

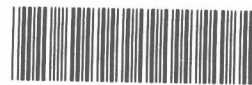
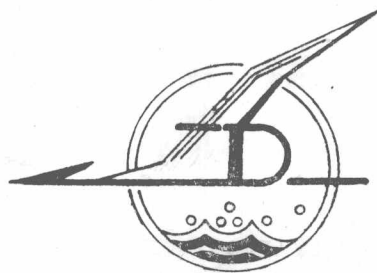
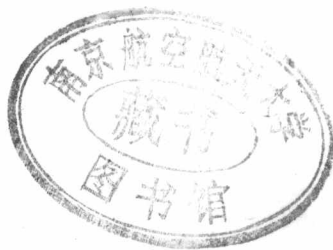
V221/A1002
1039-1

V221/1039-1

秘密

近代飞机耐久性设计技术

航空航天工业部科学技术研究院 编著



30889916

航空航天工业部《AFFD》系统工程 出版

1989

新
航
志
毅

工程技术专著

(内部发行)

内 容 简 介

飞机结构耐久性设计是为满足长寿命、高可靠性要求新发展起来的综合性技术。本书以工程应用为目标,按照可以在我国实施的完整飞机结构耐久性设计程序编写。全书共分九章:第一章介绍飞机结构耐久性基本概念和规范要求;第二章介绍飞机的使用寿命和载荷/环境谱;第三章介绍结构细节部位的耐久性设计;第四章介绍各种耐久性分析方法;第五章介绍环境等因素对结构耐久性的影响;第六章介绍各种耐久性试验;第七章介绍断口分析和评定结构的原始疲劳质量;第八章介绍工程应用实例;第九章工程应用程序简介。

本书可作为从事航空航天飞机结构和强度设计、研究、生产的工程技术人员的工作指南,以及飞机管理、使用、维护人员的重要参考资料,和航空航天高等院校教师、研究生的参考教材。

本书也可供从事汽车、船舶、机械、化工容器等新结构研制人员参考。

近代飞机耐久性设计技术

航空航天工业部科学技术研究院 编著

*

*

责任编辑

李铁柏

责任校对

钟志康

*

*

航空航天工业部《AFFD》系统工程 出版

四川省成都市华民印刷厂 印刷

787×1092 1/16 印张40 插表2 927千字

1989年12月 第一版 1989年12月 第一次印刷 印数: 001—820册

精装本定价: 20元

《近代飞机耐久性设计技术》编审委员会

主编 王 正 主审 王俊扬

编委 (按姓氏笔划为序)

王 正 刘文珽

吕国志 陈传尧

李锦华 罗安民

郑旻仲 郦正能

魏志毅

编、校、审、人员名单

第一章

编写 王 正
校对 刘文珽* 郑旻仲
审核 王俊扬

第二章

编写 王 正
校对 许毓光
审核 王俊扬

第三章

编写 罗安民* 魏志毅* 刘 益
吕国志
校对 刘悟泉* 罗安民 肖思银
审核 王 正

第四章

编写 刘文珽* 酆正能 申正金 肖寿庭
薛景川 罗安民 钟志康
校对 酆正能* 刘文珽
侯 伟 肖思银
审核 王 正

第五章

编写	吕国志	
校对	周岳泉*	罗安民
审核	郑旻仲	

第六章

编写	郑旻仲*	王 正
	寇长河	吕国志
校对	刘文珽*	郑旻仲
	唐永岩	周岳泉
审核	王俊扬	

第七章

编写	陈传尧*	戴蜀娟	
校对	戴蜀娟*	王春生	陈传尧
审核	刘文珽		

第八章

编写	李锦华*	陈传尧	申正金
校对	王 正*	戴蜀娟	刘文珽
审核	王俊扬		

第九章

编写	严 冬	刘小冬	杨海燕
	魏志毅	王 正	申正金
	侯 伟	钟志康	傅惠民
	伍成明		

校对	刘小冬	严冬	钟志康
	王正	侯伟	申正金
	杨海燕	刘文珽	罗安民

附录A

编写 罗安民

校对 侯伟 刘益

附录B

编写 吕国志

校对 周岳泉

注：带*号者为本章主要编写人或主校

封面设计	黄崇荣	薛景川	严冬
插图	吴春荣	徐雅贤	毛水珍

前 言

飞机结构耐久性设计是国外80年代前后发展起来的一项综合性飞机设计新技术。它建立在早期的安全寿命设计的基础上，总结和改进了传统的抗疲劳设计方法，扩大了应用范围，吸收了损伤容限设计的优点，提高了设计的精确性和可靠性，这样形成的耐久性设计将能够更好地满足先进飞机的多用途、高性能、长寿命、高可靠性、低维修成本的综合要求。

耐久性设计可以覆盖安全寿命设计，它与损伤容限设计相容、互补，是确定飞机使用寿命的基础设计，并为飞机结构在使用寿命期中不致出现功能损伤提供了保障。

耐久性设计技术包括设计和试验验证两大方面。它涉及到材料选择；应力水平控制；结构细节部位耐久性优化设计；抗疲劳工艺选择；生产质量控制；检查和防护系统等技术领域。

耐久性设计的基本思想是：由于材料和制造等原因，用典型工艺生产的飞机结构零、部件在使用前必然广泛地存在着许多初始缺陷。这些尺寸小但数量多的裂纹群体在服役使用的载荷/环境谱作用下会发生不同程度的扩展，当扩展到可能削弱零、部件的正常功能时，必须经济、方便地进行维修，直至达到要求的使用寿命。耐久性设计的目标是确保飞机结构在整个使用寿命期内功能可靠和最经济的维修，使飞机经常处于良好的备用状态。飞机承力结构的功能就是承受或传递各种载荷，它们都是耐久性设计的主要对象。因此，飞机结构按耐久性设计并证明耐久性合格是保证飞行安全的必要条件^[14]。

近几年来，我国已陆续引进了一些飞机结构耐久性设计分析方法和资料^[1~14]，发展了一些应用研究工作。特别是从1986年起，航空航天工业部在飞机结构抗疲劳与断裂设计技术研究（简称《AFFD》）系统工程中建立了飞机结构耐久性设计技术研究（简称ASD）课题组，结合我国新机研制需要，全面负责该项新技术的移植和研究工作。已用我国航空材料和批生产工厂的典型工艺制造了一系列耐久性试验件，对耐久性设计中的许多重大技术关键进行了较深入的分析和试验研究工作。证实了在我国执行耐久性设计的可行性。在此基础上，我国即将颁布的新国军标《飞机结构完整性大纲》中建议新设计的飞机宜采用耐久性设计准则，并在其附录A（补充件）中详细地提出了《飞机结构耐久性设计和地面试验要求》。

本书是工程应用技术专著，目的是为了尽快将这项新技术介绍和推广到我国飞机设计和生产中去。本书以《飞机结构耐久性设计和地面试验要求》为纲，对该要求作了较详细的技术说明，推荐并介绍了各部分工作的原理和工程实施方法，介绍了有关的关键技术，同时也概述了某些最新研究成果。本书可以帮助全面理解完整的耐久性设计程序，也可以作为开展耐久性设计工作的技术指导，以及飞机管理、使用和维护的重要参考

资料。由于经验、水平和时间的限制，本书难免有错误或不足之处，欢迎各方面专家、工程技术人员、飞机使用和管理人员提出宝贵意见，交流耐久性设计和使用中的经验，以便修改本书，逐渐形成我国实用的耐久性设计体系。

航空航天工业部科学技术研究院

《近代飞机耐久性设计技术》编委会

1989年2月

符 号

1. 基本符号

符号	意义	单位	
a	裂纹长度	毫米	mm
a_c	临界裂纹尺寸	毫米	mm
a_d	耐久性极限缺陷尺寸	毫米	mm
a_{eff}	有效裂纹尺寸	毫米	mm
a_o	损伤容限初始裂纹(缺陷)尺寸	毫米	mm
a_e	经济修理极限尺寸	毫米	mm
a_i	耐久性当量初始缺陷尺寸	毫米	mm
a_r	给定TTCI时的参考裂纹尺寸	毫米	mm
$a(t), a(t_1), a(t_2)$	分别为在时间 t, t_1 和 t_2 时的裂纹尺寸	毫米	mm
a_u, a_l	分别为断口金相分析裂纹尺寸的上、下界,用于确定IFQ模型参数	毫米	mm
Δa	裂纹扩展增量	毫米	mm
b	裂纹扩展方程指数		
c	裂纹扩展方程常数		
DFR	细节疲劳额定强度	兆帕	MPa
DSR	细节声额定值	兆帕	MPa
da/dN	随循环数的裂纹扩展率	毫米/循环	mm/c
da/dt	随时间的裂纹扩展率	毫米/飞行小时	mm/h
E	弹性模量	兆帕	MPa
$f_{a(o)}(X)$	EIFS的概率密度函数		
f	频率	赫兹	Hz
$f_T(t)$	$f_T(t) = dF_T(t)/dt$		
$F_{a(o)}(X)$	EIFS累积分布函数		
$F_T(t)$	TTCI累积分布函数		
G	剪切模量	兆帕	MPa
K	应力强度因子	兆帕·米 ^{1/2}	MPa·m ^{1/2}
ΔK	应力强度因子变程	兆帕·米 ^{1/2}	MPa·m ^{1/2}
K_t	应力集中系数		
K_f	疲劳缺口系数		

K_I	I 型应力强度因子	兆帕·米 ^{1/2}	MPa·m ^{1/2}
K_{TH}	应力强度因子门槛值	兆帕·米 ^{1/2}	MPa·m ^{1/2}
N	(1)寿命 (2)循环数	(1)飞行小时 (2)循环	(1)h (2)c
N_i	第i个应力区域中结构细节的总数	个	
N^*	整个耐久性关键构件中结构细节总数	个	
N_z	法向过载系数		
n	裂纹扩展方程 (da/dN) 的指数		
p	(1)概率值 (2)超越数概率		
P	(1)载荷 (2)概率	(1)牛顿	(1)N
Q	da/dt 方程参数		
R	应力比		
t	服役使用时间	飞行小时	h
T, T_{TCI}	裂纹形成时间	飞行小时	h
α, β	TTCI 参数		
ε	(1)应变 (2)TTCI 参数		
ε_e	弹性应变		
ε_p	塑性应变		
σ	(1)应力 (2)标准偏差	(1)帕, 兆帕	(1)Pa, MPa
σ_a	交变应力	帕, 兆帕	Pa, MPa
σ_b	抗拉极限强度	兆帕	MPa
σ_f	真实断裂应力	兆帕	MPa
$\sigma_{0.2}$	对应0.2%塑性变形的强度值	兆帕	MPa
σ_m	平均应力	帕, 兆帕	Pa, MPa
σ_y	屈服强度	兆帕	MPa
τ	某一特定使用时间	飞行小时	h

2. 缩写符号

A-A	空战飞行任务
A-G	空对地攻击飞行任务
DCGA	确定性裂纹扩展方法
EIFS	当量初始缺陷尺寸
G-A-G	地-空-地循环
IFQ	原始疲劳质量
I&N	仪表和导航飞行任务
PFMA	概率断裂力学方法
SCGMC	使用期裂纹扩展控制曲线

目 录

第一章 飞机结构耐久性设计 概念与要求

1.1 飞机结构设计思想的发展.....	(1)
1.1.1 静强度要求.....	(1)
1.1.2 气动弹性设计.....	(1)
1.1.3 安全寿命设计.....	(2)
1.1.4 安全寿命/损伤容限设计.....	(2)
1.1.5 耐久性/损伤容限设计.....	(2)
1.2 耐久性设计基本术语.....	(3)
*1.2.1 耐久性.....	(3)
1.2.2 使用寿命.....	(3)
1.2.3 经济寿命.....	(4)
1.2.4 结构细节.....	(4)
1.2.5 裂纹尺寸.....	(4)
1.2.6 主导疲劳裂纹.....	(4)
1.2.7 确定性裂纹扩展.....	(4)
1.2.8 裂纹群.....	(4)
1.2.9 原始疲劳质量(IFQ).....	(4)
1.2.10 当量初始缺陷尺寸(EIFS)分布.....	(4)
1.2.11 失效.....	(5)
1.2.12 耐久性极限尺寸.....	(5)
1.2.13 经济修理极限.....	(5)
1.2.14 损伤度.....	(5)

1.3 耐久性设计基本概念	(5)
1.3.1 耐久性设计要点	(5)
1.3.2 耐久性/损伤容限设计体系	(6)
1.3.3 三种设计概念的比较	(8)
1.4 飞机结构耐久性设计与地面试验要求	(10)
1.4.1 范围	(10)
1.4.2 耐久性设计的一般要求	(11)
1.4.3 耐久性细节设计过程	(13)
1.4.4 耐久性分析	(15)
1.4.5 耐久性试验	(23)
1.4.6 腐蚀防护和热防护	(27)
1.4.7 磨损	(27)
1.4.8 有特殊寿命限制的结构	(28)
1.4.9 声耐久性	(28)

参考文献

第二章 飞机的使用寿命和载荷/环境谱

2.1 飞机的设计使用寿命和设计用途	(32)
2.2 设计使用的飞-续-飞载荷/环境谱	(34)
2.2.1 飞-续-飞谱的种类	(35)
2.2.2 任务段重复载荷和环境	(36)
2.2.3 典型载荷状态	(37)
2.2.4 飞机重心过载频数曲线	(39)
2.2.5 随机数发生器	(39)
2.2.6 从累积频数曲线导出飞-续-飞随机谱	(42)
2.2.7 从任务分析导出飞-续-飞随机谱	(45)

2.2.8	标记载荷	(48)
2.2.9	特殊部件载荷/环境谱	(48)
2.3	机群服役使用寿命	(49)
2.4	基准使用谱的形成	(50)
2.4.1	空测数据的过滤	(50)
2.4.2	计数方法	(51)
2.4.3	统计分析	(54)
2.4.4	实测典型载荷状态	(54)
2.4.5	从Markov矩阵导出随机谱	(56)
2.5	单机服役使用寿命	(57)
2.5.1	单机寿命监控	(58)
2.5.2	经济维护	(59)
2.6	飞-续-飞应力/环境谱	(60)
2.6.1	设计使用的飞-续-飞应力/环境谱框图	(60)
2.6.2	全机多状态应力分析	(61)
2.6.3	细节应力分析	(62)
2.6.4	孔周名义应力场	(64)

参考文献

第三章 结构细节耐久性设计

3.1	结构细节耐久性设计的一般过程和基本原则	(72)
3.1.1	不同设计阶段的耐久性控制要求	(72)
3.1.2	耐久性关键件的初步选择和质量控制	(75)
3.1.3	设计应力水平控制	(76)

3.1.4	提高结构耐久性的基本方法	(78)
3.2	耐久性细节设计的材料选择和控制	(90)
3.2.1	耐久性材料选择和控制的基本原则	(90)
3.2.2	抗疲劳开裂材料耐久性指标	(93)
3.2.3	耐久性材料选择的综合方法	(95)
3.2.4	耐久性材料控制计划	(97)
3.3	紧固件细节耐久性设计	(98)
3.3.1	紧固件耐久性设计的一般原理	(99)
3.3.2	紧固件连接的细节设计及其规则	(105)
3.3.3	一些简单连接件的内力分布	(110)
3.3.4	紧固件细节结构参数优化	(116)
3.4	耳片接头耐久性细节设计	(116)
3.4.1	耳片接头疲劳裂纹型式	(116)
3.4.2	改善耳片耐久性的设计考虑	(121)
3.4.3	抗拉连接接头的设计与分析	(129)
3.5	提高结构耐久性的强化方法	(132)
3.5.1	强化技术的工程应用情况	(132)
3.5.2	孔的冷挤压强化	(133)
3.5.3	干涉螺接	(137)
3.5.4	喷丸强化	(141)
3.5.5	其它强化方法	(142)
3.6	抗腐蚀耐久性设计	(144)
3.6.1	腐蚀现象的特征	(145)
3.6.2	抗腐蚀耐久性材料选择和控制	(146)
3.6.3	改进细节设计与加工工艺提高结构抗腐蚀耐久性	(150)

参考文献

第四章 耐久性分析

4.1 耐久性分析准则和基础知识	(159)
4.1.1 耐久性分析准则	(159)
4.1.2 概率论与数理统计基础	(162)
4.1.3 疲劳裂纹萌生和短裂纹扩展特性	(190)
4.2 确定性裂纹扩展分析方法 (DCGA)	(197)
4.2.1. 耐久性分析中的DCGA	(197)
4.2.2 DCGA基础	(199)
4.2.3 用DCGA进行耐久性裂纹扩展分析的工程方法	(219)
4.3 细节疲劳额定强度法 (DFR法)	(253)
4.3.1 DFR法所采用的基本假设和DFR的定义	(253)
4.3.2 DFR与其它疲劳参数之间的关系及标准S—N曲线	(256)
4.3.3 DFR法的步骤	(257)
4.4 改进的局部应变法	(267)
4.4.1 局部应力 - 应变法的基本原理	(267)
4.4.2 循环加载下材料的疲劳特性	(269)
4.4.3 用于工程结构耐久性分析的局部应变法	(273)
4.5 概率断裂力学方法 (PFMA)	(275)
4.5.1 PFMA概述	(275)
4.5.2 原始疲劳质量模型 (1FQ模型)	(278)
4.5.3 使用期裂纹扩展控制曲线 (SCGMC)	(286)
4.5.4 裂纹超越数预测	(289)
4.5.5 损伤度及其评估	(292)

4.6 强化工艺的寿命增益计算方法	(295)
4.6.1 强化寿命增益的粗略估算方法.....	(296)
4.6.2 工程裂纹扩展方法估算强化寿命增益.....	(297)
4.6.3 局部应力-应变法估算强化寿命增益.....	(297)
4.6.4 权函数法估算强化寿命增益.....	(298)

参考文献

第五章 环境对结构耐久性的影响及防护

5.1 化学环境对结构耐久性的影响及防护	(301)
5.1.1 化学环境条件下常见的失效型式.....	(301)
5.1.2 影响耐久性的化学环境-力学因素.....	(307)
5.1.3 腐蚀疲劳失效的机理及其定量分析方法.....	(320)
5.1.4 化学环境影响的控制与防护.....	(329)
5.2 噪声环境及其对结构耐久性影响的分析与考虑	(329)
5.2.1 噪声源与噪声场.....	(329)
5.2.2 结构声耐久性分析.....	(348)
5.2.3 噪声环境的控制和防护.....	(372)
5.3 热环境对结构的影响及防护	(379)
5.3.1 飞机的热环境.....	(379)
5.3.2 热环境对结构的影响.....	(380)
5.3.3 结构的热防护.....	(385)

参考文献