



结构 可靠度理论

JIE GOU KE KAO
DU LI LUN

● 赵国藩 金伟良 贡金鑫 著

中国建筑工业出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

结构可靠度理论

赵国藩 金伟良 贡金鑫 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

结构可靠度理论/赵国藩等著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2000
ISBN 7-112-04564-9

I. 结… II. 赵… III. 工程结构—结构可靠性—可靠性理论 IV. TB114.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 01339 号

本书比较系统地介绍了工程结构可靠度理论的有关内容和最新研究成果。主要内容包括: 结构随机可靠度分析的基本概念和原理, 结构可靠度分析的一次二阶矩方法, 广义随机空间内结构可靠度分析的二次二阶矩方法, 结构体系可靠度分析, 结构可靠度的数值模拟, 钢筋混凝土结构施工期可靠度分析, 钢筋混凝土结构老化期可靠度分析及国际标准 ISO 2394: 1998《结构可靠性总原则》简介等。

本书可作为高等院校土建、水利工程类专业研究生和高年级本科生的教材和教学参考书, 也可供相关专业的科研人员参考。

责任编辑: 郇锁林

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

结构可靠度理论

赵国藩 金伟良 贡金鑫 著

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京二二〇七工厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 11¼ 字数: 274 千字

2000 年 12 月第一版 2000 年 12 月第一次印刷

印数: 1—2000 册 定价: 24.00 元

ISBN 7-112-04564-9

TU·4081 (10014)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

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,对结构设计是否符合安全可靠、耐久适用、经济合理、技术先进、确保质量的要求,起着重要的作用。

近十几年来,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,我国工程技术部门陆续编制和颁布了第一层次的《工程结构可靠度设计统一标准》(GB 50152—92)以及属第二层次的建筑结构、港口工程结构、水利水电工程结构、铁路工程结构和公路工程结构的可靠度设计统一标准,随之是各工程部门的专业设计规范的编制和修订。结构可靠度设计统一标准的颁布和实施已说明可靠性理论及其应用的研究在我国取得了很大的成就,但为了今后的发展和统一标准的修订和补充,还应进一步研究。

大连理工大学自20世纪50年代起,曾借鉴前苏联的经验,结合极限状态设计法的推广应用,探讨用数理统计法分析材料强度系数和荷载系数,于60年代提出用一次二阶矩法分析结构的安全系数。80年代以来,先后得到原国家教委、国家自然科学基金、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项目的资助,开展了工程结构可靠性的研究,90年代以来又得到国家攀登计划、国家自然科学基金和国家教育部博士点基金项目的资助,继续拓展工程结构可靠性的研究。除发表了有关研究论文外,于1984年出版了合著《工程结构可靠度》,1996年出版了专著《工程结构可靠性理论与应用》。研究成果分别被鉴定为“国际先进水平”,部分“国际领先水平”,先后获国家教委科技进步二等奖1项,辽宁省科技进步二等奖2项,国家科技进步二等奖1项。

结合国家攀登计划和国家自然科学基金项目,大连理工大学在结构可靠性基本理论、结构模糊可靠度、结构体系可靠度、结构可靠度分析的蒙特卡罗方法、随机有限元与结构动力可靠度、结构抗震可靠度、基于可靠度的结构优化设计、结构荷载效应组合、结构施工期可靠度和结构老化期可靠度、结构维修加固及结构耐久性方面进行了研究,部分成果已在1996年出版的专著《工程结构可靠性理论与应用》一书中作了介绍。本书除继续介绍了结构可靠性理论的基本内容(如一次二阶矩可靠度分析方法)外,对《工程结构可靠性理论与应用》一书的部分章节作了进一步的调整和删减,并增补了近期取得的一些新成果,如钢筋混凝土结构施工期可靠度和老化期可靠度的研究成果,还

介绍了国际标准化组织 ISO 2394 于 1998 年出版的《结构可靠性总原则》的主要内容,以期使读者对国际上可靠性理论的应用有一个初步的了解。另外,浙江大学在结构可靠度数值模拟(蒙特卡罗方法)、结构体系可靠度及海洋工程结构可靠度分析等方面均取得了可喜的成就,本书第 6 章介绍了其中结构可靠度的数值模拟。本书第 1、2、3、4 章由赵国藩编写,第 6 章由金伟良编写,第 5、7、8 章由贡金鑫编写,附录 A 由贡金鑫、赵尚传编写。

两位合著者中,金伟良博士是浙江大学教授、博士生导师,贡金鑫博士是大连理工大学博士后工作站工作的博士后,在可靠度专题研究方面做出重要贡献。还有我的其他 80 年代、90 年代已毕业和正在学习的博士研究生李云贵、李清富、王恒栋、姚继涛、佟晓利、伍朝晖、刘天云、巴松涛、马宏旺、赵尚传、罗乃东、董安正等,他们的研究成果是本书内容的重要组成部分。中国建筑工业出版社郦锁林副编审和其他工作人员,为本书的出版付出了辛勤的劳动,作者对他们表示衷心的感谢。

本书分别得到国家攀登计划项目、国家自然科学基金项目和国家科学技术著作出版基金的资助,在此也表示衷心的感谢。

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。

中国工程院院士 **赵国藩**

2000 年 11 月于大连理工大学

目 录

前 言	3
1 绪 论	1
1.1 影响工程结构可靠性的三种不确定性	1
1.1.1 事物的随机性	1
1.1.2 事物的模糊性	2
1.1.3 事物知识的不完善性	2
1.2 结构可靠性理论的发展历史及工程应用	2
1.3 攀登计划项目专题及国家自然科学基金项目的研究内容	3
1.3.1 结构可靠性基本理论	3
1.3.2 结构模糊可靠度	4
1.3.3 结构体系可靠度	4
1.3.4 结构可靠度分析的蒙特卡罗方法	5
1.3.5 随机有限元与结构动力可靠度	5
1.3.6 结构抗震可靠度	6
1.3.7 基于可靠度的结构优化设计	6
1.3.8 结构荷载效应组合	6
1.3.9 结构施工期和老化期可靠度	7
1.4 本书的主要内容	9
参考文献	10
2 结构随机可靠度分析的基本概念和原理	12
2.1 结构设计中的变量	12
2.2 结构的极限状态	13
2.2.1 承载能力极限状态	14
2.2.2 正常使用极限状态	14
2.3 结构可靠度	14
2.4 结构可靠指标	17
2.5 结构可靠指标与中心安全系数的关系	19
参考文献	20
3 结构可靠度分析的一次二阶矩方法	21
3.1 中心点法	21
3.2 验算点法(JC法)	22
3.2.1 两个正态随机变量的情况	22
3.2.2 多个正态随机变量的情况	24

3.2.3	非正态随机变量的情况	29
3.3	映射变换法	35
3.4	实用分析法	38
3.5	相关随机变量的可靠度分析方法	44
3.5.1	广义随机空间的概念	44
3.5.2	广义随机空间内的可靠度分析方法	45
	参考文献	52
4	广义随机空间内结构可靠度分析的二次二阶矩方法	53
4.1	多维积分的拉普拉斯渐近方法	53
4.2	广义随机空间内的结构可靠度渐近分析方法	54
4.2.1	失效概率 p_f 表达式的渐近特性	54
4.2.2	失效概率 p_f 的渐近计算	56
4.3	正交随机空间内的结构可靠度渐近分析方法	57
	参考文献	64
5	结构体系可靠度分析	65
5.1	结构主要失效模式的识别	66
5.1.1	结构极限状态与线性互补功能方程	66
5.1.2	结构效应的计算	66
5.1.3	线性互补功能方程的求解	67
5.2	结构体系失效概率的计算	68
5.2.1	结构体系失效概率的基本表达式	68
5.2.2	结构体系失效概率的区间估计方法	69
5.2.3	结构体系失效概率的点估计方法	72
	参考文献	77
6	结构可靠度的数值模拟	79
6.1	蒙特卡罗法	79
6.2	抽样方差减缩技术	80
6.2.1	对偶抽样技巧	80
6.2.2	条件期望抽样技巧	81
6.2.3	重要抽样技巧	81
6.2.4	分层抽样法	82
6.2.5	控制变数法	83
6.2.6	相关抽样法	83
6.3	复合重要抽样法	84
6.3.1	复合重要抽样	84
6.3.2	算例	87
6.4	V空间的重要抽样法	90
6.4.1	V空间	90
6.4.2	重要抽样区域	91

6.4.3	重要抽样函数	93
6.4.4	模拟过程	94
6.4.5	算例	94
6.4.6	评价	98
	参考文献	98
7	钢筋混凝土结构施工期可靠度分析	101
7.1	影响结构施工期可靠性的因素	102
7.1.1	设计缺陷	103
7.1.2	施工缺陷	103
7.2	结构施工期荷载分析	104
7.2.1	结构施工期荷载的分类	104
7.2.2	结构施工期荷载的调查与统计	104
7.3	结构施工期抗力分析	107
7.3.1	混凝土强度和弹性模量随时间的变化	107
7.3.2	施工期混凝土结构的抗力	109
7.4	施工期结构分析	111
7.5	施工期结构可靠度分析	112
	参考文献	117
8	钢筋混凝土结构老化期可靠度分析	120
8.1	影响结构抗力变化的因素	120
8.1.1	荷载作用的影响	121
8.1.2	环境作用的影响	121
8.1.3	材料内部作用的影响	123
8.2	结构抗力随时间变化的模型	123
8.3	考虑抗力随时间变化的结构可靠度分析方法	125
8.4	结构的危险率	129
8.5	大气腐蚀环境下钢筋混凝土结构的可靠度	132
8.5.1	混凝土碳化	132
8.5.2	钢筋锈蚀	133
8.5.3	钢筋混凝土构件腐蚀后的抗力	134
8.5.4	大气环境下钢筋混凝土构件的可靠度分析	135
8.6	已有结构的可靠度评估	137
8.6.1	已有结构的抗力和荷载	137
8.6.2	已有结构的可靠度评估	138
	参考文献	138
附录 A	国际标准 ISO 2394:1998《结构可靠性总原则》简介	141
A.1	引言	141
A.2	国际标准 ISO 2394:1998《结构可靠性总原则》的适用范围	142
A.3	国际标准 ISO 2394:1998《结构可靠性总原则》的内容简介	142

A. 3.1	要求和概念	142
A. 3.2	极限状态设计原则	144
A. 3.3	基本变量	145
A. 3.4	模型	147
A. 3.5	基于概率的设计原则	153
A. 3.6	分项系数模式	158
A. 3.7	已有结构的评估	163
A. 4	结束语	164
	参考文献	164
附录 B	常用附表	166
附表 1	标准正态概率密度函数值	166
附表 2	标准正态概率分布函数值	168
附表 3	χ^2 分布函数值	170
附表 4	$K-S$ 检验临界值 [$F(x)$ 为指数型函数,参数未知]	171
附表 5	$K-S$ 检验临界值 [$F(x)$ 为正态或对数正态函数,参数未知]	172

1 绪 论

钢、木、砖石、混凝土及钢筋混凝土等建造的工业与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,需要安全可靠地承受设备、人群、车辆等使用荷载,经受风、雪、冰、雨、日照或是波浪、水流、土压力、地震等自然环境作用。它们的安全可靠与否,不但影响工农业生产,而且还常常关系到人身安全。特别是一些重要的纪念性建筑物,作为一个时代的文化特征,将流传后世,对安全可靠、适用、美观、耐久等方面,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,进行可行性分析,选择合理的结构总体布置、结构方案和型式;第二步是根据选定的结构型式,设计结构各构件的截面和可行的施工方案。第二步的内容中,设计部分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。

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能承受正常施工和正常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在正常维修和养护下,具有足够的耐久性;④在偶然事件(如地震、爆炸、龙卷风等)发生时及发生后,能够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项,关系到人身财产安全,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^[1]。用来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,是本书讨论的重点。

1.1 影响工程结构可靠性的三种不确定性

工程结构要求具有一定的可靠性,是因为工程结构在设计、施工、使用过程中具有种种影响结构安全、适用、耐久的不确定性。这些不确定性大致有以下几个方面:

1.1.1 事物的随机性

所谓事物的随机性,是事件发生的条件不充分,使得在条件与事件之间不能出现必然的因果关系,从而事件的出现与否表现出不确定性,这种不确定性称为随机性。例如,掷一枚硬币,事先不能肯定出现的是正面还是反面,是随机的。但掷后出现的是正面或是反面,则是明确而不含糊的。不是正面就是反面,“非此即彼”。又例如,混凝土试块的强度试验,事先不能决定该试块出现什么强度数值,是随机的。但一经试验,这次试验的强度值就是明确而不含糊的。研究事物随机性问题的数学方法主要有概率论、数理统计和随机过程。

1.1.2 事物的模糊性

事物本身的概念是模糊的,即一个对象是否符合这个概念是难以确定的,也就是说一个集合到底包含哪些事物是模糊的,而非明确的,主要表现在客观事物差异的中间过渡中的“不分明性”,也即“模糊性”。例如,“高个与矮个”、“多云与少云”,“冷与热”等等都难以客观明确地划定界限。又如,工程结构中的“正常与不正常”、“适用与不适用”、“耐久与不耐久”、“安全与危险”等也都没有客观和明确的界限。日常事物中存在着大量模糊性事件。

研究和处理模糊性的数学方法主要是1965年美国自动控制专家查德(L. A. Zadeh)教授创始的“模糊数学”。

1.1.3 事物知识的不完善性

事物是由若干相互联系、相互作用的要素所构成的具有特定功能的有机整体。人们常用颜色来简单地描述掌握事物知识的完善程度。按照知识掌握的完善程度把事物(或称系统)分为三类:白色系统、黑色系统和灰色系统。

白色系统是指完全掌握其知识的系统,如一批钢筋是一个系统,它有多少根,钢筋的外形尺寸及其屈服强度、极限强度等,可以通过检验和试验清楚地了解。

黑色系统是指人们毫无知识的系统。例如,人类已可乘坐宇宙飞船到达月球。但是,在现有的科学技术条件下,如欲在月球上建造住宅,则对“月球建筑”的设计和施工目前是毫无所知的。

灰色系统是指部分掌握其知识、部分未掌握其知识的系统,系统中既有白色参数,又有黑色参数。例如,对于地震,准确地掌握何时何地发生地震,在现时的科学技术条件下,还是做不到的。但是,地震发生后的震级或烈度,人们还是可以评定的,尽管震级或烈度的评定带有一定的模糊性。

白色、灰色、黑色系统都与人的认识水平有关,随着科学技术的进步,过去认为不可知的事物(黑色系统)可以转变为灰色系统。灰色系统也可能变为白色系统。

工程结构中的知识的不完善性可分为两种:一种是客观信息的不完善性,是由于客观条件的限制而造成的,如由于量测的困难,不能获得所需要的足够的资料;另一种是主观知识的不完善性,主要是人对客观事物的认识不清晰,如由于科学技术发展水平的限制,对“待建”桥梁未来承受的车辆荷载的情况不能完全掌握。

对知识不完善性的描述还没有成熟的数学方法,但在工程实践中必须考虑时,目前只能由有经验的专家对这种不确定性进行评估,引入经验参数。例如,对前述的“待建”桥梁未来承受的车辆荷载可引入经验的发展系数,作为一种权宜的处理方法。

工程结构的不确定性还有其他的分类方法,可参见文献[2]。

1.2 结构可靠度理论的发展历史及工程应用

在1984年出版的著作[1]中,曾对工程结构可靠性早期的发展,及钢筋混凝土结构设计规范安全系数取值的变革过程作过梗概性介绍,这一阶段工程结构可靠性的研究处于基本理论和规范应用阶段。在1996年出版的著作[2]的绪论中,除介绍了国际有影响的结构可靠性会议的一些情况外,根据国内四届可靠性会议的总结,重点介绍了1982~1992年十年间我国工程结构可靠性理论与应用的成果与发展,主要有以下几个方面的内容^[3]。

- (1)结构可靠性一般理论的若干问题。
- (2)结构体系可靠性问题。
- (3)结构动力可靠性问题。
- (4)结构疲劳可靠性问题。
- (5)岩土工程的可靠性问题。
- (6)已有工程结构的可靠性鉴定问题。

第五届国内工程结构可靠性会议,原定于1999年在杭州召开,后于2000年与土木工程学会第九届年会合开。尽管这届会议不是工程结构可靠性的专门系列会议,但会议的主题是“工程的安全性及耐久性”^[4],会议就工程结构可靠性中的一些基本问题及在工程规范的应用展开了讨论。这次会议的主题及会议的论文,反映了最近工程结构可靠性研究与应用的新发展,即由正常使用期可靠性的研究,拓展为结构生命全过程可靠性的研究,以可靠度为尺度来分析、估计结构的耐久性,进而为结构的耐久性设计提供参考,或为已有结构的维修、加固提供依据。

工程结构可靠性研究的发展,促进了我国结构设计理论的改革,由中国建筑科学研究院会同房屋建筑、铁路、公路、港口及水利水电工程结构可靠度设计统一标准的各主编单位,组织了有关设计、科研和高等院校等单位通力合作,开展了理论研究、资料调查和数据实测工作,总结了我国工程实践经验,借鉴了国际标准[《结构可靠性总原则》(ISO 2394)],征求了全国有关单位意见,共同编制了属第一层次的《工程结构可靠度设计统一标准》(GB50153—92)^[5]。之后上述五大部门又各自根据本部门专业结构的特点,以第一层次的统一标准为指导,编制了适合于本专业、用于指导编制和修订专业结构设计规范的可靠度设计统一标准^[6~10],主要是采用以随机可靠性理论为基础,以分项系数表达的概率极限状态设计方法,作为我国土木、建筑、水利等专业结构设计规范改革修订的依据。

1.3 攀登计划项目专题及国家自然科学基金项目的研究内容

结构可靠性理论在结构设计规范中的应用,使结构设计理论进入到一个新的阶段,但仍有许多新的问题需要深入分析和解决,特别是近年暴露出来的大量结构耐久性问题,已成为影响结构安全性和适用性及工程设计中必须考虑的重要问题。为此国家科委1994年批准了重大基础性研究项目(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”,大连理工大学承担了第6.1子题“有关建筑结构安全性和耐久性的基础研究”,之后又获得国家自然科学基金“工程结构生命全过程可靠度研究”(59878008)的资助,根据工程需要,在结构可靠度基本方法和理论、钢筋混凝土结构施工期和老化期可靠度分析等方面做了一些探讨,主要包括以下几个方面^[11]。

1.3.1 结构可靠性基本理论

结构可靠性的基本理论和方法是结构可靠度分析和设计的前提,它包括结构可靠度的基本定义、概念和基本算法。一次二阶矩方法是目前常用的结构可靠度分析方法,尽管计算简便,但并不能适用于所有情况,需要根据不同问题的特点和要求,作进一步的研究。有关的研究涉及到5个方面。

- (1)目前的结构可靠度分析方法仅局限于结构随机变量不相关的情形,而实际工程中,

有些情况下随机变量可能是相关的,如以自重为主要荷载的结构的荷载与抗力,这时需要考虑随机变量的相关性。提出了广义随机空间的概念,建立了广义随机空间内考虑随机变量相关性的结构可靠度实用分析方法^[12],扩大了现有可靠度分析方法的适用范围。与国外的方法相比,不需进行正交变换,计算简便。

(2)目前结构可靠指标的计算是针对线性极限状态方程或线性化极限状态方程而言的,它只适用于结构极限状态方程非线性程度不高的情况,而实际工程中有些情况下的结构极限状态方程非线性程度可能很高,这时需考虑极限状态方程的非线性项。提出了基于拉普拉斯(Laplace)逼近原理的渐近可靠度分析方法^[13],考虑了极限状态方程的二次非线性的影响,提高了计算精度。

(3)基于信息论中的最大熵原理,提出了结构可靠度分析的四阶矩方法。在考虑了极限状态方程非线性影响的同时,也考虑了随机变量高阶矩的影响^[14];同时提出用改进罗森布鲁斯(Rosenblueth)方法解决极限状态方程不易求导的问题^[15]。

(4)传统的结构可靠度分析都是在正态空间进行的,当随机变量不服从正态分布时,则需当量正态化或映射变换为正态随机变量,若非正态随机变量的概率分布函数不存在显式,上述变换较为困难。提出了原始随机空间内可靠度分析的一次和二次方法^[16],这一方法不使用随机变量的概率分布函数而只使用概率密度函数,降低了对初始条件的要求,避免了传统的结构可靠度分析方法遇到的困难。

(5)大型复杂结构的内力和位移一般要用有限元方法进行分析,这时结构的响应与结构上作用荷载之间的关系不能再用一个显式表示,当对结构或结构构件进行可靠度分析时,所建立的极限状态方程也不再是一个显式,从而造成了迭代求解可靠指标的困难。应用响应面的概念,提出了与结构可靠度几何法相结合的响应面方法^[17],给出了新的计算迭代格式。该方法便于与通用的有限元软件联接,以求解大型复杂结构的可靠度。

1.3.2 结构模糊可靠度

在结构可靠度分析中,除随机性外,还存在模糊性,如钢筋混凝土结构的允许裂缝宽度和允许变形是模糊的,大或小反映了人们的接受程度,不代表完全失效。应用模糊数学方法,提出了结构模糊-随机可靠度的统一模型,可以同时考虑变量的随机性和模糊性,扩大了结构可靠度分析的范围^[2],还针对某些特定情况,提出了模糊变量当量随机化的方法,以简化计算^[2]。

1.3.3 结构体系可靠度

一个结构是由多个构件相互连接而形成的超静定体系,一个构件的破坏并不意味着整个结构的失效,只有当多个构件的破坏使结构形成机构时,结构才发生破坏;即使对于静定结构体系,不同构件的破坏,会形成不同的失效路径,构成最薄弱链系统。因此,结构构件的可靠度与结构体系的可靠度是不同的,而目前的研究只是处于构件水平上,真正实现结构体系的可靠度分析尚有许多工作要做,结合项目在这方面的研究包括3个方面。

(1)在寻找结构主要失效模式方面,通过发展线性互补规划中的Lemke算法,并与可靠度中的分支-约界法相结合,提出一种识别结构主要失效模式的有效算法^[18]。这一算法既不用进行结构重分析,也无须通过判断结构刚度矩阵的奇异性来识别主要失效模式,从而使计算量减少,提高了效率,并以此为基础对钢筋混凝土框架结构的可靠度进行了分析^[19]。

(2)在结构体系失效概率计算方面,分别研究了体系失效概率的区间估计法和点估计

法。区间估计法计算的是结构体系失效概率的上下界,其首要问题是如何计算两个或多个失效模式同时出现的概率,为此提出了两种计算两个失效模式同时出现概率的方法^[20,21],可电算,也可手算,简便实用,同时还提出了计算多个失效模式同时出现概率的数论方法^[22],可用于计算结构体系失效概率的上下界公式的高阶项。点估计法是通过近似方法估算体系失效概率的值,分别提出了泰勒级数展开法^[23]和多个极限状态方程两两逐步线性化的方法^[24],计算简便、效率较高。

(3)并联结构体系可靠度的计算是工程中研究较少的问题,为此提出了并联结构体系可靠度的一种计算方法,通过将由若干个非线性极限状态方程表示的并联结构体系可靠度问题转化为一个极限状态方程表示的构件可靠度问题,实现问题的求解^[25]。另外还提出并联结构体系可靠度的二次算法^[26]。

1.3.4 结构可靠度分析的蒙特卡罗方法

蒙特卡罗法是结构可靠度分析的基本方法之一,由于具有相对精确的特点,除用于复杂情况的可靠度分析外,也常用于各种可靠度近似方法分析精度的校核。通过研究,分别提出了使结构失效概率估计值方差最小的重要抽样方法^[27]和对偶重要抽样方法^[28],在计算量增加不大的情况下,提高了分析效率。需要说明的是,本书介绍的蒙特卡罗分析方法是浙江大学在这方面的研究成果。

1.3.5 随机有限元与结构动力可靠度

荷载效应和抗力是结构可靠度分析的两个基本变量,它们均与结构的材料特性(弹性模量、强度等)有关,而对于一个大型复杂结构,由于建造过程中材料的不均匀性,结构的材料性能存在着空间变异性(随机场),在这种情况下,用以离散化为手段的有限元方法进行分析是合适的,对于复杂结构的动力分析也是如此。在这方面的的工作包括:

(1)随机场分析。对于随机过程(时间随机场),基于 K-L 展开法,将相关函数转化为功率谱密度函数,得到了简单的分解表达式;对于空间随机场,通过构造标准独立随机变量基,提出了一种以少量随机变量表示随机场的投影展开方法^[29];进一步针对时-空随机场(可模拟风荷载、地震动输入),推导出简单的以随机变量表示的分解形式^[30]。

(2)随机结构静态分析。通过随机空间分解与随机变分等方法,将随机结构模型转化为一种确定性结构;进一步分析其特点,提出一种子结构迭代求解方程组的预优共轭梯度法(PCG),其迭代具有明确的物理意义,并且预优矩阵不需要是 M 阵,具有相当快的迭代收敛速度^[30]。

(3)随机结构的动态响应分析。通过推广 Hamilton 原理,使在外随机荷载作用下的具有质量、阻尼和刚度等随机性的结构问题转化为相应的确定性的高阶动力问题。对于一般阻尼的影响,采用两步降维法,即先用 Arnoldi 方法进行子空间降维,在通过改进的 QR 法选择满足精度的特征值按升序构造子空间,最后应用精细积分法求解了不同荷载情况的结构随机响应。以上计算全部在时域进行,简化了计算过程^[30]。

(4)随机结构的可靠度分析。以一次二阶矩法为基础,将结构动力可靠度问题转化为静力结构体系可靠度问题,即把动力问题的极限超曲面用一系列超平面逼近,每一时刻都用超平面来近似极限超曲面,形成一个失效模式;而结构可靠度则由失效模式串联的结构体系可靠度来计算,这不但避免了确定随机过程及其导数过程联合分布函数的困难,而且克服了极限状态曲面不可微的缺点,最后通过求得的几个主要失效模式计算结构动力可靠度^[30]。

1.3.6 结构抗震可靠度

结构的抗震可靠度属结构动力可靠度研究的范畴,而这里讲的抗震可靠度,是以抗震规范为基础的抗震可靠度问题,与以力学理论为基础的动力可靠度在分析方法上有所不同。结构的抗震可靠度分析是一个复杂的问题,它除与结构本身的抵抗能力(承载力、变形、耗能能力等)有关外,还与地震发生的特性(强度、频谱、持时)有关。在结构抗震可靠度分析方面的研究包括2个方面。

(1)在加速度峰值、特征周期、持续时间相同的条件下,利用规范给出的同一目标反应谱,合成29条人工地震波,对于选定的结构计算模型,输入地震波进行时程分析,通过最大熵法统计得出结构位移最大值的概率密度函数,进而推断结构的失效概率和可靠指标^[28]。

(2)“强柱弱梁”、“强剪弱弯”是保证钢筋混凝土结构地震作用下不发生整体倒塌的基本设计原则。利用可靠度分析方法,研究了在现行规范的基本规定下,柱先于梁屈服和剪切破坏先于弯曲破坏的概率。根据分析结果,提出对有关参数进行调整的建议^[31]。

1.3.7 基于可靠度的结构优化设计

以可靠度为基础的优化设计是结构优化设计的一个重要发展。传统的方法要分别在两个层次上迭代,对于有多个构件组成的大型复杂结构,计算量过大。提出了以可靠度为约束的结构优化设计实用方法^[32],体现了分部优化的设计思想,避免了在构件层次上的反复迭代,提高了优化设计效率,便于工程应用。

1.3.8 结构荷载效应组合

结构在其使用过程中,会受到多个可变荷载的作用,结构设计基准期内的可靠度与可变荷载效应最大值的概率分布有关,而在设计基准期内各荷载同时达到最大值的概率是很小的。因此,在结构可靠度分析和设计中要进行荷载效应的组合。结合项目进行的研究包括3个方面。

(1)持久性荷载和临时性荷载是建筑结构中最基本的两种荷载,两者的组合也是建筑结构最基本的荷载组合。在假定持久性荷载为泊松过程,临时可变荷载为滤过泊松过程的条件下,给出了两者组合的最大值概率分布函数的解析解,这一解析解可用于校核其他近似方法的计算结果。对这一解析解进行简化分析表明,从实用角度考虑,将此两种荷载简化为等时段的随机过程模型进行分析得到的结果是可以接受的^[33]。

(2)高层建筑结构的柱要承担其上各层传递下来的全部恒荷载和活荷载。按照结构荷载规范,在设计柱时,要对活荷载标准值乘以一个与其上楼层数有关的折减系数,其中涉及到活荷载的概率组合问题。应用蒙特卡罗方法和经蒙特卡罗方法检验证明计算结果可靠的实用数值分析方法,对高层建筑结构柱荷载的折减系数进行了概率分析,计算了不同楼层柱的可靠指标^[34]。分析结果表明,由于临时性活荷载的持续时间很短,即使结构的楼层数较多,其相遇的概率也不大,分析中可视为不同时间点上的脉冲;《建筑结构荷载规范》(GBJ9—87)规定的活荷载折减系数基本是可行的。

(3)荷载效应组合是结构设计和可靠度分析考虑的基本问题之一。目前已有多种可供工程应用的组合规则,但这些组合规则都是相对于独立的荷载效应而言的,而在有些情况下荷载效应间可能是相关的,因此,需要研究相关荷载效应的组合问题。根据相关荷载效应的特点,结合Turkstra组合规则,提出相关荷载效应的实用组合方法。分析计算表明,荷载效应的相关性对结构的可靠度有明显的影响^[35]。

1.3.9 结构施工期和老化期可靠度

结构可靠度是指结构在规定的时间内、规定的条件下完成预定功能的能力。这里规定的时间是“设计基准期”，规定的条件是指“正常设计，正常施工，正常使用”。在各专业结构按照本部门的统一标准进行编制和修订时，主要是针对这个时间段和以这三个条件为基础进行的。但是，一个结构从施工建造到投入使用，再到使用若干年后，性能逐渐退化，进入老化期，经历了一个类似人的生命历程，那就是幼年期、中年期和老年期。在施工建造期（幼年期），失效的风险率大；到使用期（中年期或壮年期），失效风险率降低；到老化期（老年期），失效风险率又逐渐提高，如果经过维修、加固等措施，失效风险率又会有所下降。结构失效风险率与时间过程的关系如图 1-1 所示，因其形似浴盆，称之为“浴盆曲线”。在结构生命全过程的三个阶段中，目前已对正常使用期结构的可靠度进行了大量的研究，研究成果成为编制结构设计统一标准的基础，但对风险率较高的施工期和老化期研究较少，这两个阶段是我们近期研究的重点。

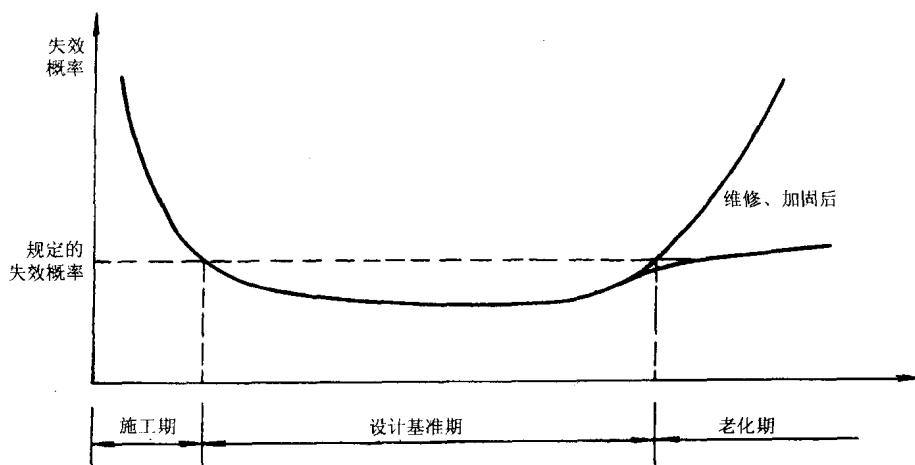


图 1-1 结构使用期与失效概率的关系

1.3.9.1 结构施工期可靠度

(1)通过对施工现场的调查，初步分析了施工过程中出现的各种荷载^[36]；根据施工过程中混凝土强度随时间不断变化的特点，分析了钢筋混凝土受弯构件和受压构件抗力的变化过程，并以独立增量过程为基础，提出了施工期结构抗力的随机过程模型，给出不同时刻结构抗力的相关函数^[37,38]。

(2)根据施工过程中结构形状、混凝土材料的性质（强度、弹性模量）以及施工荷载均随时间变化的特点，分析了施工期钢筋混凝土结构的抗弯和抗冲切可靠度，研究了支撑方案、施工周期以及可变荷载与永久荷载效应之比对施工期结构可靠度的影响^[36]。

(3)基于一次二阶矩方法，推导了结构可靠指标对随机变量统计参数的敏感度公式，并对钢筋混凝土受弯、受剪、轴压、大偏心受压构件进行了敏感性分析，以明确各种结构构件施工过程中应重点控制的项目，提高施工质量控制的主动性^[36]。

(4)在结构施工期可靠度分析的基础上，根据使结构的初始费用（建筑材料、建造费用及用工费用和支撑系统的材料费用及用工费用）和结构倒塌损失之和最小的原则，初步建立了

结构施工期的风险分析模型。在保证结构施工期必要安全性的基础上,可以为施工支撑方案的合理选择提供参考^[36]。

1.3.9.2 结构老化期可靠度、结构维修、加固及结构耐久性

(1)在使用环境、自然环境及材料内部因素的作用下,结构的性能会逐步劣化,其结果是结构的抗力减小,在规定的时间内和规定的条件下结构完成预定功能的能力降低^[39,40]。在论述了结构性能劣化原因的基础上,提出了简便易行且形式上与现行的统一标准方法相协调的、考虑抗力随时间变化的可靠度分析方法^[41],这一方法可用于结构的可靠度设计,也可用于已有结构的可靠度评估^[42]。

(2)维修是延长老化结构使用寿命的一种有效方法,当结构使用功能改变或结构存在设计和施工缺陷时,根据鉴定情况,也可能需要加固。结构加固后的工作特点是存在应变滞后现象。提出了结构加固后可靠度的分析方法,分析了现行加固规范所具有的可靠度水平^[43],为加固规范向以概率理论为基础的方向发展提供了参考。

(3)大气环境下钢筋锈蚀是钢筋混凝土结构耐久性失效的主要形式之一。钢筋锈蚀的前提条件是混凝土碳化,两者都与环境条件、设计和施工条件及材料性能有关。以钢筋混凝土受弯构件为例,研究了混凝土保护层厚度和混凝土强度等级对钢筋混凝土结构承载能力可靠度的影响^[44]。并以使结构承载能力可靠度没有明显降低为条件,研究了不同环境条件下,混凝土保护层厚度和混凝土强度等级的关系^[45]。

(4)结构的经济优化设计是结构设计的基本原则之一。传统的结构经济优化设计概念是使结构的初始建造费用与结构倒塌损失的期望值最小。然而近年来的工程实践却表明,由于结构的耐久性不足,许多结构未达到设计使用期就要进行大修,甚至有的维修费用已经超过了初始建造费用。在这种情况下,结构的经济优化设计的内涵发生了变化,即结构优化设计的目标中还应包括结构使用中的维修(护)费用。设计安全度高,初始费用大,维护费用小;反之设计安全度低,初始费用小,维护费用大。因此,存在一个结构设计与维护的协调问题。分析了不同耐久性条件下结构的经济优化设计问题,提出了结构设计与维护协调的分析方法^[46,47],阐明了结构使用中正常维护的意义。

(5)疲劳破坏是承受反复荷载作用的结构的破坏形式之一。对于在腐蚀环境中工作的钢筋混凝土结构,腐蚀不仅使钢筋的有效截面面积减少,同时钢筋表面的锈坑还会引起钢筋的应力集中,从而大大降低构件的抗疲劳能力。因此,腐蚀环境下承受反复荷载作用的钢筋混凝土结构存在着腐蚀(物理、化学作用)和交变应力(力学作用)两种损伤。在分析两种损伤特点的基础上,提出了腐蚀环境下钢筋混凝土结构疲劳可靠度的分析方法^[48,49]。

(6)已有结构性能的评估是老化结构安全和使用性能鉴定的一项基本工作,但由于影响其性能变化的因素多而复杂,很难给出一种统一的评估模式,很多情况下要结合专家的经验进行分析。利用人工神经网络的自适应性和容错性,结合专家经验对网络进行训练,提出了已有结构性能评估的人工神经网络方法^[50];对于破坏程度较大或服役年限较长的构件,要在其非线性范围内获取具有足够精度的、表达整体构件可靠性能的数学表达式,非常困难,甚至是不可能的。针对这种情况,利用层次分析法建立了钢筋混凝土构件可靠性的模糊评估模型,运用模糊评判理论,为实际工程中构件的综合评判提供了一套切实可行的方法。

(7)从已有结构或结构构件当前的性能及结构所处的环境来评价一个具体结构的耐久寿命是结构耐久寿命评估的一个重要方面,而统计分析特定环境下一类结构的耐久寿命是