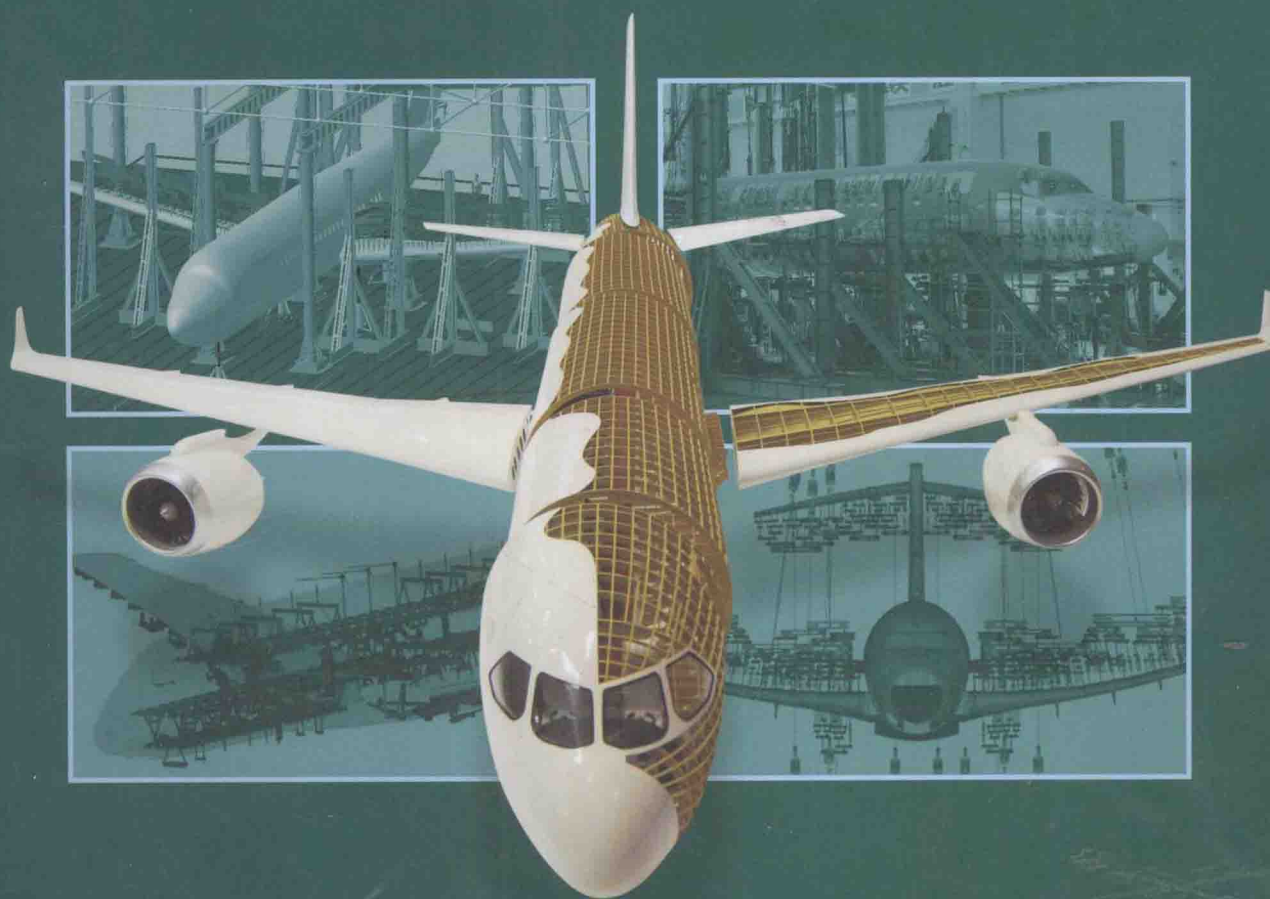


民用飞机结构强度刚度 设计与验证指南

(第二册)

孙侠生 主编



航空工业出版社

民用飞机结构强度刚度
设计与验证指南
(第二册)

孙侠生 主编

航空工业出版社

北京

内 容 提 要

《民用飞机结构强度刚度设计与验证指南》内容包括民用飞机结构强度刚度设计与验证的总体要求，适航符合性审定与文件编写要求，民用飞机结构静强度、动强度、耐久性和损伤容限设计与验证要求，民用飞机噪声控制与噪声适航符合性，民用飞机复合材料结构的验证试验要求，飞机结构和系统的强度设计和验证技术。可供飞机工程师在飞机设计、验证和报请适航符合性审查中使用。

本册内容包括民用飞机结构动强度、民用飞机结构耐久性和损伤容限 2 部分。

图书在版编目 (C I P) 数据

民用飞机结构强度刚度设计与验证指南. 第 2 册/孙
侠生主编. --北京:航空工业出版社, 2012. 9

ISBN 978 - 7 - 5165 - 0074 - 3

I. ①民… II. ①孙… III. ①民用飞机 - 结构设计 -
指南 IV. ①V271.1 - 62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 210464 号

民用飞机结构强度刚度设计与验证指南 (第二册)

Minyong Feiji Jiegou Qiangdu Gangdu Sheji yu Yanzheng Zhinan
(Di Er Ce)

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里 14 号 100029)

发行部电话: 010 - 64815615 010 - 64978486

北京地质印刷厂印刷

内部发行

2012 年 9 月第 1 版

2012 年 9 月第 1 次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

印张: 48.25

字数: 1207 千字

印数: 1—2000

定价: 288.00 元

《民用飞机结构强度刚度设计与验证指南》 编写委员会

主 编 孙侠生

副主编 段世慧 胡律行

委 员 (按姓氏笔画排序)

马小骏 王俊扬 齐丕骞 关志东 孙玉祥 牟让科

李玉龙 李令芳 李东升 沈 真 张伯年 姚卫星

姚雄华 黄文超 董登科 薛景川

编写顾问

郑作棣 屈见忠 王 中 秦福光 朱梅庄 李本建

赵越让 胡红东 邱 弢 韩克岑 周良道 朱广荣

《民用飞机结构强度刚度设计与验证指南》 各部分主要编审人员

第一部分 民用飞机结构强度刚度设计与验证总体要求

主编：王俊扬

编审：孙侠生 薛景川 胡律行

第二部分 民用飞机结构强度刚度设计与验证适航符合性审定及文件编写要求

主编：王俊扬

编审：孙侠生 薛景川 胡律行 张爱婷

第三部分 民用飞机结构静强度

主编：段世慧

编审：丁惠梁 童贤鑫 吴存利 张伯年 孙玉祥 孙 秦
张民孚 高进军 潘祥生 冯建民 薛景川

第四部分 民用飞机结构动强度

主编：齐丕骞

编审：牟让科 李玉龙 谢怀强 邵 闯 黄超广

第五部分 民用飞机结构耐久性和损伤容限

主编：薛景川

编审：李令芳 王生楠 张联营 张民孚 弓云昭 姚卫星
童明波 关志东 王春生 董登科 陈 莉 王海涛

第六部分 民用飞机噪声控制与噪声适航符合性验证试验要求

主编：黄文超

编审：马小骏 秦浩明 潘 凯 侯 峰

第七部分 民用飞机复合材料结构

主编：沈 真

编审：李东升 李 强 李令芳 陈普会 杨卫平 李军贵 杨 宇

第八部分 民用飞机结构和系统的强度设计与验证技术

主编：董登科

编审：王俊扬 弓云昭 赵美英 姚卫星 姚雄华 陈 莉

统 稿 何晓红

编写说明

《民用飞机结构强度刚度设计与验证指南》是以中国民用航空规章第 25 部《运输类飞机适航标准》(CCAR-25-R3)、第 36 部和第 23 部中与结构强度刚度有关的条款,以及美国联邦航空局在 2010 年底之前最新修订颁布的适航条例及其相关咨询通报为依据,以民用飞机适航符合性要求和用户的使用要求为前提,在充分理解、分析和借鉴国内外应用经验及必要的试验验证基础上,不仅考虑安全性和环保性的最低要求,而且考虑经济性和舒适性要求,系统总结民用飞机结构静强度、动强度、耐久性和损伤容限、噪声、复合材料等的设计要求,研究适航符合性分析方法(含软件)、试验方法以及结构适航符合性证明等,编写出的一套完整的,便于工程操作的,面向飞机设计、验证、制造、试飞和维修工程师,以及飞机适航申请、适航认证的工程技术人员的民用飞机结构强度刚度设计与验证工具书。

本指南共分 8 部分。第一部分为民用飞机结构强度刚度设计与验证总体要求,第二部分为民用飞机结构强度刚度设计与验证适航符合性审定及文件编写要求,第三部分为民用飞机结构静强度,第四部分为民用飞机结构动强度,第五部分为民用飞机结构耐久性和损伤容限,第六部分为民用飞机噪声控制与噪声适航符合性验证试验要求,第七部分为民用飞机复合材料结构,第八部分为民用飞机结构和系统的强度设计与验证技术。本指南分为 3 册,第一册包括第一、第二和第三部分,第二册包括第四和第五部分,第三册包括第六、第七和第八部分。

本指南总结了民用飞机结构静强度、耐久性和损伤容限设计要求,提炼了民用飞机结构静强度、耐久性和损伤容限分析方法、评估方法和全尺寸飞机结构试验方法,对民用飞机结构动强度校核给出了说明和验证方法解释,总结给出民用飞机噪声预计、分析和试验方法及民用飞机复合材料结构设计的一般原则和方法;按照结构符合性验证对结构试验件的要求,结合预发展阶段结构选型进行的相关验证试验,对民用飞机结构设计所采用的分析方法

进行了对比，给出了结构适航符合性验证条款中相应试验方法的近期研究成果；叙述了结构适航符合性验证条款中可多种方法验证的部分方法的研究结果。

本指南对中国民用航空适航条例和美国联邦航空局咨询通报的引用采用楷体表示。

由于水平和资源的限制，书中错误、疏漏和不合适之处，请使用者给予指正。

孙侠生

2011年5月25日

目 录

第四部分 民用飞机结构动强度

前言	(2)
符号说明	(3)
名词术语	(5)
缩略语	(9)
第 1 章 概论	(10)
1.1 民用飞机动强度问题	(10)
1.1.1 机体结构动响应问题	(10)
1.1.2 动力环境问题	(11)
1.1.3 动稳定性问题	(11)
1.2 适航条例中动强度相关条款和关键技术	(11)
1.2.1 动强度相关条款和符合性验证方法的简要说明	(11)
1.2.2 动强度相关条款涉及的关键技术	(14)
1.3 本部分内容简介	(15)
参考资料	(16)
参考文献	(16)
第 2 章 振动和抖振	(17)
2.1 结构振动	(17)
2.1.1 条款要求与说明	(17)
2.1.2 符合性说明	(19)
2.1.3 飞机结构振动符合性设计	(21)
2.1.4 结构振动符合性分析验证	(25)
2.1.5 结构振动符合性试验验证	(35)
2.2 动力装置及相关结构振动	(39)
2.2.1 条款要求与说明	(39)
2.2.2 符合性说明	(41)
2.3 设备振动	(45)
2.3.1 条款要求及符合性说明	(45)
2.3.2 符合性验证方法	(48)

2.4	燃油/滑油/液压系统	(48)
2.4.1	条款要求与说明	(48)
2.4.2	符合性说明与验证	(51)
附录 A	结构动力学设计导引	(55)
A.1	引言	(55)
A.2	优化方法	(57)
A.2.1	基本概念	(57)
A.2.2	无约束极小化方法	(60)
A.2.3	约束非线性规划方法	(65)
A.3	多频优化的结构动力学设计方法	(67)
A.3.1	多频优化的数学提法	(67)
A.3.2	多频优化方法	(68)
A.3.3	多频优化程序设计和设计实例	(69)
A.4	频响优化的结构动力学设计方法	(71)
A.4.1	频响优化的数学提法	(71)
A.4.2	频响优化设计方法	(72)
A.4.3	频响优化设计实例	(73)
附录 B	随机振动疲劳频域分析方法	(75)
B.1	随机振动过程及其统计特性	(75)
B.2	随机振动疲劳分析方法概述	(81)
B.3	用于窄带过程的 Rayleigh 分布模型	(82)
B.4	用于宽带过程的疲劳分析模型	(82)
B.4.1	Monte - carlo 方法	(83)
B.4.2	基于窄带过程估算方法的修正系数法 (P. H. Wirsching 方法)	(83)
B.4.3	Dirlik 的雨流幅值经验模型	(84)
B.4.4	涉及双模态响应谱的 Bi - modal 模型	(85)
B.4.5	简化的 Bi - modal 方法	(87)
B.5	各种方法的适用范围	(87)
附录 C	振动环境试验实例	(88)
C.1	振动环境与疲劳载荷的复合加载试验实例	(88)
C.1.1	总体思路	(88)
C.1.2	夹具设计要求	(88)
C.1.3	疲劳载荷实施及控制	(89)
C.1.4	疲劳载荷与振动环境的耦合影响消除	(89)
C.1.5	某型号飞机电动机构振动试验	(89)
C.2	振动环境与多点静载荷的复合加载试验实例	(90)
C.2.1	总体思路	(90)
C.2.2	静载荷的实施及其与振动环境的耦合消除	(91)

C. 2. 3 夹具设计要求	(91)
C. 2. 4 某型号飞机结构件叠加静载的振动试验	(92)
C. 3 超大型结构振动环境试验实例	(93)
C. 3. 1 激励方案的选择	(93)
C. 3. 2 夹具	(94)
C. 3. 3 试验简介	(94)
C. 3. 4 超大型结构振动环境试验讨论	(94)
参考资料	(95)
参考文献	(95)
第 3 章 声疲劳	(97)
3. 1 飞机结构的声疲劳问题和要求	(97)
3. 1. 1 飞机结构的声疲劳问题	(97)
3. 1. 2 条款要求	(97)
3. 1. 3 条款解释	(97)
3. 1. 4 符合性说明	(98)
3. 2 飞机结构声疲劳分析验证	(99)
3. 2. 1 声载荷预计与测试	(99)
3. 2. 2 声载荷谱编制	(101)
3. 2. 3 结构动特性及声响应分析	(101)
3. 2. 4 结构声疲劳寿命估算	(103)
3. 3 飞机结构声疲劳试验验证	(105)
3. 3. 1 概述	(105)
3. 3. 2 航空声地面试验	(108)
3. 3. 3 航空声飞行试验	(108)
3. 3. 4 实验室试验	(109)
3. 4 飞机结构声疲劳设计与预防	(110)
3. 4. 1 应力集中	(111)
3. 4. 2 材料	(111)
3. 4. 3 制造	(111)
3. 4. 4 连接	(112)
3. 4. 5 加筋板结构	(112)
3. 4. 6 声疲劳预防	(113)
参考资料	(115)
参考文献	(115)
第 4 章 起落架缓冲性能	(116)
4. 1 概述	(116)

4.2	起落架缓冲性能试验验证方法	(116)
4.2.1	总体要求	(116)
4.2.2	减振试验	(119)
4.2.3	限制落震试验	(121)
4.2.4	储备能量吸收落震试验	(124)
4.3	起落架缓冲性能分析	(125)
4.3.1	引言	(125)
4.3.2	机体动力学模型	(125)
4.3.3	起落架动力学模型	(128)
4.3.4	缓冲器动力学模型	(129)
4.3.5	轮胎力学模型	(130)
4.3.6	跑道模型	(131)
4.3.7	有关说明	(131)
4.4	多支柱起落架缓冲性能分析实例	(132)
4.4.1	模型建立	(133)
4.4.2	仿真分析结果	(136)
4.5	起落架缓冲器参数识别和优化	(140)
4.5.1	概述	(140)
4.5.2	缓冲器不可测参数识别	(141)
4.5.3	缓冲器可设计参数优化	(141)
4.5.4	基于响应面方法的多支柱起落架缓冲性能优化	(142)
4.6	多支柱起落架等效落震试验方法	(145)
4.7	起落架滑跑缓冲性能试验验证	(148)
4.7.1	条款要求	(148)
4.7.2	符合性说明	(148)
4.7.3	符合性验证试验	(148)
	参考资料	(150)
	参考文献	(150)
第5章	离散源撞击	(151)
5.1	鸟撞	(151)
5.1.1	条款要求	(151)
5.1.2	符合性说明	(152)
5.1.3	符合性验证分析方法	(155)
5.1.4	典型结构鸟撞有限元分析方法	(156)
5.1.5	典型结构抗鸟撞有限元法分析案例	(162)
5.1.6	符合性验证试验方法	(165)
5.2	冰雹	(168)

5.2.1	条款要求	(168)
5.2.2	符合性说明	(169)
5.2.3	冰雹撞击分析计算方法	(169)
5.2.4	实例分析——冰雹对涡轮风扇发动机进气口的撞击	(174)
5.2.5	试验验证方法	(177)
5.3	发动机碎片	(188)
5.3.1	条款要求	(189)
5.3.2	符合性说明	(190)
5.3.3	设计时应考虑的因素	(191)
5.3.4	符合性验证分析方法	(192)
5.3.5	符合性验证试验方法	(193)
5.4	轮胎碎片、跑道碎石	(194)
5.4.1	条款要求	(194)
5.4.2	符合性说明	(194)
5.4.3	设计时的考虑	(194)
5.4.4	故障与排故案例	(195)
5.4.5	符合性验证方法	(195)
5.4.6	其他可能的各种离散源撞击	(197)
	参考文献	(197)
第6章	应急着陆和水上迫降	(199)
6.1	应急着陆	(199)
6.1.1	条款要求及符合性说明	(199)
6.1.2	符合性验证方法	(202)
6.2	水上迫降	(218)
6.2.1	条款要求及符合性说明	(218)
6.2.2	符合性验证方法	(219)
6.3	机体结构的适坠性	(224)
6.3.1	坠撞动力学	(225)
6.3.2	机体结构的适坠性分析	(229)
6.3.3	全尺寸机体结构的适坠性试验	(235)
6.3.4	典型机身段客舱地板下部吸能结构设计	(241)
6.3.5	结构适坠性评估	(251)
	参考文献	(255)
第7章	气动弹性稳定性	(257)
7.1	总体要求	(257)
7.1.1	条款要求	(257)

7.1.2	符合性说明	(257)
7.2	防止颤振和发散	(257)
7.2.1	条款要求	(257)
7.2.2	符合性说明	(258)
7.2.3	符合性验证分析方法	(259)
7.2.4	符合性验证试验方法	(267)
7.3	由结构变形引起的操纵损失	(278)
7.3.1	条款要求	(278)
7.3.2	符合性说明	(278)
7.3.3	符合性验证分析方法	(278)
7.3.4	符合性验证试验方法	(278)
7.4	破损安全准则	(278)
7.4.1	条款要求	(278)
7.4.2	符合性说明	(280)
7.4.3	符合性验证分析方法	(281)
7.4.4	符合性验证试验方法	(282)
7.5	破损安全处理举例	(282)
附录 A	基于优化算法的结构动力模型修改	(283)
A.1	概述	(283)
A.2	修正变量选取和有限元分析模型的建立	(284)
A.3	模型修正的目标函数和约束条件	(285)
A.4	模型修正计算流程	(286)
A.5	飞机结构模型修正实例	(287)
	参考资料	(289)
	参考文献	(289)
第 8 章	飞机滑跑稳定性	(290)
8.1	总体要求	(290)
8.1.1	条款要求	(290)
8.1.2	符合性说明	(290)
8.2	符合性验证方法	(291)
8.2.1	分析方法	(291)
8.2.2	符合性验证试验	(296)
8.2.3	起落架防摆设计/验证试验一体化技术	(300)
	参考资料	(301)
	参考文献	(301)

第五部分 民用飞机结构耐久性和损伤容限

前言	(304)
符号说明	(306)
下标说明	(309)
名词术语	(310)
缩略语	(312)
第1章 总论	(313)
1.1 民用飞机结构耐久性和损伤容限设计思想	(313)
1.2 耐久性和损伤容限设计与适航条例中的疲劳评定之间的关系	(314)
1.3 疲劳评定总则	(314)
1.3.1 评定目的	(314)
1.3.2 结构设计原则和依据	(315)
1.3.3 评定的有关规定和内容	(315)
1.4 耐久性评定	(317)
1.4.1 耐久性评定的对象和内容	(317)
1.4.2 疲劳分析的名义应力法	(319)
1.4.3 腐蚀疲劳分析	(320)
1.4.4 声疲劳评定	(321)
1.4.5 磨损疲劳	(322)
1.4.6 疲劳分析方法的其他应用	(322)
1.4.7 耐久性分析的当量原始疲劳质量 (IFQ) 评估	(322)
1.5 损伤容限评定	(324)
1.5.1 损伤容限评定的目的	(324)
1.5.2 评定内容	(325)
1.5.3 离散源损伤	(330)
1.5.4 广布疲劳损伤	(331)
1.6 持续适航	(332)
1.7 民用飞机型号疲劳和损伤容限适航符合性审定	(332)
1.7.1 型号合格适航符合性审定程序	(332)
1.7.2 疲劳和损伤容限适航符合性检查要求提供的技术资料	(333)
1.7.3 型号疲劳和损伤容限验证试验的审定要求	(333)
参考资料	(336)
参考文献	(336)
第2章 耐久性和损伤容限结构设计	(337)
2.1 耐久性和损伤容限结构设计要求	(337)

2.1.1	概述	(337)
2.1.2	结构细节设计的基本要求	(337)
2.1.3	结构布局和传力路线	(339)
2.1.4	接头和结构连接细节设计	(340)
2.1.5	应力水平的控制	(345)
2.1.6	结构材料的选择和控制	(345)
2.1.7	加工工艺的选择	(346)
2.1.8	制造和装配间隙	(347)
2.1.9	抗腐蚀和抗磨蚀措施	(347)
2.1.10	结构维修	(348)
2.1.11	提高裂纹的可检查度	(348)
2.2	耐久性和损伤容限设计符合性验证方法	(349)
2.2.1	符合性验证方法概述	(349)
2.2.2	适航符合性验证方法的选用	(350)
2.2.3	耐久性和损伤容限设计符合性验证	(351)
2.3	耐久性和损伤容限设计控制	(353)
2.3.1	概述	(353)
2.3.2	耐久性和损伤容限的主要控制内容	(353)
2.3.3	研制各阶段中的耐久性和损伤容限控制要求	(357)
	参考资料	(362)
	参考文献	(363)
第3章	载荷和载荷谱	(364)
3.1	概述	(364)
3.2	适航相关条款要求	(365)
3.2.1	§ 25.571 条中涉及载荷的要求	(365)
3.2.2	咨询通报 AC25.571-1C 中涉及到载荷谱的要求	(366)
3.3	典型飞行任务剖面	(367)
3.3.1	典型飞行任务剖面的分类	(367)
3.3.2	典型飞行任务剖面中参数的确定	(368)
3.3.3	典型飞行任务剖面的标准使用情况	(370)
3.3.4	典型飞行任务剖面的示例	(370)
3.4	空中飞行载荷谱	(370)
3.4.1	阵风载荷谱	(374)
3.4.2	机动载荷谱	(377)
3.4.3	座舱增压载荷	(379)
3.5	地面载荷谱	(379)
3.5.1	波音系列飞机的地面载荷谱	(381)

3.5.2 空中客车系列飞机的地面载荷谱	(382)
3.6 载荷谱的当量化分析	(385)
3.6.1 直线型载荷谱的当量化计算	(385)
3.6.2 曲线型载荷谱的当量化计算	(386)
3.6.3 K次飞行载荷谱的当量化计算	(387)
3.6.4 两条直线叠加成的曲线型载荷谱的当量化计算	(387)
3.7 疲劳分析载荷谱的编制	(390)
3.7.1 主要结构部件载荷情况的最小分析范围	(390)
3.7.2 使用载荷及载荷谱的详细说明	(391)
3.7.3 疲劳分析应力谱的确定	(396)
3.7.4 疲劳分析应力谱例题	(396)
3.7.5 损伤容限分析的载荷谱	(396)
3.7.6 环境因素的影响	(396)
3.8 全尺寸结构疲劳试验载荷谱	(398)
3.8.1 “5×5”试验谱的基本原理	(398)
3.8.2 试验用典型飞行任务剖面的确定	(400)
3.8.3 各部件试验载荷谱的使用情况	(400)
3.8.4 关于高载截取和低载删除	(402)
3.8.5 裂纹扩展试验载荷谱的高载截取方法	(404)
3.8.6 襟翼及其系统疲劳试验载荷谱	(406)
参考资料	(406)
参考文献	(407)
第4章 耐久性分析与试验的可靠性体系	(408)
4.1 概述	(408)
4.2 结构疲劳可靠性设计解决的问题	(408)
4.3 基于对数正态分布的疲劳寿命可靠性分析	(409)
4.3.1 对数正态分布有关知识	(409)
4.3.2 按一个可靠性指标确定结构安全寿命和分散系数	(410)
4.3.3 按两个可靠性指标确定结构安全寿命和分散系数	(412)
4.3.4 估计对数寿命母体标准差的统计方法	(415)
4.4 基于威布尔分布的疲劳寿命可靠性分析	(416)
4.4.1 威布尔分布的有关知识	(416)
4.4.2 针对寿命母体确定安全寿命和分散系数	(418)
4.4.3 全尺寸结构试验寿命要求和试验可靠性寿命评估	(422)
4.4.4 应用实例	(423)
4.5 疲劳寿命分布类型和分散系数	(425)

4.5.1	疲劳寿命概率分布类型的选定	(425)
4.5.2	疲劳寿命分散系数的实际统计	(426)
4.6	可靠性系数	(427)
4.6.1	可靠性系数的基本概念	(427)
4.6.2	结构可靠性系数准则	(428)
4.6.3	特定结构及组件的疲劳可靠性系数	(429)
	参考文献	(432)
第5章	结构细节应力分析	(433)
5.1	概述	(433)
5.2	结构总体应力分析和细节应力分析	(433)
5.3	典型连接细节应力分析的解析法	(434)
5.3.1	基本假设	(434)
5.3.2	典型连接细节内力计算公式	(434)
5.4	结构细节应力分析的有限元法	(438)
5.4.1	细节应力分析的基本原理	(438)
5.4.2	细节应力分析的基本步骤	(438)
5.5	紧固件柔度系数	(444)
5.5.1	影响 $P-\delta$ 曲线的主要因素	(444)
5.5.2	紧固件弹性段柔度系数	(445)
5.6	几何应力集中系数	(447)
	参考资料	(447)
	参考文献	(447)
第6章	结构耐久性分析	(448)
6.1	概述	(448)
6.1.1	耐久性分析的范围和目的	(448)
6.1.2	耐久性分析和疲劳分析	(449)
6.2	应力严重系数法	(450)
6.2.1	单向拉伸疲劳载荷作用下的应力严重系数	(450)
6.2.2	相同危险细节数的影响与绝对尺寸效应	(452)
6.2.3	可靠性寿命估算方法	(454)
6.3	细节疲劳额定值法	(455)
6.3.1	DFR 法基本假设和定义	(455)
6.3.2	DFR 和其他疲劳参数之间的关系 (标准 $S-N$ 曲线)	(456)
6.3.3	相对疲劳损伤	(457)
6.3.4	DFR 值的确定	(458)