



'96卷

大连理工大学教授学术丛书

工程结构可靠性 理论与应用

RELIABILITY
THEORY AND
ITS APPLICATIONS
FOR ENGINEERING
STRUCTURES

赵国藩 著

大连理工大学出版社

'96卷

大连理工大学教授学术丛书

**RELIABILITY
THEORY AND
ITS APPLICATIONS
FOR ENGINEERING
STRUCTURES**

责任编辑 水舟 刘杰 封面设计 孙宝福

ISBN 7-5611-1111-8



9 787561 111116 >

ISBN 7-5611-1111-8
TU · 26 定价: 18.00 元

大连理工大学教授学术丛书'96 卷

工程结构可靠性理论与应用

赵国藩 著

大连理工大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

工程结构可靠性理论与应用/赵国藩著. —大连:大连理工大学出版社,1996.10

(大连理工大学教授学术丛书'96 卷)

ISBN 7-5611-1111-8

I. 工… I. 赵… III. 工程结构-可靠性-理论 IV. TU311.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 20933 号

大连理工大学教授学术丛书'96 卷

工程结构可靠性理论与应用

赵国藩 著

* * *

大连理工大学出版社出版发行

(大连市凌水河 邮政编码 116024)

大连海事大学印刷厂印刷

* * *

开本: 850×1168 1/32 印张: 11.75 字数: 293 千字
插页: 4

1996 年 10 月第 1 版 1996 年 10 月第 1 次印刷
印数: 1—3000 册

* * *

责任编辑: 水舟 刘杰 责任校对: 春静
封面设计: 孙宝福

* * *

ISBN 7-5611-1111-8

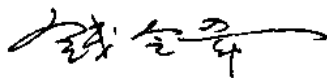
TU·26

定价: 18.00 元

序

工程结构的安全性,当然是人们非常关注的大事。对工程设计人员来说,更是责任重大。最早,设计主要依靠个人经验。后来有了设计规范,设计人员才有章可循,这是一个很大的进步。但由于工程安全性这个问题太复杂,牵涉到的因素很多,连“工程安全性”的概念和定义,也不能像“工程经济性”那样可以比较确切地定性和定量。所以,早期各国的设计规范为工程安全设置的条例,主要还是经验性的,像用许用应力来反映结构的安全系数,明知其局限和不够合理,但是沿用却很广很久。后来,在实践中逐渐认识到有必要把一个笼统的安全系数设计方法,发展为以分项系数表达结构极限状态安全性概率的设计方法。于是就要求用数理统计分别制定结构的荷载系数、材料强度系数和构件工作条件系数等。这是从经验到理性迈出的重要一步,自此,就建立和发展了工程结构可靠性理论的研究,逐渐把以概率论为基础的随机可靠性理论用于工程结构极限状态设计方法。我国学者结合我国具体条件在这方面做了大量工作,于1992年制定了《工程结构可靠度设计统一标准》,这个统一标准将指导各专业工程部门(建筑、铁路、公路、港口、能源、水利等)修订自己的设计准则。这是一项重大改革的基础,曾是科技工作者投入大量人力、物力辛勤工作的结果,为了推广应用和改进发展还将不断进行科学研究、工程调查、数据积累等大量工作。

本书作者赵国藩教授自 50 年代就从事有关工程结构安全设计的研究,并一直参与国家规范的研究与制定工作。本书是他数十年辛勤工作的概括,也反映了我国在工程结构可靠性理论与应用方面的发展,并为“统一标准”的制定提供了科学依据。还值得注意的是作者在自己的深入研究中事物不确定因素的科学处理,和可靠度研究下一步如何解决实际问题而发表的见解。希望此书对工程结构可靠性的研究和设计规范的先进性进一步发挥积极作用。



1996 年 10 月

前 言

工程结构可靠性理论是一门涉及多学科并与工程应用有着密切关系的学科,对结构设计能否符合安全可靠、耐久适用、经济合理、技术先进、确保质量的要求,起着决定性的作用。

近十多年来,根据我国可靠性理论研究成果和工程结构设计经验,借鉴国外经验,国家计委于1985年下达了计综[1985]1号文,指导有关部门组织科研、设计单位和部分高等院校,进行了大规模的工程结构可靠度的科研、工程调查、资料收集以及数据分析等工作。我国的工程技术部门陆续颁布了《工程结构可靠度设计统一标准》(GB 50153-92)以及建筑结构、港口工程结构、水利水电工程结构、铁路工程结构可靠度设计的统一标准,公路工程结构可靠度设计统一标准也正在编制,随之是各工程部门的专业设计规范的编制和修订。其规模之大,深度之广,已超过一些先进的国家,跨入世界先进的行列。

我们在50年代曾借鉴当时苏联经验,结合极限状态设计方法的推广应用,探讨用数理统计法分析材料强度系数和荷载系数,于60年代曾提出用一次二阶矩法分析结构的安全系数。1982年,为在大连理工大学讲授“工程结构可靠度”课程,曾与四川省建筑科学研究院合写了讲义。后经修改补充,于1984年由水利电力出版社出版了《工程结构可靠度》一书,1988年再版。

80年代以来,我们得到国家教委、国家自然科学基金(项目5880385)、中国工程建设标准化协会、交通部标准和规范工作合同

项目、原能源部-水利部水利水电规划设计总院的资助,继续拓展了工程结构可靠性的研究。

1991年7月,“工程结构可靠度”项目获得国家教委科技进步二等奖。1991年3月,国家教委对“钢筋混凝土结构正常使用极限状态可靠度分析”组织了鉴定(鉴定证书:教Q91鉴字062号),1992年8月对“水工钢筋混凝土结构可靠度分析”组织了鉴定(鉴定证书:教Q92鉴字176号),均鉴定为:达到“国际先进水平”,部分成果达到“国际领先水平”,这是对我们的鼓励,也是对我们的鞭策。

从1994年起,又在国家基础性研究重大项目(攀登计划)“重大土木与水利工程安全性与耐久性的基础研究”课题中,承担了“有关建筑结构安全性与耐久性设置标准的基础研究”专题,这是一项为期五年,对工程结构可靠性有更高要求的研究课题。

本书主要内容是随机可靠度的分析方法,其中除介绍中心点法和JC法外,还介绍了我们提出的与JC法精度相当、应用简便的一次二阶矩的映射变换法和实用分析法,考虑随机变量相关的广义随机空间的一次二阶矩法、精度较高的二次二阶矩法和以信息论中的最大熵原理为基础的二次四阶矩法。对功能函数难以直接明确表达的响应面方法和随着计算机的发展而在工程中广泛应用的蒙特卡洛法,以及难度较大的结构体系可靠度分析方法也作了介绍,还介绍了荷载和抗力统计参数的分析方法。这些方法可供决策者及工程技术界,根据结构的重要性、所依据的极限状态方程、要求的计算精度等条件从中选用。

对难度较大、研究较少的模糊可靠度问题,本书介绍了我们的一些初步研究成果,提出了模糊随机概率的可靠度分析模型,讨论了钢筋混凝土结构正常使用极限状态可靠度分析的三种模型,着

重介绍了我们提出的模糊随机可靠度的分析方法。对“已有”结构的可靠度分析及性能评估,也提出了初步研究报告。对于难度很大的知识不完善性问题,如工程界极为关注的结构耐久性问题,借鉴“人工神经网络”、“生存分析”等新方法,做一些“千里之行,始于足下”的工作,这方面的问题有待于继续努力作长期深入的研究。

在工程技术部门的领导下,工程结构可靠性研究已成为我们“结构工程”博士点的重要研究方向之一。80年代以后,先后有博士研究生李云贵、李清富、王恒栋、姚继涛、佟晓利、伍朝晖、贡金鑫、刘天云、巴松涛以及博士后研究人员李云贵、张爱林参加了这项专题。他们尽心尽力,勤奋攻读,钻研新的科学知识,在完成或正在撰写的博士学位论文或博士后工作报告中,对专题作出了重大的贡献。作者作为他们的导师,同他们相互切磋,教学相长,获益匪浅。在《工程结构可靠度》一书于1984年出版和1988年再版之后,又得到他们的通力合作,贡献了他们的聪明才智,完成了本书的写作,作者对此表示衷心的感谢。

德高望重的中国科学院院士钱令希教授在百忙之中为本书作序。大连理工大学数学科学研究所的徐利治教授、王仁宏教授和应用数学系的李学伟教授、滕素珍教授在我们研究和写作中遇到数学疑难问题时,曾给予热情帮助。在本书付梓之时,作者谨表示衷心的感谢。

我们的研究和写作及本书的出版,还得到有关工程技术部门领导的指导和资助,得到大连理工大学校领导、土木建筑学院领导以及大连理工大学出版社的领导和责任编辑的支持与帮助。对此,作者深表谢忱。

作者还要感谢正在我校攻读博士学位的研究生贡金鑫、佟晓利、伍朝晖、刘天云、赵志方、巴松涛和博士后工作者张爱林,他

(她)们牺牲假日的休息,在本书的整理、编辑、例题计算、书稿校核等多方面做了大量的工作。本书就是在这多方面的帮助下得以完成的一本向工程技术界汇报请教的科研报告,期望对正在发展的工程结构可靠性理论及其应用的研究,特别是对各专业部门结构设计统一标准和设计规范的修订、编制,能有所贡献。

由于作者水平有限,本书一定存在着不妥甚至错误之处,作者意在抛砖引玉,尚祈工程技术界不吝赐教指正。

赵国藩

1996年10月于大连理工大学

目 录

序

前 言

第一章 绪 论	1
1.1 影响工程结构可靠性的事物的不确定性	2
1.2 我国工程结构设计标准和规范的变革	4
1.3 工程结构可靠性研究近年发展概况	8
1.4 本书主要内容	13
参考文献	16
第二章 结构随机可靠度分析的基本概念和原理	18
2.1 基本随机变量	18
2.2 结构的极限状态	19
2.2.1 承载能力极限状态	21
2.2.2 正常使用极限状态	21
2.3 结构可靠度	21
2.4 结构可靠指标	25
2.5 结构可靠指标与中心安全系数的关系	29
参考文献	30
第三章 结构可靠度分析的一次二阶矩方法	31
3.1 中心点法	31
3.2 验算点法(JC 法)	33
3.2.1 两个正态随机变量的情况	34
3.2.2 多个正态随机变量的情况	36
3.2.3 非正态随机变量的情况	46

3.3 映射变换法	56
3.4 实用分析法	61
3.5 近似概率极限状态设计法	71
3.5.1 验算点法(JC法)	72
3.5.2 映射变换法	78
3.5.3 实用分析法	80
参考文献	83
第四章 广义随机空间内结构可靠度分析的	
一次二阶矩方法	84
4.1 广义随机空间内结构失效概率的基本表达式	84
4.2 广义随机空间内的中心点法	86
4.3 广义随机空间内的验算点法	87
4.3.1 正态随机变量线性极限状态方程的情况	87
4.3.2 一般情况	89
4.4 广义随机空间内的映射变换法	94
4.5 广义随机空间内的实用分析法	99
参考文献	104
第五章 广义随机空间内结构可靠度分析的	
二次二阶矩方法	105
5.1 多维积分的拉普拉斯渐近方法	106
5.2 广义随机空间内的结构可靠度渐近分析方法	108
5.2.1 失效概率 P_f 表达式的渐近特性	108
5.2.2 失效概率 P_f 的渐近计算	111
5.3 正交随机空间内的结构可靠度渐近分析方法	113
参考文献	125
第六章 结构可靠度分析的二次四阶矩方法	127
6.1 二次四阶矩可靠度分析方法的信息论基础	128
6.1.1 信息与熵(Entropy)	128

6.1.2 最大熵原理	129
6.1.3 以矩为约束条件的最大熵分布	131
6.2 二次四阶矩可靠度分析的基本方法	134
6.2.1 随机变量的统计特征	134
6.2.2 功能函数前四阶矩统计参数的计算	135
6.2.3 结构失效概率的计算	138
参考文献	143
第七章 结构可靠度分析的响应面方法	145
7.1 响应面方法简介	146
7.1.1 响应面的设计	147
7.1.2 待定系数的估算	149
7.2 响应面方法在结构可靠度分析中的应用	149
参考文献	158
第八章 结构体系可靠度的分析方法	159
8.1 结构体系失效概率的基本表达式	161
8.2 结构体系失效概率的区间估计方法	162
8.2.1 宽界限和窄界限公式	162
8.2.2 二维正态分布函数值的计算	164
8.3 结构体系失效概率的点估计方法	171
8.3.1 结构体系失效概率的近似数值分析方法	173
8.3.2 结构体系失效概率的快速半数积分方法	179
参考文献	193
第九章 结构可靠度分析的蒙特卡洛方法	195
9.1 伪随机数的产生和随机变量的抽样	196
9.1.1 产生随机数的方法	196
9.1.2 随机变量的抽样	198
9.1.3 正态随机变量的抽样	200
9.2 结构可靠度蒙特卡洛模拟的直接抽样方法	201

9.3 结构可靠度蒙特卡洛模拟的重要抽样方法	205
9.4 重要抽样法模拟精度的估算	211
参考文献	217
第十章 荷载和抗力的统计分析	219
10.1 荷载的统计分析	219
10.1.1 荷载效应 S 与荷载 Q 的关系	219
10.1.2 荷载与作用	223
10.1.3 荷载的统计分析	224
10.1.4 荷载效应组合	232
10.2 抗力的统计分析	235
10.2.1 抗力统计分析的基本概念	235
10.2.2 单一材料构件抗力 R 的统计分析	237
10.2.3 两种材料构件抗力 R 的统计分析	240
10.2.4 抗力 R 的概率分布	242
参考文献	244
第十一章 结构模糊随机可靠度分析	246
11.1 事件的随机性	247
11.2 事件的模糊性	247
11.3 随机性与模糊性的关系	251
11.4 模糊随机可靠度分析的统一模型	252
参考文献	257
第十二章 钢筋混凝土结构正常使用极限状态的可靠度分析	258
12.1 正常使用极限状态	258
12.2 正常使用极限状态设计中的荷载	263
12.3 正常使用极限状态的可靠度分析	264
12.3.1 第一种计算模式	265
12.3.2 第二种计算模式	267

12.3.3 第三种计算模式	268
12.4 正常使用极限状态模糊可靠度分析的 当量随机化方法	272
12.4.1 模糊变量的当量随机化	273
12.4.2 模糊变量当量随机化后的可靠度分析方法	274
参考文献	278
第十三章 已有结构的可靠度分析与性能评估	282
13.1 已有结构的荷载和抗力	283
13.1.1 已有结构的荷载与荷载效应	283
13.1.2 已有结构构件的抗力	285
13.2 已有结构构件的可靠度分析	286
13.3 已有结构构件性能的可靠性评定	288
13.4 已有结构破损状态的模糊分析	290
13.4.1 已有结构破损程度的描述	290
13.4.2 已有结构破损状态的模糊分析	291
参考文献	294
第十四章 钢筋混凝土结构的耐久性	296
14.1 钢筋的腐蚀机理及主要影响因素	299
14.1.1 钢筋腐蚀机理	299
14.1.2 钢筋混凝土中钢筋腐蚀的主要因素	300
14.2 混凝土碳化和氯离子侵蚀的人工神经网络模型	303
14.2.1 人工神经网络的拓扑结构和数学描述	304
14.2.2 混凝土碳化的人工神经网络模型	306
14.2.3 氯离子侵蚀的人工神经网络模型	310
14.3 混凝土中钢筋锈蚀的概率分析	314
14.3.1 参数的线性无偏估计	315
14.3.2 钢筋锈蚀的可靠度分析	318
14.4 钢筋混凝土结构的耐久性生存分析	322

14.4.1 生存分析的寿命表方法	322
14.4.2 耐久性寿命的卡普兰—梅尔(Kaplan—Meier)估计	324
参考文献	327
附 录	329
附表 1 标准正态概率密度函数值表	329
附表 2 标准正态概率分布函数值表	331
附表 3 χ^2 分布函数值表	333
附表 4 K—S 检验临界值表 [$F(x)$ 为指数型函数, 参数未知]	334
附表 5 K—S 检验临界值表 [$F(x)$ 是正态或对数正态函数, 参数未知]	335
附表 6 二维标准正态联合分布函数 $\Phi_2(-\beta, -\beta; \rho)$ 数值表	336
附表 7 正态分布时参数线性无偏估计的系数 a_i 和 b_i ...	344
附表 8 极值 I 型分布时参数线性无偏估计的系数 a_i 和 b_i	346

Contents

Foreword

Preface

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Uncertainties of events influencing structural reliability	2
1.2 Transformation of structural design standards and codes in China	4
1.3 General situation of development of structural reliability research in recent years	8
1.4 Main contents of this book	13
References	16
Chapter 2 The fundamental concept and principle of structural random reliability analysis	18
2.1 Basic random variables	18
2.2 Limit states of a structure	19
2.2.1 Ultimate limit states	21
2.2.2 Serviceability limit states	21
2.3 Structural reliability	21
2.4 Structural reliability index	25
2.5 Relationship between structural reliability index and central safety factor	29
References	30
Chapter 3 The first-order second-moment method	