

结构可靠性设计手册

JIEGOU KEXIAOXING SHEJI SHOUCHE

主编 刘文琰



國防工業出版社

National Defense Industry Press

TB114.3/17

2008

结构可靠性设计手册

主编 刘文琰

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本手册共 22 章。第 1 章绪论阐述了关于结构可靠性设计的重要概念、适用范围、装备结构可靠性与耐久性主要参数和结构可靠性设计主要工作项目;第 2 章阐述了结构主要失效模式;第 3 章介绍了提高结构可靠性的设计要求与措施,重点是结构的抗疲劳设计与防腐蚀(烧蚀)设计;第 4 章~第 6 章详细叙述了载荷/环境及载荷谱,包括了载荷的统计分析与提高载荷谱统计真实性与可靠性的技术;第 7 章介绍了与结构可靠性分析相关的材料力学性能(强度、疲劳与断裂性能)的可靠性分析方法;第 8 章~第 9 章分别介绍了零构件与结构体系的静强度可靠性分析技术;第 10 章~第 12 章分别阐述了结构的疲劳、损伤容限和耐久性分析技术;在第 13 章介绍了结构的破坏危险性(疲劳断裂可靠性)分析技术以及疲劳分散系数;第 14 章介绍了腐蚀环境下结构的使用寿命评定技术;第 15 章介绍了为保证结构动强度可靠性的振动、噪声和颤振控制与分析技术,第 16 章则阐述了各类装备结构的可靠性试验技术。第 17 章~第 22 章中介绍了典型装备结构可靠性试验、分析与使用寿命评定的一些应用范例。

本手册内容全面、系统、具备实用性与先进性,在强调可供设计人员应用的前提下,讲清道理,明确方法,阐明适用范围,为各类装备的设计人员贯彻结构可靠性设计思想与要求提供了重要的设计工具,可供从事装备结构设计、分析与试验的技术人员使用,对于高等院校相关专业的师生和从事结构可靠性研究的科研工作者也有重要的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

结构可靠性设计手册 / 刘文琰主编. —北京: 国防工业出版社, 2008. 2

ISBN 978-7-118-05307-4

I. 结... II. 刘... III. 结构可靠性—设计—技术手册
IV. TB114.3-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 118471 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)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 84 字数 1962 千字

2008 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 220.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

编审委员会

主任委员 孙来燕

副主任委员 吴伟仁 马恒儒 张福泽 刘文珽

顾问 高镇同 黄克智

主 编 刘文珽

主 校 李令芳

编 委 (按姓氏笔画排列)

王 凡	刘小冬	刘文珽	刘英卫	孙 欣
许 建	陈千圣	李令芳	李宪珊	陈凤熹
宋恩鹏	林富甲	张民孚	张联营	孟繁沛
洪祖峻	姜 军	施荣明	赵 宇	贺小帆
徐秉汉	崔维成	蒋祖国	魏来生	

主 审 张福泽

副 主 审 李 明 钟群鹏 陈一坚 吴有生

审 委 (按姓氏笔画排列)

王大钧	王自力	王 勇	安伟光	孙 聪
李玉海	李良巧	李锦华	吴学仁	杨 伟
郭瑞霞	费斌军	唐长红		

编校人员(带*者为章负责人)

章号	编写人员	校 对
1	刘文珽* 洪祖峻 束长庚 欧阳吕伟 许建	赵 宇
2	姜军* 魏来生 洪祖峻 束长庚 朱邦俊 孙欣	刘文珽
3	李令芳* 洪祖峻 孙欣 魏金龙 陈凤熹	刘小冬
4	蒋祖国* 李宪珊 洪祖峻 范知友 沈进威 欧阳吕伟 许建	李令芳 蔡新钢
5	蒋祖国* 汤吉晨 李俊	李令芳
6	蒋祖国* 陈千圣 沈进威 李俊	刘小冬 蔡新钢 李俊
7	刘文珽*	刘英卫
8	刘文珽* 王磊	刘英卫
9	刘英卫*	王 磊
10	李令芳* 刘小冬 宋恩鹏 侯伟 欧阳吕伟 沈进威	贺小帆
11	刘小冬* 许秋莲 侯伟	刘文珽
12	林富甲*	刘英卫
13	刘文珽* 刘小冬 王忠波	姜 军
14	刘文珽* 贺小帆 王忠波 杨洪源	姜 军
15	施荣明* 李宪珊 沈顺根	刘文珽
16	张联营* 刘文珽 洪祖峻 王全荣 孙欣 魏来生 王凡 李宪珊 施荣明 丁永官 沈进威 束长庚	李令芳 蔡新钢
17	李令芳* 刘小冬 张联营 孟繁沛 王志刚 陈千圣	蒋祖国
18	宋恩鹏* 姜 军	贺小帆
19	张民孚* 许建 洪祖峻 朱邦俊	李令芳
20	孟繁沛*	李令芳
21	魏来生*	陈千圣
22	束长庚*	蔡新钢 丁永官

前 言

为保证装备安全可靠的实现其性能与寿命要求,在装备研制中必须全面贯彻可靠性要求,这不仅是工程界的共识,而且已为装备研制必须遵循的规范所明确。结构是装备的基础平台(载体),是装备实施作战任务、实现性能指标的基本前提。没有安全可靠的结构,装备的先进性能和作战威力均无法显现。同时,结构的破坏(失效)将导致整个装备使用的终结,装备的使用寿命主要取决于结构。因此,结构可靠性是装备可靠性中带有全局性的不可缺少的重要组成部分,必须在装备研制和使用全过程中予以贯彻。多年来国内外对结构强度技术进行了大量卓有成效的研究,制定了对应的规范,建立了成熟的技术体系。在多种军用飞机、运载火箭、装甲车辆、舰艇等装备型号研制中基本保证了结构在静(热)强度、疲劳断裂以及动强度等方面在规定的使用期限内的安全可靠,积累了十分宝贵的经验。在结构静强度、疲劳断裂可靠性技术研究中所取得的丰硕成果已在各类装备型号研制与评定中得到不同程度的应用,有关结构体系可靠性分析技术的研究也取得了可供工程应用的成果。为将结构可靠性有机地融入装备可靠性体系,贯彻结构可靠性设计思想,必须明确结构可靠性主要参数,确定结构可靠性工作项目,把用于实现结构安全和寿命的结构强度技术提高到结构可靠性要求的高度,将各类装备结构可靠性方面的技术成果和宝贵的型号应用经验系统地加以总结和提高,编制可供设计人员使用的结构可靠性设计手册。这就是《结构可靠性设计手册》编写的背景与目的。为此,国防科工委科技与质量司组织了航天、航空、船舶、兵器行业的数十名多年从事有关结构可靠性研究与应用的专家编写了这本《结构可靠性设计手册》(以下简称《手册》)。

《手册》共设 22 章。大体分为三部分:绪论(第 1 章)、结构可靠性与耐久性技术(第 2 章~第 16 章)和工程范例(第 17 章~第 22 章)。第 1 章绪论阐述了关于结构可靠性设计的重要概念、《手册》的适用范围、装备结构可靠性与耐久性主要参数和结构可靠性设计主要工作项目,起着统领全手册的作用。第 2 章~第 16 章按照结构可靠性设计工作项目的顺序介绍了结构可靠性与

耐久性的各项技术,第2章阐述了结构主要失效模式;第3章介绍了提高结构可靠性的设计要求与措施,重点是结构的抗疲劳设计与防腐蚀(烧蚀)设计;第4章~第6章详细叙述了载荷/环境及载荷谱,包括了载荷的统计分析 with 提高载荷谱统计真实性与可靠性的技术;第7章介绍了与结构可靠性分析相关的材料力学性能(强度、疲劳与断裂性能)的可靠性分析方法;第8章~第9章分别介绍了零构件与结构体系的静强度可靠性分析技术;第10章~第12章分别阐述了结构的疲劳、损伤容限和耐久性分析技术;在第13章介绍了结构的破坏危险性(疲劳断裂可靠性)分析技术以及疲劳分散系数;第14章介绍了腐蚀环境下结构的使用寿命评定技术;第15章介绍了为保证结构动强度可靠性的振动、噪声和颤振控制与分析技术,第16章则阐述了各类装备结构的可靠性试验技术。第17章~第22章中介绍了典型装备结构可靠性试验、分析与使用寿命评定的一些应用范例,包括17章中的典型战斗机设计与实测载荷谱、轰炸机实测载荷谱以及坦克实测载荷谱应用范例,第18章给出的典型战斗机结构腐蚀条件下使用寿命评定范例,第19章阐述的典型飞机、舰船及运载火箭结构静力试验范例,第20章给出的典型轰炸机结构耐久性/损伤容限试验与使用寿命评定范例,第21章叙述的装甲车辆结构耐久性试验范例,以及第22章给出的船舶总纵极限强度可靠性分析范例。

《手册》以实现结构可靠性参数指标为目标,以结构可靠性工作项目为主线,以静强度、疲劳(耐久性)/损伤容限、环境强度和动强度等结构强度技术为基础,吸取了国内外有关结构可靠性研究的先进技术成果,内容全面、系统,具备实用性与先进性,在强调可供设计人员应用的前提下,讲清道理,明确方法,阐明适用范围,供设计人员理解和选用。

《手册》为各类装备的设计人员贯彻结构可靠性设计思想与要求提供了重要的设计工具,对推动结构可靠性技术的发展和應用有重要的促进作用。可供从事装备结构设计、分析与试验的技术人员使用,对于高等院校相关专业的师生和从事结构可靠性研究的科研工作者也有重要的参考价值。

本手册不仅是参编人员努力的结晶,更是各类装备设计部门与相关单位从事结构可靠性及强度技术研究与應用的技术人员成果与经验的汇总和提升。国防科工委科技与质量司、中国航空工业第一集团公司质量部领导对《手册》的编写给予了大力支持与热心指导;张福泽、李明、钟群

鹏、陈一坚、吴有生院士在百忙中主审了本手册,提出了十分宝贵的建议;国防工业出版社为《手册》的出版付出了艰辛的劳动,在此一并表示衷心的感谢。

由于结构可靠性技术尚在发展中,加之我们水平所限,本手册难免有不足以至错谬之处,敬请读者批评指正。

编 者
2006 年 12 月

目 录

术语符号表	1	2.2.1 箭体的失稳破坏	48
第1章 绪论	31	2.2.2 结构的强度破断	49
1.1 关于结构可靠性设计的重要概念	31	2.2.3 结构的功能失效	49
1.1.1 结构	31	2.3 飞机结构的失效模式	50
1.1.2 结构可靠性	32	2.3.1 概述	50
1.1.3 结构的耐久性与使用 寿命	32	2.3.2 结构静力失效模式	51
1.1.4 结构可靠性设计	33	2.3.3 结构疲劳失效模式	52
1.2 本手册的适用范围	33	2.3.4 结构的热失效模式	55
1.3 结构可靠性与耐久性主要参数	34	2.3.5 振动、噪声及颤振失效 模式	56
1.3.1 综述	34	2.3.6 环境失效模式	59
1.3.2 运载火箭结构可靠性主要 参数	36	2.3.7 结构功能失效模式	65
1.3.3 飞机结构可靠性与耐久性 主要参数	37	2.3.8 飞机结构失效分析	65
1.3.4 舰船结构可靠性与耐久性 主要参数	38	2.4 舰船结构失效模式	66
1.3.5 坦克装甲车辆结构可靠性 与耐久性主要参数	41	2.4.1 舰船结构型式	66
1.4 结构可靠性设计主要工作项目	42	2.4.2 水面舰船结构的失效 模式	67
1.4.1 结构可靠性设计 与分析	42	2.4.3 潜艇和潜器耐压船体结构 的失效模式	72
1.4.2 结构可靠性试验与 评价	45	2.5 装甲车辆结构的故障模式	75
参考文献	45	2.5.1 结构故障及失效概述	75
第2章 结构失效模式	47	2.5.2 故障分类与处理	76
2.1 概述	47	2.5.3 故障分级判断准则	77
2.1.1 结构失效的概念	47	2.5.4 装甲车辆故障模式及 类型	77
2.1.2 结构失效模式的分类	47	参考文献	82
2.2 运载火箭结构的失效模式	48	第3章 保证结构可靠性的设计措施	84
		3.1 引言	84
		3.2 结构的抗疲劳设计	84
		3.2.1 不同设计阶段抗疲劳设计 的控制要求	84

3.2.2	结构布局的基本要求	85	影响	154
3.2.3	传力路线的合理安排	86	4.3.4	环境参数的表示法
3.2.4	结构材料的选择和控制	89	4.3.5	飞机结构环境参数的确定
3.2.5	结构细节设计的一般准则	90	4.4	舰船结构主要载荷与环境
3.2.6	接头连接细节的抗疲劳设计要求	101	4.4.1	海浪环境描述
3.2.7	紧固件连接的细节设计要求	105	4.4.2	水面舰船的主要载荷
3.2.8	胶接连接的细节设计要求	110	4.4.3	潜艇结构主要载荷与环境
3.2.9	缝焊连接的细节设计要求	111	4.5	装甲车辆结构载荷
3.2.10	点焊连接的细节设计要求	114	4.5.1	坦克在平面上的匀速直线运动载荷
3.2.11	提高结构疲劳强度的工艺措施	115	4.5.2	坦克在斜坡上的匀速直线运动载荷
3.3	结构的防腐蚀(烧蚀)设计	117	4.5.3	坦克在平面上的低速均匀转向运动载荷
3.3.1	运载火箭结构的防腐蚀与防烧蚀设计	117	4.5.4	坦克在平地的高速均匀转向运动载荷
3.3.2	飞机结构的防腐设计	119	4.5.5	坦克在斜坡上的匀速转向运动载荷
3.3.3	舰船结构的防腐设计	132	4.5.6	坦克行动部分关键件的载荷
3.3.4	坦克装甲车辆结构的防腐设计	134	4.5.7	坦克传动齿轮的载荷
参考文献		141	参考文献	245
第4章	结构的载荷与环境分析	143	第5章	飞机载荷及载荷的统计分析
4.1	结构承受的主要载荷与环境	143	5.1	飞机结构载荷的获取方法和途径
4.1.1	载荷和环境与结构可靠性的关系	143	5.1.1	结构载荷的获取方法
4.1.2	结构载荷和环境分类	143	5.1.2	形成结构载荷的技术途径
4.2	运载火箭结构主要载荷和环境	146	5.2	飞行载荷计算
4.2.1	箭体的主要载荷	146	5.2.1	原始参数
4.2.2	箭体的主要力学环境	149	5.2.2	机动载荷
4.3	飞机结构环境	151	5.2.3	阵风载荷
4.3.1	飞机使用环境种类	151	5.2.4	部件分布载荷
4.3.2	飞机使用环境特点	153	5.2.5	临界载荷情况的筛选
4.3.3	环境对飞机结构的		5.3	地面载荷计算
			5.3.1	有关规定及主要原始

参数	283	6.2.5 飞机耐久性设计和损伤 容限设计使用载荷谱 ...	366
5.3.2 着陆载荷	286	6.3 飞机疲劳载荷谱的实测	366
5.3.3 滑行载荷	306	6.3.1 实测方法概述	366
5.3.4 其它地面载荷	307	6.3.2 选取载荷谱实测参数 ...	367
5.4 飞机载荷实测验证	307	6.3.3 确定飞行实测任务 剖面	368
5.4.1 飞机载荷实测方法	307	6.3.4 测试仪器及其改装	371
5.4.2 应变计改装和地面校准 试验	307	6.3.5 地面试验	371
5.4.3 飞机载荷实测的飞行 试验	313	6.3.6 飞行试验	372
5.4.4 飞机载荷飞行验证 要求	316	6.4 飞机实测载荷谱的编制	376
5.5 飞机载荷参数识别技术	323	6.4.1 载荷谱实测结果的数据 处理	377
5.5.1 回归分析技术	323	6.4.2 多代表起落随机载荷谱 编制方法	390
5.5.2 神经网络技术	323	6.4.3 中值寿命代表起落随机 载荷谱编制方法	398
5.5.3 混合型识别技术	327	6.4.4 均值载荷谱编制方法 ...	399
5.5.4 实例	328	6.4.5 3种实测载荷谱编制方法 之间的关系	413
5.6 结构载荷的统计分析	332	6.4.6 飞机几个不同阶段的 实测载荷谱的编制	413
5.6.1 结构载荷统计分析 内涵	332	6.5 装甲车辆疲劳载荷谱的编制	422
5.6.2 载荷的分布特性	333	6.5.1 动力响应	422
5.6.3 确定载荷分布的方法 ...	337	6.5.2 随机载荷谱的统计 处理	423
5.6.4 结构限制载荷的确定 ...	339	6.5.3 程序载荷谱的编制	425
参考文献	345	6.5.4 应力谱的等效转换	429
第6章 结构的疲劳载荷谱	347	6.6 水面舰船结构疲劳载荷谱	430
6.1 疲劳载荷谱	347	6.6.1 引言	430
6.1.1 疲劳载荷谱的概念及其 重要性	347	6.6.2 线性波浪载荷作用下 总纵弯曲时船体结构 应力范围的短期和长 期统计分布规律	431
6.1.2 疲劳载荷谱的分类	347	6.6.3 非线性波浪载荷作用下 总纵弯曲时船体结构应 力范围的短期和长期统 计分布规律	431
6.2 飞机设计使用载荷谱的编制	349	6.7 关于疲劳载荷谱的统计真实性	
6.2.1 编谱原始数据的获取 ...	349		
6.2.2 编制飞机使用载荷谱 的基本方法——任务分 析法	350		
6.2.3 编制设计使用载荷谱的 飞行模拟法	359		
6.2.4 飞—续—飞载荷谱及其 编制方法	361		

与可靠性	431	曲线的可靠性分析	465
6.7.1 实测载荷谱的子样容量	432	参考文献	470
6.7.2 载荷谱实测中的地面与飞行试验	434	第8章 零构件静强度可靠性分析	471
6.7.3 计数处理	435	8.1 引言	471
6.7.4 编谱方法	440	8.1.1 零构件静强度可靠性分析的作用	471
6.7.5 疲劳载荷谱的高载外推	441	8.1.2 影响零构件静强度可靠性的主要因素分析	471
参考文献	442	8.1.3 零构件静强度可靠性分析的主要方法	472
第7章 材料力学性能的可靠性分析	445	8.2 零构件静强度可靠性设计的安	
7.1 目的与基本方法	445	全系数法	472
7.1.1 材料力学性能可靠性分析的目的	445	8.2.1 安全系数法的基本思想	472
7.1.2 材料力学性能可靠性分析的基本方法	446	8.2.2 安全系数法的基本步骤	473
7.2 材料常规力学性能(强度) $\sigma_{0.2}, \sigma_b$ 的可靠性分析	453	8.2.3 中心安全系数	473
7.2.1 $\sigma_{0.2}, \sigma_b$ 的分布特性	453	8.2.4 基于基准设计许用值的安全系数	473
7.2.2 分布参数估计值与 A, B 值	453	8.2.5 可靠性(概率)安全系数	475
7.3 疲劳性能的可靠性分析	454	8.3 零构件静强度可靠性分析方法	475
7.3.1 $S-N$ 曲线及 $p-S-N$ 曲线	454	8.3.1 零构件静强度可靠性分析干涉模型	476
7.3.2 疲劳寿命与疲劳强度的分布特性	455	8.3.2 干涉概率(可靠度)的计算方法	476
7.3.3 疲劳试验数据及其统计处理	455	8.4 安全系数法对应的静强度可靠性设计与评估	478
7.3.4 $S-N$ 曲线与 $p-S-N$ 曲线的拟合	457	8.4.1 构件受正态型载荷(应力)时对应的静强度可靠性设计与评估	478
7.4 断裂性能的可靠性分析	458	8.4.2 构件受非正态型载荷(应力)时对应的静强度可靠性设计与评估	484
7.4.1 断裂韧度(K_{IC})的可靠性分析	458	8.5 算例	486
7.4.2 延性断裂韧度(J_{IC})的可靠性分析	460	8.6 各种安全系数法的综合分析	488
7.4.3 薄板裂纹扩展阻力(K_R)曲线的可靠性分析	463	参考文献	488
7.4.4 疲劳裂纹扩展速率(da/dN)			

第9章 结构体系可靠性分析 489

9.1 结构体系可靠性分析基本概念 ... 489

9.1.1 影响工程结构安全的确定性因素 489

9.1.2 基于可靠性分析的构件设计概念 490

9.1.3 完整结构体系可靠性设计概念 491

9.1.4 含损伤结构体系可靠性设计概念 492

9.2 构件可靠度分析的基本方法 493

9.2.1 构件可靠度分析的一次二阶矩法 493

9.2.2 构件可靠度分析的二次二阶矩法 509

9.2.3 数值模拟法 520

9.3 结构体系可靠度分析的通用方法 525

9.3.1 结构体系失效概率的基本表达式 526

9.3.2 数值积分法 527

9.3.3 Monte-Carlo 法 528

9.3.4 各种改进的抽样法 529

9.3.5 响应面法 538

9.3.6 随机有限元法简介 542

9.3.7 序列化方法 546

9.3.8 杂交法 547

9.3.9 小结 548

9.4 结构体系可靠度分析的专用方法 548

9.4.1 结构主要失效模式的识别方法 548

9.4.2 结构体系失效概率的计算方法 569

9.5 结构体系可靠度优化设计模型 ... 575

9.5.1 引言 575

9.5.2 构件级结构可靠度优化设计模型 576

9.5.3 完整结构体系级可靠度优化模型 576

9.5.4 同时考虑结构体系与构件可靠度优化设计模型 577

9.5.5 同时考虑完整结构体系、带损伤结构体系及构件可靠度的优化设计模型 578

9.6 应用范例 580

9.6.1 飞机机翼结构可靠性分析 580

9.6.2 弹身结构可靠性分析与优化设计 583

参考文献 586

第10章 结构的疲劳分析 590

10.1 概述 590

10.1.1 疲劳分析局部应力—应变法简介 591

10.1.2 疲劳分析名义应力法简介 591

10.1.3 疲劳分析应力严重系数法简介 591

10.1.4 疲劳分析 DFR 法简介 591

10.2 结构疲劳关键部位的细节应力分析 592

10.2.1 基本方法 593

10.2.2 有限元建模技术 594

10.2.3 有限元应力分析 597

10.2.4 细节应力分析结果评估 598

10.3 疲劳分析的局部应力—应变法 599

10.3.1 原始数据准备 599

10.3.2 局部应力—应变历程的获得 601

10.3.3 损伤累积和寿命

估算	602	11.2.4 初始缺陷检测与 评估	672
10.3.4 实例	603	11.3 结构裂纹扩展寿命计算	672
10.4 疲劳分析的名义应力法与应力 严重系数法	606	11.3.1 结构裂纹扩展寿命	672
10.4.1 疲劳分析的名义应 力法	606	11.3.2 裂纹扩展寿命分析	674
10.4.2 疲劳分析的应力严重 系数法	608	11.4 检查周期的确定	688
10.5 疲劳分析的 DFR 法	622	11.4.1 检查方法	688
10.5.1 使用载荷及载荷谱 ...	622	11.4.2 检查的评估方法	690
10.5.2 结构细节疲劳额定值 (DFR)	636	11.4.3 检查周期的确定	692
10.5.3 标准 $S-N$ 曲线和疲 劳损伤图表	638	11.5 结构的剩余强度分析	695
10.5.4 可靠性系数和可靠性 准则	643	11.5.1 剩余强度载荷	695
10.5.5 疲劳裕度和可靠性寿 命估算	646	11.5.2 剩余强度要求	698
10.6 舰船结构的疲劳分析	652	11.5.3 断裂判据	701
10.6.1 水面舰船结构的疲劳 分析	652	11.5.4 剩余强度分析	706
10.6.2 潜艇结构的疲劳分析 ...	656	参考文献	723
参考文献	660	第 12 章 结构破坏危险性分析	725
第 11 章 结构的损伤容限分析	661	12.1 引言	725
11.1 概述	661	12.2 疲劳寿命可靠性分析——安全 寿命与分散系数	725
11.1.1 结构损伤容限分析的 基本概念	661	12.2.1 基于对数正态分布的 疲劳寿命可靠性分析 ...	726
11.1.2 结构概率损伤容限分 析目标	662	12.2.2 基于威布尔分布的疲 劳寿命可靠性分析	733
11.1.3 破坏准则	663	12.2.3 两点说明	738
11.1.4 损伤容限分析方法	663	12.3 可检结构部位的疲劳断裂可 靠性分析	741
11.1.5 损伤容限分析步骤	664	12.3.1 裂纹检出可靠性的定 量描述方法	741
11.2 初始缺陷假定	665	12.3.2 可检结构部位疲劳断裂 可靠性分析方法(一) ...	756
11.2.1 初始缺陷尺寸	665	12.3.3 可检结构部位疲 劳断裂可靠性分 析方法(二)	760
11.2.2 初始缺陷的概率 分布	670	12.4 可修复结构部位的疲劳断裂 可靠性分析	761
11.2.3 意外初始损伤尺寸 确定	671	12.4.1 各次检修后裂纹尺寸 的概率分布	761
		12.4.2 计及检修的结构	

部位疲劳断裂可 靠性分析	763	13.3.5 结构损伤度评估与经 济寿命预测	798
12.5 多部位结构体系的疲劳断裂 可靠性分析	764	13.3.6 示例	799
12.5.1 串联模型	764	13.4 结构耐久性分析的裂纹萌生方法 (CIA)	800
12.5.2 并联模型	765	13.4.1 耐久性分析裂纹萌生 方法的原理与步骤	800
12.5.3 r/n 模型	765	13.4.2 结构细节裂纹萌生 $p-S-N$ 曲线	801
12.6 应用范例	766	13.4.3 各应力区裂纹超越概 率随使用时间的变化 规律—— $p(i,t)-$ t 曲线	804
12.6.1 成对使用机翼的破坏 危险性分析	766	13.4.4 结构损伤度评估与经 济寿命预测	805
12.6.2 含孔构件破坏危险性 分析	771	13.4.5 裂纹萌生方法的 改进	806
12.6.3 可修复机翼主梁的破 坏危险性分析	773	13.4.6 示例	807
12.6.4 一种多梁结构机翼的 破坏危险性分析	776	13.5 结构耐久性分析的确定性裂纹 增长方法(DCGA)	808
参考文献	780	13.5.1 耐久性分析确定性 裂纹增长方法的目 标和步骤	808
第13章 结构耐久性分析与经济寿命 预测	782	13.5.2 初始缺陷的假设	808
13.1 结构耐久性与经济寿命准则	782	13.5.3 裂纹扩展解析程序	809
13.1.1 结构耐久性	782	13.5.4 相对小裂纹(当量)扩 展速率公式	809
13.1.2 经济寿命准则	782	13.5.5 DCGA 对应的结构损 伤计算	811
13.2 结构耐久性分析的目标与方法 概述	782	13.5.6 DCGA 的分析结论	811
13.2.1 结构耐久性分析的 目标	782	13.5.7 示例	811
13.2.2 结构耐久性分析 方法	783	13.6 结构耐久性分析的功能失效 概率控制方法	813
13.3 结构耐久性分析的概率断裂力 学方法(PFMA)	784	13.6.1 耐久性分析功能失效 概率控制方法的原理 与作用	813
13.3.1 结构原始疲劳质量 (IFQ)评估	784	13.6.2 关键件和装备结构功 能失效概率	814
13.3.2 耐久性分析对象、范围 及细节应力区划分	793	13.6.3 结构使用寿命评定	816
13.3.3 使用期裂纹扩展控制 曲线(SCGMC)	794		
13.3.4 各应力区与细节群的 裂纹超越数	796		

13.6.4	结构功能失效概率控制	819	14.4.3	腐蚀疲劳影响系数及其测定	873
13.6.5	影响因素分析	822	14.4.4	腐蚀环境下指定使用强度的结构疲劳寿命	874
13.6.6	可修理结构的功能失效概率控制方法	827	14.5	腐蚀环境下结构疲劳分析与经济寿命耐久性分析	874
13.6.7	示例	828	14.5.1	腐蚀环境下的疲劳分析方法	874
参考文献		834	14.5.2	腐蚀环境下结构的经济寿命耐久性分析	878
第14章	腐蚀环境下的结构使用寿命评定	836	14.6	腐蚀环境下结构的使用寿命评定技术	887
14.1	概述	836	14.6.1	疲劳关键件(部位)的使用寿命评定	887
14.1.1	腐蚀环境下结构使用寿命评定的目的	836	14.6.2	腐蚀失效关键件(部位)的日历寿命评定	889
14.1.2	腐蚀环境对结构使用寿命的影响	837	14.7	整体结构的腐蚀环境下使用寿命评定与修理	892
14.1.3	基本方法	838	14.7.1	引言	892
14.2	环境谱与载荷/环境谱的编制	839	14.7.2	整机结构的使用寿命	894
14.2.1	地面停放环境谱的编制	839	14.7.3	结构的腐蚀检修要求	895
14.2.2	结构关键部位地面局部环境谱的编制	842	参考文献		895
14.2.3	使用中的环境谱编制及工程简化	843	第15章	结构的动强度可靠性	897
14.2.4	载荷/环境谱的编制原理与方法	847	15.1	结构的振动与噪声控制	897
14.3	加速腐蚀(老化)试验技术	848	15.1.1	火箭结构的振动与噪声控制	897
14.3.1	加速腐蚀(老化)试验与加速试验环境谱	848	15.1.2	飞机结构的振动与噪声控制	898
14.3.2	各类加速试验环境谱的编制	849	15.1.3	舰艇振动噪声控制	935
14.3.3	当量加速关系确定方法	857	15.2	结构的振动与噪声分析	945
14.4	腐蚀环境下的疲劳寿命评定方法	868	15.2.1	火箭结构振动与噪声分析	945
14.4.1	腐蚀环境下结构疲劳寿命评定方法	868	15.2.2	飞机结构的振动与声疲劳分析	948
14.4.2	地面停放腐蚀影响系数曲线($C-T$ 曲线)及其测定	872	15.2.3	舰艇结构的振动分析	968

15.3 结构的颤振分析	979	试验	1031
15.3.1 颤振方程	979	16.6 装甲车辆结构的耐久性试验 ...	1036
15.3.2 颤振方程的数值解	980	16.6.1 耐久性参数	1037
15.3.3 飞机的颤振问题	986	16.6.2 明确耐久性试验的 目的	1038
参考文献	995	16.6.3 制定耐久性试验 计划	1038
第16章 结构可靠性试验	997	16.6.4 制定耐久性试验 大纲	1039
16.1 结构可靠性试验的目的与分类 ...	997	16.6.5 确定装甲车辆、试验样 本、试验总里程及 寿命	1039
16.1.1 结构可靠性试验 目的	997	16.6.6 试验车辆的预处理 试验	1039
16.1.2 结构可靠性试验 分类	997	16.6.7 确定试验设备仪器及 要求	1040
16.1.3 说明	999	16.6.8 确定耐久性试验 项目	1040
16.2 运载火箭结构可靠性试验	999	16.6.9 确定耐久性试验剖面 及耐久性试验的综合 环境条件	1040
16.2.1 目的与分类	999	16.6.10 制定耐久性统计 试验方案	1040
16.2.2 静力试验	1000	16.6.11 确定耐久性试验 程序	1041
16.2.3 静力/热联合试验	1002	16.6.12 确定耐久性试验 方法	1041
16.2.4 热流冲刷试验	1002	16.6.13 确定耐久性参数测 量方法、测量基准、 测量时机及内容	1042
16.2.5 超低温试验	1003	16.6.14 进行耐久性预计和 分析	1042
16.2.6 结构振动试验	1004	16.6.15 确定耐久性损坏判 据准则	1042
16.3 飞机结构静力试验	1006	16.6.16 试验车辆的维修、 试验中止、试验恢复 和终止等项说明	1043
16.3.1 静力试验的目的与 分类	1006	16.6.17 明确耐久性信息收 集和试验组织机构	
16.3.2 试验件	1006		
16.3.3 试验件的支持	1007		
16.3.4 试验大纲与试验任 务书	1008		
16.3.5 静力试验内容	1008		
16.3.6 试验检查和安全 防护	1011		
16.3.7 试验报告	1012		
16.4 舰船结构静力试验	1012		
16.4.1 水面舰船结构静力 试验	1012		
16.4.2 潜艇结构静力试验—— 泵水与深潜试验	1024		
16.5 飞机结构的耐久性试验	1028		
16.5.1 试验的目的与分类 ...	1028		
16.5.2 设计研制试验	1028		
16.5.3 全尺寸结构验证			