

新世纪理工系列教材

随机结构系统 可靠性分析与优化

安伟光 蔡荫林 陈卫东 著

哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

新世纪理工系列教材

随机结构系统可靠性分析与优化

安伟光 蔡荫林 陈卫东 著

哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

本书以现代可靠性理论为基础,系统阐述了随机结构系统(如大型桁架、框架、板架、梁板及薄壁结构等)的可靠性分析及基于可靠性的优化设计的基本理论和方法。给出的理论公式侧重于工程上的应用,尽量略去繁琐的推导,并有数值例题及专题研究加以说明。

本书可供从事可靠性与优化设计的研究人员,从事工程结构分析与设计的工程技术人员,以及大专院校相关专业的教师、研究生和本科生使用。

图书在版编目(CIP)数据

随机结构系统可靠性分析与优化/安伟光,蔡荫林,陈卫东著.—哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2007
ISBN 978-7-81073-651-0

I.随… II.①安…②蔡…③陈… III.①随机系统-系统可靠性-系统分析②随机系统-系统可靠性-系统设计-最佳化 IV.TP271

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 014030 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451-82519328
传 真 0451-82519699
经 销 新华书店
印 刷 肇东粮食印刷厂
开 本 787mm×960mm 1/16
印 张 22.25
字 数 382 千字
版 次 2007 年 10 月第 2 版
印 次 2007 年 10 月第 2 次印刷
定 价 37.00 元
<http://press.hrbeu.edu.cn>
E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

前 言

传统的工程结构分析,通常采用确定性的力学模型进行。在这类模型中,所采用的有关计算结构物力学响应的参数是一些确定的量。换句话说,在这类计算模型中,忽略了实际结构系统内部的变异性。在具体的分析与计算过程中,本质上是用某种意义上的均值参数系统代替实际结构系统。以安全系数表征工程的安全程度,是这一分析的产物。现有研究表明,只有在实际系统关于这类模型系统的变异性较小或各部分变异比较均匀时,上述分析才能给出较为符合真实情况的结果。否则,上述分析甚至不能在均值响应的意义上把握实际系统的响应。与之相适应,传统的工程结构系统识别结果也必然是对实际系统的一种有偏差的估计结果。

实际工程结构的随机性通常表现在以下几方面。

1. 结构元件材料特性的随机性。由于制造环境、技术条件、材料的多相特征等因素影响,使工程材料的屈服应力、弹性模量、泊松比、质量密度等具有随机性。
2. 结构元件几何尺寸的随机性。由于制造和安装误差使结构的几何尺寸,如梁和柱的长度、横截面积,板的厚度等具有随机性。
3. 结构边界条件的随机性。由于结构的复杂性而引起结构与结构的联结、元件与元件的联结等边界条件具有随机性。
4. 结构物理性质的随机性。由于系统的复杂性而引起系统阻尼特性、摩擦系数等具有随机性。

通常把考虑上述性质的工程结构系统,称为随机结构系统。

另外,结构所承受的外载荷(如空气动力载荷、波浪载荷、温度载荷、风载荷及地震载荷等)一般均具有随机性。这样,在结构的分析和设计中,考虑结构系统和载荷的随机性是符合工程实际的,也是合理的。正如权威人士指出^[1],“在计算机科学日新月异的今天,计算参数与实际情况相比所具有的精度已远远落后于工程结构的精确分析”、“如果不考虑设计参数的不确定性,结构的精确分析所能取得的效益将被粗略的经验性的安全指标所淹没”。因此,考虑实际工程的随机因素,对结构系统进行随机力学分析和基于概率概念的可靠性设计,显然具有十分重要的意义。

在实际的工程研究中,为了简化问题,常根据随机因素的影响程度大小,找出主要随机因素,开展结构系统的可靠性分析和优化设计。如当载荷与强度变异性较大,对结构系统可靠性的影响是主要的;而其他因素(例如元件的长度、截面积及弹性模量等)变异性较小,对结构系统可靠性的影响是次要的。为简化计算,在结构系统的可靠性分析中,将载荷和强度看作随机变量,其他因素当作常量处理。此时失效模式的安全余量中,只有载荷与强度为随机的,且



一般安全余量是线性的,求解可靠性指标比较容易。如果载荷、强度、元件长度、截面积及弹性模量等的变异性都比较大,对结构系统可靠性影响哪个都不能忽略,则此时就应都作为随机变量处理。在结构系统的可靠性分析中,结构系统的刚度矩阵就是一个随机矩阵。安全余量中的随机变量多,如果加上结构响应(如节点位移),则它的表达式往往是上述随机变量的非线性函数和隐式函数,求解可靠性指标就比较复杂。

传统的结构优化设计在航空、航天等诸多领域已得到广泛应用,但至少存在以下两个问题。①在一般情况下,有些复杂的结构并不需要满足所有约束条件方能工作。例如,超静定结构某些元件的强度不足,甚至破坏,并不导致结构整体的失效。实际上,对结构而言,某些局部性约束(如应力)虽然得不到满足,但结构仍能正常工作。因此,以较高的概率保证结构在未来工作环境中能正常工作,才是设计的主要目标和真正约束。②在传统结构优化的数学模型中,目标和约束函数都是确定的量,没有较全面和确切地考虑结构未来表现的随机性,不符合工程实际,因而优化结果不能保证均匀的安全水平。而随机结构基于可靠性的优化设计,把结构作为一个整体,同时考虑载荷和强度的变异性,还可考虑结构尺寸等的不确定因素;并全面研究结构在未来工作期间表现的随机性^[2]。即将结构参数模拟成随机变量,致使结构的响应(位移、应力等)是随机的。从而克服了上述两个缺点。这种结构优化设计方法,把随机结构的可靠度要求结合到优化问题的约束中或结合到目标函数中,即在一定的结构系统可靠性指标下,通过调整元件参数(如杆件横截面积)使结构重量或费用最小(第一类基于可靠性的结构优化问题);或在一定的结构重量或费用条件下,通过调整元件参数,使结构系统的可靠度最大(第二类基于可靠性的结构优化问题)。由于对结构物的最主要的要求是,既安全可靠又经济合理,而这两类优化问题可明显提高设计质量和获得显著的经济效益,故该类优化已成为目前国内外都积极探索和研究的重要课题。

当前,航空、航天结构为完成预期更高的使命,对其结构必然要求越来越轻质,越来越可靠;船舶行业中,由于海战的高科技化,要求舰船结构(如导弹驱逐舰、气垫船和水翼船等)重量轻,可靠性高;国民经济和社会发展中,由于科学技术和人民生活水平的提高,对建筑物和构筑物(如高层建筑、大跨建筑 and 智能建筑等)的功能、可靠性等指标也要求越来越高。这样,在这些领域中,对轻质、高强复合材料或更复杂的材料的需求,必然越来越多,而该类材料本身以及构成的结构的刚度矩阵的随机性都十分明显;由于复杂的结构制造技术等原因,自然使结构系统及其部件的几何尺寸、接口边界等因素表现出明显的随机性;再加上激烈的市场竞争,势必对产品的成本、可靠性提出更严格的要求。因此,基于结构可靠性优化设计的研究在国民经济的航空、航天、航海及建筑行业等领域必将有广泛的应用前景。

本书的主要内容包括:绪论;结构系统可靠性的基本理论;随机有限元法;结构系统失效模式的形成及可靠性分析;结构系统强度可靠性分析;结构系统刚度可靠性分析;结构系统可靠度的敏度分析;结构系统基于可靠性的优化设计;结构系统可靠性的专题研究等。

本书的特点在于重点介绍随机结构系统(如大型桁架、框架、板架、梁板及薄壁结构等)的



可靠性分析,失效过程的处理及基于可靠性的优化设计的基本理论和方法。内容新颖,基本上反映了近期我们的研究成果。给出的理论公式侧重于工程上的应用,尽量略去繁琐的推导,并有数值例题及专题研究加以说明。撰写过程中,力求做到基本概念清晰、重点突出、实用性强。

本书可供从事工程结构分析与设计的工程设计人员,大专院校相关专业的教师、研究生及本科生使用。

作 者

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 结构系统可靠性的基本概念	1
1.2 结构系统的可靠性分析	1
1.3 结构系统基于可靠性的优化设计	2
1.4 结构系统可靠性分析与优化设计的历史发展	5
第 2 章 结构系统可靠性的基本理论	9
2.1 载荷和抗力变量的概率模型	9
2.2 可靠性指标均值的一次二阶矩(FOSM)	12
2.3 可靠性指标的改进一次二阶矩(AFOSM)	16
2.4 可靠性指标的二次二阶矩(SOSM)	25
2.5 蒙特卡罗(Monte - Carlo)法	29
2.6 可靠性计算方法的比较	30
2.7 载荷组合模型	30
第 3 章 随机有限元法	40
3.1 引言	40
3.2 随机有限元法研究现状综述	41
3.3 随机场的表示	43
3.4 随机有限元的基本方程	46
3.5 随机有限元法在随机结构分析中的应用	50
3.6 随机有限元法的发展前景及发展方向	66
第 4 章 结构系统失效模式的形成及可靠性分析	68
4.1 结构元件的承载能力	68
4.2 静定结构的失效分析	68
4.3 静不定结构的失效分析	71
4.4 桁架结构失效模式的可靠性指标与失效模式间的相关系数	73
4.5 薄壁结构失效模式的可靠性指标与失效模式间的相关系数	81
4.6 平面框架结构失效模式的可靠性指标及失效模式间的相关系数	92
4.7 板架结构失效模式的安全余量和可靠性指标	120
4.8 增量荷载法形成结构的安全余量	127
第 5 章 结构系统强度可靠性分析	132
5.1 失效路径和失效模式数	132



5.2 分枝限界法	133
5.3 提高分枝限界法的若干策略	139
5.4 一种基于增量载荷法判别主要失效模式的方法	143
5.5 系统可靠性的计算方法	146
第 6 章 结构系统刚度的可靠性分析	170
6.1 完整结构系统的刚度可靠性	170
6.2 不完整结构系统的刚度可靠性	179
第 7 章 结构系统可靠度的敏度分析	184
7.1 结构系统可靠度(β_i)、结构系统失效概率(P_f) 对设计变量的偏导数	184
7.2 失效模式可靠度、相关系数及失效概率对设计变量的偏导数	188
7.3 失效模式二、三阶联合失效概率对设计变量的偏导数	195
7.4 刚度失效模式的可靠性指标对设计变量的偏导数	198
第 8 章 结构系统基于可靠性的优化设计	202
8.1 基于可靠性的结构优化设计的数学模型及其求解途径	202
8.2 结构系统可靠度约束下最小化结构重量或费用	209
8.3 结构重量或费用约束下最大化结构系统可靠度	234
8.4 元件截面为 I 型时基于可靠性的结构优化	239
8.5 基于可靠性的结构模糊优化	248
第 9 章 结构系统可靠性的专题研究	253
9.1 杆板薄壁结构失稳时的可靠性分析	253
9.2 结构系统在随机组合力作用下的可靠性分析	267
9.3 飞机结构考虑损伤容限和耐久性的可靠性分析	274
9.4 结构系统同时考虑强度和疲劳的可靠性分析	282
9.5 结构系统同时考虑强度和刚度的可靠性分析与优化设计	289
9.6 空间随机结构系统可靠性分析与优化设计	298
附录	322
附录 A 拉压杆元单元刚度矩阵及单元内力	322
附录 B 三角形平面应力元 (CST 元)	324
附录 C 线性应变矩形元 (LSR 元)	329
附录 D 等剪应力矩形元 (CSSR 元)	334
附录 E 纯剪矩形板元 (SSP 元)	340
参考文献	344

第 1 章 绪 论

1.1 结构系统可靠性的基本概念

结构系统是指若干元件组成的承受外部作用力并有特定功能的整体,在它的各个元件之间存在相互作用和相互依存的关系。

结构系统的可靠性是指在规定的时间内,在规定的条件下完成规定功能的能力。这里所说的“规定时间”是指分析系统可靠性时,考虑各项基本变量与时间关系所取的设计基准期。一般说来,结构系统可靠性是随着时间的推移而逐渐降低的。所以,一定的结构系统可靠性是对一定时间而言的。“规定条件”是指设计时所确定的结构正常设计、正常施工和正常使用的条件。在不同的条件下,结构系统可靠性是不同的。“规定功能”一般是以结构系统是否达到“极限状态”来标志的。如果结构系统达到极限状态的概率超过了允许值,结构系统就失效。这里,失效的含义是系统变成机构,或超过规定的变形,或不能进一步承受外载荷。结构系统的失效概率越小,其可靠性就越高。

度量结构系统可靠性的数量指标称为结构系统可靠度。其定义为:结构系统在规定时间内、在规定条件下完成规定功能的概率。由此可见,结构系统可靠度是结构系统可靠性的概率度量。这是基于统计数学观点下的比较科学的定义。因为在各种随机因素的影响下,结构系统完成规定功能的能力只有用概率度量才比较符合实际情况。

1.2 结构系统的可靠性分析

结构系统的可靠性分析较结构元件的可靠性分析要复杂得多,其原因有下面几点。

1. 有些随机变量之间存在相关问题

例如,一个结构中各个元件强度之间、弹性模量之间、尺寸之间等会有相关关系。这种变量间存在的相关性,使结构系统可靠性的分析变得复杂。在不考虑结构自重的条件下,外载荷与强度变量之间可以认为是相互独立的。

2. 必须确定结构系统的失效模式及确认其中的主要失效模式

通常,结构系统是高度静不定的,一般需有若干个元件应力达到临界状态而失效后,才使整个结构系统失效,并形成一失效模式。大型复杂结构系统的失效可以有很多个失效模式。例如,十六杆平面桁架是冗余度为3的超静定结构,其最大可能的失效模式就有43 680种。要精



确计算这种结构系统的可靠度是比较困难的,而通常是由对结构系统可靠度有重要贡献的主要失效模式来估计。所谓主要失效模式,是指它的失效概率,要比别的一般失效模式的失效概率大很多,这往往根据经验或实际需要,人为设定一个数量级,如大到 10^6 倍,故一般失效模式可以略去不计。因而寻找一些方法使首先找到的失效模式都是或大多数是主要失效模式是十分重要的,这个过程称为确认主要失效模式。

3. 要计算主要失效模式的可靠度

当失效模式对应的安全余量为线性函数时,用一次二阶矩(First - Order Second Moment—FOSM)理论(即简化为只与分布函数的参数的均值以及标准差有关)计算失效模式的可靠度或失效概率,是比较省时的。当安全余量为随机变量的非线性函数,并含有正态随机变量(非正态变量可以当量化为正态随机变量^[3])和隐式变量(如结构响应的位移量)时,可采用 SFEM(Stochastic Finite Element Method—SFEM)^[4] 与改进的一次二阶矩(Advanced First - Order Second Moment—AFOSM)^[5,6] 相结合的求解方法或响应面法(Response Surface Method—RSM)^[7] 等计算失效模式的失效概率或可靠度。当然,为了提高计算精度也可采用 SFEM 与二次二阶矩(Second - Order Second Moment—SOSM)^[8,9] 相结合的方法等来进行。

4. 整个结构系统可靠性的计算必须综合各主要失效模式

在计算整个结构系统的可靠度或失效概率时,必须把各主要失效模式综合进去。此时,可视为结构系统由各主要失效模式串联而成,任何一个失效模式的出现都会导致结构系统的失效。由于失效模式间的相关性,即使只考虑主要失效模式,要精确计算结构系统可靠度也几乎是不可能的(涉及到多维联合概率的计算)。通常希望采用一些既考虑这种失效模式之间的相关性,又计算较为简单的方法和公式(仅涉及一维或二维联合概率的计算)来估计结构系统的可靠度。目前已有一些较为适合的估计结构系统可靠度的计算方法。例如:Ditlevsen 界限法^[10]、高精度公式^[11]、PNET(概率网络估算法)法^[31]、近似公式^[12]及蒙特卡洛(Monte - Carlo)法^[13]等。在具体运用过程中,应依据失效模式的具体情况,折中计算精度和效率等因素来选用。对于大型复杂的结构系统,如何找出计算精度与效率都比较满意的方法,目前仍在研究中。

1.3 结构系统基于可靠性的优化设计

通常结构系统的可靠性设计,不能采用电子系统那么简单的可靠度指标分配法,原因是:

1. 结构系统通常不能视为串联、并联逐级的组合;
2. 结构系统在有若干个元件逐一到达临界时,必须考虑这些元件临界后,对结构系统余下元件的内力影响,即有内力重新分布的问题;在计算结构系统可靠度时,略去这个影响会导致计算精度很低;
3. 在计算结构系统可靠度时,必须考虑结构元件间的相关性(如:各元件强度通常是相关的),以及各失效模式间的相关性,否则计算精度太低;



4. 结构系统的破坏,是由任一失效模式所引起的,形成一个失效模式通常需有一系列元件达到临界;尽管各失效模式之间是串联的,但需考虑模式的相关性;一个失效模式所涉及的若干个临界元件不存在简单的并联关系,需要考虑内力的重新分布。

因此,结构系统的可靠性设计应以结构整体来考虑:应只有一个有关整个结构系统的可靠性设计准则,即

$$R_s \geq R_s^a \quad (1-1)$$

式中 R_s ——结构系统的可靠度(或称为可靠概率);

R_s^a ——结构系统可靠度的容许值。

由此看来,结构系统的可靠性设计应以基于可靠性的结构优化设计为好。这种优化设计是在传统结构的优化设计的基础上发展起来的。在“前言”中已提到传统结构优化设计的不足,例如,按传统结构优化设计的某些理论,对于只有一组同时作用的外载荷的结构系统,只考虑静强度约束,则在无最小尺寸约束时,以静定结构为最轻。如果初始结构为静不定结构,则优化的结构退化为静定结构;若有最小尺寸限制,则退化为一种准静定结构,即以最有利的静定子系统为基础,配上其他一些具有最小尺寸的冗余元件,这时结构最轻;但这两种结构的可靠性都不好。从可靠性的观点看,这两种结构都不是理想的结构。另外,相当多的典型例子,如十杆超静定桁架结构、二十五杆输电塔结构等,传统优化设计的结果要么是静定结构,要么是准静定结构,结构的冗余度等级很低。这样的优化结果显然是不合理的。因此,综上所述,必须在可靠性的基础上进行优化设计,即把可靠度的要求结合到优化问题的约束中或结合到目标函数中,运用适当的优化方法,得出最优结构。

基于可靠性结构优化设计方法的研究已有约 30 年历史,开始基本上是以结构元件或单一失效模式的失效概率为约束条件(或目标函数)建立数学模型,后来发展成以系统可靠度为约束的结构优化设计方法。结构可靠性优化方法的发展与完善,是与结构可靠性分析方法的发展与完善密切相关的。从国内外研究实践中,我们认为合适的基于可靠性的优化设计方法应体现在以下几个方面。

1. 安全余量表达式要体现基本变量之间的关系

安全余量的数学表达式能否体现基本变量之间的关系,是可靠性分析和计算精度的关键。本书第 4 章在安全余量表达式中,采用极限状态理论将结构力学中的基本变量,如位移、弹性模量、元件截面积、元件长度等直接写到安全余量中。这样在表达式中,能直接看出这些量对结构系统可靠性的影响,也改进了结构系统可靠性分析中安全余量的粗糙表达(即通常只有抗力和内力之间关系,而求得的可信性指标与实际误差往往较大)。这样建立的安全余量方程,将各基本变量的内在联系及对系统的影响表达得很清楚。特别是,失效模式的安全余量,由各基本随机变量和节点位移显式表达出来,易于求得安全余量对各基本随机变量的导数表达式,从而可用 AFOSM 求出失效模式的可靠性指标;同时也便于分析客观上存在的失效模式间的相关性,改进整个系统的可靠性分析质量和计算精度。这一工作,为更好地进行结构系统的可靠



性分析与优化设计奠定了基础^[14]。

2. 可靠性分析的方法应能较好地折中考虑计算效率与计算精度

进行结构系统的可靠性分析时,如果结构系统中的随机变量只有强度和外载荷时,元件的安全余量可用线性函数形式表达,通过 FOSM(用均值和标准差表示的简单公式)可以精确求得可靠性指标。当随机变量不只是上面 2 个,还有元件截面积、长度及弹性模量等随机变量时,此时安全余量将是随机变量的非线性函数,而且含有位移这种隐式变量,这就会给求解问题带来一定困难。本书第 4 章采取了 AFOSM 的可靠性指标迭代和 SFEM 法的正则列式进行了可靠性分析。因为在可靠性指标的迭代计算中,需求出安全余量对基本随机变量的导数。而安全余量对基本变量的导数计算过程中,位移项成为一个中间项。由于它是基本变量的隐式表达,因此位移对这些量的导数必须通过 SFEM 正则列式来求得。在求解过程中,正确选择了收敛的判据,保证达到收敛的迭代次数减少,较好地处理了计算效率和计算精度的关系,当然这一研究还有待进一步探讨。

3. 结构系统失效过程的力学模型要正确反映元件失效对结构的影响

对于超静定结构来说,一个或几个元件的失效并不能导致结构系统的失效,故要分析失效过程中,已失效元件失效后,其减缩刚度矩阵和反向节点力对残余结构的受力状态和总刚阵的影响。对于拉压杆元和梁元的影响很多学者已做了大量工作^[15],本书对板元的影响做了较详细的分析^[16,17]。

4. 能给出可靠度或失效概率约束的敏度表达式

采用数学规划法中许多算法进行优化设计时,结构系统可靠度或失效概率约束的敏度分析是关键,它决定了优化的计算精度、计算量和收敛性。本书对结构系统可靠性的敏度分析做了详细的研究^[18],给出了合适的表达式,便于优化问题的顺利求解。

5. 选择的优化算法应使优化过程稳定收敛、计算量较小及适应性强

本书介绍了几种方法,其中对第一类基于可靠性的结构优化问题,提出了最佳矢量型算法^[19]。它采用了梯度步与最佳矢量步相结合的搜索步。大量算例表明,这种算法的迭代过程不仅快速稳定收敛,而且收敛精度高。同时对初始点没有严格要求,在可行区与非可行区均可,反映该方法适应性强。

另外,基于随机有限元的结构可靠性分析与遗传算法相结合的优化算法也是一种值得探索的方法。

结构系统基于可靠性的优化设计,是结构优化设计领域的一个新的分支,此类优化问题在计算上的难点是计算复杂,存储量大,计算时间长,对全局最优解的判定也较困难。国内外学者对此问题正在不断地开展研究,以寻求更适合工程应用的方法。

结构系统可靠性与基于可靠性的优化设计的研究近年来已经取得了很大的进展,但同时还有许多值得研究和探讨的课题。我们坚信,只要经过艰苦的努力,理论研究不断创新,该方法一定能在工程上得到越来越广泛的应用。



1.4 结构系统可靠性分析与优化设计的历史发展

1.4.1 结构可靠性分析的历史发展

概率设计的思想可追溯到20世纪的40年代。1947年,文献[20]——“结构安全度”的文章,奠定了结构可靠性的理论基础。使人们充分意识到实际结构的随机因素,将概率分析和概率设计的思想引入到了实际工程。1947年,文献[21]提出了FOSM理论的基本概念。1954年,该文献的作者又提出了应力-强度可靠性设计的正态-正态模型;并推导了用正态分布二阶矩表达的可靠性中心安全系数的一般形式,给出了计算结构失效概率的方法及对应的可靠性指标公式。1969年,文献[22]在文献[21]的基础上,提出了以与结构失效概率相联系的可靠性指标作为衡量结构安全度的一种统一数量指标;并建立了结构安全度的FOSM模型。1971年,文献[23]对这种模型采用分离函数方式,将可靠性指标表达成分项系数形式。1974年,文献[5]建议根据失效面而不是根据失效函数来定义失效模式的可靠性指标,称为AFOSM。后来该文作者等又对该方法进行了更深入的研究,使之更适合工程的应用。但AFOSM也有其局限性,它只适用于非线性程度较小的极限状态方程。基于这种情况,文献[8,9]又提出SOSM可靠性方法(或Second-Order Reliability Method—SORM)。1977年,文献[3]提出了一种有效的算法(称R-F算法)使得任何非正态随机变量都可以在设计点处转化为正态随机变量,从而使计算由非正态随机变量和非线性极限承载状态构成的失效模式的失效概率成为可能。由于R-F算法良好的适用性,已被国际结构安全性联合委员会(JCSS)所采纳,并正式命名为JC算法。模式失效概率的计算精度虽有许多需要改进的地方,但JC算法的出现无疑标志着在失效模式已知条件下,模式失效概率的计算问题最终有了工程上可以实现的方法。实际工程结构中,除了载荷和元件强度具有随机性外,元件的几何尺寸、材料的弹性模量等也是具有随机性的,若当后者也必须处理为随机变量时,则安全余量可能成为含有多种随机变量的高次非线性函数,而且可能含有隐式变量。此时求解结构失效模式的失效概率可采用Monte-Carlo法,但其巨大的计算量限制了实际应用。此时,文献[7]的RSM法倒是一种很好的选择。也可采用SFEM^[4]和AFOSM^[5,6]或SFEM和SOSM相结合的方法,与RSM法相比,它们的计算精度高,但计算量要大。

随着概率设计方法的发展和日臻完善,这种方法逐渐达到实用的程度。20世纪60年代末至80年代初,美国、加拿大和前苏联等国制定了相应的标准和规范,作为结构元件概率设计的依据。这种设计方法随着概率、统计数学和可靠性理论的发展已逐步成熟并将逐步取代传统的安全系数法。1976年,结构安全性联合委员会(JCSS)也推广了这种方法。我国在航空、航天结构的可靠性方面,根据国情并参照国外先进经验制定了一系列的结构可靠性规范、手册、指南和标准,例如文献[24,25]。此外,建筑、铁路、公路、水运和水利等五大部门联合编制了《工程结



构可靠度设计统一标准》(GB50153-92)。1994年国家技术监督局和建设部联合发布了《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》(GB50199-94),以及一系列的可靠度设计标准等。这些情况表明,以概率可靠度为基础的极限状态设计法,在航空、航天、土木、建筑及水利各专业工程结构中,正慎重有序地逐步推广。

20世纪70年代后期及80年代,国际上大批桥梁、高层建筑已接近或超过原有的设计寿命,对于这样一些高价建筑,如何分析现在具有的安全水平或可靠度,以便作出合理判断,这只有通过结构系统的可靠性分析才能合理解决;另外,已建成的与将建立的海洋石油平台数目很大,每个平台约几百万美元;昂贵的航天结构及核电站的设计与制造等等,使得如何运用结构系统可靠性理论研究它们,以提高安全性和经济性,也成了迫切需要。加之结构分析的有限元法、计算机应用技术和实用概率网络分析理论的迅猛发展,使结构系统可靠性分析理论和应用技术开始了由元件级水平向系统级水平的实质性过渡。结构系统的可靠性分析远比结构元件的可靠性分析困难和复杂。主要问题有三:第一,由于结构系统,特别是大型复杂结构的失效模式很多,因此,如何高效率地确认主要失效模式就成为十分重要的问题;第二,如何有效地综合各主要失效模式的失效概率求得结构系统的失效概率;第三,如何将结构分析的有限元法与结构系统可靠性分析有机地结合起来,以便将结构系统的可靠性分析应用到各种元件模拟的工程结构中。对于第一个问题,文献[15]提出了基于全量载荷法的自动形成主要失效模式的分枝限界法。文献[26]等提出了基于增量载荷法形成主要失效模式的方法。其他学者也提出了相应的确认主要失效模式的方法:如改进的分枝限界法^[27-29]和 β 限界法^[30]等。对于第二个问题,1979年,文献[10]提出了结构系统可靠度计算的窄边界法。1984年,文献[31]提出了搜索主要模式的FTA(Failure Tree Analysis)法和计算系统失效概率的PNET法。1989年,文献[11]提出了用于结构系统可靠性分析的高精度公式。1992年,文献[32]提出了用数值积分法计算二阶和三阶联合失效概率。1992年,文献[12]提出了基于简单界限的近似公式。对于第三个问题,文献[15]进行了用拉压杆元模拟的桁架结构和用梁元模拟的框架结构的结构系统可靠性分析。文献[33,34]给出了用杆元、三角形或矩形平面应力元模拟的薄壁结构系统的可靠性分析。与这三个问题相联系的其他可靠性理论研究也很活跃,文献[35~38]等开展了在随机组合载荷作用下的结构系统的可靠性分析。文献[14,16,39,40]给出了由桁架结构系统、梁元和板元组成的薄壁结构用SFEM和AFOSM进行可靠性分析的实例。文中成功地给出了安全余量对结构刚度矩阵中的诸多随机变量及结构响应位移的表达式,通过SFEM和安全余量的敏度分析,完成了对大型结构系统的可靠性分析。

上面提到的结构系统可靠性分析主要是针对随机变量为元件强度和结构外载荷且安全余量为随机变量的线性函数的情况。对于诸如以结构元件的弹性模量、结构元件几何尺寸(如杆、梁元件的长度或其截面积等)为随机变量的情况,此时的安全余量为随机变量的非线性函数,并含有隐式表达的结构响应量(如位移或应力),因而需借助SFEM进行结构的可靠性分析,以提高可靠性指标的计算精度。SFEM的基本原理及有关方法可参阅文献[4]。文献[14]对用梁



元和板元的薄壁结构,成功地给出了安全余量对结构刚度矩阵中的诸多随机变量的显式表达式,并对大型结构系统进行了可靠性分析。

1.4.2 基于可靠性的结构优化的历史发展

随着电子计算机的迅速发展和结构分析有限元法的出现,传统的结构优化设计在20世纪60至80年代得到迅速的发展和工程应用^[41~45]。但这类结构优化设计和基于可靠性的结构优化设计相比存在诸多不足。基于可靠性的结构优化也是在传统的结构优化的基础上发展起来的。1969年,文献[46]是第一篇有关基于可靠性结构优化的评述文章。文中说:“一种用整个结构的失效概率作为性态约束的优化方法,将形成与合理的安全度相适应的更为均衡的设计。”1973年,文献[47]提出:“应对各种结构采用某种近似方法计算出失效概率;并把这种失效概率当作最优过程中的约束或作为目标函数的一部分。在最优化的过程中考虑失效概率,这从实际和理论上都具有许多优越性。”到20世纪70年代后期,结构系统的可靠性优化得到迅速发展。1986年文献[48]提出了在可靠性分析的基础上能对大型结构进行元件尺寸优化的准则法。基于文献[48],1991年,文献[49]对翼盒结构进行了基于可靠性的优化设计。在20世纪70年代以后,基于数学规划法进行基于可靠性结构优化得到迅速发展。文献[15]分别采用基于二次规划子问题的系列解和序列线性规划法求解了基于可靠性的结构优化问题。文献[18]提出了结构可靠性优化中目标与约束函数对设计变量的敏度分析表达式,为应用导数方法求解基于可靠性的结构优化问题奠定了基础。文献[50]给出了两类基于可靠性的结构优化设计的方法和框架例题。文献[19]提出了一种收敛性好,收敛精度高,适于结构重量为目标函数的系统可靠性为约束的优化问题的最佳矢量法。文献[51]进行了结构系统既考虑强度又考虑刚度要求的基于可靠性的结构优化设计的研究。随着SFEM研究的进展,基于SFEM的结构可靠性优化也相应得到了发展,但相对而言文献资料甚少,而且偏于简单结构的分析与优化。文献[52]基于AFOSM和SFEM,提出了一种可靠性优化设计方法,其中敏度分析用半解析法进行,安全因子敏度中出现的导数用差分法求解。文献[53,54]给出了桁架结构、文献[14]给出了大型薄壁结构系统基于SFEM的优化设计,采用了文献[19]提出的最佳矢量法,其约束函数的敏度分析用全解析法^[18],使结构系统的可靠性分析及优化设计达到了一个新的水平。

1.4.3 本书的工作

本书在国内外同行学者理论研究的基础上,就结构系统的可靠性分析与基于可靠性的优化设计问题开展了相应的工作,主要内容如下。

1. 进一步对AFOSM和SOSM的方法进行了补充和完善^[6,9]。
2. 对随机组合力以及在随机组合力作用下的结构系统可靠性进行了分析^[35~38]。
3. 在结构系统的可靠度计算中,提出简单界限的近似公式^[12]。
4. 对弹塑性结构失效过程中的反向节点力和减缩刚度进一步开展了研究,给出了几种常



用单元在结构失效过程中的反向节点力公式^[14,19],使结构失效过程的分析更符合工程实际。

5.对 SFEM 开展研究,除将其应用于静力问题外,还给出了用 SFEM 进行结构动力可靠性分析的方法^[55]。

6.对确认结构系统的主要失效模式的分枝限界法开展研究,给出了改进的分枝限界法^[27-29],提高了识别主要失效模式的效率。

7.对完整结构系统和非完整结构系统的刚度可靠性进行了分析^[56,57]。

8.对结构系统同时考虑强度和刚度^[58,59],同时考虑强度和疲劳^[60];同时考虑飞机结构损伤容限和耐久性^[61,62]以及结构失稳时的可靠性开展了研究^[63,64]。

9.给出了结构系统可靠性指标、相关系数的敏度分析的全解析法,以及相应失效模式可靠性指标的敏度表达式^[18]。同时,给出了结构系统刚度可靠性指标、相关系数的敏度表达式^[51],为基于可靠度优化的梯度计算提供了有效方法。

10.在第一类优化中,给出了最佳矢量法^[19]和对偶规划法^[65,66],特别是最佳矢量法,收敛快,迭代过程稳定,精度高,是一种较好的工程适用方法。

11.在优化设计中,讨论了初始点选择对优化结果的影响^[67],同时还讨论了不同的结构系统可靠性的计算公式对优化计算效率的影响^[67]。

12.在原有工作的基础^[68]上,对随机结构系统的安全余量表达式开展研究。给出了结构失效模式的安全余量关于基本随机变量(元件强度、结构载荷、元件的弹性模量、几何尺寸等)和中间变量(如结构的节点位移)的显式函数表达式,以及安全余量关于这些变量的导数的显式函数表达式。从而借助随机有限元法求得中间变量(如位移)对基本随机变量的导数,为进行大型结构系统(不仅考虑元件强度和结构载荷的随机性,而且考虑其他基本变量的随机性)的可靠性分析奠定了基础,具有重要的理论意义。在理论分析的基础上,开展了大型随机结构系统的可靠性分析与基于可靠性的结构优化设计^[14,53,69],编制了相应的软件系统,并得到较为满意的计算结果。此成果为工程应用提供了有效的计算实例和方法。

第2章 结构系统可靠性的基本理论

2.1 载荷和抗力变量的概率模型

2.1.1 载荷变量的模拟

载荷一般是随时间变化的,随时间变化的载荷最好模拟成随机过程。然而许多情况下,当在基准期内,只有随时间变化的载荷作用于结构系统时,用极值分布才更是适宜的。

令随机变量 Y 是 n 个相同分布且有分布函数 F_X (母体分布) 的独立随机变量 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 的最大值,则 Y 的分布函数 F_Y 是

$$\begin{aligned} F_Y(y) &= P(Y \leq y) = P(X_i \leq y, \text{对于所有的 } i = 1, \dots, n) = \\ &= P(X_1 \leq y)P(X_2 \leq y) \cdots P(X_n \leq y) = \\ &= [F_X(y)]^n \end{aligned} \quad (2-1)$$

式中 $P(\cdot)$ ——概率度量,对应的密度函数 f_Y 为

$$f_Y(y) = \frac{d}{dy} F_Y(y) = n[F_X(y)]^{n-1} f_X(y) \quad (2-2)$$

假定随机变量 X 是具有均值 $\mu_X = 0$ 和标准差 $\sigma_X = 1$ 的标准正态分布,而 Y 是 n 个独立的 X 的试验值的最大值,则随机变量 Y 的分布函数是

$$F_Y(y) = \left[\int_{-\infty}^y \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \right]^n \quad (2-3)$$

当 $n = 1, 10, 100, 1\,000$ 时,对应密度函数如图 2-1 所示。由图 2-1 可知, Y 的均值随 n 的增加而增加; Y 的标准差随 n 的增加而减小。

假定随机变量 Z 是 n 个相同分布,且有分布函数的独立随机变量 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 的最小值,则 Z 的分布函数为

$$F_Z(z) = 1 - [1 - F_X(z)]^n \quad (2-4)$$

由式(2-1)和式(2-4)定义的分布函数 F_Y 和 F_Z ,当 $n \rightarrow \infty$ 时,其渐近极值分布有三种主要形式。

若母体分布 F_X 的上尾以指数方式减少,则最大值的分布 F_Y 有以下形式,即

$$F_Y(y) = \exp\{-\exp[-\alpha(y-u)]\} \quad (-\infty < y < \infty) \quad (2-5)$$