

结构疲劳寿命分析

Fatigue Life Prediction of Structures

姚卫星 著

国防工业出版社

<http://www.ndip.com.cn>

结构疲劳寿命分析

Fatigue Life Prediction of Structures

姚卫星 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

结构疲劳寿命分析/姚卫星著. —北京:国防工业出版社,2003.1

ISBN 7-118-02946-7

I. 结... II. 姚... III. 机械—疲劳寿命
IV. TH114

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 069904 号

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 8% 218 千字

2003 年 1 月第 1 版 2003 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1—2000 册 定价:24.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

IV

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

**国防科技图书出版基金
评审委员会**

国防科技图书出版基金
第四届评审委员会组成人员

名誉主任委员	陈达植				
顾问	黄宁				
主任委员	刘成海				
副主任委员	王峰	张涵信	张又栋		
秘书长	张又栋				
副秘书长	彭华良	蔡锺			
委员	于景元	王小谟	甘茂治	冯允成	
(按姓名笔画排序)	刘世参	杨星豪	李德毅	吴有生	
	何新贵	佟玉民	宋家树	张立同	
	张鸿元	陈火旺	侯正明	常显奇	
	崔尔杰	韩祖南	舒长胜		

前 言

结构和机械的疲劳破坏是其主要的失效形式,因此结构和机械的疲劳强度和疲劳寿命是其强度和可靠性研究的主要内容之一。

材料的疲劳是一个十分复杂的问题,至今还是一个科学之“谜”,因为影响材料疲劳强度或疲劳寿命的因素很多,而且绝大多数影响因素目前还无法很好地从数学上给予定量描述,因此也就无法对结构或机械的疲劳强度或疲劳寿命作出精确的分析。

目前疲劳问题涉及的领域和研究人员的范围十分广泛,试图写一本全面论述疲劳问题的著作是不现实的。本书主要涉及结构或机械在机械载荷作用下,疲劳裂纹形成寿命的分析方法。主要介绍作者及其研究小组近 20 年来在结构疲劳寿命分析研究方面的理论和工程应用成果。

本书的特点是:(1) 用数学方法对有关疲劳行为作定量描述,便于疲劳寿命分析时应用;(2) 介绍近年来理论研究和工程实践中常用的结构疲劳寿命分析的方法,如局部应力应变法、应力场强度方法、疲劳可靠性分析方法等;(3) 理论与实践相结合,给出了多个分析实例,通过实例加深对理论、算法和步骤的理解。

我首先要感谢我的研究生导师西北工业大学杨庆雄教授,是他引导我进入了结构疲劳研究的领域,他研究学术问题的思想、方式和作风深深影响了我,本书某些章节的内容与他讲授的“结构疲劳”研究生课程内容是相近的。我要感谢我的博士后导师清华大学俞新陆教授和颜永年教授,我从他们的研究中汲取了思考问题的方法,从他们的研究中得到了启示,发展了一套在理论上完备和自洽的场强法理论,并受到了国内外同行的关注和认可。我同时

还要感谢我的研究生和博士后们,本书的很多内容得益于他们的具体工作。我要衷心地感谢王中光教授和刘文珽教授审阅了全部书稿。

由于水平有限,书中缺点错误在所难免,不妥之处敬请读者批评指正。

作 者

2002年5月于南京

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 疲劳和疲劳寿命	1
1.1.1 疲劳定义	1
1.1.2 疲劳的分类	1
1.1.3 疲劳寿命	2
1.2 疲劳研究方法	3
1.2.1 疲劳寿命估算方法发展简史	3
1.2.2 疲劳研究的三个尺度	4
1.3 影响结构疲劳寿命的主要因素	5
1.3.1 应力集中的影响	6
1.3.2 尺寸的影响.....	17
1.3.3 表面状态的影响.....	20
1.3.4 载荷的影响.....	23
1.4 确定疲劳寿命的方法.....	25
第 2 章 疲劳载荷谱处理	28
2.1 疲劳载荷谱的种类.....	28
2.2 随机疲劳载荷谱的生成.....	30
2.2.1 伪随机数.....	30
2.2.2 随机谱编排.....	30
第 3 章 金属材料的疲劳性能及其描述	34
3.1 金属材料的拉伸特性.....	34
3.2 金属材料的循环应力应变特性.....	36
3.2.1 循环硬化和循环软化.....	36
3.2.2 循环蠕变和循环松弛.....	38

3.2.3	Bauschinger 效应	39
3.2.4	Masing 特性	40
3.2.5	稳态循环应力应变曲线	41
3.2.6	记忆特性与可用性系数	44
3.2.7	瞬态循环应力应变曲线	46
3.3	金属材料的 S—N 曲线	50
3.3.1	S—N 曲线	50
3.3.2	等寿命曲线	55
3.3.3	疲劳极限	57
3.3.4	疲劳极限图	61
3.3.5	p —S—N 曲线	63
3.4	应变—寿命曲线	67
3.4.1	$\Delta\epsilon$ — N 曲线	68
3.4.2	ϵ_{eq} — N 曲线	73
第 4 章	疲劳累积损伤理论	75
4.1	损伤的定义	75
4.2	疲劳累积损伤理论	76
4.3	线性疲劳累积损伤理论	76
4.4	非线性疲劳累积损伤理论	80
4.5	概率疲劳累积损伤理论	82
4.5.1	概率 Miner 理论	83
4.5.2	疲劳累积损伤动态统计模型	85
4.6	关于疲劳累积损伤理论的讨论	86
第 5 章	名义应力法	88
5.1	名义应力法的基本假设	88
5.1.1	名义应力法估算结构疲劳寿命的步骤	89
5.1.2	材料性能数据	89
5.1.3	名义应力法的种类	91
5.2	传统的名义应力法	91
5.2.1	名义应力法	91

5.2.2	例题一:变截面拉杆	92
5.2.3	例题二:中心孔板(1).....	95
5.2.4	例题三:带小孔液压管.....	100
5.3	应力严重系数(SSF)法	103
5.3.1	SSF 法	103
5.3.2	实例一:螺栓连接接头.....	106
5.3.3	实例二:某机翼整体油箱壁板对接区.....	111
第6章	局部应力应变法	117
6.1	局部应力应变法的基本假设	117
6.1.1	局部应力应变法估算结构疲劳寿命的步骤	118
6.1.2	局部应力应变法的种类	118
6.1.3	关于局部应力应变法原理的讨论	119
6.2	结构局部应力应变的计算	121
6.2.1	Neuber 近似解法	121
6.2.2	弹塑性有限元解法	124
6.2.3	缺口弹塑性应力应变的 Neuber 解与有限元解的比较	125
6.3	局部应力应变法的稳态法	127
6.3.1	雨流法	128
6.3.2	例题四:中心孔板(2)	129
6.3.3	实例三:中心孔板.....	136
6.4	局部应力应变法的瞬态法	140
6.4.1	例题五:中心孔板(3)	140
第7章	应力场强法	153
7.1	应力场强法基本原理	153
7.1.1	应力场强法基本原理	153
7.1.2	应力场强法基本假设的试验验证	157
7.1.3	讨论与结论	163
7.2	应力场强法对有关疲劳现象的解释	164
7.2.1	疲劳缺口减缩系数 K_f	164

7.2.2	不同加载方式下疲劳极限	167
7.2.3	多轴疲劳载荷下的疲劳极限	171
7.2.4	疲劳尺寸系数 ϵ	173
7.3	应力场强法的应用	178
7.3.1	例题六:双轴加载缺口试验件	179
7.3.2	实例四:缺口试验件 $S-N$ 曲线预测	179
7.3.3	实例五:飞机结构中下陷细节的抗疲劳设计	181
7.3.4	实例六:连接件的疲劳细节分析	183
7.3.5	实例七:某机翼下壁板模拟件	184
第8章	结构疲劳可靠性分析	186
8.1	动态应力—强度干涉模型	187
8.1.1	干涉模型的解析解法	190
8.1.2	干涉模型的近似解法	195
8.1.3	干涉模型的数值解法	198
8.2	结构元件的疲劳可靠性分析	199
8.2.1	疲劳累积损伤模型	199
8.2.2	剩余强度模型	211
8.2.3	疲劳寿命模型	220
8.3	结构系统的疲劳可靠性分析	225
8.3.1	结构系统的模型	227
8.3.2	结构系统疲劳失效模式的枚举	229
8.3.3	单个失效模式的破坏概率的计算	232
8.3.4	整个系统失效概率的求解	235
8.3.5	例题七:十杆平面桁架(1)	239
8.4	结构系统安全评估与监控的风险预测方法	244
8.4.1	结构的安全性监控	246
8.4.2	例题八:十杆平面桁架(2)	251
附录	正态分布表	254
	参考文献	256

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Fatigue and Fatigue Life	1
1.1.1 The Definition of Fatigue	1
1.1.2 The Category of Fatigue	1
1.1.3 Fatigue Life	2
1.2 Methodology of Fatigue Investigations	3
1.2.1 A Simple Historical Overview of Fatigue Life Prediction	3
1.2.2 Macro-, Meso- and Micro-Aspect of Fatigue Investigations	4
1.3 Factors Affecting Fatigue Life of Structures	5
1.3.1 Effect of Stress Concentration	6
1.3.2 Effect of Size	17
1.3.3 Effect of Surface Finish	20
1.3.4 Effect of Type, Mean Stress and Frequency of Loading	23
1.4 Approaches for Predicting Fatigue Life	25
Chapter 2 Treatment of Load Spectrum	28
2.1 Spectrum Types of Loading	28
2.2 Formation of Random Spectrum	30
2.2.1 Pseudo-Random Number	30
2.2.2 Formation of Pseudo-Random Spectrum	30
Chapter 3 Cyclic Material Behavior and Their Description	34

3.1	Monotonic Properties of Metals	34
3.2	Cyclic Stress – Strain Properties of Metals	36
3.2.1	Cyclic Strain Hardening and Softening	36
3.2.2	Cyclic Creep and Relaxation	38
3.2.3	Bauschinger Effect	39
3.2.4	Masing Behavior	40
3.2.5	Stable Stress – Strain Curve	41
3.2.6	Cyclic Remembrance and Usable Factor	44
3.2.7	Instantaneous Stress – Strain Curve	46
3.3	Stress – Life Curves, $S-N$	50
3.3.1	$S-N$ Curves	50
3.3.2	Constant – Life Fatigue Diagram	55
3.3.3	Fatigue Limit	57
3.3.4	Fatigue Limit Diagram	61
3.3.5	$p-S-N$ Curve	63
3.4	Strain – Life Curves, $\epsilon-N$	67
3.4.1	$\Delta\epsilon-N$ Curve	68
3.4.2	$\epsilon_{eq}-N$ Curve	73
Chapter 4	Fatigue Damage Cumulative Rule	75
4.1	Fatigue Damage	75
4.2	Fatigue Damage Cumulative Theory	76
4.3	Linear Damage Cumulative Rules	76
4.4	Nonlinear Damage Cumulative Rules	80
4.5	Probabilistic Damage Cumulative Rules	82
4.5.1	Probabilistic Miner's Rule	83
4.5.2	Statistical Dynamic Damage Cumulative Rule	85
4.6	Discussions on Damage Cumulative Rules	86
Chapter 5	Nominal Stress Approach	88
5.1	Assumption of Nominal Stress Approach	88
5.1.1	Steps of Nominal Stress Approach for Predicting Fatigue	

Life	89
5.1.2 Fatigue Property Data for Nominal Stress Approach	89
5.1.3 Nominal Stress Approach	91
5.2 Traditional Nominal Stress Approach	91
5.2.1 Nominal Stress Approach	91
5.2.2 Example 1:A Shaft subjected to Tension – Compression	92
5.2.3 Example 2:Centered – Hole Plates (1)	95
5.2.4 Example 3:Pipe with a Hole	100
5.3 Stress Severity Factor (SSF) Approach	103
5.3.1 SSF Approach	103
5.3.2 Engineering Case 1:A Bolt Joint	106
5.3.3 Engineering Case 2:Connect Area of A Wing	111
Chapter 6 Local Stress – Strain Approach	117
6.1 Assumption of Local Stress – Strain Approach	117
6.1.1 Steps of Local Stress – Strain Approach for Predicting Fatigue Life	118
6.1.2 Local Stress – Strain Approach	118
6.1.3 Discussions on the Assumption	119
6.2 Determination of Stress and Strain at a Concen- tration	121
6.2.1 Neuber’s Rule	121
6.2.2 Elasto – plastic Finite Element Method	124
6.2.3 Comparison between Neuber’s Solution and the Solution given by FEM	125
6.3 Traditional Local Stress – Strain Approach	127
6.3.1 Rainflow Method	128
6.3.2 Example 4:Centered – Hole Plate (2)	129
6.3.3 Engineering Case 3:Centered – Notched Plate	136
6.4 Local Stress – Strain Approach Based on Cyclic – dependent Stress – Strain Curves	140

6.4.1	Example 5: Centered - Hole Plate (3)	140
Chapter 7	Stress Field Intensity Approach	153
7.1	Stress Field Intensity Approach	153
7.1.1	Assumption of Stress Field Intensity Approach	153
7.1.2	Verification of the Assumption of Stress Field Intensity Approach	157
7.1.3	Discussion and Conclusions	163
7.2	Explanations of Fatigue Phenomena based on Stress Field Intensity	164
7.2.1	Fatigue Notch Factor, K_f	164
7.2.2	Fatigue Limits under Different Loading Types	167
7.2.3	Fatigue Limits Under Multiaxial Loading	171
7.2.4	Fatigue Size Factor, ϵ	173
7.3	Applications of Stress Field Intensity Approach	178
7.3.1	Example 6: Notched - Tube under Bi - axial Loading	179
7.3.2	Engineering Case 4: $S-N$ Curves of Notched Elements	179
7.3.3	Engineering Case 5: Step Details in Aircraft Structures	181
7.3.4	Engineering Case 6: Joints in Aircraft Structures	183
7.3.5	Engineering Case 7: Wing Panel	184
Chapter 8	Fatigue Reliability Analysis of Structures	186
8.1	Dynamic Load - Strength Interfere Model	187
8.1.1	Solutions of the Interfere Model	190
8.1.2	Approximate Solutions	195
8.1.3	Numerical Solutions	198
8.2	Fatigue Reliability Analysis of Structural Elements	199
8.2.1	Fatigue Damage Cumulative Model	199
8.2.2	Fatigue Residual Strength Model	211
8.2.3	Fatigue Life Model	220
8.3	Fatigue Reliability Analysis of Structural Systems	225

8.3.1	Model of Structural Systems	227
8.3.2	Enumerating of Failure Models of A Structural System	229
8.3.3	Probability Calculation of a Failure Model	232
8.3.4	Probability Calculation of Structural System	235
8.3.5	Example 7:10 – bar Truss (1)	239
8.4	Fatigue Risk Analysis of Structural System	244
8.4.1	Fatigue Failure Monitoring of Structural System	246
8.4.2	Example 8:10 – bar Truss (2)	251
Appendix A: Normal Distribution		254
References		256