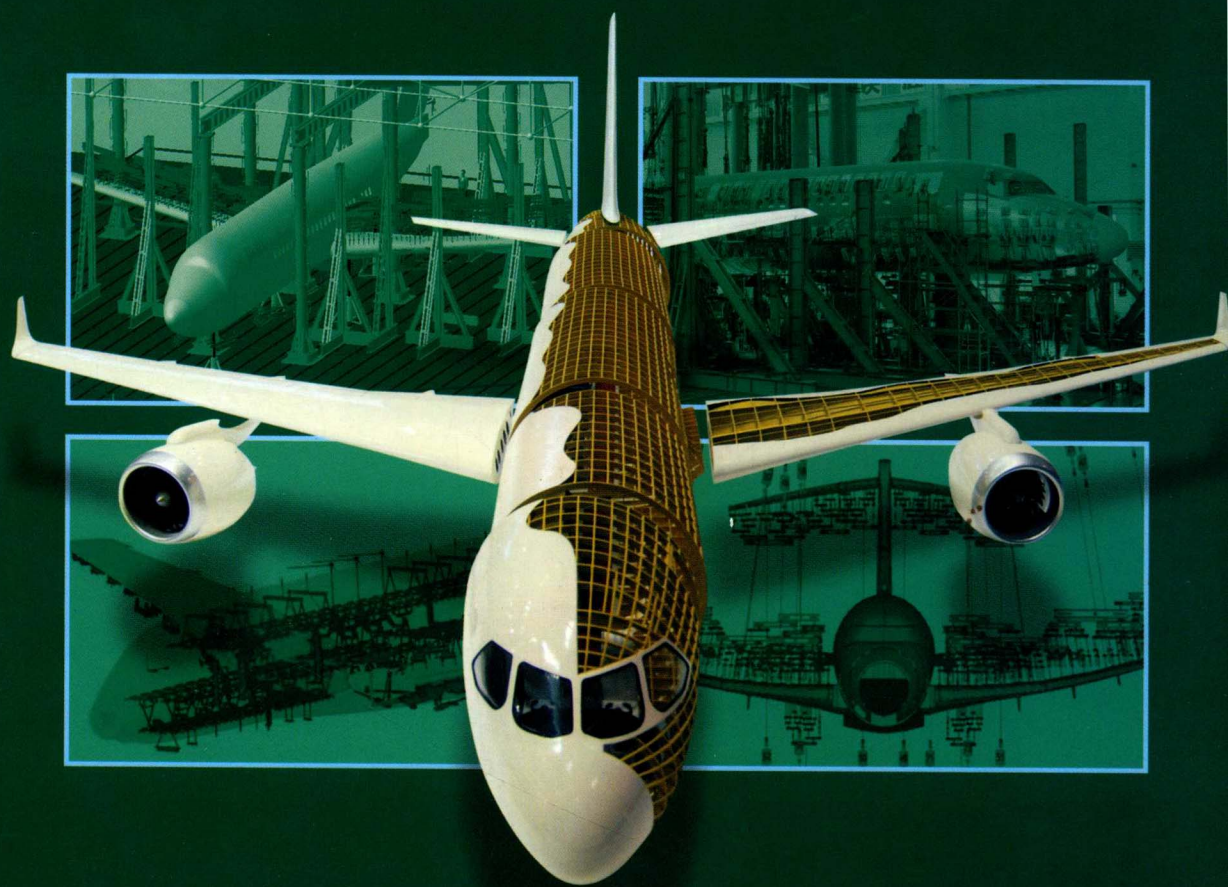


民用飞机结构强度刚度 设计与验证指南

(第三册)

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 (第三册)

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噪声控制与噪声适航符合性验证试验要求、民用飞机复合材料结构、民用飞机结构和系统的强度设计与验证技术3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3册/孙
侠生主编. --北京:航空工业出版社, 2012.9

ISBN 978 - 7 - 5165 - 0075 - 0

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 210478 号

民用飞机结构强度刚度设计与验证指南 (第三册)

Minyong Feiji Jiegou Qiangdu Gangdu Sheji yu Yanzheng Zhinan
(Di San 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: 45.5

字数: 1135 千字

印数: 1—2000

定价: 268.00 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

前言	(2)
第 1 章 概述	(3)
1.1 飞机噪声问题	(3)
1.2 飞机噪声限制	(3)
第 2 章 飞机噪声源	(5)
2.1 主要噪声源	(5)
2.2 发动机动力装置噪声	(5)
2.2.1 涡轮喷流噪声	(5)
2.2.2 涡轮风扇噪声	(7)
2.2.3 螺旋桨噪声	(9)
2.2.4 旋翼噪声	(11)
2.3 机体噪声	(12)
第 3 章 飞机噪声控制	(14)
3.1 飞机噪声控制基本方法	(14)
3.2 动力装置噪声控制	(14)
3.2.1 喷流噪声控制	(14)
3.2.2 风扇噪声控制	(15)
3.2.3 螺旋桨噪声控制	(16)
3.2.4 短舱消声设计	(17)
3.3 舱内噪声控制	(18)
3.3.1 壁板隔声特性	(19)
3.3.2 舱壁板隔热吸声措施	(20)
3.3.3 蜂窝刚度处理	(21)
3.3.4 阻尼减振降噪	(21)
3.3.5 多层复合结构	(22)
3.3.6 吸振和隔振措施	(27)
3.3.7 座舱吸声降噪	(29)

参考文献	(33)
第 4 章 飞机舱内噪声预计方法	(34)
4.1 概述	(34)
4.2 飞机舱室结构子系统的划分原则	(34)
4.2.1 SEA 的基本能量平衡关系	(34)
4.2.2 子系统划分原则	(36)
4.3 飞机舱室结构模态数的计算方法	(37)
4.4 子系统参数的计算方法	(40)
4.4.1 平板-声空间的耦合损耗因子计算方法	(41)
4.4.2 不同形式结构间的耦合损耗因子计算方法	(41)
4.5 识别能量传递路径的功率流综合分析法	(42)
4.6 模型中外声场载荷的等效计算方法	(44)
4.7 模型中座椅的简化处理方法	(46)
4.8 小结	(47)
第 5 章 飞机舱内噪声预计参数测试与试验验证	(48)
5.1 概述	(48)
5.2 机身舱段模拟件相关试验研究	(48)
5.3 机身声学试验平台相关试验研究	(49)
5.3.1 输入功率的测量	(50)
5.3.2 各子系统响应的测量	(50)
5.3.3 部分 SEA 参数的测量	(50)
5.3.4 仿真模型中座椅的简化处理相关试验	(54)
5.4 飞机壁板结构相关试验研究	(54)
5.4.1 振动激励下壁板声辐射的测量	(54)
5.4.2 壁板子系统 SEA 参数的测量	(55)
5.4.3 壁板隔声测量	(56)
第 6 章 飞机舱内噪声预计实例	(57)
6.1 概述	(57)
6.2 某型支线飞机总体概述	(57)
6.2.1 全机三面图	(57)
6.2.2 总体数据	(58)
6.2.3 材料特性	(60)
6.3 有限元模型	(62)
6.3.1 有限元模型	(62)
6.3.2 结构特性参数	(62)

6.4	统计能量分析模型及舱内噪声预计	(64)
6.4.1	子系统的建立与划分	(64)
6.4.2	子系统参数	(66)
6.4.3	载荷的定义	(70)
6.5	预计结果	(76)
6.5.1	起飞状态下发动机引起的噪声	(76)
6.5.2	巡航状态下边界层噪声引起的舱内噪声	(77)
	参考文献	(80)
第7章	飞机适航噪声验证试验	(81)
7.1	适航噪声验证试验的必要性	(81)
7.2	飞机适航噪声试验依据	(81)
7.3	适航噪声审定测量条件要求	(81)
7.3.1	适航噪声验证试验概述	(81)
7.3.2	试验场的要求	(82)
7.3.3	气候限制	(82)
7.3.4	适航噪声验证测量程序	(83)
7.4	飞行航迹要求及测点位置	(84)
7.4.1	起飞噪声测量	(84)
7.4.2	边线噪声测量	(86)
7.4.3	进场噪声测量要求	(87)
7.5	测量系统设备要求	(88)
7.5.1	测量系统	(88)
7.5.2	传感、记录和重放设备	(88)
7.5.3	分析设备	(88)
7.5.4	校准	(89)
7.5.5	噪声测量要求	(89)
7.6	测量数据的修正	(90)
7.6.1	概述	(90)
7.6.2	噪声合格审定的基准条件	(91)
7.6.3	数据修正	(91)
7.6.4	结果的有效性判断	(92)
7.7	测量数据的报送	(92)
7.7.1	概述	(92)
7.7.2	必须报送资料	(92)
附录 A	详细的修正程序	(93)
A.1	概述	(93)
A.2	PNLT 修正	(94)
A.2.1	起飞航迹	(94)

A. 2. 2	进场航迹	(95)
A. 2. 3	边线航迹	(96)
A. 3	持续时间修正	(96)
A. 3. 1	起飞航迹	(97)
A. 3. 2	进场航迹	(97)
A. 3. 3	边线航迹	(97)
附录 B	EPNL 计算方法	(97)
B. 1	概述	(97)
B. 2	感觉噪声级	(97)
B. 3	频谱不规则性修正	(98)
B. 4	持续时间修正	(100)
附录 C	置信度区间算法	(100)
C. 1	一组抽样数据平均值估值的置信度区间计算	(100)
C. 2	回归方程平均曲线的置信度区间计算	(101)
C. 3	分析发动机静态测试数据得到的 NPD 曲线的置信度区间计算	(102)
C. 4	分析计算得到的 NPD 曲线的置信度区间计算	(102)
C. 5	回归方程数学模型的合理性	(103)
C. 5. 1	发动机参数的选取	(103)
C. 5. 2	回归方程模型的选择	(103)
C. 6	三组抽样数据的联合 90% 置信度区间计算范例	(103)
附录 D	符号、单位及定义说明	(104)
附录 E	ICAO 大气声衰减系数计算	(109)

第七部分 民用飞机复合材料结构

前言	(112)
名词术语	(114)
缩略语	(118)
第 1 章 总论	(119)
1. 1 概述	(119)
1. 2 复合材料的发展及其在飞机结构中的应用	(119)
1. 2. 1 复合材料的发展概况	(119)
1. 2. 2 复合材料在飞机结构中的应用	(120)
1. 3 复合材料结构的特点	(122)
1. 3. 1 结构性能方面	(122)
1. 3. 2 制造工艺方面	(127)
1. 4 复合材料结构的成本	(127)

1.4.1	材料	(128)
1.4.2	制造技术	(128)
1.4.3	整体化设计与制造技术	(128)
1.4.4	充分利用复合材料优异的抗疲劳和耐腐蚀性能	(128)
1.5	复合材料结构设计要点	(128)
1.5.1	设计特点	(128)
1.5.2	设计-分析-制造优化途径	(128)
1.5.3	应避免的问题	(129)
1.5.4	适航审定	(129)
1.6	民用飞机复合材料结构适航文件的发展	(129)
	参考文献	(130)
第2章	环境设计	(132)
2.1	概述	(132)
2.2	有关环境设计准则的适航条款	(132)
2.2.1	CCAR 25 部有关条款	(132)
2.2.2	AC 20-107B 有关条款	(132)
2.3	环境设计准则的范围	(132)
2.3.1	环境设计要求	(132)
2.3.2	要考虑的环境条件	(132)
2.3.3	环境设计指南	(132)
2.4	建议民用飞机复合材料结构采用的环境设计准则	(133)
2.4.1	温度使用条件	(133)
2.4.2	民用飞机结构设计考虑的吸湿量	(135)
2.4.3	民用飞机复合材料结构的老化影响	(135)
2.5	其他环境条件	(135)
2.5.1	溶剂和其他液体	(135)
2.5.2	雷击	(136)
2.5.3	高强度辐射场(HIRF)	(136)
2.5.4	冰雹	(136)
2.5.5	外来物损伤	(137)
2.5.6	雨蚀和砂蚀	(137)
2.5.7	高温源的考虑	(138)
2.5.8	与金属连接零件的电化学腐蚀	(138)
2.5.9	漆层开裂	(139)
2.5.10	复合材料油箱	(139)
附录 A	确定湿热环境设计准则的相关数据	(140)
A.1	我国飞机服役典型环境区的划分	(140)

A.2	温度谱	(140)
A.2.1	典型环境区气温谱	(140)
A.2.2	气温的垂直分布	(142)
A.2.3	飞机结构在地面大气中的温度分布	(142)
A.2.4	用于飞机结构设计的温度变化剖面实例	(143)
A.3	湿度谱	(144)
A.3.1	典型环境区的相对湿度谱	(144)
A.3.2	湿度随高度的变化曲线	(144)
	参考文献	(146)
第3章	许用值和设计值	(147)
3.1	概述	(147)
3.2	材料和制造研究的适航条款	(147)
3.2.1	CCAR25 部有关条款	(147)
3.2.2	AC 20-107B §6. 材料和制造研发	(148)
3.3	许用值和设计值在强度设计中的意义	(148)
3.4	许用值和设计值的定义和范畴	(149)
3.4.1	许用值	(149)
3.4.2	设计值	(151)
3.4.3	许用值与设计值的关系	(151)
3.5	国外飞机复合材料结构设计值的确定方法	(152)
3.5.1	早期设计值的确定方法	(152)
3.5.2	20世纪70~80年代的研究概况	(153)
3.5.3	确定拉伸和压缩设计值的一般方法	(154)
3.6	许用值及其确定	(155)
3.6.1	概述	(155)
3.6.2	确定许用值的路线图	(155)
3.6.3	试验矩阵	(156)
3.6.4	试验方法和试验数据的处理方法	(162)
3.6.5	许用值确定方法	(164)
3.6.6	不同结构研制阶段和关键程度的许用值试验要求	(166)
3.7	确定结构设计值的方法	(168)
3.7.1	基本原则	(168)
3.7.2	尺寸效应和边界支持的影响	(169)
3.8	湿热环境影响	(170)
3.8.1	聚合物基复合材料的吸湿和平衡吸湿量	(170)
3.8.2	影响范围	(170)
3.8.3	湿热对玻璃化转变温度的影响	(170)

3.8.4	湿热对力学性能的影响	(174)
3.8.5	吸湿量对湿膨胀系数和热膨胀系数的影响	(176)
附录 A	确定设计许用值的计算范例	(178)
A.1	层压板强度毯式曲线计算范例	(178)
A.2	含缺口层压板强度毯式曲线计算范例	(180)
A.3	机械连接挤压强度许用值计算范例	(181)
附录 B	力学性能的测试方法	(183)
B.1	概述	(183)
B.2	试验方法标准	(183)
B.2.1	力学性能试验方法标准	(183)
B.2.2	其他相关标准	(185)
附录 C	力学性能测试数据的处理方法	(186)
C.1	异常数据的处理	(186)
C.2	正则化	(186)
C.2.1	概述	(186)
C.2.2	方法	(187)
C.3	B-基准值计算过程简述	(187)
C.4	B-基准值计算软件简介	(190)
附录 D	有关冲击损伤的研究新进展	(191)
D.1	结构压缩设计值和复合材料体系的抗冲击性能	(191)
D.1.1	CAI 的由来和演变	(191)
D.1.2	BVID 和压缩设计值	(191)
D.2	复合材料层压板抗冲击行为及表征方法	(193)
D.2.1	冲击损伤阻抗性能	(193)
D.2.2	对集中准静态压痕力的损伤阻抗性能	(193)
D.2.3	冲击损伤容限性能	(194)
D.2.4	抗冲击行为的拐点现象	(195)
D.2.5	拐点的物理意义	(195)
D.2.6	复合材料层压板抗冲击行为的表征方法	(196)
D.3	关于 BVID 和 VID 对应的剩余强度要求	(197)
D.4	空中客车公司 CAI 的确定方法	(197)
D.4.1	试样和试验方法概述	(197)
D.4.2	BVID 的确定	(197)
D.4.3	冲击能量的确定方法	(197)
附录 E	ACT 缝合/RFI 机翼设计值的确定方法	(198)
E.1	设计准则	(198)
E.2	结构安排	(199)
E.3	进行比较研究的 4 种设计情况	(199)

E.4	材料性能和设计值	(200)
E.4.1	蒙皮壁板	(200)
E.4.2	桁条	(204)
E.4.3	蒙皮屈曲工作载荷(Running Load)许用值	(206)
E.4.4	桁条竖直突缘压损许用值	(206)
E.4.5	检查孔设计值	(207)
E.4.6	梁	(207)
E.4.7	肋	(208)
E.4.8	缝合材料的设计值	(210)
E.5	总结	(213)
附录 F	获得许用值的参考方法和数据	(214)
F.1	基本思路	(214)
F.2	无缺口多向层压板的性能	(214)
F.2.1	基本方法	(214)
F.2.2	Hart - Smith 的 10% 法则	(214)
F.2.3	多向层压板强度的毯式曲线	(214)
F.3	影响开孔强度的各种因素	(215)
F.3.1	环境系数	(215)
F.3.2	缺口系数	(215)
F.3.3	孔径修正系数	(215)
F.3.4	边距修正系数	(217)
F.4	算例	(217)
附录 G	试样吸湿试验方法	(218)
G.1	试样吸湿试验方法	(218)
G.2	有效吸湿平衡状态的定义	(218)
G.3	试验标准的选用	(219)
G.4	影响吸湿量的因素	(219)
参考文献		(221)
第 4 章	静强度设计与验证	(223)
4.1	概述	(223)
4.2	结构静强度验证的适航条款	(224)
4.2.1	CCAR25 部有关条款	(224)
4.2.2	AC 20 - 107B §7 结构验证——静力	(224)
4.3	静强度设计要点	(224)
4.4	静强度验证试验指南	(226)
4.4.1	试验目的和特点	(226)
4.4.2	全尺寸部件试验件的状态	(227)

4.4.3	重复载荷和环境条件叠加的疲劳对静强度的影响	(227)
4.4.4	材料分散性的考虑	(228)
4.4.5	全尺寸部件试验对重复载荷与环境暴露影响的处理方法	(229)
4.4.6	环境补偿系数的确定方法	(231)
4.4.7	结构吸湿试验方法	(232)
4.4.8	静强度试验未满足验证要求的实例	(232)
4.5	静强度设计刚度设计准则	(235)
4.5.1	刚度	(235)
4.5.2	稳定性	(236)
4.5.3	强度	(237)
4.6	热分析和吸湿分析	(238)
4.6.1	热分析	(238)
4.6.2	吸湿分析	(239)
4.7	一般设计原则	(241)
4.7.1	一般结构设计	(241)
4.7.2	夹层结构设计	(243)
4.7.3	螺接连接	(244)
4.7.4	胶结连接	(246)
4.7.5	复合材料与金属的斜面搭接连接	(248)
4.7.6	复合材料与金属的连续连接	(248)
4.7.7	复合材料与复合材料的斜面搭接连接	(248)
	参考文献	(249)
第5章	耐久性设计与评定	(250)
5.1	概论	(250)
5.2	结构耐久性验证的适航条款	(250)
5.2.1	§ 25.571 结构的损伤容限和疲劳评定	(250)
5.2.2	AC 20-107B § 8 结构验证-疲劳和损伤容限	(251)
5.3	耐久性设计要点	(251)
5.4	复合材料结构耐久性中经常提及的几个概念	(252)
5.4.1	静力覆盖疲劳	(252)
5.4.2	冲击损伤阻抗	(253)
5.4.3	胶结结构的耐久性	(253)
5.5	耐久性设计要求	(253)
5.5.1	概述	(253)
5.5.2	工具坠落	(254)
5.5.3	冰雹和跑道碎石冲击	(254)
5.5.4	操作和踩踏	(255)

5.5.5 可拆卸的夹层结构要求	(255)
5.6 复合材料及其结构的疲劳特性	(255)
5.6.1 层压板的疲劳特性	(255)
5.6.2 结构件的疲劳特性	(256)
5.7 耐久性分析	(257)
5.7.1 概述	(257)
5.7.2 疲劳寿命估算方法	(257)
5.8 耐久性验证试验指南	(261)
5.8.1 基本原则	(261)
5.8.2 载荷/环境谱	(261)
5.8.3 环境影响的处理方法	(262)
5.8.4 疲劳寿命分散性	(262)
5.8.5 试验件的状态	(266)
5.8.6 复合材料/金属混合结构的耐久性验证	(266)
附录 A 复合材料的分散性和载荷放大系数法	(267)
A.1 威布尔分布	(267)
A.2 威布尔分布的 B - 基准	(268)
A.3 寿命分散系数	(269)
A.4 载荷放大系数	(269)
参考文献	(271)
第 6 章 损伤容限设计与评定	(272)
6.1 概述	(272)
6.2 结构损伤容限验证的符合性条款	(273)
6.2.1 CCAR - 25 有关条款	(273)
6.2.2 AC 20 - 107AB § 8 结构验证—疲劳和损伤容限	(275)
6.3 损伤容限设计要求	(275)
6.3.1 复合材料飞机结构损伤容限设计要求的演变	(275)
6.3.2 损伤容限要求	(277)
6.3.3 关于 BVID 和 VID 对应的剩余强度要求	(280)
6.4 损伤容限评定策略	(280)
6.4.1 复合材料结构的损伤类别	(280)
6.4.2 对条款的理解	(283)
6.4.3 损伤容限评定	(284)
6.4.4 损伤容限符合性方法	(286)
6.5 缺陷/损伤类型及其对强度的影响	(293)
6.5.1 按产生时机表征的缺陷/损伤	(293)
6.5.2 用物理缺陷表征的损伤	(293)