



# 民机结构耐久性与损伤容限 设计手册

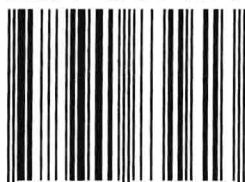
(上 册)

疲劳设计与分析

《民机结构耐久性与损伤容限设计手册》编委会

航空工业出版社

ISBN 7-80183-161-6



## 内 容 提 要

9 787801 831613 >

本手册共分为上下两册,上册为疲劳设计与分析,下册为损伤容限设计与分析。本书为上册,共分8章,主要阐述了结构细节疲劳额定值(DFR)和以 DFR 为主要参数的一种民机结构疲劳分析方法。手册中提供了疲劳分析有关的使用载荷谱、标准  $S-N$  曲线、细节应力分析方法、可靠性系数和可靠性准则,还介绍了结构抗疲劳设计的基本要求,最后一章对本手册编制的分析软件系统的功能进行了介绍。

本手册可直接供从事民用飞机结构设计和强度分析人员对新支线客机进行疲劳设计与分析使用,也可供军用飞机研制和其他工业部门从事疲劳设计的人员以及高等院校相关专业师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

民机结构耐久性与损伤容限设计手册.上册,疲劳设计与分析/郑晓玲主编;  
李令芳分册主编. —北京:航空工业出版社,2003.6

ISBN 7-80183-161-6

I. 民… II. ①郑…②李… III. ①民用飞机-飞机构件-疲劳强度-结构设计-技术手册②民用飞机-飞机构件-疲劳强度-结构分析-技术手册  
IV. V215.5-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 045046 号

责任编辑:姚立 技术编辑:李力 封面设计:麦醒媛

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)

北京地质印刷厂印刷

内部发行

2003年6月第1版

2003年6月第1次印刷

开本: 787×1092 1/16

印张: 24.25

字数: 618千字

印数: 1—500

定价: 80.00元

ISBN 7-80183-161-6  
V·019

## 前 言

随着航空科学技术的飞速发展，为满足飞机综合性能不断提高的客观需求，飞机结构设计思想不断更新，长寿命、高可靠性、高出勤率和低维修成本的综合要求已成为现代飞机结构设计的一项极为重要而必须遵循的准则。对于民机而言，安全是永恒的主题，是结构设计的基本要求，长寿命、低维修成本构成的经济性是实现其市场价值的保证，而结构耐久性与损伤容限设计则是达到上述要求的重要设计原则与方法。当前，我国正在研制新支线客机，为保证其研制符合适航规章对结构的规定，并达到研制的寿命指标，迫切需要编写一部与之对应的《民机结构耐久性与损伤容限设计手册》作为结构设计工作的指导，这就是本手册编写的背景与目的。

结构耐久性是飞机结构抵抗疲劳开裂、腐蚀、热退化、剥离和外来物损伤作用的能力，而抵抗疲劳开裂的能力是其中最主要的部分，它表现为飞机结构在使用条件下的寿命。耐久性评定的方法主要包括疲劳分析的方法和概率断裂力学分析的方法。目前，国内外民机结构耐久性评定主要采用的是疲劳分析的细节疲劳额定值(DFR)方法，因此，本手册仍以疲劳分析方法作为耐久性分析的基本方法，但也从发展的角度，介绍了耐久性设计与耐久性经济寿命的概念。疲劳分析的主要目的是实现结构的长寿命，对少数不能实现损伤容限要求的不可检结构而言，它还承担着保证安全性的作用。损伤容限设计承认结构中存在着未被发现的初始缺陷，要求在使用过程的重复载荷作用下，缺陷(裂纹)的增长应控制在一定范围内，在规定的检查间隔内，结构满足规定的剩余强度要求，以便能通过有效的检查、维修保证结构在使用寿命期内不发生灾难性的破坏。因此，损伤容限设计是结构安全性的主要保证。

本手册以原《民机结构耐久性与损伤容限设计手册》(JNS 手册)为蓝本，增加了适应新支线客机结构特点的内容，考虑了 CCAR/FAR 25 部新版本要求，吸取了国内外已有的成熟经验，通过理论和试验研究补充了

新的技术内容和经验证过的数据与图表，评定方法也有相应的发展，同时编制了配套的软件系统。在手册内容的编排上考虑了设计人员的使用方便，调整了手册的结构，力求做到内容系统、全面，与国外先进评定技术接轨，使手册具有很强的实用性、可靠性与先进性。

本手册共分为上下两册，上册为疲劳设计与分析，下册为损伤容限设计与分析。

上册共有 8 章。第 1 章简单介绍了疲劳分析基本要求和步骤，以及耐久性设计概念。第 2 章从结构设计角度出发规定了提高结构耐久性设计质量的具体措施，包括合理选材、结构布局、结构细节设计的一般原则、抗疲劳工艺方法、防腐蚀设计措施等。第 3 章规定了民用运输机的标准使用情况以及载荷谱的构成，给出了飞机机动谱、阵风谱和地面谱以及相应的当量载荷谱，规定了各部件的分析范围。第 4 章结构细节应力分析，介绍了进行结构细节应力分析的有限元素法和解析法，给出了紧固件柔度系数和几何应力集中系数的确定方法。第 5 章结构细节疲劳额定值，给出了疲劳额定值 DFR 的定义，确定许用值的计算方法、公式和考虑孔充填、表面处理、埋头深度等因素的各种修正系数，以及典型 DFR 许用值的算例，并提供了国内外材料的截止值、受拉、受剪、双向受载及机身蒙皮大开口等的许用值。第 6 章可靠性系数和可靠性准则，叙述了疲劳可靠性系数和可靠性准则，给出了双参数威布尔分布的特征寿命计算方法及有关的参数值。第 7 章介绍疲劳分析准则，给出了标准  $S-N$  曲线和公式以及地—空—地损伤图表，详细地介绍了疲劳分析 DFR 法的计算步骤，并用图表形式给出计算实例。最后一章疲劳分析软件功能简介，主要介绍与手册配套的软件系统及其运行环境与功能。

下册共有 11 章。第 1 章扼要叙述飞机结构损伤容限设计的基本原理、方法和准则，以及断裂力学最基本的概念和术语。第 2 章从结构设计角度介绍了提高结构损伤容限特征应采取的设计措施，为结构设计人员在结构设计中提供指南。第 3 章损伤容限评定步骤，介绍损伤容限评定和离散源损伤评定的步骤，为设计人员提供进行损伤容限评定的总体思路 and 提示以后各章的相互关系。第 4 章给出了民机结构若干典型开裂

模式，并描述了它们从起裂至破坏的典型过程，给出各阶段的组合构形因子 $\beta_j$ 和载荷再分配因子 $\beta_c$ 的配置。第5章简单介绍了应力强度因子的定义和表达式，并提供了常用应力强度因子公式和曲线。第6章裂纹扩展分析，介绍了裂纹扩展分析的基本原理、计算步骤以及广布疲劳损伤分析方法。第7章剩余强度，介绍断裂准则、剩余强度许用值以及剩余强度分析方法与步骤。第8章材料断裂性能，给出了国内外常用航空材料裂纹扩展速率与断裂韧度等数据与曲线，提供了不同厚度下断裂韧度 $K_{IC}$ 值的经验公式，并简单介绍影响裂纹扩展速率的主要因素。第9章损伤检测和损伤评定，叙述了民机结构的主要损伤源和对各损伤源造成损伤的检测方法，并着重描述一种工程实用的损伤评定额定值系统，包括环境损伤额定值(EDR)、意外损伤额定值(ADR)和损伤容限额定值(DTR)，给出了对应的评定方法。第10章主要介绍结构检查大纲的目的、要求、组成、检查周期和检查内容，为设计人员提供制定结构检查大纲方法和指南。最后一章损伤容限设计与评定软件系统，简介与手册配套的软件系统及其运行环境与功能。

上下两册是一个相辅相成的有机整体，我们希望本手册在飞机结构设计中，对提高飞机安全性、长寿命、经济性、维修性和可靠性的工作，将会起到重大促进作用。

本手册可直接用于新支线飞机结构设计和耐久性与损伤容限分析，也可供大型民用运输机结构设计和耐久性与损伤容限分析使用。对于高等院校飞机结构设计专业师生和从事飞机维修的技术人员也有一定的参考价值。

本手册在整个编写过程中，还有许多设计人员、试验研究人员参加，他们为手册提供了宝贵的资料、设计数据和试验数据。同时也得到了国防科工委系统三司、中国航空工业第一集团公司科技部民机处大力支持和指导，在此一并表示衷心感谢。

由于作者水平所限，本手册难免有不足乃至错误之处，敬请各方面专家和读者予以指正。

**编者**

2003年6月

# 《民机结构耐久性与损伤容限设计手册》

## 总 编 审 委 员 会

总 编 郑晓玲

副总编 (按姓氏笔画顺序)

刘文珽 李令芳 孟繁沛 张民孚

张伯年 秦福光 傅祥炯 薛景川

总 审 高镇同

副总审 陈一坚 郑作棣 王德明 吴学仁

# 《民机结构耐久性与损伤容限设计手册》

(上册)

## 疲劳设计与分析

### 编审人员

主 编 李令芳

主 校 薛景川

主 审 高镇同 郑作棣 王德明

编 委 (按姓氏笔画顺序)

王立新 刘文珽 李令芳 李 勇

何 涇 孟振凯 郑晓玲 孟繁沛

张联营 杨玉恭 董登科 薛景川

### 编校人员

章号

编写

校对

符号、下标

张联营

王新波

1

刘文珽

李令芳

2

李令芳

张联营

3

何 涇

孟繁沛

4

杨玉恭 李素菊

孟振凯

5

孟繁沛 王建邦

薛景川

6

刘文珽

薛景川

7

薛景川 董登科

孟振凯 李令芳

8

弓云昭 肖迎春

苏爱民



## 符号表

$A$	孔充填系数; 面积( $\text{mm}^2$ )
$a$	耳片几何尺寸(mm)
$a_1; a_2$	离散阵风统计参数
$B$	合金表面处理系数; 宽度(mm)
$B_1; B_2$	离散阵风统计参数
$b$	宽度; 耳片几何尺寸(mm)
$C$	埋头深度系数; 内力再分配因子
$C_A$	开口角部轴力的附加系数
$C_F$	登机门前角部修正系数
$c$	耳片几何尺寸(mm)
$D$	材料叠层系数; 直径(mm)
$d$	直径(mm)
DFR	细节疲劳额定值(MPa)
DFR <sub>0</sub>	结构件最小允许使用的 DFR 值(MPa)
DFR <sub>base</sub>	DFR 基本值(MPa)
DFR <sub>cutoff</sub>	DFR 截止值(MPa)
DFR <sub>S</sub>	剪切载荷的细节疲劳额定值(MPa)
DFR <sub>T</sub>	通过试验得到的细节疲劳额定值(MPa)
$E$	螺栓夹紧系数; 弹性模量(MPa); 端距(mm)
$e$	偏心距; 边距(mm)
$F$	粗糙度系数
$F_e$	紧固件弹性柔度系数
FRF	疲劳可靠性系数
$G$	重量(kg)
GAG	地—空—地
$H$	高度(m)
$h$	高度(m)
$H_{\text{cru}}$	巡航高度(m)
$K$	材料常数
$K_1$	应力集中系数
$K_{\text{tg}}$	以毛面积应力为参考应力的应力集中系数
$K_{\text{tn}}$	以净面积应力为参考应力的应力集中系数
$K_A$	受轴力时开口角部的应力集中系数

$K_P$	受内压时开口角部的应力集中系数
$K_S$	受剪切时开口角部的应力集中系数
$L$	长度(mm)
$l$	长度(mm)
$L_d$	耳片尺寸系数
$L_s$	耳片形状系数
$L_1$	耳片厚度系数
$L_\theta$	耳片斜载荷系数
$M$	马赫数
$M_C$	焊接错位系数
$N$	疲劳寿命; 疲劳破坏周次; 载荷超越次数; 轴力(N)
$N_{95/95}$	可靠性寿命
$n$	紧固件排数
$\Delta n_{cg}$	重心过载系数增量
$n_d$	试件或构件所含相似关键细节数
NDT	无损检测
$P$	外载荷(N); 概率
$\Delta p$	压差(MPa)
$Q$	剪力和轴力的载荷系数
$q_0$	剪流(N/mm)
$R$	应力比; 可靠度; 机身有效半径(m)
$R_C$	构件疲劳额定值系数
$R_1$	端部紧固件载荷(N)
$S$	$S-N$ 曲线斜度参数; 耳片腰部宽度; 紧固件间距(mm)
$S_C$	置信度系数
$S_R$	可靠性系数
$S_T$	试件系数
$T$	推力(N); 按时间计的寿命
$t_c$	叉耳厚度(mm)
$t_1$	耳片厚度(mm)
$t$	飞行时间; 厚度; 深度(mm)
$t_{av}$	平均厚度(mm)
$t_c$	角部边缘厚度(mm)
$t_{eff}$	有效厚度(mm)
$t_p$	凸台厚度(mm)
$t_{to}$	总厚度(mm)

$U$	凸台有效系数
$U_{de}$	阵风速度(m/s)
$V$	速度(m/s)
$W$	宽度(mm)
$W_e$	叉耳宽度(mm)
$W_1$	耳片宽度(mm)
$\alpha$	形状参数
$\beta$	特征寿命; 耳片形状参数
$\eta$	加工分散度系数
$\varphi$	双向受载接头许用值的修正系数
$\psi$	载荷传递系数
$\omega$	双向应力相对比
$\theta$	斜载耳片载荷方向角
$\gamma$	斜载耳片 DFR 部位角
$\gamma_0$	斜载耳片边距部位角
$\sigma$	正应力(MPa)
$\sigma_a$	应力幅(MPa)
$\sigma_{ref}$	参考应力(MPa)
$\sigma_{peak}$	峰值应力(MPa)
$\sigma_{loc}$	计算部位的应力(MPa)
$\sigma_{br}$	挤压应力(MPa)
$\sigma_{max}$	最大正应力(MPa)
$\sigma_m$	平均应力(MPa)
$\sigma_{m0}$	$\sigma_a$ 为零时的破坏应力(MPa)
$\tau$	剪应力(MPa)
$\tau_{ref}$	参考剪应力(MPa)
$\tau_{peak}$	峰值剪应力(MPa)

## 下 标

a	交变
av	平均
base	基准
br	挤压
c	巡航; 叉耳
cg	重心
cutoff	截止
eq	当量
e	弹性
eff	有效
g	毛(面积)
l	耳片
loc	计算部位
max	最大
min	最小
n	净面积
ref	参考
peak	峰值
s	剪切
st	长桁; 桁条
to	总
t, T	试验

## 目 录

**第 1 章 飞机结构疲劳设计概述** ..... ( 1 )

- 1.1 疲劳设计基本要求 ..... ( 1 )
  - 1.1.1 疲劳设计的目标 ..... ( 1 )
  - 1.1.2 实现疲劳设计目标的途径 ..... ( 1 )
  - 1.1.3 疲劳设计的基本要求 ..... ( 2 )
- 1.2 疲劳分析的方法和步骤 ..... ( 2 )
  - 1.2.1 引言 ..... ( 2 )
  - 1.2.2 DFR 法的主要特点 ..... ( 2 )
  - 1.2.3 疲劳分析的基本步骤 ..... ( 2 )
- 1.3 耐久性设计 ..... ( 3 )
  - 1.3.1 耐久性设计基本概念 ..... ( 3 )
  - 1.3.2 结构耐久性设计的基本要求 ..... ( 3 )
  - 1.3.3 结构耐久性分析基本方法 ..... ( 4 )

**第 2 章 抗疲劳设计要求** ..... ( 5 )

- 2.1 结构布局 ..... ( 5 )
- 2.2 选材原则 ..... ( 5 )
- 2.3 一般设计准则 ..... ( 6 )
- 2.4 细节设计 ..... ( 6 )
- 2.5 加工工艺 ..... ( 7 )
- 2.6 防腐设计措施 ..... ( 8 )

**第 3 章 使用载荷及载荷谱** ..... ( 10 )

- 3.1 概述 ..... ( 10 )
- 3.2 典型飞行任务剖面的标准使用情况 ..... ( 11 )
- 3.3 主要结构部件载荷情况的最小分析范围 ..... ( 12 )
- 3.4 使用载荷谱——当量分析 ..... ( 13 )
- 3.5 使用载荷及载荷谱的详细说明 ..... ( 14 )
- 3.6 使用情况编号说明 ..... ( 18 )
- 3.7 图表 ..... ( 19 )
  - 3.7.1 地面滑跑载荷谱 ..... ( 19 )
  - 3.7.2 地面转弯扭矩载荷谱 ..... ( 20 )
  - 3.7.3 地面转弯侧向载荷谱 ..... ( 21 )
  - 3.7.4 飞行机动载荷谱 ..... ( 22 )
  - 3.7.5 离散阵风载荷谱 ..... ( 22 )

- 3.7.6 离散阵风统计参数 ..... ( 24 )
- 3.7.7 离散阵风当量载荷谱 ..... ( 25 )
- 3.7.8 垂直和侧向复合阵风当量载荷 ..... ( 26 )
- 3.7.9 座舱压差 ..... ( 27 )
- 3.7.10 标准使用情况参考图表 ..... ( 28 )

**附录 3A 离散阵风载荷谱**

NACA TN 4332 ..... ( 30 )

**附录 3B 离散阵风当量载荷谱** ..... ( 31 )**附录 3C 载荷谱当量化计算** ..... ( 32 )**第 4 章 结构细节应力分析** ..... ( 38 )

- 4.1 概述 ..... ( 38 )
- 4.2 结构细节应力分析的有限元素法 ..... ( 38 )
  - 4.2.1 细节应力分析的基本原理 ..... ( 38 )
  - 4.2.2 钉元刚度矩阵 ..... ( 39 )
  - 4.2.3 钉元的内力矩阵 ..... ( 41 )
  - 4.2.4 结构细节内力计算方法 ..... ( 41 )
  - 4.2.5 细节应力分析基本步骤 ..... ( 44 )
- 4.3 结构细节应力分析的解析法 ..... ( 63 )
  - 4.3.1 基本假设 ..... ( 63 )
  - 4.3.2 结果归纳 ..... ( 63 )
  - 4.3.3 危险端部紧固件载荷  $R_1$  ..... ( 67 )
- 4.4 紧固件柔度系数 ..... ( 77 )
  - 4.4.1 影响  $P-\delta$  曲线的主要因素 ..... ( 77 )
  - 4.4.2 紧固件弹性段柔度系数 ..... ( 77 )
  - 4.4.3 实测  $P-\delta$  曲线及其特性参数 ..... ( 80 )
  - 4.4.4  $P-\delta$  曲线计算和选用的说明 ..... ( 85 )
- 4.5 几何应力集中系数 ..... ( 85 )
  - 4.5.1 几何应力集中系数的定义 ..... ( 85 )
  - 4.5.2 几何应力集中系数的使用原则 ..... ( 85 )
  - 4.5.3 典型细节的几何应力集中系数曲线 ..... ( 85 )

**第 5 章 结构细节疲劳额定值** ..... ( 209 )

- 5.1 概述 ..... ( 209 )
  - 5.1.1 定义 ..... ( 209 )
  - 5.1.2 许用值简述 ..... ( 209 )
  - 5.1.3 计算主要结构件 DFR 的具体

步骤·····	(212)	5.7.4 缺口结构·····	(285)
5.1.4 DFR 截止值·····	(214)	5.7.5 无载荷传递结构·····	(287)
5.1.5 特殊 DFR 系数及在超差处理中的 应用·····	(216)	5.7.6 载荷传递结构·····	(287)
5.1.6 构件疲劳额定系数 $R_C$ ·····	(220)	5.7.7 机身的连接·····	(300)
5.2 受拉结构许用值·····	(220)	5.7.8 偏心受载的双剪连接·····	(305)
5.2.1 无紧固件受拉结构细节的许 用值·····	(220)	5.7.9 机身侧壁的连接·····	(306)
5.2.2 有紧固件受拉结构细节的许 用值·····	(227)	<b>第 6 章 可靠性系数和可靠性准则</b> ·····	(312)
5.3 受剪结构许用值·····	(238)	6.1 可靠性系数·····	(312)
5.3.1 腹板与缘条单剪连接许用值·····	(239)	6.1.1 结构可靠性系数准则·····	(312)
5.3.2 腹板与缘条双剪连接(插入件) 许用值·····	(240)	6.1.2 特定结构及组件的疲劳可靠性 系数·····	(313)
5.3.3 屈曲腹板连接许用值·····	(241)	6.2 可靠性准则·····	(316)
5.3.4 受剪腹板上开孔许用值·····	(241)	6.2.1 定义·····	(316)
5.4 修正系数·····	(243)	6.2.2 结构疲劳试验要求准则·····	(316)
5.4.1 孔充填系数 $A$ ·····	(243)	6.2.3 试验或使用评估准则·····	(317)
5.4.2 合金和表面处理系数 $B$ ·····	(248)	6.2.4 应用实例·····	(323)
5.4.3 埋头深度系数 $C$ ·····	(250)	6.2.5 几种特殊评估方法·····	(327)
5.4.4 材料叠层厚度系数 $D$ ·····	(252)	<b>第 7 章 疲劳强度分析</b> ·····	(330)
5.4.5 螺栓夹紧系数 $E$ ·····	(253)	7.1 概述·····	(330)
5.4.6 粗糙度系数 $F$ ·····	(256)	7.2 疲劳强度分析要求·····	(330)
5.4.7 凸台有效系数 $U$ ·····	(258)	7.2.1 结构细节疲劳寿命和可靠性 要求·····	(330)
5.5 双向受载情况许用值·····	(271)	7.2.2 疲劳分析要求·····	(330)
5.5.1 双向受载筒形件的疲劳检查 方法·····	(271)	7.2.3 疲劳分析的载荷谱要求·····	(331)
5.5.2 双向受载接头许用值的确定 ·····	(272)	7.3 标准 $S-N$ 曲线·····	(333)
5.6 机身蒙皮大开口的许用值·····	(273)	7.4 地—空—地损伤比·····	(341)
5.6.1 角部应力的基本公式·····	(274)	7.5 疲劳检查方法·····	(341)
5.6.2 角部的应力集中系数·····	(274)	7.6 特殊疲劳裕度和复合疲劳裕度·····	(351)
5.6.3 角部结构的有效厚度·····	(274)	7.6.1 特殊疲劳裕度·····	(351)
5.6.4 典型开口的角部应力计算实例 ·····	(277)	7.6.2 复合疲劳裕度·····	(352)
5.6.5 对特殊结构的特殊规定·····	(279)	7.7 算例·····	(353)
5.6.6 大开口处毛面积周向疲劳额定 值的确定·····	(281)	7.7.1 某机机翼下翼面展向蒙皮接缝疲劳 分析·····	(353)
5.6.7 初步设计时再分配区的结构尺寸 确定·····	(282)	7.7.2 某机机身顶部蒙皮接缝·····	(357)
5.7 DFR 例题·····	(282)	7.7.3 某机垂直安定面连接接头·····	(357)
5.7.1 引言·····	(282)	<b>附录 7A 连接件的压应力修正</b> ·····	(362)
5.7.2 开孔——受拉结构·····	(283)	<b>第 8 章 疲劳分析软件系统功能     介绍</b> ·····	(363)
5.7.3 开孔——受剪结构·····	(284)	8.1 设计概述·····	(363)
		8.1.1 设计思想·····	(363)
		8.1.2 软硬件支持·····	(363)

---

8.1.3 系统的安装 .....	(363)	系统 .....	(365)
8.1.4 系统结构与界面组织 .....	(363)	8.2.2 材料与结构参数设计系统 .....	(365)
8.1.5 系统设计流程图 .....	(365)	8.2.3 疲劳分析系统 .....	(367)
8.2 功能介绍 .....	(365)	8.2.4 再设计分析系统 .....	(367)
8.2.1 结构细节 DFR 值计算机辅助计算		8.3 工程应用 .....	(368)

## 第 1 章 飞机结构疲劳设计概述

### 1.1 疲劳设计基本要求

#### 1.1.1 疲劳设计的目标

(1) 民用飞机的结构必须在预期的使用寿命期内具有高安全性和高可靠性,同时具有良好的经济性。实现高安全性与可靠性、满足适航条例的要求,是研制民用飞机的基本前提;而达到预期的长使用寿命,减少维修费用,降低使用成本,则是提高民用飞机市场竞争力的一个主要条件。疲劳设计的主要目标是通过设计和分析等手段,改善结构的疲劳性能,提高结构的耐久性,实现长寿命和良好经济性的研制要求;同时也为结构的高安全性、高可靠性提供重要的保障。

(2) 民用飞机结构应按适航条例的要求贯彻损伤容限设计准则。对于按损伤容限准则设计,达到适航条例规定的损伤容限评定要求的结构,疲劳设计的目标主要是实现预期的寿命可靠性和经济性要求。

(3) 对于使用寿命期间无法实施有效的检查,或者不能实现适航条例规定的损伤容限要求的结构,也就是确认为应采用疲劳(安全寿命)评定的结构,疲劳设计的目标不仅是达到寿命可靠性和经济性要求,同时要保证使用寿命期内的高安全性。

#### 1.1.2 实现疲劳设计目标的途径

(1) 疲劳设计的成功与否取决于结构设计、制造、分析、试验、重量、载荷、应力以及管理、使用经验和生产制造等多种因素的综合作用,要实现疲劳设计的目标需要各有关方面从不同侧面出发共同努力。而结构的抗疲劳或耐久性设计和疲劳分析则是其中两个重要和主导的部分。

(2) 对结构进行抗疲劳或耐久性设计,提高结构固有的疲劳性能,是实现疲劳设计目标的基本途径。

过去的经验表明,引起飞机结构疲劳问题的原因可以分为四大类:

不好的细节设计	占 45%
附加应力和次应力	占 24%
超过使用应力	占 16%
其他因素	占 15%

因此,改进细节设计并控制使用应力是抗疲劳或耐久性设计的主导方面。具体内容应大包括结构布局设计、细节设计、选材与工艺控制等。

(3) 疲劳分析在实现疲劳设计目标过程中起着重要作用。结构疲劳设计是否达到了预期的寿命和可靠性指标必须由疲劳分析加以验证,结构必要的设计更改也需以疲劳分析结果为依据。因此,疲劳分析必须从打样阶段开始,贯穿结构设计的全过程。进行静强度分析的所有结构应同时完成疲劳分析以确定其疲劳裕度。



### 1.1.3 疲劳设计的基本要求

(1) 结构的疲劳破坏(失效)以形成可检裂纹为准则,本手册中结构的疲劳寿命则定义为可检裂纹形成所对应的飞行次数。

(2) 结构在预期使用寿命内的可靠性水平可以用疲劳裕度表示,合格的疲劳设计要求结构的疲劳裕度不小于0。

## 1.2 疲劳分析的方法和步骤

### 1.2.1 引言

疲劳分析方法通常分为应力疲劳分析方法和应变疲劳分析方法。应变疲劳分析方法(局部应力应变法)适用于结构关键部位应力水平较高,使得所载荷谱中的高载对应的关键部位局部应力达到材料屈服应力的情况。受载严重的先进军用战斗机结构的疲劳分析大多采用这种方法。对民用飞机结构而言,其应力水平较低,一般不会使关键部位的局部应力达到屈服极限。因此,适合于采用应力疲劳分析方法。本手册给出了一种快速的应力疲劳分析工程方法——细节疲劳额定值(DFR)法。

### 1.2.2 DFR 法的主要特点

(1) 引入了最能体现结构部位固有疲劳品质的细节疲劳额定值(DFR),采用以疲劳裕度表征的疲劳检查法,将疲劳分析结果落实到疲劳检查表,清楚地表示出所设计的结构疲劳裕度是否达到要求,以及与使用应力有关的细节设计品质。这种方法类似于用强度裕度表示的静强度校核方法,容易被一般设计人员接受和掌握。

(2) 规定了典型飞行任务剖面的标准使用情况和主要结构件载荷情况的最小分析范围,提供了进行谱分析的用超越次数表示的各种载荷谱曲线和进行当量化分析所用的当量载荷作用次数,简化了应力谱的计算工作。

(3) 针对民机结构的疲劳损伤以地—空—地循环损伤为主这一特点,通过“地—空—地损伤比”的计算,将载荷谱的作用折算为“当量地—空—地循环数”,用以确定地—空—地许用应力及疲劳裕度。

(4) 疲劳分析中采用以 DFR 为主要参量的标准  $S-N$  曲线和疲劳损伤图表,保证了结构疲劳寿命与疲劳强度的基本可靠性水平(95%可靠度与95%置信度),并引入疲劳可靠性系数(FRF),以确保结构具有所要求的高可靠性。

(5) 本方法从结构打样设计阶段就可开始进行疲劳检查,贯穿设计全过程,能避免大的设计反复,提高了设计质量和工作效率。

### 1.2.3 疲劳分析的基本步骤

- 第1步:确定目标寿命——飞行次数;
- 第2步:确定疲劳可靠性系数(FRF);
- 第3步:确定地—空—地(GAG)应力循环;
- 第4步:计算地—空—地损伤比;