

现代结构系统可靠性理论 及其应用

董 聪 著

国 家 自 然 科 学 基 金
航 空 科 学 基 金
8 6 3 高 科 技 计 划
清 华 大 学 基 础 研 究 基 金
教 育 部 高 校 重 点 实 验 室 高 级 访 问 学 者 基 金
模 式 识 别 国 家 重 点 实 验 室 基 金
智 能 技 术 与 系 统 国 家 重 点 实 验 室 基 金
CIMS 青 年 科 技 创 新 基 金
中 国 博 士 后 科 学 基 金

资 助 项 目

科 学 出 版 社

2 0 0 1

内 容 简 介

本书汇集了国际上近 20 年来和作者本人近 15 年来在结构系统可靠性理论及其应用领域的一些重要研究成果。内容包括:先进拟合优度检验方法及应用,结构强度与结构疲劳寿命分布的统一模型,可靠性工程中的经验 Bayes 方法,模式失效概率计算的理论与方法,系统综合失效概率计算的理论与方法,系统失效模式识别的广义 β 约界法,联合失效概率分枝-约界法及其拓展,结构系统静强度可靠性分析理论与算法,结构系统疲劳寿命可靠性分析理论与算法,结构系统可靠性分析的统一理论,结构系统智能健康诊断理论与方法,广义遗传算法等。

本书理论体系完整,提供了大量珍贵的原始试验数据和工程应用实例,可供土木建筑、机械、航空航天、近海工程、反应堆、石油勘探、动力系统、管理工程等领域从事可靠性研究与应用的科技人员和管理人员参考,也可作为研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

现代结构系统可靠性理论及其应用/董聪著,-北京:
科学出版社,2001
ISBN 7-03-008979-0

I. 现… II. 董… III. 结构可靠性;系统可靠性-研究 IV. TB311.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 81689 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2001 年 3 月第 一 版 开本:787×1092 1/16
2001 年 3 月第一次印刷 印张:20 3/4
印数:1—2 500 字数:474 000

定价:45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈杨中〉)

前 言

结构可靠性通常定义为:在规定的使用条件和环境下,在给定的使用寿命期间,结构有效地承受载荷和耐受环境而正常工作的能力。结构可靠性的数量指标通常用概率表示,称为结构可靠度。结构可靠性是一个广义概念,通常包含结构的安全性和耐久性两个方面。静载和瞬态动载作用下结构可靠性研究的重点是结构的安全性问题。循环荷载作用下结构可靠性研究的重点则通常是结构的耐久性问题。结构可靠性理论分为结构元部件可靠性理论和结构系统可靠性理论两个层次。结构元部件可靠性理论的研究起步于20世纪20年代,50年代前后开始引起广泛关注。目前出版的关于结构可靠性方面的著作,多数是分析和研究结构元部件的可靠性问题,通常不涉及或很少涉及结构系统可靠性理论的核心内容。结构系统可靠性理论是20世纪80年代前后发展起来的一门新兴边缘学科,主要数学基础是概率论、随机过程理论、决策论、博弈论、组合数学和近代数理统计方法,主要计算手段是有限元法、边界元法和随机网络分析技术。结构系统可靠性理论中的系统有两个含义:第一,系统是由结构单元构成的具有一定功能关系的组合体;第二,系统失效有明确的演化历程,失效过程中系统的拓扑结构将发生明确的变化。附加第二条限制性条款的原因是,对于随机结构系统,如果在整个分析过程中假定其拓扑结构不发生演化,则其可靠性分析和元件的可靠性分析之间没有本质的区别。结构系统可靠性理论的研究之所以在20世纪80年代前后才开始出现,在很大程度上是因为系统失效过程中其拓扑结构发生了变化,拓扑结构的变化使结构失效模式的识别和分析变得十分困难。

本书是一部有关结构系统可靠性理论与应用的专著,汇集了国际上近20年来及作者本人近15年来在该领域的一些重要研究成果。从1988年本书作者所在课题组首次获得国家自然科学基金(18880306)资助开始,本项目的研究工作已6次获得国家自然科学基金的资助。除此之外,本项目所涉及的研究内容还获得过航空科学基金、863高科技计划项目、攀登计划重大项目、霍英东青年教师基金、CIMS青年科技创新基金、航空科技预研项目、国防科技预研项目、船舶科技预研项目和航空科技攻关项目等几十项资助。其中,作者本人获得过国家自然科学基金(59505011, 59778039, 59975049)、航空科学基金(95B51062)、863高科技计划项目(863-2-441, 863-2-443)、CIMS青年科技创新基金、中国博士后科学基金、中国航天博士后基金、教育部高校重点实验室高级访问学者基金、模式识别国家重点实验室基金、智能技术与系统国家重点实验室基金、船舶科技预研项目、航空高校自选课题、清华大学基础研究基金(JC2000003)等十多项资助。

作者就本书的有关课题在核心期刊上发表论文60余篇,其中被EI(Engineering Index)索引12篇,被IAA(International Aerospace Abstract)摘引7篇,被SCI引用3篇,被核心期刊引用140多次。本书是在作者已发表的几十篇核心期刊论文的基础上加以提炼和完善,同时补充上未发表或未公开发表的一些最新研究成果之后凝缩而成的。作为一部学术专著,本书没有提供有关计算结构力学、概率论、随机过程理论和网络分析理论等基础知识的介绍,有关这方面的内容,建议读者参阅相关的基础教程。

本书的主要内容安排如下：

第一章 绪论。从整体和历史发展的角度，简要介绍和评价了现代结构系统可靠性理论发展中的一些重要成就和相关经验，目的是使读者对该领域的全貌有一个基本的了解。

第二章 先进拟合优度检验方法及应用。简要介绍了近年来发展起来的一类以 EDF 统计量为基础的高效母体分布拟合优度检验方法，在目前已出版的结构可靠性著作和数理统计研究生教材中，尚未发现有关这方面内容的介绍。重点放在建立结构强度与结构疲劳寿命分布的统一模型，并用大样本原型试验和模拟试验数据，对统一模型的正确性与合理性进行系统的检验和确证。有必要说明的是，本章提供了一些珍贵的大样本原始试验数据。

第三章 可靠性工程中的经验 Bayes 方法。对适用于小样本估计的经验 Bayes 方法进行了系统的研究，建立了检验先验分布假设合理性的对偶检验法则。

第四章 模式失效概率计算的理论与方法。简要介绍了目前流行的用于可靠度指数 β 计算的中心点法、H-L 算法和 JC 算法。重点介绍了本书提出的基于 Quasi-Rosenblatt 变换和 H-L 算法相结合的 Q-H-L 算法，证明虽然迭代轨迹不同，但 Q-H-L 算法和 JC 算法的收敛点是完全一样的。同时，Q-H-L 算法比 JC 算法实现起来更加方便、快捷。

第五章 系统综合失效概率计算的理论与方法。简要介绍了 Ditlevsen 的 2 阶窄可靠度近似计算理论、Feng 的 3 阶窄可靠度近似计算理论和我们的高阶窄可靠度上下界理论。重点介绍了高阶可靠度积分计算理论和高阶可靠度近似计算的递归算法。

第六章 系统失效模式识别的广义 β 约界法。介绍了 Thoft-Christensen 的 β 约界法和我们提出的联合 β 约界法、修正 β 约界法和全局 β 约界法。证明与 Thoft-Christensen 的 β 约界法相比，全局 β 约界法不仅是高效的，同时也是准确的。

第七章 联合失效概率分枝-约界法及其拓展。简要介绍了 Murotsu 的联合失效概率分枝-约界法，对 Murotsu 算法的逻辑合理性和计算复杂性进行了系统的分析，提出了一系列相关的改进算法。

第八章 结构系统静强度可靠性分析理论与算法。对识别结构系统静强度主要失效模式的几种常用算法进行了系统的介绍，内容包括 Moses 的广义承力比最大准则、Feng 的优化准则法及其拓展，以及本书作者的阶段临界强度分枝-约界法和全局临界强度分枝-约界法。分析了失效域两种不同定义方法的区别与联系，完成了结构系统静强度可靠性分析体系的统一。算例部分提供了采用全局临界强度分枝-约界法评估输电铁塔和海洋平台总体极限强度可靠性的工程实例。

第九章 结构系统疲劳寿命可靠性分析理论与算法。对常规疲劳和腐蚀疲劳环境下的结构系统可靠性分析方法进行了系统深入的研究，内容包括广义 Miner 法则及其概率拓展、应力腐蚀疲劳累积损伤计算模型、全局疲劳寿命分枝-约界法等。算例部分提供了采用全局疲劳寿命分枝-约界法评估海洋平台总体疲劳寿命可靠性的工程实例。

第十章 结构系统可靠性分析的统一理论。建立了新的定义于概率空间的有限自动机模型，证明该模型可实现经典有限自动机模型和广义半 Markov 过程模型的统一，进而实现了结构系统静力、动力和疲劳断裂寿命主要失效模式识别算法的统一。以统一的概率型有限自动机模型为基础，通过将人工神经网络、全局分枝-约界算法和自适应重要抽样算法相结合，建立了智能化的随机离散系统可靠性分析和预测的统一模型体系。

第十一章 结构系统智能健康诊断理论与方法。对结构健康诊断方法进行了系统深入的研究,提出了一系列新的损伤识别和定位公式,建立了具有自主进化功能的结构健康诊断体系。用青马桥传感器群最优布点设计的成功实例,说明基于计算智能的算法体系在大型工程中是可以实现的。

第十二章 广义遗传算法。从数学结构、操作程序和生物学原理等三个方面,对广义遗传算法进行了系统的诠释。与 Holland 的经典遗传算法不同,广义遗传算法采用了基于间断平衡理论的非线性进化策略,其进化轨迹不是一个遍历的 Markov 过程,结果使广义遗传算法的搜索域远小于经典遗传算法的搜索域。搜索域的压缩解释了广义遗传算法高效率的本质原因。广义遗传算法的有效性和高效率在青马桥传感器群最优布点设计研究中得到了检验和验证。

在本书正式定稿之际,谨向清华大学土木系陈肇元院士的推荐表示衷心的感谢。清华大学钱稼茹教授审阅了全文,在此表示诚挚的谢意。

诚挚的感谢献给我的硕士导师冯元生教授、博士生导师杨庆雄教授和博士后合作导师夏人伟教授与何庆芝教授,正是他们的积极支持、教诲和鼓励,才使我走上了科学研究的道路。

诚挚的感谢献给高镇同院士、钟万勰院士、赵国藩院士、项海帆院士、杨为民教授,刘西拉教授、江见鲸教授、范立础教授、柳春图研究员、申仲翰研究员、潘际炎研究员、陈基发研究员和谭铁牛研究员,他们的支持、鼓励和帮助令我终生难忘。

诚挚的感谢献给雷源忠教授、茹继平教授、黎明教授、裴兆宏教授和石理国研究员,他们的积极支持和鼓励,使本书所涉及的研究工作得以不断地延续和发展。最后,向国家自然科学基金委员会、航空科学基金委员会、863 航天高科技专家委员会、教育部高校重点实验室访问学者基金评审委员会、清华大学基础研究基金评审委员会、中国船舶科学研究中心、西安飞机工业公司疲劳断裂实验室、清华大学结构工程与振动教育部重点实验室、清华大学智能技术与系统国家重点实验室、中科院模式识别国家重点实验室、清华大学 CIMS 国家工程研究中心等部门的支持表示衷心的感谢。

董 聪

2000 年 3 月于清华大学

第一章 绪 论

结构可靠性通常定义为:在规定的使用条件和环境下,在给定的使用寿命期间,结构有效地承受载荷和耐受环境而正常工作的能力。结构可靠性的数量指标通常用概率,即结构可靠度表示。结构可靠性是一个广义概念,通常包含结构的安全性和耐久性两个方面。静载和瞬态动载作用下结构可靠性研究的重点是结构的安全性问题。循环荷载作用下结构可靠性研究的重点通常是结构的耐久性问题。结构可靠性理论分为结构元部件可靠性理论和结构系统可靠性理论两个层次。结构元部件可靠性理论的研究起步于20世纪20年代,50年代前后开始引起广泛关注,目前出版的关于结构可靠性方面的书籍,多数是分析和研究结构元部件的可靠性问题,通常不涉及或很少涉及结构系统可靠性理论的核心内容。结构系统可靠性理论是20世纪80年代前后发展起来的一门新兴边缘学科,主要数学基础是概率论、随机过程理论、决策论、博弈论、组合数学和近代数理统计方法,主要计算手段是有限元法、边界元法和随机网络分析技术。结构系统可靠性理论中的系统有两个含义:第一,系统是由结构单元构成的具有一定功能关系的组合体;第二,系统失效有明确的演化历程,失效过程中系统的拓扑结构将发生明确的变化。附加第二条限制性条款的原因是,对于随机结构系统,如果在整个分析过程中假定其拓扑结构不发生演化,则其可靠性分析和元件的可靠性分析之间没有本质的区别。结构系统可靠性理论的研究之所以在20世纪80年代前后才开始出现,在很大程度上是因为系统失效过程中其拓扑结构发生了变化,拓扑结构的变化使结构失效模式的识别和分析变得十分困难。结构系统可靠性理论与应用主要包括以下几个方面:1)结构系统主要设计参数的统计分析方法和概率分布规律;2)结构系统主要设计参数之间的相关关系和参数相关程度对系统综合失效概率的影响;3)结构系统可靠性分析的数学模型及其求解算法;4)结构系统可靠性试验理论和试验模拟技术;5)结构系统主要失效模式识别算法和系统综合失效概率计算方法;6)结构系统可靠性预测与分配方法;7)以系统可靠性指标为目标函数或约束条件的结构优化设计理论与方法;8)结构系统可靠性理论在大型工程结构设计、分析、使用和评定中的应用。

1.1 结构元部件可靠性理论的研究与发展

将概率论和数理统计方法应用于结构可靠性分析的最早尝试可以追溯到20世纪20年代。尽管早期的研究工作富有创造性,但囿于当时的科技发展水平和现实需求,基于可靠性的结构分析方法并未引起社会的足够重视。第二次世界大战期间及随后的岁月里,有关机电设备、船舶、压力容器、飞行装置和海上石油钻井平台等复杂结构,在设计使用寿命期限内,在规定的载荷条件与环境下不能预期正常工作的事例不断增多和日趋严重,说明以安全系数设计法为代表的传统设计方法对环境条件和结构特性的确定论性假设是不适当的,必须从概率论的观点出发,对有关的设计参量进行统计分析,研究它们的分布规律和相关特性,从而制订出一整套新的、符合实际情况的结构设计规范^[1]。

Borges 研究了载荷和应力的分布规律。Toroja 和 Paez 进行了根据载荷和应力分散现象产生的原因推断其所属分布类型的初步尝试。Freudenthal 研究了传统设计法中的安全系数和结构破坏概率之间的内在关系,建立了结构可靠性分析的理想数学模型^[2,3]。由于数学分析手段的进步和客观环境的需要,加上 Freudenthal 等人的杰出工作与不懈努力,20 世纪 50 年代以来,工程结构的可靠性问题开始引起学术界和工程界的普遍关注^[1~6]。

Freudenthal 的全概率分析方法在理论上是合理的,但在实际应用中往往很难实现。通常情况下,我们仅能够得到关于结构参数均值和方差的比较准确的估计结果,因此以随机变量的均值和方差为基础的二阶矩方法在工程界受到了普遍的欢迎^[7]。Cornell 将结构可靠度指数 β 定义为结构安全裕量方程的均值和标准差之比。对于非线性安全裕量方程, Cornell 建议将其在均值点处进行 Taylor 展开,并根据展开式的线性项近似计算非线性安全裕量方程的均值和方差^[8]。研究表明,对于不同形式的等价安全裕量方程, Cornell 的方法不能保证得出一致的计算结果。鉴于此,Hasofer 和 Lind 建议根据失效面而不是安全裕量方程定义失效模式的可靠度指数 β 。对于同一物理问题,根据 H-L 算法计算得到的可靠度指数 β ,不会由于选择不同形式的等价安全裕量方程而发生变化^[9]。Rackwitz 和 Fiessler 将 H-L 算法的适用条件由正态随机变量构成的安全裕量方程推广为任意随机变量构成的安全裕量方程。R-F 算法的核心是将非正态随机变量在设计点处转换为正态随机变量,通过迭代计算,使两者在可靠度指数 β 的计算上近似等价^[10]。R-F 算法的出现意味着,研究可靠度指数 β 的准确计算问题只需将重点放在由正态随机变量构成的安全裕量方程即可。由于 R-F 算法良好的普适性,目前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然有许多需要改进的地方,但 JC 算法的出现无疑标志着,在失效模式已知的条件下,模式失效概率的计算问题最终有了工程上可以实现的解决方案。对 JC 算法的改进有许多途径,如 Chen 和 Lind 提出的 3 参数正态尾区近似方案^[11],但理论上更加严格的改进是由 Hohenbichler 和 Rackwitz 提出的一体化实施方案^[12];使用 Rosenblatt 变换^[13],将非正态随机向量等价变换为对应的线性无关正态随机向量,而后对变换后的由正态随机向量构成的等价安全裕量方程使用 H-L 算法计算失效模式的可靠度指数 β 。根据通常的命名原则,我们将按这种方式扩展的 H-L 算法命名为 R-H-L 算法(Rosenblatt-Hasofer-Lind)。R-H-L 算法和 R-F 算法的区别是,R-F 算法实现的是局部等价而非全局等价,其转换结果依赖于设计点的位置选择^[14]。在单一失效模式的模式失效概率计算有了工程上可以实现的解决方案之后,多模式综合失效概率的快速计算问题成为人们关注的焦点。在结构系统可靠性分析领域,Cornell、Ang 和 Amin 提出了 1 阶窄可靠度上下界理论^[15,16]。通过将众多失效模式按相关系数的大小进行分类,Ang 等人对 1 阶窄可靠度上下界理论进行了修正。经 Ang 修正后的 1 阶窄可靠度上下界理论在一些文献中被称为概率网络评估技术^[17,18]。Ditlevsen 通过考虑两两失效模式之间相关关系的影响,提出了 2 阶窄可靠度上下界理论^[19]。2 阶窄可靠度上下界理论的出现同样标志着,在系统的主要失效模式集已知的条件下,结构系统综合失效概率上下界的估算问题有了工程上可以实现的解决方案。事实上,通过考虑 N 个失效模式之间相关关系的影响,我们也可以按照和 Ditlevsen 类似的方式建立 N 阶窄可靠度上下界理论^[14,20]。

由于 Hasofer、Rackwitz 和 Ditlevsen 等人的卓越贡献,20 世纪 80 年代前后,与有限元法、计算机应用技术和随机网络分析理论的迅猛发展潮流相呼应,以一次二阶矩方法为基

础的现代结构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。

现代结构可靠性分析理论和应用技术由元件级水平向系统级水平过渡的过程中,出现过一种称为分项安全系数设计法的细节可靠性设计方法。美国、加拿大和欧共体等制订的有关压力容器和民用建筑的许多结构可靠性设计规范,以及我国制订的有关港口工程、水利水电工程和铁路工程的结构可靠性设计规范,都是以分项安全系数设计法为基础的。分项安全系数设计法的总体思路是:从系统整体的角度出发,通过对结构元件进行合理的可靠度分配,来确保系统具有近优的初始可靠度和残余可靠度。具体做法是:用若干个分项安全系数代替传统安全系数设计法中的单一安全系数,通过合理地规定这些分项安全系数的大小来保证设计出的结构元件具有比较均匀的可靠度分配。分项安全系数设计法是把结构分解为元件后,再针对元件进行可靠性设计,它的结构设计程序和原先使用的传统结构设计程序相同,因而易于被结构设计人员和强度分析人员接受和使用。在航空工程领域,分项安全系数设计法的历史可以追溯到 20 世纪 60 年代,当时的军用飞机和大型民用飞机的起落架就是按照分项安全系数进行设计的。80 年代初,美国波音民用飞机公司对分项安全系数设计法进行了系统的改进,用分项安全额定值(Partial Safety Ratings, PSR)取代分项安全系数,制订了基于细节疲劳损伤额定值(Detail Fatigue Rating, DFR)的飞机结构耐久性设计规范和基于损伤容限额定值(Damage Tolerance Rating, DTR)的飞机结构损伤容限设计规范。通过在波音当时的新型号机种,如 Boeing-757 和 Boeing-767 机体结构设计中的成功应用,基于 DFR 和 DTR 的飞机结构耐久性和损伤容限设计方法得到了广泛的认同^[1]。20 世纪 80 年代中期,美国军用飞机同大型民用飞机一样,将基于 PSR 的飞机结构可靠性设计方法作为飞机结构设计的常规方法^[21]。80 年代中期,当时的中国航空航天工业部组织大量的人力和物力翻译和研究美国新近颁布的飞机结构和机载设备的可靠性设计规范,如文献[22, 23]便是相应美军规范和设计手册的中文版本。

同结构元部件的可靠性分析一样,就结构系统可靠性分析而言,如何对结构参数的统计分布规律进行准确的估计和检验^[24~34],如何对结构元部件的随机疲劳累积损伤规律进行准确的分析和预测^[35~44],如何对结构的模式失效概率和系统综合失效概率进行准确的估计和计算^[45~56]始终是一项重要的研究课题。尽管如此,进入 20 世纪 80 年代之后,如何快速、准确地识别结构系统的主要失效模式,开始成为系统可靠性研究人员最为关注和必须解决的焦点和难点问题^[1, 20, 57]。

1.2 结构系统可靠性理论的早期研究与发展

20 世纪 60 年代,在研制民兵式导弹和发展载人航天飞行器的过程中,美国贝尔实验室的工程师们发明了故障树分析法(Fault Tree Analysis, FTA)。随着阿波罗载人登月计划的成功,FTA 在机电工程可靠性分析和评估领域开始流行^[22, 58]。JC 算法的出现和窄可靠度上下界理论的建立^[10, 19],意味着在系统的主要失效模式集已知的条件下,结构系统综合失效概率上下界的估算问题有了工程上可以实现的解决方案,因此,快速、准确地识别结构系统的主要失效模式,开始成为系统可靠性研究人员最为关注的焦点和难点^[1]。Ang 和 Tang 将 FTA 的思想和做法引入结构系统可靠性分析领域,并通过 PNET 对结构

系统综合失效概率进行初步估计^[18]。作为美国工程院院士(1976)和土木工程领域结构可靠性研究的先驱之一,Ang 对结构元部件的可靠性进行过深入系统的研究。作为对比,Ang 在 80 年代前后有关系统可靠性研究方面的早期论著,其分析实例则多为机电系统,如 Boeing-747 飞机的着陆系统和汽车的自动刹车系统等。对土木工程结构,如由加劲梁、桥面板、桥墩及桥桩组成的桥梁体系,则采取了人工简化的方式,将其等价简单的串并联模型之后再做分析。从今天的角度看,Ang 当时显然没有考虑结构系统的失效演化历程。造成这一现象的主要原因是,虽然故障树的自动分析问题当时已经解决,但故障树的自动生成问题却没有有效的解决方案。对于机电系统,故障树比较容易采用逻辑推理,通过人工或人工干预的方式予以生成(首次完成载人登月使命的著名阿波罗飞船——Apololl 的故障树,就是通过人工方式生成的)。对于结构系统,元件失效将导致结构内力的重新分配,因此,不经复杂的数值计算过程,事先便无法判断结构的可能失效方式和途径,因此也就无法借助于逻辑推理,通过人工或人工干预的方式生成结构系统的故障树。作为结构系统可靠性研究的开拓者之一,Ang 的主要贡献是将一种新的思想和分析方法从一个正在获得成功的领域迅速移植到另一个尚未开垦的处女地。从历史发展的角度讲,正是因为 FTA 的引入才使人们真正意识到,有效的约界方法和自动化分析手段,将在结构系统可靠性分析和设计中扮演十分重要的角色。80 年代前后,和 Ang 一同进军结构系统可靠性研究领域的还有 Moses^[59~61], Thoft-Christensen^[45,62,63]和 Murotsu^[63~65]等一批著名学者,他们共同为结构系统可靠性理论的诞生和早期发展做出了杰出的贡献。

结构系统主要失效模式识别算法的核心有两个:1)如何实现结构的失效状态转移;2)如何快速、正确地生成结构系统失效树的主干和主枝。对于确定性结构系统,可能的失效路径只有一条,熟悉计算结构力学和结构极限状态分析算法的人们知道如何完成第一项任务^[66]。对于随机结构系统,由于可能的失效路径多种多样,因此不仅需要考虑如何实现结构的失效状态转移,而且需要判断结构的失效状态下一步最有可能朝哪些路径转移。当可能的失效状态转移路径不止一条时,便会出现分枝现象。显然,如果在每一个分枝点考虑所有的分枝可能,则只需分枝操作,便可以生成完整的失效树集合,这就是自动化的简单穷举算法。熟悉组合数学和网络分析理论的人都知道,简单穷举的结果必然导致组合爆炸。避免出现组合爆炸的唯一出路,就是通过有效的算法,将那些最有可能对最终结果产生重要影响的分枝提前选出来,从而避免分枝规模的无限制扩大。限制分枝规模的操作就是约界。因此,约界操作的目的是在生长过程中,而不是在生长过程结束之后,将失效树的主干和主枝快速、正确地识别出来。显然,要高效地完成第二项任务,需要那些具有力学背景又熟悉随机网络分析技术、状态空间搜索算法和事件树搜索算法的研究者的积极参与。评价园丁的好坏,要看他修剪树木的手艺。同样,结构系统主要失效模式识别算法成功与否的关键,在于能否建立合理高效的约界准则和约界算法。从数理逻辑的角度讲,计算结构力学的逻辑基础是演绎逻辑。演绎逻辑的特点决定了理论上可以采用自动方式生成结构系统的失效树。

在 Moses 和 Thoft-Christensen 的论著中,虽然没有以术语的形式出现过 Branching 和 Bounding 这些在组合数学和人工智能领域广泛使用的专业术语^[67~69],甚至未曾以算法的形式,严格阐述对他们的设想。但不可否认,他们以自己敏锐的直觉和卓越的智慧,准确无误地发现了问题的本质和算法的精髓。Thoft-Christensen 将其提出的失效模式识别

方法取名为 β -Unzipping 法。Unzipping 是一个生活用语,意思是拉开拉锁。从表层意思上看,Unzipping 似乎和 Branching 或 Bounding 的涵义相去甚远。但从深层分析,其实则不然。设想一下,拉开拉锁的过程难道不是 Branching? 而控制拉锁拉开的程度难道不是 Bounding? Unzipping 一词一语双关,用得真是恰到好处。在文献[1,57]中,根据算法的实现过程,我们将 Thoft-Christensen 的 β -Unzipping 法意译为 β 约界法。早期的系统可靠性研究人员,在提出自己构想的同时,多数不太注意或不太善于对所提构想进行结构化的算法阐述,有点像佛教文化中的禅,其真谛需要信徒自己去领悟。

结构系统可靠性分析的核心架构,决定了那些熟悉计算结构力学和结构极限状态分析算法的可靠性研究者,将在主要失效模式识别算法的创立中发挥重要作用。而那些同时还熟悉随机网络分析技术、状态空间搜索算法、博弈树和事件树搜索算法的可靠性研究者,会在主要失效模式识别算法的完善和创立新的统一算法的过程中发挥重要作用。

作为早期从事结构优化设计的可靠性研究人员,Moses 对计算结构力学有透彻的理解和把握。由 n 个单元组成的结构系统中,设 r_1, r_2, \dots, r_{k-1} 共 $(k-1)$ 个单元已相继失效,在失效历程第 k 阶段,定义结构单元 $r_k [r_k \in (1, 2, \dots, n), r_k \notin (r_1, r_2, \dots, r_{k-1})]$ 的承力比(对于 $k=1$)或承力比之比(对于 $k>1$)为 $\lambda_r^{(k)}$ 。本书中,我们将承力比和承力比之比统称为广义承力比,则 Moses 提出的广义承力比最大准则可描述为:定义 $0 < c_k \leq 1$, 满足 $\lambda_r^{(k)} > c_k \max[\lambda_r^{(k)}]$ 的单元 r_k 将有资格成为该阶段的失效候选单元。Moses 采用和当前失效单元相关的增量加载方式实现结构的状态改变,并由此进入失效历程的第 $k+1$ 阶段。通过分析结构系统的失效演化历程,可求得系统的一系列主要失效模式。从本质上讲,Moses 的广义承力比最大准则是传统极限状态分析法(Limit State Analysis Method, LSAM)和现代概率论及数理统计观点的一种巧妙结合。

Thoft-Christensen 提出了识别结构系统主要失效模式的 β 约界法。具体内容为:由 n 个单元组成的结构系统,设 r_1, r_2, \dots, r_{k-1} 共 $(k-1)$ 个单元已相继失效,单元的失效事件表示为 $E_{r_1}^{(1)}, E_{r_2}^{(2)}, \dots, E_{r_{k-1}}^{(k-1)} | r_1, r_2, \dots, r_{k-2}$ (因为有上标 k 存在,因此在不会发生误解的条件下,通常简记为 $E_{r_k}^{(k)}$)。在失效历程第 k 阶段,单元 $r_k [r_k \in (1, 2, \dots, n), r_k \notin (r_1, r_2, \dots, r_{k-1})]$ 的失效事件表示为 $E_{r_k}^{(k)}$ 。定义失效事件 $E_{r_k}^{(k)}$ 发生的概率为 $P(E_{r_k}^{(k)})$, 并定义条件可靠度指数为 $\beta_{r_k}^{(k)} = -\Phi^{-1}[P(E_{r_k}^{(k)})]$ 。其中, Φ 表示标准正态分布的累积分布函数。定义 $\beta_{\min}^{(k)} = \min(\beta_{r_k}^{(k)})$, 在失效历程第 k 阶段,Thoft-Christensen 认为,满足 $\beta_{r_k}^{(k)} \in [\beta_{\min}^{(k)}, \beta_{\min}^{(k)} + \Delta\beta^{(k)}]$ 的单元 r_k 将有资格成为该阶段的失效候选单元^[45, 62, 63]。删除最新失效单元 r_k ,通过对失效单元 r_k 所在节点外加虚载的方式实现结构的状态改变,并由此进入失效历程的第 $(k+1)$ 阶段。对于延性破坏,虚载的大小等于单元临界承载力。对于脆性破坏,虚载的大小等于零。

定义 $c_k \geq 1$, Thoft-Christensen 的 β 约界准则可改写为另一种形式: $\beta_{r_k}^{(k)} < c_k \beta_{\min}^{(k)} = \beta_c^{(k)}$ 。我们称其为修正 β 约界准则^[57],通常取 $\beta_c^{(k)} = 1.29 + 0.86\beta_{\min}^{(k)}$ 。定义 $0 < c_k \leq 1$, 用失效概率 $\Phi(-\beta)$ 取代 β , 可得如下约界准则: $\Phi(-\beta_{r_k}^{(k)}) > 10^{-7} \times \Phi(-\beta_{\min}^{(k)})$, 我们称其为广义 β 约界准则,通常取 $r = 1.0 \sim 2.0$ 。满足上述条件的单元 r_k 将有资格成为失效历程第 k 阶段的失效候选单元。基于 β 约界准则、修正 β 约界准则和广义 β 约界准则的约界算法,我们统一称其为广义 β 约界法。

显然,无论是 β 约界法还是广义 β 约界法,约界结果的正确性和准确性都依赖于 β 的

准确计算。由于 β 计算结果方面的误差,有可能导致给出错误的主要失效模式或主要失效模式排序结果,因此对由非正态随机变量构成的安全裕量方程或非线性安全裕量方程,如何快速、准确地计算 β 是它们的使用者必须解决好的一个问题。

定义导致系统最终失效的事件为 $E_{r_p}^{(p_q)}$, 约界参数为 $P_{f_{pC}} = 10^{-\gamma} \times \max \left\{ P \left(\bigcap_{i=1}^{p_q} E_{r_i}^{(i)} \right) \right\}$ 。在失效历程第 k 阶段, Murotsu 认为, 满足条件 $P \left(\bigcap_{i=1}^k E_{r_i}^{(i)} \right) \geq P_{f_{pC}}$ 的单元 r_k , 将有资格成为失效历程第 k 阶段的失效候选单元^[63~65]。由于 Murotsu 的分枝-约界法是以联合失效概率 $P \left(\bigcap_{i=1}^k E_{r_i}^{(i)} \right)$ 的大小为依据候选失效单元, 并以联合失效概率间的相互关系 $P \left(\bigcap_{i=1}^k E_{r_i}^{(i)} \right) \geq P_{f_{pC}}$ 为依据进行分枝-约界操作的, 因此, 我们将 Murotsu 的分枝-约界法称为联合失效概率分枝-约界法。

当完整失效路的长度 l 比较长时, 对于主要失效路识别过程的最初几步 ($k \leq l - \Delta l$, $\Delta l = 2 \sim 3$), 入选条件 $P \left(\bigcap_{i=1}^k E_{r_i}^{(i)} \right) \geq P_{f_{pC}}$ 显得过于宽松。此时, 需引入新的局部入选限制机制^[14]。修改后的约界参数为 $P_{f_{pC}}^* = \max \left[P_{f_{pC}}, 10^{-\gamma L} \times \max \left(P_{f_{p(r_k)}}^{(k)} \right) \right]$, 即符合条件 $P_{f_{p(r_k)}}^{(k)} \geq P_{f_{pC}}^*$ 的失效路分枝, 才有资格成为失效历程第 k 阶段的失效候选单元。基于约界参数 $P_{f_{pC}}^* = \max \left[P_{f_{pC}}, 10^{-\gamma L} \times \max \left(P_{f_{p(r_k)}}^{(k)} \right) \right]$ 的分枝-约界法, 我们称之为复合失效概率分枝-约界法。

联合失效概率的准确计算困难和耗时, 这是联合失效概率分枝-约界法和复合失效概率分枝-约界法面临的主要困难。如何妥善地解决这一问题, 过去和现在都是一项富有挑战性的课题, 尤其是当安全裕量方程由非正态随机变量构成或为非线性安全裕量方程的时候。

1.3 可实证的结构系统可靠性理论的研究与发展

Moses、Thoft-Christensen 和 Murotsu 等人均以算法的形式, 实现了结构系统失效树的自动生成。Thoft-Christensen 提出在失效历程各阶段, 根据本阶段所可能提供的信息进行同步约界的思想。Murotsu 采用结构化的方式, 对所提出的结构系统失效模式识别算法进行了严格的阐述。他们的创造性贡献, 为结构系统可靠性理论的进一步发展和完善, 奠定了坚实的基础。

20 世纪 80 年代中后期, 结构系统可靠性研究开始逐步向实用化的方向发展。采用现有算法, Feng (冯元生) 和 Moses 对结构系统的失效原因进行了深入的研究, 建议采用无损结构系统可靠度指标和残余结构系统可靠度指标共同规范设计, 以确保设计出的结构具有合理的残余可靠度储备^[70]。Kam 研究了初始结构缺陷对系统可靠性的影响, 发现几何缺陷将在一定程度上降低结构系统的可靠性品质^[71]。Feng 研究了材料属性对结构可靠度储备的影响^[72], 发现合理的材料属性选择对获得合理的残余结构可靠度储备具有至关重要的意义。

在主要失效模式识别算法研究方面, Melchers 和 Tang 提出了识别结构系统主要失效模式的截止枚举法 (Truncated Enumeration Method, TEM), 认为在截止参数选择得当

的条件下,该方法能够识别出结构系统的所有主要失效模式^[73,74]。Feng 对 Moses 的广义承力比最大准则进行了改进,提出了识别结构系统主要失效模式的优化准则法^[75]。董聪对 Murotsu 联合失效概率分枝-约界法中的失效模式识别程序进行了改进,提出了识别结构系统主要失效模式的强度削减-人造外载法^[76]。冯元生和董聪共同对优化准则法进行了改进,提出了识别结构系统主要失效模式的载荷增量最小准则和相应的最小载荷增量法。采用最小载荷增量法,冯元生和董聪发现,已进入失效状态的单元存在由于后续单元的失效而出现局部卸载的现象,并给出了作为标准考题的 10 杆桁架结构,系统临界强度均值不大于 $43.3333 \times 10^5 \text{N}$ 的所有失效模式。发现在前 34 个失效模式中,有 10 个失效模式是以前其他研究人员未曾发现的失效模式^[77]。最小载荷增量法的意义,主要的并不在于它能够给出完整的失效模式集,而在于它第一次将真实的、可由实验测量的可测物理量(载荷增量)作为失效模式识别算法的约界依据。最小载荷增量法的出现标志着,结构系统可靠性理论的发展开始跨入可实证的历史阶段。

结构系统可靠性理论要在工程上得到广泛的应用,除了理论本身应当尽可能地合理和完善之外,理论分析结果的表达形式必须具有可实证的特征,必须便于工程技术人员根据其经验,对分析结果的合理性进行判断。

董聪和冯元生将广度优先搜索策略引入失效模式识别领域,建立了识别结构系统主要失效模式的阶段临界强度分枝-约界准则和相应的阶段临界强度分枝-约界法,证明在一级搜索纵深的条件下,该算法可严格确保不遗漏结构系统的主要失效模式^[78]。与载荷增量最小准则相比,阶段临界强度分枝-约界准则不仅考虑了载荷增量的作用,而且全面考虑了载荷累积量的影响,因而在失效历程的每一阶段,能够对失效树桠枝实现有效的同步约界控制。董聪和杨庆雄将柔性自适应控制边界的概念引入失效模式识别过程,借助于多级动态反馈回路,实现失效树柔性控制边界的自适应动态调整,建立了适用于大中型结构自动化可靠性分析的全局临界强度分枝-约界准则和相应的全局临界强度分枝-约界法,证明在多级搜索纵深的条件下,该算法可严格确保不遗漏结构系统的主要失效模式^[79,80]。

董聪和杨庆雄研究了循环荷载作用下的结构系统可靠性分析问题,建立了识别结构系统主要失效模式的阶段疲劳寿命分枝-约界准则和相应的阶段疲劳寿命分枝-约界法^[81]。通过引入反馈控制,实现了失效树柔性边界的自适应动态调整,建立了适用于大中型结构自动化可靠性分析的全局疲劳寿命分枝-约界准则和相应的全局疲劳寿命分枝-约界法,证明在多级搜索纵深的条件下,采用全局疲劳寿命分枝-约界法可严格确保不遗漏结构系统的主要失效模式^[82]。

系统临界强度(极限强度)和系统疲劳寿命不仅是实验可测的物理量,而且是结构系统极限承载力实验和疲劳寿命实验的考核指标。因此,以系统临界强度和系统疲劳寿命为约界参数的全局分枝-约界法在得到学术界高度评价的同时^[83],也得到了工程界的普遍认同。采用全局分枝-约界法,杨庆雄、石理国、董聪共同负责完成了渤海 8 号海洋平台总体极限强度和疲劳寿命的可靠性分析与评估任务^[1,84]。与随机离散结构系统不同,随机连续结构系统分枝点的位置事先无法确定。董聪和夏人伟提出了同步跟踪自校验算法,解决

了随机连续结构系统疲劳断裂寿命的可靠性分析问题,并对复杂飞机连接件的疲劳断裂寿命进行了可靠性评估^[85]。

1.4 结构系统可靠性分析的统一理论与智能化体系

结构系统主要失效模式识别算法的核心是生成图 1.1 所示的失效树。

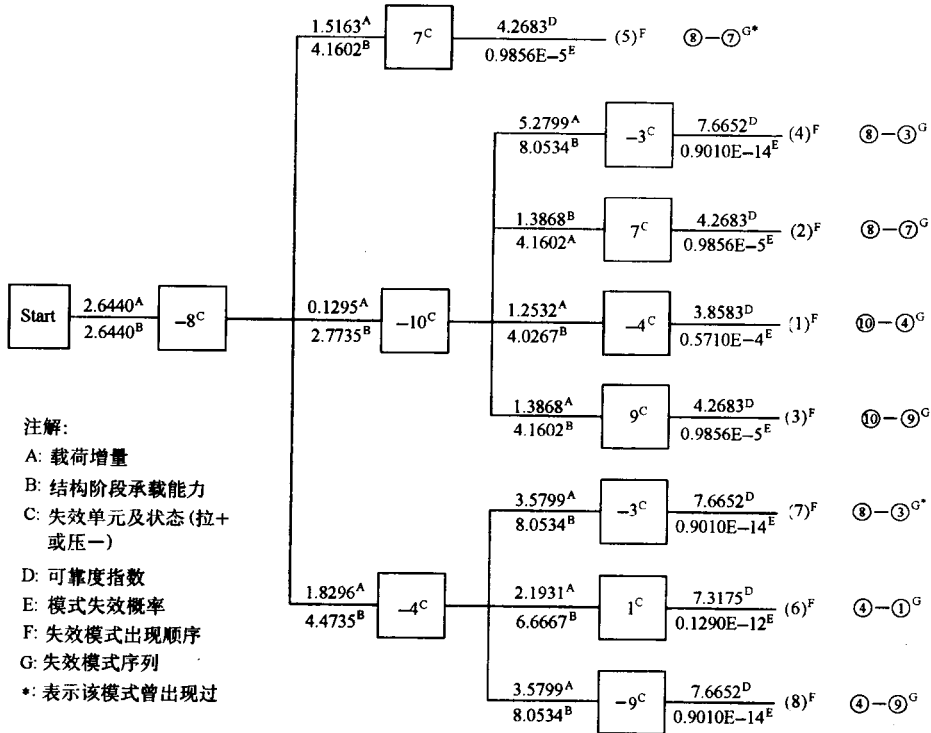


图 1.1 结构系统失效树的形式与内容(出自参考文献[57])

生成失效树的基本操作只有分枝和约界两种。分枝的原因是由随机性引起的,不同方法的差异在于所采用的约界准则和约界策略(表 1.1)。约界的目的是通常是将符合某些条件的一组而非一个失效单元筛选出来,将不符合条件的其他单元提前排除。因此,将不同约界准则根据所使用的约界参数的特性称为相应的最大或最小化准则更准确些。

系统阶段临界强度是现阶段和系统失效过程中的失效单元序列所对应的一系列载荷增量的和,这一特点决定了在全局临界强度分枝-约界法的框架下,可以实现优化准则法,最小载荷增量法,阶段临界强度分枝-约界法和全局临界强度分枝-约界法的统一^[1,14,80]。我们将离散事件动态系统(Discrete Event Dynamic Systems, DEDS)定义为离散事件按照一定的发生机制相互作用而导致系统状态演化的一类动态系统。具体地说,它具有 3 个基本特征:1)事件的发生时刻是离散的;2)系统状态的转移由离散事件触发;3)系统状态的演化规律可由离散事件的有向序列来表征。除此之外,它还具有 2 个分类特征:1)是否考虑事件发生时刻之间的物理时间间隔;2)是否考虑事件发生和状态转移的随机性。根据上

述定义和分类特征,考虑系统失效演化历程的静力、动力、疲劳和断裂寿命可靠性分析与仿真系统、柔性生产线系统、交通运输管理系统、通讯网络系统等都是典型的DEDS^[86~90]。董聪和郭晓华建立了概率型有限自动机模型,并在概率型有限自动机模型的框架下,首次实现了结构系统静力、动力、疲劳和断裂寿命主要失效模式识别算法的统一。^[89~92]。

表 1.1 识别结构系统主要失效模式的方法

方法名称	约界准则 (单元入选条件)	约界范围		原创作者	文 献
		横向(现阶段)	纵向(跨阶段)		
工程准则法	承力比或承力比之比最大化准则	✓		Moses	[59,60,61]
优化准则法	载荷增量最小化准则	✓		Feng(冯元生)	[75]
最小载荷增量法	载荷增量最小化准则	✓		董聪、冯元生	[77]
β 约界法	β 最小化准则	✓		Thoft-Christensen	[45,62,63]
修正 β 约界法	β 最小化准则	✓		董聪	本书
广义 β 约界法	失效概率最大化准则	✓		董聪	[14,57]
全局 β 约界法	联合失效概率最大化准则	✓	✓	董聪	本书
联合失效概率分枝-约界法	联合失效概率最大化准则		✓	Murotsu	[63,64,65]
强度削减-人造外载法	联合失效概率最大化准则		✓	董聪	[57,76]
截止枚举法	联合失效概率最大化准则		✓	Melchers、Tang	[73,74]
复合失效概率分枝-约界法	联合失效概率最大化准则	✓	✓	董聪	[14,57]
阶段临界强度分枝-约界法	阶段临界强度最小化准则	✓		董聪、冯元生	[57,78]
全局临界强度分枝-约界法	阶段临界强度及系统临界强度最小化准则	✓	✓	董聪、杨庆雄	[57,79,80]
阶段疲劳寿命分枝-约界法	阶段疲劳寿命最小化准则	✓		董聪、杨庆雄	[14,81]
全局疲劳寿命分枝-约界法	阶段疲劳寿命及系统疲劳寿命最小化准则	✓	✓	董聪、杨庆雄	[14,82]

主要失效模式识别算法统一之后,建立统一的结构系统可靠性理论成为一项重要课题。对于线性系统,由于失效演化模式的安全裕量方程存在显式表达,采用窄可靠度上下界理论便可以对结构系统的可靠性状况进行评估。因此,建立统一的结构系统可靠性理论的关键,是如何进行非线性结构系统的可靠性分析与评定。非线性结构系统可靠性分析与评定涉及两个由浅入深的层次:第1层次问题的特点是,系统输入和系统响应之间的关系是非线性的,但不考虑系统的失效演化历程。也就是说系统的特性虽然是随机的,但在整

个分析过程中,假定其拓扑结构和有关品质不发生演化。在结构工程领域,如果不考虑损伤累积、节点约束失效、构件破坏及材料品质劣化等问题,则大型桥梁和高层建筑在风载作用下的随机响应即属此类问题。通常情况下,随机有限元法、快速概率积分法和 Monte Carlo 模拟法比较适合于处理此类问题。按照本书对系统可靠性的定义,第 1 层次问题可归入元部件可靠性研究的范畴。第 2 层次的问题才是真正意义上的非线性结构系统可靠性问题。其特点是,系统输入和系统响应之间的关系是非线性的,但同时需要考虑系统的失效演化历程。也就是说,系统的特性不仅是随机的,而且在整个分析过程中,其拓扑结构和有关品质将发生演化。在结构工程领域,如果考虑损伤累积、节点约束失效、构件破坏及材料品质劣化等问题,则大型桥梁、高层建筑和海上石油钻井平台在风载和地震载荷等作用下的可靠性分析与评定即属此类问题。非线性结构系统可靠性分析的难点在于:1)失效演化模式的安全裕量方程不存在显式表达,如何重构失效演化模式的安全裕量方程是一个十分关键的问题。2)对于非线性安全裕量方程,如何准确地计算模式失效概率、模式联合失效概率和系统综合失效概率。

董聪等人建立的以系统整体的阶段疲劳寿命和阶段临界强度(极限承载力)为控制变量,以自适应柔性边界为反馈环节的全局分枝-约界法的操作是在均值条件下进行的,不依赖于单元参数的分布类型和系统的线性或非线性特性,因此,该算法不仅适用于识别线性系统的主要失效模式,也适用于识别非线性系统的主要失效模式^[14,73,80,82,91,92]。对于线性系统,主要失效模式的安全裕量方程(极限状态方程)存在显式,故可直接导出。对于非线性系统,主要失效模式的安全裕量方程不存在显式,不能直接导出。虽然非线性系统的安全裕量方程不能直接导出,但和安全裕量方程有关的顺序失效单元序列 r_1, r_2, \dots, r_q 可直接给出。因此,通过特征方程重构的方式,我们可以建立近似安全裕量方程。

常规做法是将近似安全裕量方程 \hat{F} 取为以下形式的二次超曲面:

$$\hat{F}(\bar{x}) = a + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j \leq i}^n c_{ij} x_i x_j \quad (1.1)$$

或其它形式的多项式函数。有关函数逼近问题的近期研究结果表明,以有限维的多项式函数作为基函数,以任意精度逼近任意非线性映射是不可能的^[93]。也就是说,在许多情况下,采用多项式型的 \hat{F} 不能够有效地逼近实际安全裕量方程 F 。因此,无论是作为一个理论问题,还是作为一个应用问题,安全裕量方程的重构精度一直悬而未解。

由于人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)研究所取得的杰出成就,多层前向网络以任意精度逼近任意有限维非线性映射的问题已从理论上彻底解决^[94~108]。

定理 1.1(Funahashi)^[95] 设 $h(x)$ 为有界单调递增连续函数, K 为 R^n 的紧致子集(有界闭子集), $F(\bar{x}) = F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为 K 上的实值连续函数,则对任意 $\epsilon > 0$, 存在整数 N 和实常数 $\alpha_{ij}, \theta_j, \beta_j (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, N)$, 使

$$\hat{F}(\bar{x}) = \sum_{j=1}^N \beta_j h\left(\sum_{i=1}^n \alpha_{ij} x_i - \theta_j\right)$$

满足

$$\max_{\bar{x} \in K} |\hat{F}(\bar{x}) - F(\bar{x})| < \epsilon \quad (1.2)$$

即对 $\epsilon > 0$, 存在一个 3 层前向网络,其输入节点和隐节点分别为 n 和 N 个,网络的输入输出关系为 $\hat{F}(\bar{x})$, 隐层的节点函数为 $h(\cdot)$, 输入层和输出层的节点函数为线性的,使得式

(1.2)成立。

由于 n 维线性空间 V^n 上不同范数之间存在等价性,因此,上述定理可以自然地推广到任意范数意义下的逼近问题中去^[96]。

定理 1.1 及对定理 1.1 的推广使我们意识到,采用多层前向网络作为安全裕量方程近似函数 \hat{F} ,可从理论上有效地解决安全裕量方程的精确重构问题。

对于非线性安全裕量方程, Monte Carlo 模拟法成为准确计算模式失效概率、模式联合失效概率和系统综合失效概率的有效手段^[50~53,56,93]。Monte Carlo 模拟法的有效使用通常依赖于采样中心的选择^[50~53,56,93],具有全局优化能力的遗传算法^[109~112]及广义遗传算法^[113~118]是确定最优采样中心的有效工具。通过将全局分枝-约界法、人工神经网络、广义遗传算法和 Monte Carlo 模拟法的最新研究成果相结合,董聪等人建立了非线性结构系统可靠性理论的统一框架及其模拟方法^[92,118,119]。

20 世纪 90 年代以来,随着大跨度铁路公路两用桥、大型水力发电机组、大型核能发电机组、国际空间站计划、火星无人探测计划等大型工程项目的实施,基于动力特性的复杂结构系统的在线可靠性评估问题成为国际学术界和工程界关注的热点^[120]。以国际空间站计划的实施为契机,美、英、法、德、日等发达国家相继投入了大量的研究与发展资金用于支持该领域的探索性研究。由本章以上各节的介绍可知,结构参数已知条件下的系统可靠性分析问题已基本解决,因此,结构系统在线可靠性评估的关键是解决结构损伤识别、定位及结构单元损伤程度的标定问题。文献^[121~123]介绍了结构损伤识别和定位研究的近期进展。在文献^[124~126]中,我们提出了无反演状态下结构损伤识别和定位的合理解决方案,并对一些曾经引起广泛争议的著名实验现象和实验结果进行了解释。在文献^[127,128]中,我们提出了基于反演的结构损伤识别、定位及结构单元损伤程度标定的系统解决方案。在文献^[129,130]中,我们从应用的角度对结构系统可靠性理论的研究进展进行了介绍。

在绪论中,我们主要从整体和历史发展的角度介绍和评价现代结构系统可靠性理论发展中的一些重要成就和相关经验,目的是使读者对该领域的全貌有一个基本的了解。在后面的各章中,我们将以专题的形式深入分析和讨论与现代结构系统可靠性理论及应用密切相关的一些理论和实际工程问题,这些分析和讨论将有助于读者对现代结构系统可靠性理论的内涵有更深刻的理解和把握。

参 考 文 献

- [1] 董聪、杨庆雄,现代结构系统可靠性分析理论发展概况及若干应用,力学进展,1993,23(2),206—213
- [2] Freudenthal A M, The Safety of Structures, ASCE Trans., 1947, 112, 125—129
- [3] Freudenthal A M. Safety and The Probability of Structural Failure. ASCE Trans., 1956, 121: 1337—1397
- [4] 赵国藩、曹居易、张宽权,工程结构可靠度,水利水电出版社,1984
- [5] 高镇同,疲劳应用统计学,国防工业出版社,1986
- [6] 王光远,工程软设计理论,科学出版社,1992
- [7] Ang A H-S, Tang W H, Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Vol. 1, John Wiley & Sons, New York, 1975
- [8] Cornell C A, Structural Safety Specification Based on Second-Moment Reliability, Sym. Int. Assoc. of Bridge and

Struct. Engr. ,London, 1969

- [9] Hasofer A M, Lind N C, Exact and Invariant Second-Moment Code Format. J. Eng. Mech. Div. ,ASCE, 1974, 100(1): 111—121
- [10] Rackwitz R, Fiessler B, Structural Reliability under Combined Random Load Sequences. Computers and Structures, 1978, 9, 489—494
- [11] Chen X, Lind N C, Fast Probability Integration by Three Parameter Normal Tail Approximation, Struct. Safety, 1983, 1: 269—276
- [12] Hohenbichler M, Rackwitz R, Non-Normal Dependent Vectors in Structural Safety, ASCE, J. Eng. Mech. Div. , 1981, 107(EM6), 1227—1238
- [13] Rosenblatt M, Remarks on a Multivariate Transformation, Annals of Math. Statistics, 1952, 23, 470—472
- [14] 董聪, 现代结构系统可靠性理论, 博士学位论文, 1993
- [15] Cornell C A. Bounds on The Reliability of Structural Systems, J. Struct. Div. , ASCE, 1967, 93(ST1)
- [16] Ang A H-S, Amin M. Reliability of Structures and Structural Systems, J. Eng. Mech. Div. , ASCE, 1968, 94(EM2), 671—691
- [17] Ang A H-S, Abdelnour J, Chaker A A, Analysis of Activity Networks under Uncertainty, J. Eng. Mech. Div. , 1975, 101(EM4), 373—387
- [18] Ang A H-S, Tang W H, Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Vol. 2, John Wiley & Sons, New York, 1984
- [19] Ditlevsen O, Narrow Reliability Bounds for Structural Systems, J. Struct. Mech. , 1979, 7(4), 453—472
- [20] 董聪、夏人伟. 现代结构系统可靠性评估理论研究进展, 力学进展, 1995, 25(4), 537—548
- [21] USAF Damage Tolerance Design Handbook, Air Force Wright Aeronautical Laboratories, USA, 1984
- [22] 曾天翔、丁连芬等译, 可靠性设计手册, 航空工业出版社, 1987
- [23] 航空航天工业部科学技术研究院译, 损伤容限设计手册, 西北工业大学出版社, 1989
- [24] Lin Y K, Yang J N, On Statistical Moments of Fatigue Crack Propagation, Engineering Fracture Mechanics, 1983, 18(2), 243—256
- [25] Dowling N E, Estimation and Correlation of Fatigue Lives for Random Loading, Int. J. Fatigue, 1988, 10(3), 179—185
- [26] Coolen F P, Newby M J, Bayesian Reliability Analysis with Imprecise Prior Probability, Reliability Engineering and System Safety, 1994, 43(1), 75—86
- [27] MIL-HABK-17B. USA. 1988
- [28] 张骏华, 结构可靠性设计与分析, 宇航出版社, 1989
- [29] 董聪、戎海武、夏人伟, 分布假设及其对复合材料 B 基值的影响, 强度与环境, 1994(3), 1—7
- [30] Dong Cong, Rong Haiwu, Xia Renwei, The Distribution Model of Fatigue Life and Its Good-of-Fit Test. Chinese J. of Aeronautics, 1995, 8(3), 185—190
- [31] 董聪、戎海武、何庆芝, 强度与寿命分布模型的统一描述与检验, 航空学报, 1996, 17(7), 47—51
- [32] 董聪, 可靠性工程中的经验 Bayes 方法(I), 强度与环境, 1995, (4), 47—54
- [33] 董聪, 可靠性工程中的经验 Bayes 方法(II), 北京航空航天大学学报, 1996, 22(4), 460—464《EI》, No. EI97-M150573
- [34] 董聪, 可靠性工程中的经验 Bayes 方法(III), 系统工程与电子技术, 1996, 18(9), 69—75
- [35] Yang J N, Salivar G C, Annis C G, On Statistical Modeling of Fatigue Crack Growth in a Nickel-Base Superalloy, Engineering Fracture Mechanics, 1983, 18(2), 257—270
- [36] Ichikawa M, Confidence Limit of Probability of Failure Based on Stress-Strength Model. Reliability Engineering, 1984, 8, 75—83
- [37] Bogdanoff J L, Kozin F, Probabilistic Models of Cumulative Damage, John Wiley & Sons, 1985
- [38] Provan J W, Probabilistic Fracture Mechanics and Reliability, Martinus Nighoff Publishers, 1987
- [39] Kopnov V A, Residual Life, Linear Fatigue Damage Accumulation and Optimal Stopping. Reliability Engineering and