

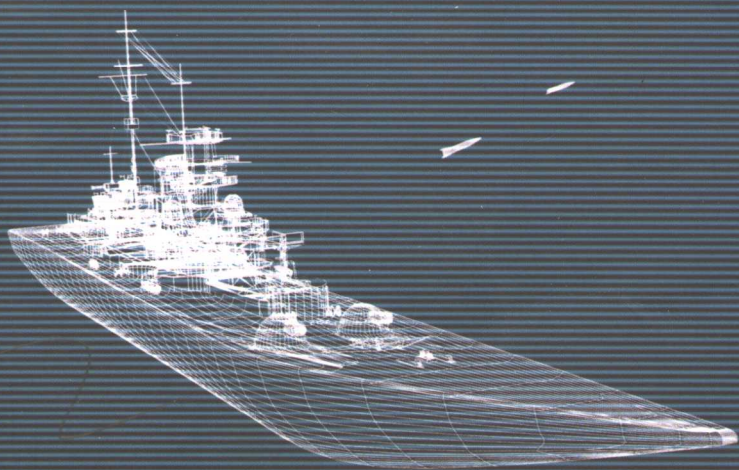
其他



国防科工委「十五」规划专著

随机结构系统可靠性分析与优化设计

安伟光 蔡荫林 陈卫东 著



哈尔滨工程大学出版社

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社

西北工业大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

TP271
59



国防科工委“十五”规划专著

随机结构系统可靠性 分析与优化设计

安伟光 蔡荫林 陈卫东 著

哈尔滨工程大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社
西北工业大学出版社 哈尔滨工业大学出版社

5088/01

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设计/安伟光,蔡荫林,陈卫东著. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2005
ISBN 7-81073-651-5

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(2005)第 014030 号

随机结构系统可靠性分析与优化设计

安伟光 蔡荫林 陈卫东 著

责任编辑 张林峰 孟祥忠

哈尔滨工程大学出版社出版发行

哈尔滨市南通大街 145 号 哈尔滨工程大学 11 号楼

发行部电话:(0451)82519328 邮编:150001

新华书店经销

哈尔滨工业大学印刷厂印刷

开本:850mm×1168mm 1/32 印张:15.25 字数:382千字

2005年4月第1版 2005年4月第1次印刷 印数:1—1000册

ISBN 7-81073-651-5/TP·271 定价:32.50元

国防科工委“十五”规划专著编委会

(按姓氏笔画排序)

主 任:张华祝

副主任:陈一坚 屠森林

编 委:王文生 王泽山 卢伯英 乔少杰

刘建业 张华祝 张近乐 张金麟

杨志宏 杨海成 肖锦清 苏秀华

辛玖林 陈一坚 陈鹏飞 武博祎

侯深渊 凌 球 聂 武 谈和平

屠森林 崔玉祥 崔锐捷 焦清介

葛小春



总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就。研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天器为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。十一届三中全会以来,伴随着改



改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济作出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,生产和传播国防科技新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版 200 种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相



关专业领域的专家学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的 100 多位专家、学者,对经各单位精选的近 550 种教材和专著进行了严格的评审,评选出近 200 种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与工程、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入 21 世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工



业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝



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。

综上所述，随机结构系统的可靠性分析和优化设计理论，在目前的工程设计中将占据越来越重要的地位。鉴于此，本书作者根据 20 余年来的教学、科研实践，以及发表的诸多论文，撰著这本“随机结构系统可靠性分析和优化设计”一书，希望能为该理论在工程上的进一步应用与研究，提供有益的参考。

该书的主要内容包括：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

2004年10月

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	2
1.3 结构系统基于可靠性的优化设计	3
1.4 结构系统可靠性分析与优化设计的历史发展	7
第 2 章 结构系统可靠性的基本理论	14
2.1 载荷和抗力变量的概率模型	14
2.2 可靠性指标均值的一次二阶矩(FOSM)	18
2.3 可靠性指标的改进一次二阶矩(AFOSM)	24
2.4 可靠性指标的二次二阶矩(SOSM)	36
2.5 蒙特卡罗(Monte - Carlo)法	42
2.6 可靠性计算方法的比较	43
2.7 载荷组合模型	44
第 3 章 随机有限元法	56
3.1 引言	56
3.2 随机有限元法研究现状综述	58
3.3 随机场的表示	61
3.4 随机有限元的基本方程	65
3.5 随机有限元法在随机结构分析中的应用	72
3.6 随机有限元法的发展前景及发展方向	92
第 4 章 结构系统失效模式的形成及可靠性分析	94
4.1 结构元件的承载能力	94
4.2 静定结构的失效分析	94
4.3 静不定结构的失效分析	98
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	101
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	112



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	127
4.7	板架结构失效模式的安全余量和可靠性指标	164
4.8	增量荷载法形成结构的安全余量	174
第 5 章	结构系统强度可靠性分析	181
5.1	失效路径和失效模式数	181
5.2	分枝限界法	183
5.3	提高分枝限界法的若干策略	191
5.4	一种基于增量荷载法判别主要失效模式的方法	196
5.5	系统可靠性的计算方法	201
第 6 章	结构系统刚度的可靠性分析	233
6.1	完整结构系统的刚度可靠性	233
6.2	不完整结构系统的刚度可靠性	245
第 7 章	结构系统可靠度的敏度分析	251
7.1	结构系统可靠度(β_j)、结构系统失效概率(P_j) 对设计变量的偏导数	251
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 ..	256
7.3	失效模式二、三阶联合失效概率对设计变量的偏导数	267
7.4	刚度失效模式的可靠性指标对设计变量的偏导数	271
第 8 章	结构系统基于可靠性的优化设计	276
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	276
8.2	结构系统可靠度约束下最小化结构重量或费用	286
8.3	结构重量或费用约束下最大化结构系统可靠度	318
8.4	元件截面为 I 型时基于可靠性的结构优化	325
8.5	基于可靠性的结构模糊优化	337
第 9 章	结构系统可靠性的专题研究	343
9.1	杆板薄壁结构失稳时的可靠性分析	343
9.2	结构系统在随机组合力作用下的可靠性分析	360
9.3	飞机结构考虑损伤容限和耐久性的可靠性分析	370
9.4	结构系统同时考虑强度和疲劳的可靠性分析	381
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	391



9.6 空间随机结构系统可靠性分析与优化设计	402
附录	434
附录 A 拉压杆元单元刚度矩阵及单元内力	434
附录 B 三角形平面应力元 (CST 元)	437
附录 C 线性应变矩形元 (LSR 元)	443
附录 D 等剪应力矩形元 (CSSR 元)	449
附录 E 纯剪矩形板元 (SSP 元)	459
参考文献	463