家自然科学基金重大项目“大型复杂结构体系的关键科学问题及设计理论研究”子课题研究的成果。

本书提出了具有“安全-中介-失效”工作模式的各种结构和工程系统的可靠性分析方法。既考虑结构及工程系统工作的随机性,又考虑其模糊性,并可以使可靠性分析利用更多的资料,提出关于结构工作状态不确定性更全面的估计,有利于工程的设计和决策。

本书所提方法的最大优点就是:它不仅提供了更多信息,而且在分析过程的具体计算中,全部使用的是常规(即现有的“有效-失效”模式)的计算方法,因而没有带来任何新的困难。

作为应用实例,在本书第二篇还提出了抗震结构优化设计的非常实用的计算方法,在其目标函数中包括结构造价及结构维修和遇灾失效损失的期望值,基本符合国际标准《ISO 2394:1998》的最新建议。

本书的读者对象是土木、建筑、水利工程以及机械等专业的技术人员、科研工作者、研究生、教师和本科高年级学生。

图书在版编目(CIP)数据

工程结构及系统的模糊可靠性分析/王光远,张鹏等著.
—南京:东南大学出版社,2001.9

ISBN 7-81050-867-9

I. 工... II. ①王...②张... III. 工程结构-可靠性-分析 IV. TU311.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 074948 号

东南大学出版社出版发行
(南京四牌楼 2 号 邮编 210096)

出版人:宋增民

江苏省新华书店经销 江苏省地质测绘院印刷厂印刷

开本:850mm×1168mm 1/32 印张:7 字数:188 千字

2001 年 11 月第 1 版 2001 年 11 月第 1 次印刷

印数:1~2000 定价:18.00 元

(凡因印装质量问题,可直接向发行科调换。电话:025-3792327)

前 言

一个系统的可靠度是指在规定条件下和规定时间内该系统完成规定功能的概率。它反映了对工程设计的综合性要求,表现了安全和经济的统一,并且可用以协调工程的近期投资和长远效益之间的矛盾。所以应用可靠性分析是工程设计理论的一次飞跃,具有重要的理论意义和广泛的应用前景。

目前,先进国家(包括我国)的结构设计规范多已提出对结构构件可靠度的要求和限制。结构被看作由多个构件组成的系统来研究其可靠性时,从严格的理论意义来看,有两个很大的困难:一是结构系统有大量失效模式,二是如何搜索其主要失效模式和这些失效模式之间的相关性问题。目前国内外着重研究工程结构可靠度的实用的近似方法,取得了很多成果。相信在不久的将来,这些成果必然会反映到各国的结构设计规范中去。

如果一个工程项目只有一个主要结构(如桥梁、电视塔、歌剧院等),当然只需要进行该主要结构的可靠性分析。但是不少工程项目包括不止一个主要结构,这时某个或某些(部分)主要结构的失效就可以导致工程项目的整体失效。这就提出了工程系统(以各主要结构为单元所组成系统)总体可靠性的问题。在最近出版的专著文献[1]中,我们提出了一些工程系统总体可靠度的计算方法及其在抗震优化设计中的应用。

在可靠性分析中存在着失效准则的模糊性问题。一般结构的极限状态可分为三类:正常作用极限状态,承载能力极限状态,破坏安全极限状态。这些极限状态的允许值都具有模糊性,例如强度约束条件,最大允许应力是人为设定的一个界限,应力小于允许值认为是有效的,大于允许值为失效。其实在允许值左右两侧,构件的表现并没有突然的变化。应力等于允许值不仅是允许的,而且是理想的(优化的力学满应

力准则),可是应力稍大于允许值(理论上差别为无限小)就认为构件失效。这在理论上和逻辑上是不合理的,在应用上是有害的。在结构优化设计中同样存在类似的问题。因此,在文献[2]中我们提出了“结构模糊优化设计”的方法。

在文献[2]中,我们还提出了“结构模糊随机可靠性”的理论和计算方法。该方法的优点是考虑了失效准则的模糊性,缺点是计算上过于复杂,难以应用(本书附录 I 有简要介绍,供对该理论有兴趣的读者参阅)。本书就是为了克服这个缺点,经过多年的酝酿和研究后提出的,考虑有效和失效间的中介状态的,工程结构和工程系统可靠性分析的合理、简便、实用的方法^[3]。

简而言之,本书的基本概念就是认为现有的可靠性理论都是把单元和系统的工作状态分为“有效”和“失效”二级,从有效到失效采取“突变”的模式,这对某些电气设备和精密仪器系统可能是适用的,但对某些工程系统(例如土木建筑工程等)却不完全符合实际情况,因为工程中的构件、结构和工程系统的工作状态从有效到失效是渐变的,从完好地工作到完全不能工作之间存在中介状态,即虽有损伤却仍能工作的状态。

本书提出了具有“安全 - 中介 - 失效”工作模式的各种结构和工程系统的可靠性分析方法。在该方法中,系统及其单元均具有安全、中介、失效三种工作状态。可靠性分析的结果是求出它们的安全概率 P_R 、中介概率 P_M 和失效概率 P_F ,它们联合起来称为可靠性向量 $[P_R, P_M, P_F]$ 。这样就可以使可靠性分析利用更多的资料,提出关于结构工作状态随机性更全面的估计,有利于工程的设计和决策。

本书所提方法的最大优点是:它不仅提供了更多信息,而且在分析过程的具体计算中,全部使用的是常规(即现有的“有效 - 失效”模式)的计算方法,因而没有带来任何新的困难。

本书分为三篇:第一篇(前四章)为基本理论和方法,第二篇(五、六章)为该理论在抗震结构优化设计中的应用,第三篇(七、八、九章)为具

有中介状态的工程系统的可靠性分析方法。附录 I 为结构系统模糊随机可靠度理论的简介。

在第五章中,我们指出抗震结构的三级设防标准(小震不坏,中震可修,大震不倒)与我们提出的结构的三级工作模式(安全、中介、失效)在概念上是一致的。所以本书给出的抗震结构三级设防的安全概率 P_R , 中介概率 P_M 和失效概率 P_F 也就分别是它的小震不坏,中震可修和大震严重破坏包括倒塌的概率。从而给出了非常合理而又极为简便的可靠性向量的计算方法。

与文献[1]所提方法相比较,在本书第六章中提出的抗震结构最优设计(设防)烈度的决策方法具有以下特点:(1)接近最近国际标准《ISO 2394:1998》提出的优化策略和目标函数^[4]; (2)完全和我国现行的设计规范^[5]的精神和规定相一致; (3)利用第五章提出的方法,使可靠性分析可以直接查表求出,不需要计算,从而进一步极大地简化了抗震结构优化设计的方法。

本书前六章及附录 I 由王光远执笔,于玲参加了第五、六章的编写工作。第七、八章由张鹏执笔,第九章及附录 II、III、IV 由陈艳艳执笔,张鹏参与修改。

目 录

第一篇 基本理论和方法

第一章 绪论	3
§ 1.1 可靠度在工程设计中的重要性	3
§ 1.2 工程中的不确定性信息	5
§ 1.3 广义可靠度的概念	6
§ 1.4 构件、结构与工程系统	8
§ 1.5 “安全 - 中介 - 失效”三级工作模式	11
第二章 具有中介状态时可靠性分析的基本方法	14
§ 2.1 可靠性向量	14
§ 2.2 可靠性向量的基本求法	15
§ 2.3 模系并、交运算规则	17
§ 2.4 多随机事件的并、交运算	19
§ 2.5 工程系统可靠性向量的基本求法	21
第三章 单约束系统的可靠性向量	23
§ 3.1 单约束系统	23
§ 3.2 极限状态与功能函数	23
§ 3.3 失效概率与可靠度	25
§ 3.4 可靠指标	26
§ 3.5 计算可靠指标的 JCSS 法	28
§ 3.6 具有中介状态时的可靠性向量	31

第四章 结构的可靠性向量	33
§ 4.1 结构与结构系统	33
§ 4.2 结构系统的可靠性理论简介	34
§ 4.3 复杂结构可靠度的近似计算方法简介	37
§ 4.4 结构的可靠性向量	43

第二篇 抗震结构的优化设计

第五章 三级设防抗震结构的可靠性向量	47
§ 5.1 引言	47
§ 5.2 抗震结构的三级设防标准	47
§ 5.3 抗震结构的三级工作模式	50
§ 5.4 地震烈度的概率分布	51
§ 5.5 抗震结构的可靠性向量	54
§ 5.6 结语	57
第六章 三级设防抗震结构最优设防烈度的决策	58
§ 6.1 引言	58
§ 6.2 抗震结构的二阶段优化法	59
§ 6.3 国际标准《ISO 2394:1998》建议的优化目标函数	61
§ 6.4 结构造价函数 $C(I_d)$	62
§ 6.5 维修费用期望函数 $M(I_d)$	63
§ 6.6 失效损失期望函数 $L(I_d)$	64
§ 6.7 最优设计烈度的决策	66
§ 6.8 抗震结构的优化设计	67
§ 6.9 结语	68

第三篇 工程系统的可靠性向量

第七章 简单工程系统的可靠性向量	71
§ 7.1 工程系统和简单工程系统	71
§ 7.2 串联系统的可靠性向量	72
§ 7.3 并联系统的可靠性向量	77
§ 7.4 串联与并联混合系统的可靠性向量	81
§ 7.5 表决系统的可靠性向量	86
§ 7.6 旁联系统的可靠性向量	102
§ 7.7 结语	111
第八章 递阶系统的可靠性向量	112
§ 8.1 复杂系统概述	112
§ 8.2 递阶系统及其特性	113
§ 8.3 基于逻辑关系的多级递阶系统模型	115
§ 8.4 多级递阶系统可靠性向量的计算原则	121
§ 8.5 多级递阶系统算例	124
第九章 网络工程系统的可靠性向量	130
§ 9.1 引言	130
§ 9.2 图论方法简介	131
§ 9.3 网络和网络工程系统	137
§ 9.4 网络工程系统的模型简化	146
§ 9.5 “安全 - 中介 - 失效”模式下网络系统的可靠性向量 ..	149
§ 9.6 网络系统最小路集和最小割集的结构函数定义及其求法 ..	156
§ 9.7 具有中介状态的网络系统可靠性分析技术	160
§ 9.8 网络系统的失效相关性处理	171
附录 I 结构系统模糊随机可靠度理论简介	174

附录 II	不交型布尔代数简介	182
附录 III	经典网络的可靠度算法	187
附录 IV	网络可靠性分析通用子程序	201
参考文献		213

第一篇 基本理论和方法

第一章 绪 论

§ 1.1 可靠度在工程设计中的重要性

系统可靠度现行定义为:一个系统在规定的使用期间内,在预期的工作条件下,能正常工作的概率可记为

$$\psi = P(\Omega) \quad (1.1)$$

式中 Ω 代表该结构使用期间在预定条件下“正常工作”这一随机事件。若用 $\bar{\Omega}$ 代表它的对立事件,即在上述条件下“结构失效”,则称

$$P_f = P(\bar{\Omega}) \quad (1.2)$$

为失效概率。很明显,可靠度与失效概率间存在如下关系

$$\psi = 1 - P_f \quad (1.3)$$

利用可靠度进行工程设计,具有以下明显的优越性:

(1) 可靠度表现了安全和经济的统一。如所周知,在任何工程项目的设计中,安全和经济是一对主要矛盾。从上述定义可以看出,这对主要矛盾在可靠度上得到了统一。因为,它一方面代表了对工程项目安全性的要求,另一方面又代表了对工程项目投资的限制。因为过高的可靠度指标会导致过高的投资要求。

(2) 可靠度协调了近期投资和长远效益。对任何一种产品,人们的要求不外就是“物美价廉”。“价廉”对工程和结构来说,一般都理解为工程造价低,这并不全面。“价廉”不仅应包括当前的投资(造价),还应包括它的长远经济效益。后者可以表示为使用过程中和遇到灾害时的损失期望较小。同样的,对“物美”也需要选择适当的参数来描述,那

就是可靠度。工程项目的近期投资 C (造价) 和损失期望 L (代表长远效益) 都是可靠度 ψ 的函数。可靠度 ψ 愈高, 则造价 $C(\psi)$ 愈大, 但遇到灾害时的损失期望 $L(\psi)$ 愈小; 反之, 可靠度低, 则造价虽小, 但损失期望大。所以可靠度是度量近期投资与长远效益的综合尺度。在统一考虑造价与损失期望时, 存在一个最佳的可靠度使得造价与损失期望之和最小, 这样就通过可靠度在近期投资与长远效益之间找到了一个最佳平衡。这就是我们进行优化的准则之一, 用公式表示就是

求 ψ , 使目标函数

$$W(\psi) = C(\psi) + L(\psi) \rightarrow \min \quad (1.4)$$

这个准则对结构, 对工程系统都是适用的。

(3) 可靠度指标是工程设计的综合性约束条件。一般的结构优化设计可以简明地表示为解如下的数学规划:

$$\left. \begin{array}{l} \text{求设计向量 } \bar{x}, \text{ 使目标函数 } W(\bar{x}) \rightarrow \min \\ \text{并满足约束条件 } g_m(\bar{x}) \in G_m (m = 1, 2, \dots, M) \end{array} \right\} \quad (1.5)$$

这里约束条件包括对每个构件截面的应力 σ 、重要结点或截面的位移 u 、结构的频率 ω 、各构件和结构的几何尺寸等所提出的要求。式中, g_m 代表相应的物理量, G_m 为 g_m 的允许范围。

但在一般情况下, 有些结构并不需要满足所有上述条件方能正常工作。例如, 超静定结构的某些赘元构件的强度不足, 甚至破坏, 并不导致结构整体的失效。

实际上, 式(1.5)中的所有约束条件都是为了了一个总目的, 即保证结构的正常工作这一事件 Ω 的实现。但它们却并非都是必要条件。所以数学规划式(1.5)可用数学规划

$$\left. \begin{array}{l} \text{求 } \bar{x}, \text{ 使 } W(\bar{x}) \rightarrow \min \\ \text{并满足 } P_f \leq P_f^a \end{array} \right\} \quad (1.6)$$

来代替, 式中 P_f^a 为失效概率 P_f 的最大允许值。这就是基于可靠性分析的结构优化设计的一种模式, 在理论上最严格, 在概念上最清晰。

§ 1.2 工程中的不确定性信息

在工程的规划、设计、施工、维修各个阶段都存在一些不确定性信息,过去硬把它们简化成确定性信息处理,有时就会得到矛盾的或很不合理的结果。目前人们考虑的有三种不确定性。

(1) 随机性。由于事件的发展过程受到多种偶然因素的干扰,未来的事物大多或多或少地具有随机性。工程结构在施工和服役过程中将遇到什么样的环境作用是不可能预先确知的,必须考虑其随机性。随机性是人们认识到的第一种不确定性,但在很长时期内都受到决定论模式思想者的反对,直到长期的、大量的科学实践证明了它的正确性和必要性时为止。目前,在土木工程设计中,对随机性的考虑主要表现在自然灾害的危险性分析和结构可靠性分析两个领域。解决多次重复随机事件的数学手段是统计数学,包括概率论、数理统计和随机过程理论。研究未来的一次性随机事件的数学工具是决策理论。

(2) 模糊性。目前可以数学处理的模糊性事物是比较简单的。概括起来说,目前人们所考虑的事物的模糊性,主要是指由于不可能给某些事物以明确的定义和评定标准而形成的不确定性。这时人们考虑的对象往往可以表现为某些论域上的模糊集合。土建工程中遇到的主要模糊量有地震烈度、场地等级划分、设计中物理量的允许范围等。解决具有模糊因素的数学工具是模糊集合理论和模糊随机过程理论^[6,7]。

(3) 未确知性。在进行某些决策时,我们所研究和处理的某些因素和信息可能既无随机性又无模糊性,但决策者纯粹由于条件的限制而对它认识不清,也就是说,所掌握的信息不足以确定事物的真实状态和数量关系。这种在决策中需要利用的,纯主观的,认识上的不确定性信息可以称为未确知信息。我们在 1990 年提出了这个概念和一种简便的数学处理方法^[2]。这个方法后来受到数学界一些专家的重视,已发展成为不确定性数学的一个分支的雏形,被称为“未确知数学”。

这个简化处理方法就是,可以把随机性和模糊性视为强不确定性,而把未确知性视为弱不确定性。后者的“弱”表现在当它和前二者(或其一)并存时可合并到前二者(或其一)中一起考虑;当它单独存在时可以用前二者的描述手段表达。这样,在数学表达形式上可以只出现随机性和模糊性,从而使问题得到了极大的简化。

科学地、如实地考虑工程中的不确定性因素,为结构力学开拓了一系列新的领域,例如,广义可靠性理论、结构的不确定性优化设计、模糊随机振动理论等。

关于上述三种不确定性信息的数学处理方法,详见参考文献[2]第二篇。

§ 1.3 广义可靠度的概念

在 § 1.1 节我们介绍了当前关于系统的可靠度的概念和定义,并讨论了它在工程设计中的重要性,但是这种可靠度具有两个重要的局限性:

- (1) 它只考虑了一种不确定性,即随机性。
- (2) 它研究的只是设计方案的可靠性,而不包括真实结构的可靠性。

经过长期的研究,我们拓广了可靠度的概念和定义,并称之为“广义可靠度”^[8,9]。

§ 1.1 所介绍的有关结构可靠度的定义只是反映了“结构安全”这一事件的随机性。在这一理论中,结构所处状态安全的界限是明确的,非此即彼,没有中介状态。而事实上这种界限必然是模糊的,也就是说“结构安全”这一事件本身不可能有一刀切的确定性的定义和评定标准。

结构安全这一事件的模糊性有两个来源:一是结构安全准则的模糊性,二是结构受干扰(如地震荷载等)所可能具有的模糊性。

既然具有模糊性,“结构安全”这一事件就不再是单纯的随机事件 Ω ,而成为“模糊随机事件” $\tilde{\Omega}$ 。这时结构的可靠度的定义应改为

$$\psi = P(\tilde{\Omega}) \quad (1.7)$$

在进一步的研究中我们发现,不仅是随机性,而且模糊性单独也能引起可靠性的问题;进而又认识到,对于一个给定的结构,外部荷载的作用和结构本身的抗力所包含的任何不确定性因素(包括未确知性)都会导致该结构安全程度的不确定性,从而引起可靠性问题,这样就扩大了现有结构可靠度的概念。当然这个概念不仅适用于结构,还可以扩大到任何系统。

为了有所区别,我们称式(1.1)所定义的可靠度(即现行定义)为“随机可靠度”,式(1.7)所定义的为“模糊随机可靠度”,只有模糊性因素时的可靠度为“模糊可靠度”。这些总称为“广义可靠度”。对理论有兴趣的读者可参阅本书附录 I。

当系统的可靠性分析中必须利用未确知性信息和数据时,系统正常工作这一事件就具有了未确知性,从而产生相应的可靠性问题。但如前所述,当未确知性与随机性和模糊性共存时,前者可以合并于后者而不需单独考虑。

以上所讨论的实际上只是结构设计方案的可靠度,新建成的结构的可靠度还依赖于施工条件和施工质量的影响。可将结构的设计方案的可靠度结合施工条件和施工质量,利用结构检测和诊断的手段和模糊综合评判的方法对新建成的结构的可靠度进行综合评定。

为了保证结构经常处于良好的工作状态,应该对它进行跟踪监视和检测,并规划和执行最优的维修策略。由于维修的目的是维护结构的整体功能,因此以可靠度指标作为决策的控制参数是非常适宜的。为此,我们提出了已建成结构的动态服役可靠度的概念,并研究了它的定义和评估方法。这是另一种结构的广义可靠性,它和设计方案的可靠度有本质的不同。详见参考文献[2]第二十章。

在本书附录 I 中,简要地介绍了我们提出的模糊随机可靠度的计