



湖北省学术著作出版专项资金资助项目  
土木工程前沿学术研究著作丛书(第1期)

# 工程结构可靠性理论 及其应用

Reliability Theory of Engineering Structures and Its Application

黄 斌 编著



湖北省学术著作出版专项资金资助项目  
土木工程前沿学术研究著作丛书(第1期)

# 工程结构可靠性理论及其应用

黄 斌 编著

武汉理工大学出版社

## 内 容 提 要

本书是土木工程研究生系列教材之一。本书的知识点和内容的取舍,充分结合了研究生的培养需求、学科发展和科研成果。

本书详细介绍了工程结构可靠性理论的发展历史,探讨了可靠性工程的若干发展趋势和面临的挑战。系统地介绍了结构构件、结构体系和土木结构复杂体系的可靠性概念、理论与方法,如一次二阶矩法、二次二阶矩法、蒙特卡洛法、响应面法、随机有限元法等,重点介绍了随机有限元法中的混合摄动-伽辽金随机有限元方法。全面探讨了可靠性理论在土木工程中的应用研究,如结构工程、桥梁工程、岩土工程等,书中部分章节内容是作者近几年的研究成果。

本书的内容涉及专业极广,本书可供结构工程、桥梁工程、岩土工程和防灾减灾等专业的研究生使用,也可供在土木工程领域从事研究、设计、施工等方面的工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

工程结构可靠性理论及其应用/黄斌编著. —武汉:武汉理工大学出版社,2019.2  
ISBN 978-7-5629-5962-5

I. ①工… II. ①黄… III. ①工程结构-结构可靠性-研究 IV. ①TU311.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 011142 号

项目负责人:高 英

责 任 编 辑:余晓亮

责 任 校 对:余士龙

封 面 设 计:博壹臻远

出 版 发 行:武汉理工大学出版社

地 址:武汉市洪山区珞狮路 122 号

邮 编:430070

网 址:<http://www.wutp.com.cn>

经 销 者:各地新华书店

印 刷 者:湖北恒泰印务有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:10

字 数:285 千字

版 次:2019 年 2 月第 1 版

印 次:2019 年 2 月第 1 次印刷

印 数:1000 册

定 价:68.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:027-87391631 87664138 87785758 87165708(传真)

• 版权所有,盗版必究 •

# 前 言

进入 21 世纪,我国经济高速发展,工程建设事业兴旺发达。然而,在工程建设及运营期间,工程事故仍时有发生。因而,如何确保工程结构在全寿命期内的安全性依然是工程界面临的重要挑战。

工程结构在设计、施工及运营过程中会遇到各种影响结构安全、适用与耐久的不确定因素,如何分析这些因素对结构安全性的影响推动着工程结构可靠性理论的不断发展。

工程结构可靠性理论涉及工程结构、概率论等多个学科,它与实际工程有着紧密联系并已在工程中得到广泛应用。我国颁布的各种结构设计规范都是以结构的安全可靠度为设计目标的。因此,工程结构可靠性理论对于指导工程结构的设计具有重要作用。

近几十年来,我国陆续颁布和修订了一系列的结构可靠性设计标准,如《工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50153—2008)等。这些标准的制定标志着我国的工程结构可靠性理论具有很好的研究基础,并已取得巨大的成绩。

本书较为系统地介绍了结构可靠性理论的发展历史、发展趋势和面临的挑战,详细阐述了可靠性的基本理论和方法,包括一次二阶矩法、二次二阶矩法、蒙特卡洛法以及响应面法等,并结合作者课题组成果重点介绍了基于随机有限元的可靠性分析方法;探讨了可靠性理论在土木工程领域中的应用。

本书的编写综合了国内外许多学者的研究成果,在此对他们表示感谢。参与本书编写的人员还有李焯君博士以及博士生张衡、吴志峰、陈辉、王鑫等。硕士生李庆怡、鲁溢、贺志赟、谢尊等参与了书稿的打印、绘图和校对等工作,在此表示感谢。

本书的完成得到了武汉理工大学土木工程与建筑学院有关领导的鼓励和支持,以及武汉理工大学出版社领导和有关人员的指导,在此表示衷心的感谢。

尽管我们做出了极大的努力,但是书中难免存在疏漏、不妥之处,恳请各位专家和读者批评指正。

编 者

2019 年 1 月

# 目 录

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 1 可靠性理论的发展历史及挑战 .....             | 1  |
| 1.1 概述 .....                      | 1  |
| 1.2 可靠性理论发展和研究概况 .....            | 2  |
| 1.2.1 国外可靠性研究历程 .....             | 3  |
| 1.2.2 国内可靠性研究历程 .....             | 5  |
| 1.3 可靠性理论面临的挑战 .....              | 9  |
| 1.3.1 结构建模的非确定性 .....             | 9  |
| 1.3.2 结构的失效模式 .....               | 9  |
| 1.3.3 计算方法的确定 .....               | 10 |
| 1.3.4 结构动力可靠度方面的研究 .....          | 10 |
| 1.3.5 结构的非线性研究 .....              | 10 |
| 1.3.6 结构参数可靠性优化 .....             | 11 |
| 1.3.7 时变可靠度 .....                 | 12 |
| 1.3.8 施工可靠度 .....                 | 13 |
| 1.3.9 塑性应变疲劳可靠性分析 .....           | 13 |
| 1.3.10 断裂可靠性分析 .....              | 14 |
| 本章参考文献 .....                      | 14 |
| 2 结构可靠性分析的数学基础 .....              | 19 |
| 2.1 概率论的基本概念 .....                | 19 |
| 2.1.1 随机试验与样本空间 .....             | 19 |
| 2.1.2 概率的定义和性质 .....              | 19 |
| 2.1.3 条件概率 .....                  | 20 |
| 2.2 随机变量 .....                    | 21 |
| 2.2.1 随机变量的定义 .....               | 21 |
| 2.2.2 随机变量的数字特征 .....             | 22 |
| 2.2.3 结构可靠性分析常用的概率分布 .....        | 25 |
| 2.3 随机向量 .....                    | 29 |
| 2.3.1 二维随机向量的分布函数 .....           | 29 |
| 2.3.2 边际分布函数 .....                | 30 |
| 2.3.3 二维随机向量 $(X,Y)$ 的相互独立性 ..... | 31 |

|       |                        |    |
|-------|------------------------|----|
| 2.3.4 | 多维随机向量的数字特征            | 31 |
| 2.4   | 随机变量的函数                | 32 |
| 2.4.1 | 一维随机变量函数的分布            | 32 |
| 2.4.2 | 二维随机向量函数的概率            | 33 |
| 2.4.3 | 随机变量函数的数字特征            | 33 |
| 2.5   | 随机场                    | 34 |
| 2.5.1 | 随机场的空间离散法              | 34 |
| 2.5.2 | 随机场的 K-L 级数展开          | 35 |
| 2.5.3 | 随机场的多项式展开              | 36 |
| 2.6   | 随机过程                   | 37 |
| 2.6.1 | 随机过程的基本概念              | 37 |
| 2.6.2 | 随机过程的数字特征              | 38 |
| 2.6.3 | 几种常见的随机过程              | 39 |
|       | 本章参考文献                 | 40 |
| 3     | 可靠性基本概念                | 41 |
| 3.1   | 结构的功能要求                | 41 |
| 3.2   | 结构功能函数                 | 41 |
| 3.3   | 结构极限状态                 | 42 |
| 3.4   | 结构可靠度                  | 43 |
| 3.4.1 | 求解 $P_s$ 与 $P_f$ 的一般公式 | 44 |
| 3.4.2 | $R$ 与 $S$ 都服从正态分布      | 46 |
| 3.4.3 | $R$ 与 $S$ 都服从对数正态分布    | 47 |
| 3.4.4 | $R$ 服从正态分布, $S$ 服从指数分布 | 47 |
| 3.5   | 结构可靠指标                 | 48 |
| 3.5.1 | 可靠指标 $\beta$ 的导出及物理意义  | 48 |
| 3.5.2 | 可靠指标 $\beta$ 的几何意义     | 49 |
| 3.6   | 求可靠指标 $\beta$ 的方法      | 51 |
| 3.7   | 结构可靠性分析中不确定性分类         | 53 |
| 3.8   | 结构体系可靠性分析模型            | 54 |
| 3.8.1 | 串联结构系统                 | 54 |
| 3.8.2 | 并联结构系统                 | 56 |
| 3.8.3 | 串联-并联组合结构系统            | 58 |
|       | 本章参考文献                 | 59 |
| 4     | 可靠性理论和方法               | 60 |
| 4.1   | 一次二阶矩法                 | 60 |

|                         |           |
|-------------------------|-----------|
| 4.1.1 均值点法              | 60        |
| 4.1.2 验算点法              | 61        |
| 4.1.3 映射变换法             | 64        |
| 4.1.4 实用分析法             | 66        |
| 4.1.5 设计点法              | 67        |
| 4.1.6 相关随机变量的处理         | 70        |
| 4.2 均值法(MV)             | 70        |
| 4.3 二次二阶矩法              | 71        |
| 4.3.1 二次展开法             | 71        |
| 4.3.2 二次点拟合法            | 76        |
| 4.4 蒙特卡洛法               | 78        |
| 4.4.1 概述                | 78        |
| 4.4.2 简单蒙特卡洛法           | 79        |
| 4.4.3 改进的蒙特卡洛法          | 80        |
| 4.5 矩方法                 | 82        |
| 4.5.1 二阶矩法              | 82        |
| 4.5.2 三阶矩法              | 82        |
| 4.5.3 四阶矩法              | 83        |
| 本章参考文献                  | 83        |
| <b>5 用于可靠性分析的随机有限元法</b> | <b>84</b> |
| 5.1 摄动随机有限元法            | 84        |
| 5.2 纽曼随机有限元法            | 85        |
| 5.3 谱随机有限元法             | 86        |
| 5.4 降维法                 | 87        |
| 5.5 混合摄动-伽辽金法           | 88        |
| 5.5.1 幂级数               | 88        |
| 5.5.2 多维幂级数展开           | 91        |
| 5.5.3 高阶摄动法             | 91        |
| 5.5.4 伽辽金投影法            | 93        |
| 本章参考文献                  | 94        |
| <b>6 结构静力可靠性分析</b>      | <b>96</b> |
| 6.1 结构工程可靠性分析           | 96        |
| 6.1.1 正常使用极限状态可靠度       | 96        |
| 6.1.2 结构工程可靠性设计应考虑的问题   | 100       |
| 6.2 桥梁可靠性分析             | 101       |

|                                  |            |
|----------------------------------|------------|
| 6.2.1 正常使用极限状态下的可靠度 .....        | 101        |
| 6.2.2 桥梁工程可靠性设计应考虑的问题 .....      | 107        |
| 6.3 岩土工程可靠性分析 .....              | 109        |
| 6.3.1 正常使用极限状态下的可靠度 .....        | 109        |
| 6.3.2 岩土工程可靠性设计应考虑的问题 .....      | 116        |
| 本章参考文献 .....                     | 118        |
| <b>7 结构动力可靠性分析 .....</b>         | <b>119</b> |
| 7.1 抗震结构的动力可靠性 .....             | 119        |
| 7.1.1 概述 .....                   | 119        |
| 7.1.2 抗震结构可靠性分析的四类基本公式 .....     | 121        |
| 7.1.3 抗震结构承载能力的可靠性分析 .....       | 125        |
| 7.1.4 抗震结构基于各种破坏准则的可靠性分析 .....   | 125        |
| 7.1.5 抗震结构的可靠性分析方法和实例计算 .....    | 129        |
| 7.2 抗风结构的动力可靠性 .....             | 137        |
| 7.2.1 概述 .....                   | 137        |
| 7.2.2 结构的安全界限 .....              | 137        |
| 7.2.3 抗风结构在一次强风作用下的动力可靠性分析 ..... | 138        |
| 7.2.4 抗风结构在使用期限内的动力可靠性分析 .....   | 145        |
| 7.2.5 武汉电视塔抗风可靠性分析 .....         | 146        |
| 本章参考文献 .....                     | 149        |

# 1 可靠性理论的发展历史及挑战

## 1.1 概述

近几十年来,随着结构可靠性理论不断发展,世界上很多大学都加强了对可靠性理论的教学工作,同时对结构可靠性理论进行研究的学者也在迅速增加。到目前为止,结构可靠性理论已发展成许多专业中不可缺少的一个重要研究方向,并在大学和科研单位中作为一门重要课程来进行讲授。

在日常生活和工业生产活动中,会遇到各种各样的结构。例如,工业与民用建筑、交通和铁路工程中的桥梁、港口工程中的港口码头、水工结构中的堤坝、舰船、飞机的外壳、导弹的弹体及各种运载车辆等。这些结构在其使用期内,将会承受自重、设备、人群等静、动荷载,以及风雨、冰雪等气象作用,或者波浪、水流、地震等自然作用。这些荷载作用,很多预先无法确定下来,而这些荷载作用对结构施工和运营期的安全具有重大影响。因此,荷载的不确定性是诱发结构可靠性分析的重要因素。

结构可靠性可以定义如下:在规定条件下和规定时间内,结构完成规定功能的能力。它的具体内容包括结构的安全性、适用性、耐久性、可维修性、可贮存性及其组合。

“规定条件”通常是指使用条件、维护条件、环境条件和操作技术。这些条件对结构的可靠性有着重要的影响。在不同条件下,结构系统的可靠性是不同的。这些条件是指结构所处的外部环境条件,诸如外力、温度、振动、冲击、周围介质等情况。例如,同一幢房屋建筑,在强震区和非地震区的抗震可靠性是完全不一样的。在非地震区设计的房屋建筑在强震区的抗震可靠性是很低的。

“规定时间”是可靠性定义的重要前提,规定时间通常是指设计基准期。根据这一定义,结构可靠性明显地与时间有关。规定时间的长短,随结构物及使用目的不同而异。例如,船舶及海洋结构物要求在几十年内可靠;导弹弹体结构要求在几分钟或几秒钟之内可靠;一些工业及民用建筑结构要求在几年、几十年或者更长的时间内可靠。这种时间成为结构的有效时间或使用时间,一般在设计时就予以确定,超过了这个时间,结构的可靠性会降低到规定的标准以下,不宜继续使用,而且可靠性也没有意义了。例如,一般房屋建筑的使用期是50年,若超过50年,再讨论结构的可靠性问题就没有意义了,除非这个建筑在使用期是经过加固维修的。定义中的时间概念,也可以用周期、次数、里程或其他相应于时间的单位来代替。一般来说,在规定的时间内,结构的可靠性是随时间的延长而逐渐降低的。

在结构物设计时,确定合理的设计基准期和设计条件,是一项非常重要的工作。在设计基准期内,合理的设计条件才能使设计达到既经济又可靠的目的。

“规定功能”通常指结构的各种性能指标。在设计或制造任何一种工程结构时,都赋予它一定的功能。例如,桥梁的功能是保证车辆、行人安全通行;机床的功能是进行机械加工;

导弹弹体的功能是将导弹各部分有机地联系在一起,承受运输、发射和飞行中的各种荷载。有些结构还可能会有多种功能。在结构的可靠性分析中,将会用概率的方法将这种功能的实现情况定量地表示出来。如果设计的结构能满足规定功能的要求,意味着结构是可靠的;否则,结构将会失效。可靠和失效是统一在结构体内的两个方面。在估计结构可靠性时,必须对结构失效有充分的了解。

评价结构是处于正常功能状态抑或失效状态的标志是极限状态,即极限状态是区分结构工作状态是可靠还是不可靠的标准。

严格地讲,结构的安全可靠只具有统计或概率意义。结构设计的目标,就是要在可接受的概率水平上,保证结构在规定的设计使用期限内能够满足预定的功能要求。在实际应用中,为了定量地进行分析计算,给出结构可靠性的数量指标,引入了失效概率和可靠度的概念。

结构的安全与否,关系到工农业生产,关系到人民的正常生活和生命财产安全,甚至关系到国家的稳定。进行结构可靠性分析的目的,就是将结构可靠性的大小,用概率定量地表示出来,以保证结构具有足够的安全水平。

## 1.2 可靠性理论发展和研究概况

在材料力学及弹性力学的基础上,工程界在早期提出的结构设计方法是许用应力法。它假设弹性结构的材料特性在空间上是均匀分布的而且是确定的。在给定荷载后,用结构力学或材料力学的方法算出构件中的应力分布,确定最不安全处的工作应力值。设计时保证最大应力不超过材料的许用应力,它满足了结构的强度要求,因而认为结构在工作中不会破坏。所采用的许用应力是根据经验及统计资料确定的。考虑到工作中的各种不确定因素,由许用应力乘以安全系数后,就可得到结构的设计强度,这种方法称为许用应力法或传统设计法。以往的结构设计均采用此法。设计时,作用于结构上的荷载以及结构的承载能力,均用定值,若有动荷载作用于结构上时,将动荷载换算成静荷载进行计算。

随着计算机的出现和计算方法的发展,结构设计中可以考虑材料的非线性等复杂因素,并应用个人电脑来进行大型结构的力学计算,与计算仿真对应的结构试验也更趋完善和成熟。但这种设计方法还没有达到完美的程度,主要原因之一就是结构设计中会遇到各种不确定因素(如荷载和材料性能的不确定性),因而趋向于用概率方法来代替它们。

在传统的决定论设计方法中,所用荷载及材料性能等数据,均取它们的平均值,或者取所谓的最大值或最小值,没有考虑到数据的离散性,而且在设计中引入了一个大于1的安全系数。这种安全系数在很大程度上由设计者根据经验确定,带有一定的不确定性,特别是运用新材料对新产品的的设计更是如此。当设计者不能确信他设计的产品安全可靠时,一般来说,采用大的安全系数是正确的,它能够降低结构失效的可能。然而,这并不能绝对防止结构失效的发生,反而造成了结构质量的增加。

可靠性设计又称为概率设计。这种设计方法认为,作用于结构的真实外荷载及承载能力,都具有概率特性,设计时不可能予以精确地确定,称为随机变量或随机过程,它服从一定的概率分布。以此为出发点进行结构设计,能够更好地符合客观实际情况。从这种设计思路

出发,就能够根据结构的可靠性要求,把失效的发生控制在可接受的水平。这种方法的显著优点就是给出了确定结构可靠性程度的数量概念。例如,像飞行器这样一类航空航天结构,利用概率设计法可以明显减小结构质量,并能降低成本和提高性能。

概率设计法能够解决两个方面的问题:根据设计,进行分析计算以确定结构的可靠度;根据任务提出的可靠性指标,确定构件的参数。

## 1.2.1 国外可靠性研究历程

结构可靠性理论的形成始于人们对结构工程中各种不确定性的认识,概率设计法的思想可追溯到 20 世纪。1911 年,卡宾奇就提出用统计数学的方法研究荷载及材料强度。1928 年苏联哈奇诺夫、1935 年斯特列里茨基等人相继发表了这方面的文章。在 1926—1929 年间,霍契阿洛夫和马耶罗夫制定了概率设计的计算方法,但当时提出的方法不够严格,没有摆脱争论的实质,因而没有得到广泛的赞同,未付诸实践。之后,斯特列里茨基、拉尼岑和苏拉等人的工作,逐渐为这种方法铺平了道路。弗罗伊登撒尔(Freudenthal)在 20 世纪 40 年代和拉尼岑几乎同时开展了结构可靠性的研究工作。

1946 年美国的弗罗伊登撒尔(Freudenthal)发表了题为《结构的安全度》的研究论文,开始较为集中地讨论结构安全度问题。该论文奠定了结构可靠性的理论基础。1947 年,苏联的尔然尼钦提出了一次二阶矩理论的基本概念和计算结构失效概率的方法,给出与失效概率  $P_f$  相对应的安全指标  $\beta$  的计算公式。美国的康乃尔(Cornell)在尔然尼钦工作的基础上,于 1969 年提出了与结构失效概率相联系的可靠指标  $\beta$ ,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分析的二阶矩模式。

1954 年,拉尼岑提出了应力-强度结构可靠性设计的正态-正态模型,并推导了用正态分布随机量的二阶矩表达的可靠性中心安全系数的一般形式。美国“大力神”导弹壳体结构设计采用了这种中心安全系数。20 世纪 50 年代,随着导弹和空间技术的发展,结构可靠性问题日益引起人们的关注和重视,一些国家相继成立了专门的组织,从事这方面的研究,概率设计方法也日臻完善并达到了实用程度。在这期间,美国、苏联、加拿大等国家制定了相应的标准和规范,作为概率设计的依据。继而,一些国际组织也提出了这方面的准则。例如,国际标准化组织(ISO)给出了《结构可靠度总原则》,并采用了拉克维茨提出的等价正态方法,国际结构安全度联合委员会(JCSS)也推广了这一方法。

1971 年加拿大的林德(Lind)提出了分项系数的概念,将可靠指标  $\beta$  表达成设计人员习惯采用的分项系数形式。这些工作都加速了结构可靠度方法的实用化。美国伊利诺依斯大学洪华生(Ang)在结构可靠度研究方面有较大贡献。他对各种结构不定性做了分析,提出了广义可靠性概率方法。1974 年,他与康乃尔(Cornell)联合撰写了《结构安全和设计的可靠性基础》一文,对结构可靠度设计做了详尽系统的论述。

1986 年,Liu 和 Kiureghian 提出了两个符合边缘分布函数的多元分布模型。该模型适用于任意数量的随机变量,特别适用于工程应用,并确定了各模型的有效性条件和各变量之间相关系数的适用范围。1988 年,Kiureghian 和 Ke 利用一阶可靠性和有限元方法,建立了随机变结构随机荷载作用下结构可靠度分析方法,研究了随机域离散化的两种方法,并研究了随机属性或荷载场的相关长度对实例结构可靠性的影响。1996 年,Deodatis 采用基于谱表示的

仿真算法,根据其规定的非平稳交叉谱密度矩阵,生成具有演化能力的非平稳、多变量随机过程的样本函数。生成的样本函数的集合互相关矩阵与相应的目标相同。

2000年,Soize提出了一种广义质量、阻尼和刚度矩阵不确定的随机模型的构造方法。这种非参数模型不需要确定不确定的局部参数。Naess和Moe描述了路径积分(PI)方法数值实现的新方法。它们允许对时间变化的动态系统进行分析,而不会显著地增加计算机时间,并给出了二维和三维问题的数值计算结果。

2001年,Au和Beck针对工程系统可靠性分析中遇到的小故障概率,提出了一种新的仿真方法,称为子集模拟法。Solarì和Piccardo提出了一种适合于确定结构三维阵风激励响应的大气湍流统一模型。与经典模型不同的是,模型中所有参数都是通过一组二阶统计矩来确定的,并对模型误差和其他随机性来源也作了一般性讨论。Papadimitriou等定义了鲁棒可靠性的概念,考虑到结构建模中的不确定性,以及结构在其寿命期间所经历的不确定的激励;为了提高基于动态测试数据的鲁棒可靠性评估,将系统辨识的贝叶斯概率方法与概率结构分析工具相结合,提出了用于识别和辨认模型修正的结构可靠性的方法。

2002年,Puig等给出了一个基于高斯过程无记忆变换的蒙特卡洛仿真技术的数学依据,并对不同类型的收敛性给出了逼近序列。此外,还提出了一种原始的数值方法来求解产生基本高斯过程自相关函数的泛函方程。2003年,Proppe等对等效线性化(EQL)和蒙特卡洛仿真(MCS)在随机动力学中的应用进行了讨论。Poulakis等提出了一种用于管网泄漏检测的贝叶斯系统辨识方法。该方法适当地处理了测量和建模误差中不可避免的不确定性。基于流量测试数据的信息,它提供了最有可能的泄漏事件(泄漏的大小和位置)以及这些估计中的不确定性的估计。

2004年,Koutsourelakis等讨论了当存在大量随机变量时结构可靠度的评估问题,通过采样技术来探测失效域。Rahman和Xu提出了一种新的单变量降维方法,用于计算机系统在荷载、材料特性和几何形状等不确定的情况下的统计矩。与常用的泰勒展开/摄动法和诺伊曼展开法相比,所提出的方法既不需要计算偏导数,也不需要随机矩阵的反演。RICHARD V F和Grigoriu探讨了PC近似的特点和局限性,研究了来评估PC近似准确性的指标。Schuëller等得出了在高维度的可靠性程序的一个重要评价方法。结果表明,如果尺寸大幅度增加或趋于无穷大,在低维中表现良好的程序可能变得无用。据观察,有些基于蒙特卡洛的模拟程序实际上能够处理高维问题。

2005年,Sues和Cesare提出了一种获得串联、并联和混合系统可靠性的方法。该方法是基于数值的简单的最可能点系统仿真(MPPSS)。该方法可用于获得系统灵敏度因子,即每个随机变量对系统可靠性的重要性。Xu和Rahman提出了一种新的计算方法,称为分解方法,可用于预测结构和机械系统在随机荷载、材料特性和几何条件下的失效概率。2006年,Elhewy等提出了人工神经网络(ANN)的响应面方法。该方法利用神经网络模型建立了随机变量与结构响应之间的关系,然后将神经网络模型与一阶、二阶矩或蒙特卡洛模拟法(MCS)等可靠性方法相结合,预测失效概率。2009年,Cadini等提出了在不确定监测条件下裂纹扩展问题的可能性。非线性模型的非加性噪声影响裂纹扩展过程。这是第一次将粒子滤波技术应用用于结构预测问题,并对滤波器进行修改,以便根据预定义检查时间的观测估计部件剩余寿命的分布。2010年,Kaymaz和McMahon提出了一种新的响应面称为ADAPRES,

其中加权回归方法应用于标准回归。实验点也选自设计点最可能存在的区域。实例说明所提出的方法对数值和隐式性能函数有改善。Kang 等提出了一个有效的应用移动最小二乘 (MLS) 近似的 RSM, 而不是传统的最小二乘近似。MLS 近似给出了权重高于实验点接近最可能失效点 (MPFP), 它允许响应面函数 (RSF) 是在 MPFP 接近极限状态函数。

2011 年, Chakraborty 和 Roy 给出了有界不确定系统参数下的调谐质量阻尼器 (TMD) 参数在地震振动控制中的可靠性优化问题。2012 年, Spanos 和 Kouglioumtzoglou 提出了一种新的基于谐波小波的统计线性化方法来确定随机激励下非线性振荡器响应的演化功率谱, 还通过非线性系统的输入输出关系的统计线性化来扩展非线性系统。同年, 两人研究了随机激励非线性振子的非平稳响应概率密度函数 (PDF) 的近似解析技术。2013 年, Yurchenko 等考虑带窄带随机激励的非线性马蒂厄方程的旋转运动, 利用路径积分技术获得响应的联合概率密度函数, 用于构造参数空间中的旋转运动域。Wu 和 Law 提出了一种考虑不确定性的桥梁与车辆相互作用动力学分析的新方法。该方法与蒙特卡洛方法在数值模拟中有很高的一致性, 在不同的车辆速度、不确定性的激励和系统参数的情况下具有良好的协议。

2014 年, Marian 和 Giaralis 提出了一种新的被动振动控制结构, 即调谐质量阻尼器式 (TMDI), 作为经典的调谐质量阻尼器 (TMD) 的推广, 来抑制振荡运动的随机支持激发机械级联 (连锁) 系统。Gaspar 等提出了一种对 Kriging 插值模型的效率进行评估的方法, 该模型用于包括非线性有限元分析、结构模型等耗时的数值模型的结构可靠性问题。

近年来, 欧洲混凝土委员会 (CEB) 和国际预应力混凝土协会 (FIP), 在安全度研究方面也做了大量工作。1971 年, 由 CEB 倡议, CEB、CECM (欧洲钢结构协会)、CIB (国际房屋建筑协会)、FIP、IABSE (国际桥梁与结构工程协会)、RILEM (国际材料与结构研究所联合会) 赞助, 成立了国际结构安全度联合委员会 (JCSS), 并编制了《结构统一标准规范的国际体系》。1976 年, JCSS 推荐了拉克维茨 (Rackwitz) 和菲斯莱 (Flessler) 等人提出的通过“当量正态化”方法以考虑随机变量实际分布的二阶矩模式。至此, 结构可靠性理论开始进入实用阶段。

在国际学术会议方面, “国际结构安全性与可靠性会议” (ICOSSAR) 第一届于 1969 年在美国华盛顿举行, 第二届于 1977 年在德国慕尼黑举行, 此后每四年举行一次。另一个国际系列学术会议“国际土木工程中统计学与概率论的应用学术会议 (ICASP)”也是每四年举行一次。同时, 在《结构安全性》(Structural Safety)、《概率工程力学》(Probabilistic Engineering Mechanics) 等国际期刊上, 集中报道了各国在工程结构可靠性方面的重要研究成果。

## 1.2.2 国内可靠性研究历程

20 世纪 50 年代, 我国开始了对结构可靠性的研究工作。研究的方向大致可分为两个方面, 即静力可靠性和动力可靠性, 并在此基础上涵盖了多个结构领域。

在静力可靠性方面, 1954 年, 大连理工大学赵国藩提出用数理统计学中的误差传递公式, 计算各种荷载组合的总超载系数  $n_s$  及构建总均值系数  $K_R$ , 以代替各分项系数。1960 年, 他提出用数理统计法计算的安全系数与经验系数相结合, 设计钢筋混凝土结构构件。20 世

纪60年代,土木工程界广泛开展了结构安全度问题的讨论,对影响安全度的诸因素进行了较为详细的分析。20世纪70年代,我国的部分规范采用了半经验半概率的极限状态设计法,但在安全度的表达形式上以及材料强度的取值原则上,各设计规范没有统一起来。为此,国家基本建设委员会于1978年成立了《建筑结构设计统一标准》编委会和专题研究组,组织有关单位开展了研究工作。1983年提出的《建筑结构设计统一标准(草案)》就完全采用了国际上推行的概率极限状态设计法(水准Ⅱ)。目前,我国工程结构设计规范的编制与修订正在按下述层次进行:第一层次为《工程结构可靠度设计统一标准》;第二层为按照第一层次统一标准的指导原则编制的专业部门的国家标准,如《港口工程结构可靠度设计统一标准》、《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》等;第三层次为按照第二层次标准修订补充而成的具体行业标准,如《砌体结构设计规范》、《钢结构设计规范》等。

1984年,赵国藩院士在根据帕洛黑姆和汉纳斯的“加权分位值”的概念基础上提出了“结构可靠度的实用分析方法”。1987年,李桂青和曹宏研究在平均风压和脉动风压共同作用下高耸结构动力可靠性的分析方法,提出了计算结构的年破坏概率与使用期限内破坏概率的整套公式,并考虑了风向的影响。1992年,赵国藩院士根据最大熵原理提出了“结构可靠度分析的四阶矩法”。1993年,李云贵、赵国藩以条件概率和数值分析方法为基础,提出了一种新的结构体系可靠度点值估算方法,并通过算例说明了该法的应用。

在动力可靠性方面,1986年,王光远等在充分考虑地震荷载的模糊性和随机性的基础上建立了地震地面运动干扰的模糊平稳随机模型,提出了在地震作用下结构模糊随机振动反应分析的基本方法。1995年,王光远以模糊随机变量为基本变量,定义了结构的模糊随机功能函数,分析了结构有效状态与失效状态之间的模糊性,建立了结构的模糊随机极限状态方程。

1994年,姚耀武和陈东伟研究了基于可靠度理论的土坡稳定可靠度使用分析方法,采用JC法,包括楔块稳定分析法和具有多种土质堤坝的转动分析方法,并考虑了 $c$ 、 $\varphi$ 、 $\gamma$ 等参数为随机变量。

1995年,欧进萍、段宇博提出了结构构件和体系“小震不坏”、“大震不倒”及结构体系在设计基准期内的抗震可靠度分析方法;重新校准了结构构件的目标可靠度指标;综合考虑结构造价和损失期望,并提出了结构体系抗震目标可靠度的优化决策方法。1999年,王光远对抗震结构的最优设防烈度与可靠度进行了研究,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。

在学术会议方面,我国土木工程学会桥梁及结构工程分会结构可靠度专业委员会,从1987年起每隔两三年举行一次全国性学术会议。会议收录的论文全面地反映了我国在结构可靠性研究领域的成果。

1993年,肖焕雄、韩采燕把超标洪水间隔时间作为随机变量,考虑实际施工导流系统使用之前的最近一次超过设计值的洪水发生时间已知的条件,提出了一种超标洪水风险率模型,并对洪水间隔时间的概率分布做了初步分析。1994年,肖焕雄、唐晓阳从截流实际情况出发,研究水流作用下群体抛投混合料的稳定性。

1996年,金伟良采用Monte-Carlo方法进行结构可靠度的数值模拟,提出了以条件期望和重要抽样相结合的改进模拟方法。1997年,李杰提出了考核中小型电力变压器的可靠性

建议指标,并通过样本实例,给出了目前中小型电力变压器的可靠性运行状况。

1998年,贡金鑫等论述了结构性能劣化的原因,提出了一种简便易行,且形式上能够与现有的结构可靠度分析方法相协调,并考虑抗力变化的结构可靠度的分析方法。杜修力结合水工建筑物的特点,提出了一套可供水工建筑物抗震可靠度设计和分析应用参考的随机地震动输入模型和参数。1999年,严春风等应用岩土工程可靠度计算中常用的一次二阶矩法,以 Mohr-Coulomb 准则的抗剪度参数  $c$ 、 $\varphi$  为例,针对各种不同分布函数概型对可靠度指标的敏感度进行了定量分析。

2000年,李国强对结构抗震设计的目的与目标、结构抗震设计原则、结构抗震设计标准、地震作用的统计分析以及基于概率可靠度的结构抗震设计方法等方面中存在的问题,进行了探讨。徐军等基于可靠度指标的几何含义,运用遗传算法原理,提出了计算岩土工程可靠指标和设计验算点的全局优化算法。刘宁等综合考虑初始地应力、渗流荷载以及岩体材料参数的随机性,采用非线性有限元的初应力法,基于偏微分技术,模拟地下洞室施工开挖步骤,提出了地下洞室围岩可靠度对随机因素敏感性的计算方法。

2001年,张建仁、刘扬将遗传算法(GAs)和人工神经网络(ANN)这一类智能方法引入斜拉桥可靠度分析领域,分别对斜拉桥主梁和索塔在多种失效模式下的可靠度进行计算和分析。欧进萍等根据结构体系可靠度的特点,提出了基于概率 Pushover 分析的结构体系抗震可靠度评估方法,并通过理论分析和算例结果表明:该方法是评估结构体系抗震可靠度的简便、实用方法。傅旭东和刘祖德结合土坝应力变形的可靠性分析,对二阶非线性摄动随机有限元理论、程序和土性参数随机场的离散技术进行研究,推导出邓肯-张模型的一阶和二阶弹性偏导矩阵,提出非线性摄动随机有限元的计算方法,研制出相应的程序。

2002年,徐军、郑颖人基于数值模拟研究了响应面重构的若干方法,以模拟实际工程中常见的功能函数不能明确的可靠度计算问题。2003年,徐军、郑颖人结合可靠度理论,给出了围岩稳定的可靠度分析方法,在计算出可靠度的同时还给出了围岩和锚喷支护结构的应力特征值。

2004年,陈建兵、李杰基于概率密度演化的基本思想,构造一个虚拟随机过程,使得随机结构动力反应的极值为该虚拟随机过程的截面随机变量,提出了随机结构动力可靠度分析的极值概率密度方法。2005年,张建仁、秦权在研究现有混凝土桥梁抗力和荷载的时变性的基础上,建立了现有桥梁的时变可靠度计算模型,采用自适应重要抽样法计算时变可靠指标,并对变量进行了参数敏感性分析。2006年,熊铁华、常晓林利用基于响应面的随机有限元法来获得失效模式中各个单元的极限状态方程,通过得到这些方程的等效线性化方程从而逐步得到该失效模式的等效线性化方程,并由 Ditlevsen 界限法来计算结构的体系可靠度。吕大刚等将结构的可靠度方法与基于性能的抗震设计理论结合起来,提出了基于可靠度和性能的结构整体地震易损性分析方法,并采用有限元可靠度方法进行了结构地震易损性的计算。苏永华等以 Janbu 法为例,研究隐式功能函数边坡工程稳定可靠度计算方法。通过不同计算方法的对比,验证该近似方法的准确性和合理性,并采用近似方程分析灰木露天矿边坡的稳定可靠性。

2007年,周伟等针对基于有限元法的重力坝深层抗滑稳定分析问题,根据工程实际中

软弱结构面上的抗剪断摩擦系数和凝聚力变异性不同的特点,在计算中引入滑动面上抗剪强度参数的分项系数,提出了一种新的应用于重力坝抗滑稳定的有限元计算方法——分项系数有限元法。2009年,熊铁华等研究了顺风向、横风向风荷载同时作用下输电铁塔的主要失效模式及其极限基本风压。按空间桁架体系建立了输电铁塔的有限元模型,建立了在风荷载作用下,寻找输电铁塔主要失效模式的方法。2010年,熊铁华、梁枢果研究了在覆冰荷载作用下,输电铁塔主要失效模式及其体系可靠度。建立覆冰荷载作用下寻找输电铁塔主要失效模式的方法。李典庆等提出分析相关非正态变量可靠度计算问题的随机响应面法,采用 Nataf 变换成功地解决输入变量相关时随机响应面法的配点问题及可靠度计算问题。郑俊杰等基于无量纲计算模式,研究了极限状态方程中每个随机变量对基桩竖向承载力可靠性分析的影响,并采用最大熵原理将可靠指标的计算转化为熵密度函数的计算。利用无量纲计算模式推导了基桩竖向承载力的失效概率的计算公式。吕大刚等将均匀设计与响应面法相结合,提出了结构可靠度的数值模拟新方法:基于均匀设计的响应面法、均匀设计响应面与蒙特卡洛抽样相结合的混合模拟法。

2011年,贾超等以国内某盐岩地下储气库为例,建立了相应的可靠度计算功能函数,开展储气库运营期时变可靠度计算及储库风险分析研究。以储库的蠕变体积收缩率为风险控制指标,拟合出满足工程可靠度要求的体积收敛率限值与储气内压的关系式,并探讨了储气库可靠性对主要随机因素的敏感性。

2012年,陈祖煜等通过典型重力坝算例分析及工程实例的反演分析,对岩体的抗剪强度参数的分项系数进行了敏感性分析,对重力坝设计规范的建议值的合理性进行了评价。提出可靠度方法相对安全率  $\eta_R$  的概念和计算公式,以无重介质地基的极限承载力为例在数学上严格证明了传统方法与可靠度方法相对安全率的等价性,证实了可靠度方法相对安全率  $\eta_R$  作为描述建筑物失效概率相对允许值裕幅的指标的合理性,并以  $\eta_p = \eta_R$  为判据进行了分项系数标定的工作。李典庆、蒋水华等提出了地下洞室变形可靠度分析的非侵入式随机有限元法,并提出了随机多项式展开与 SIGMA/W 模块接口方法及其流程图,从而实现了确定性有限元分析和随机分析一体化。最后研究了非侵入式随机有限元法在地下洞室变形可靠度分析中的应用。

2013年,左育龙等针对岩土工程的功能函数强非线性、难以显式表达的特点,提出了基于人工神经网络的四阶矩法。利用神经网络对隐式功能函数进行拟合,求出基本随机变量在均值点处的功能函数值和其偏导数,利用四阶矩法求解岩土工程的隐式功能函数可靠度。李典庆等提出了考虑土体参数空间变异性的边坡可靠度分析的非侵入式随机有限元法。采用 K-L 级数展开方法表征土体抗剪强度参数空间变异性,其中通过 Wavelet-Galerkin 技术求解 Fredholm 积分方程得到相关函数的特征解。基于有限元滑面应力法计算边坡安全系数,采用随机多项式展开将隐式函数表达的安全系数替换为显式函数表达的安全系数,并编写了计算程序 NISFEM;研究了所提方法在考虑土体参数空间变异性的边坡稳定可靠性分析中的应用。

2015年,杨晓艳等以可靠度理论和实测车辆荷载数据为基础,推导了考虑桥梁跨径对车辆荷载分项系数的影响,建立车辆荷载效应的概率模型,得到不同跨径桥梁车辆荷载效应

标准值的跨径影响系数,在此基础上确定了不同跨径桥梁结构的车辆荷载分项系数与跨径的关系,并采用一次二阶矩可靠度方法计算了其可靠指标。1999年,邱志平和顾元宪为计算出不确定结构参数对结构位移影响范围的上下界,提出了两种区间摄动方法。当结构参数具有误差或有界不确定性时,区间数学可以在不知道不确定变量的概率分布的情况下定量地考察不确定参数对结构响应的影响。

可靠度理论的研究和实际应用发展速度较快,从电子产品的可靠性分析与设计,拓展到机械设备和工程结构领域,从军事领域逐步转向一般工业和民用部门。在不久的将来,可靠度理论的研究与应用将与我们的生活息息相关。

可以预料,结构可靠性理论作为一门新兴学科,随着科学技术的不断发展,必将不断完善并拓宽自己的应用领域,使结构设计与分析方法进入一个新的阶段。

## 1.3 可靠性理论面临的挑战

### 1.3.1 结构建模的非确定性

实际工程问题中广泛存在着与几何尺寸、材料属性、边界条件等相关的不确定性,采用合理有效的理论与方法度量、传播和控制这些不确定性对于提高产品或结构的安全性能具有极其重要的意义。不确定性可分为随机不确定性和认知不确定性两大类,随机不确定性建模通常需要大量的样本信息以构造不确定性参数的精确概率分布,且不能随着认识水平的提高而消除;而认知不确定性则往往是由于样本信息匮乏无法构建精确的概率分布,且会随着认识水平的提高而逐渐消除。现代产品和结构的设计、制造、服役及老化等全生命周期普遍存在认知不确定性,仅仅采用传统的随机建模、分析与设计将无法对认知不确定性下结构的性能做出客观有效的评估,甚至可能导致不可靠的设计。目前,以概率论这一个统一完善的理论体系为支撑,随机不确定性结构响应与可靠性分析在理论方法与工程应用方面均发展得较为成熟。相对而言,认知不确定性的建模与分析手段则存在多种理论体系并存的情况,这就使得认知不确定性的建模与分析在一定程度上较随机不确定性的处理方法更为复杂。尽管认知不确定性结构响应与可靠性分析得到了较为迅速的发展,但是整体而言该领域的研究依然处于初步阶段,还有诸多关键问题亟待解决。

### 1.3.2 结构的失效模式

实际大型结构体系通常都是多次静不定结构,结构的冗余度较高,存在着多种可能的失效模式。如何有效地识别其中的主要失效模式已成为结构可靠性分析中的核心问题。从理论上讲,若要计算体系的综合失效概率一般需要搜索所有可能的失效模式,因此会导致工作量的增大。实际上,各个失效模式的发生概率存在数量级的差异,并且各个失效模式之间存在相关性,因此可只对发生概率较大的失效模式进行计算,从而使计算效率得到大幅度的提高。近些年来,世界各国相继开展了这方面的研究,并且提出了一系列识别结构主要失效模式的算法。例如,网络搜索法、荷载增量法、分支-约界法、 $\beta$ 约界法、截止枚举法、优化准则法