

航空宇航科学与技术



国防  
科技  
教材

工  
委  
十五

规划

# 飞行器结构疲劳 与寿命设计

●熊峻江 编著



北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社

西北工业大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

哈尔滨工程大学出版社

国防科工委“十五”规划教材  
航空宇航科学与技术



责任编辑：刘宝俊

书籍装帧：



ISBN 7-81077-462-X



9 787810 774628 >

ISBN 7-81077-462-X

定价：19.50 元



国防科工委“十五”规划教材. 航空宇航科学与技术

# 飞行器结构疲劳与寿命设计

熊峻江 编著

北京航空航天大学出版社

## 内容简介

本书是根据国内外航空航天工业的发展和需要,吸取必要的国内外成熟方法编写而成,着重讲述飞行器结构疲劳强度及其疲劳寿命的分析与设计方法。重点介绍了飞行器结构安全寿命设计、损伤容限设计、耐久性设计和可靠性设计等内容;对疲劳强度、疲劳载荷谱、结构疲劳细节设计等做了较详细的阐述;对疲劳破坏特征和起因,以及影响疲劳强度的一些主要因素也做了必要的介绍。本教材可作为高等学校飞行器结构强度与设计、机械设计等专业的教学用书,也可供从事疲劳设计和疲劳试验的研究人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

飞行器结构疲劳与寿命设计/熊峻江编著. —北京:  
北京航空航天大学出版社, 2004. 7

ISBN 7-81077-462-X

I. 飞… II. 熊… III. ①飞行器—疲劳—研究  
②飞行器—结构寿命—设计 IV. V423

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 038969 号

## 飞行器结构疲劳与寿命设计

熊峻江 编著

责任编辑 刘宝俊

责任校对 陈 坤

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市学院路 37 号(100083)

发行部电话:010-82317024

<http://www.buaapress.com.cn>

E-mail: bhpresse@263.net

北京宏伟双华印刷有限公司印制 各地书店经销

开本: 787×960 1/16

印张: 13.5 字数: 302 千字

2004 年 7 月第 1 版 2004 年 7 月第 1 次印刷

印数: 2 000 册

ISBN 7-81077-462-X

定价: 19.50 元

# 国防科工委“十五”规划教材编委会

(按姓氏笔画排序)

**主 任:** 张华祝

**副主任:** 王泽山 陈懋章 屠森林

**编 委:** 王 祁 王文生 王泽山 田 蔚 史仪凯  
乔少杰 仲顺安 张华祝 张近乐 张耀春  
杨志宏 肖锦清 苏秀华 辛玖林 陈光祜  
陈国平 陈懋章 庞思勤 武博祯 金鸿章  
贺安之 夏人伟 徐德民 聂 宏 贾宝山  
郭黎利 屠森林 崔锐捷 黄文良 葛小春

# 前 言

本书——《飞行器结构疲劳与寿命设计》(Fatigue Life Design For Aircraft Structure)是在继承高镇同编写的《疲劳强度》和《疲劳可靠性》、徐灏编写的《疲劳强度》、吴富民编写《结构疲劳强度》、傅祥炯主编的《结构疲劳与断裂》、赵少汴和王忠保编写的《疲劳设计》等教材和专著的基础上,吸收当今国际先进飞行器结构疲劳设计思想,按学科体系纂辑而成。

全书总体构思如下:一方面,根据疲劳过程的两阶段论(即疲劳过程划分为裂纹形成和裂纹扩展两个阶段,构件在出现某一指定“工程裂纹”以前的寿命称为裂纹形成寿命,从工程裂纹扩展至临界裂纹的寿命为裂纹扩展寿命,全寿命为二者之和),系统地讲述了安全寿命设计、损伤容限设计、耐久性设计以及可靠性设计思想和方法,使用这些设计方法,可以精确合理地对工程实际结构进行定量分析与设计;另一方面,围绕构件疲劳断裂机理及其影响因素,重点阐述了结构抗疲劳断裂的细节设计技术与措施,采用这些措施,能够主动地制订工程实际结构详细的抗疲劳断裂细节设计方案,强化其疲劳薄弱部位。

本书注重理论联系实际,将应用问题贯穿于理论分析内容之中,所列举的一些算例都来源于工程实践。因此,本书除可作为教学用书之外,还可供从事机械结构疲劳设计和疲劳试验的研究人员参考。

作者

2003年3月2日

# 主要符号

| 符号         | 名称                      | 单位                |
|------------|-------------------------|-------------------|
| $A_0$      | 试样原始截面积                 | $\text{mm}^2$     |
| $A$        | 试样瞬时真实横截面积              | $\text{mm}^2$     |
| $A_f$      | 试样断裂后的实际截面积             | $\text{mm}^2$     |
| $a$        | 计算裂纹尺寸                  | $\text{mm}$       |
| $a_0$      | 初始裂纹尺寸                  | $\text{mm}$       |
| $a_c$      | 临界裂纹尺寸                  | $\text{mm}$       |
| $a_e$      | 经济修理极限                  | $\text{mm}$       |
| $a_r$      | 参考裂纹尺寸                  | $\text{mm}$       |
| $da/dN$    | 疲劳裂纹扩展速率                | $\text{mm/cycle}$ |
| $da/dt$    | 疲劳裂纹扩展速率                | $\text{mm/s}$     |
| $b$        | 疲劳强度指数                  |                   |
|            | 裂纹扩展速率 $da/dt$ 方程指数     |                   |
| $c$        | 疲劳延性指数                  |                   |
| $C$        | 裂纹扩展速率 $da/dN$ 方程参数     |                   |
|            | 载荷-应变曲线的比例系数            |                   |
| $C_t$      | 名义应力按毛截面面积计算得到的理论应力集中系数 |                   |
| $d$        | 直径                      | $\text{mm}$       |
| $D$        | 直径                      | $\text{mm}$       |
|            | 疲劳损伤                    |                   |
| $e$        | 名义应变                    | %                 |
| $\Delta e$ | 名义应变变程                  | %                 |
| $E$        | 弹性模量                    | $\text{GPa}$      |
| $E(\xi)$   | 随机变量 $\xi$ 的数学期望        |                   |
| $F$        | 力                       |                   |
| $f$        | 频率                      |                   |
| $F_s$      | 考虑塑性区真实形状的校正系数          |                   |
| $f(x)$     | 概率密度函数(理论频率函数)          |                   |

|                 |                         |                |
|-----------------|-------------------------|----------------|
| $F(x_p)$        | 分布函数(累积频率函数)            |                |
| $G$             | 切变模量                    | GPa            |
| $k$             | 单侧容限系数                  |                |
| $\hat{k}$       | 标准差修正系数                 |                |
| $K$             | 应力强度因子                  | MPa $\sqrt{m}$ |
|                 | 单调应力-应变曲线的强度系数          | MPa            |
| $K'$            | 循环强度系数                  | MPa            |
| $K_C$           | 断裂韧性                    | MPa $\sqrt{m}$ |
| $K_f$           | 疲劳缺口系数,有效应力集中系数         |                |
| $K_{IC}$        | 平面应变断裂韧性                | MPa $\sqrt{m}$ |
| $K_m$           | 应力强度因子均值                | MPa $\sqrt{m}$ |
| $K_{max}$       | 最大应力强度因子                | MPa $\sqrt{m}$ |
| $K_{min}$       | 最小应力强度因子                | MPa $\sqrt{m}$ |
| $\Delta K$      | 应力强度因子变程                | MPa $\sqrt{m}$ |
| $\Delta K_{th}$ | 疲劳裂纹扩展门槛值               | MPa $\sqrt{m}$ |
| $K_t$           | 名义应力按净截面面积计算得到的理论应力集中系数 |                |
| $K_s$           | 正应力下的疲劳缺口系数             |                |
| $K'_s$          | 真实应力集中系数                |                |
| $K_r$           | 切应力下的疲劳缺口系数             |                |
| $K'_r$          | 真实应变集中系数                |                |
| $L$             | 裂纹超越数                   |                |
| $L_f$           | 完全寿命分散系数                |                |
| $L_i$           | 不完全寿命分散系数               |                |
| $M$             | 弯矩                      | N · m          |
| $M_t(\theta)$   | 随机变量 $\xi$ 的矩母函数        |                |
| $n$             | 应力循环数                   | cycle          |
|                 | 安全系数                    |                |
|                 | 子样大小(样本容量)              |                |
|                 | 裂纹扩展速率 $da/dN$ 方程指数     |                |
|                 | 单调应力-应变曲线的应变硬化指数        |                |
| $n'$            | 循环应变硬化指数                |                |

|                |                                        |       |
|----------------|----------------------------------------|-------|
| $[n]$          | 许用安全系数                                 |       |
| $N$            | 疲劳寿命(疲劳裂纹形成寿命或全寿命)                     | cycle |
| $N^*$          | 疲劳裂纹扩展寿命                               | cycle |
| $N_{50}$       | 中值疲劳寿命(50%可靠度的疲劳寿命)                    | cycle |
| $N_p$          | 具有可靠度 $p$ 的疲劳寿命                        | cycle |
| $\hat{N}_p$    | 具有可靠度 $p$ 的疲劳寿命估计量                     | cycle |
| $N_T$          | 过渡寿命(弹性线与塑性线的交点)                       | cycle |
| $p$            | 可靠度(存活率)                               | %     |
| $\hat{p}$      | 可靠度估计量                                 | %     |
| $P$            | 破坏率                                    | %     |
| $P(A)$         | 事件 $A$ 的概率                             | %     |
| $P(\xi > x_p)$ | 随机变量 $\xi$ 大于 $x_p$ 的概率                | %     |
| $P_r$          | 载荷-应变回线前一次反向终点处的载荷                     | N     |
| $q$            | 疲劳缺口敏感系数                               |       |
| $Q$            | 裂纹扩展速率 $da/dt$ 方程参数                    |       |
| $r$            | 半径                                     | mm    |
|                | 相关系数                                   |       |
| $R$            | 应力比                                    |       |
|                | 可靠度                                    |       |
|                | 缺口的曲率半径                                | mm    |
| $s$            | 交变应力                                   | Mpa   |
|                | 子样标准差                                  |       |
| $s^2$          | 子样方差                                   |       |
| $s_{\max}$     | 应力循环中代数值最大的应力                          | MPa   |
| $s_{\min}$     | 应力循环中代数值最小的应力                          | MPa   |
| $s_m$          | 平均应力( $s_{\max}$ 和 $s_{\min}$ 的代数平均值)  | MPa   |
| $s_a$          | 应力幅值( $s_{\max}$ 和 $s_{\min}$ 的代数差的一半) | MPa   |
| $S$            | 疲劳强度                                   | MPa   |
|                | 名义应力                                   | MPa   |
| $\Delta S$     | 疲劳强度变程                                 | MPa   |
|                | 名义应力变程                                 | MPa   |
| $S_{\max}$     | 最大疲劳强度                                 | MPa   |
| $S_{\min}$     | 最小疲劳强度                                 | MPa   |

|                |                                        |     |
|----------------|----------------------------------------|-----|
| $S_m$          | 疲劳强度均值( $S_{max}$ 和 $S_{min}$ 的代数平均值)  | MPa |
| $S_a$          | 疲劳强度幅值( $S_{max}$ 和 $S_{min}$ 的代数差的一半) | MPa |
| $\hat{S}_p$    | 具有可靠度 $p$ 的疲劳强度估计量                     | MPa |
| $\hat{S}_{50}$ | 中值疲劳强度(或疲劳极限)估计量                       | MPa |
| $S_{-1}$       | 对称循环下光滑小试样的疲劳极限                        | MPa |
| $(S_{-1})_d$   | 对称循环下光滑大试样的疲劳极限                        | MPa |
| $(S_{-1})_d^K$ | 对称循环下有应力集中大试样的疲劳极限                     | MPa |
| $(S_R)_*$      | 应力比 $R$ 下零件的疲劳极限                       | MPa |
| $s_\xi$        | 作为随机变量的子样标准差                           |     |
| $s_\xi^2$      | 作为随机变量的子样方差                            |     |
| $t$            | 时间                                     | h   |
| $t_x$          | 变量的取值                                  |     |
| $T$            | 扭矩                                     |     |
| $U$            | 标准正态变量,或表示必然事件                         |     |
| $u$            | 标准正态变量的取值                              |     |
| $u_p$          | 标准正态偏量                                 |     |
| $u_\gamma$     | 与置信度相关的标准正态偏量                          |     |
| $Var(\xi)$     | 随机变量 $\xi$ 的方差                         |     |
| $X$            | 正态变量,或其他随机变量                           |     |
| $\bar{x}$      | 子样均值                                   |     |
| $x_p$          | 具有可靠度 $p$ 的百分位值                        |     |
| $x_u$          | 当量初始缺陷尺寸(EIFS)的上限                      | mm  |
| $\alpha$       | 显著度                                    | %   |
|                | 三参数 Weibull 分布的形状参数                    |     |
|                | 孔的表面状态系数                               |     |
| $\beta$        | 表面系数                                   |     |
|                | 三参数 Weibull 分布的比例参数                    |     |
|                | 紧固件和连接板配合的填充系数                         |     |
| $\beta_1$      | 表面加工系数                                 |     |
| $\beta_2$      | 腐蚀系数                                   |     |
| $\beta_3$      | 表面强化系数                                 |     |
| $\chi^2$       | 按 $\chi^2$ 分布的随机变量                     |     |
| $\delta$       | 相对误差                                   | %   |

|                     |                      |                   |
|---------------------|----------------------|-------------------|
| $\epsilon$          | 尺寸系数                 |                   |
|                     | 真应变                  | %                 |
|                     | 三参数 Weibull 分布的最小参数  |                   |
| $\Delta\epsilon$    | 真应变变程, 或局部应变变程       | %                 |
| $\epsilon_s$        | 应变幅值                 | %                 |
| $\epsilon_e$        | 弹性应变                 | %                 |
| $\epsilon_f$        | 真断裂延性                |                   |
| $\epsilon'_f$       | 疲劳延性系数               |                   |
| $\epsilon_p$        | 塑性应变                 | %                 |
| $\epsilon_r$        | 载荷—应变回线前一次反向终点处的局部应变 | %                 |
| $\epsilon_t$        | 总应变                  |                   |
| $\mu$               | 母体平均值                |                   |
| $\hat{\mu}$         | 母体平均值估计量             |                   |
| $\varphi(u)$        | 标准正态概率密度函数           |                   |
| $\gamma$            | 置信度                  | %                 |
| $\rho$              | 缺口根部曲率半径             | mm                |
|                     | 横截面上点到坐标原点的距离        | mm                |
|                     | 材料密度                 | kg/m <sup>3</sup> |
| $\nu$               | 自由度                  | %                 |
|                     | 泊松比                  |                   |
|                     | 变异系数                 |                   |
|                     | 频数                   |                   |
| $\sigma$            | 应力                   | MPa               |
|                     | 真应力, 或局部应力           | MPa               |
|                     | 母体标准差                |                   |
| $\Delta\sigma$      | 局部应力变程               | MPa               |
| $\sigma^2$          | 母体方差                 |                   |
| $\hat{\sigma}^2$    | 母体方差估计量              |                   |
| $[\sigma]$          | 许用应力                 | MPa               |
| $\sigma_0$          | 脉动循环下的弯曲疲劳极限         | MPa               |
| $\sigma_{-1}$       | 材料的对称弯曲疲劳极限          | MPa               |
| $(\sigma_{-1})_d$   | 对称循环下光滑大试样弯曲疲劳极限     | MPa               |
| $(\sigma_{-1})_d^K$ | 对称循环下有应力集中大试样弯曲疲劳极限  | MPa               |

|                   |                     |     |
|-------------------|---------------------|-----|
| $(\sigma_{-1})_N$ | N 次循环的材料对称弯曲疲劳极限    | MPa |
| $\sigma_a$        | 应力幅值                | MPa |
| $\sigma_b$        | 拉伸强度极限              | MPa |
| $\sigma_e$        | 等效应力                | MPa |
| $\sigma_i$        | 真断裂强度               | MPa |
| $\sigma'_i$       | 疲劳强度系数              | MPa |
| $\sigma_m$        | 平均应力                | MPa |
| $\sigma_{max}$    | 最大应力                | MPa |
| $\sigma_{min}$    | 最小应力                | MPa |
| $\sigma_n$        | 名义应力                | MPa |
| $\sigma_r$        | 前一次反向終了时的局部应力       | MPa |
| $\sigma_{ref}$    | 参考应力, 如钉孔附近毛面积的名义应力 | MPa |
| $\sigma_s$        | 拉伸屈服极限              | MPa |
| $\sigma_t$        | 真应力                 | MPa |
| $\tau$            | 切应力                 | MPa |
| $\tau_0$          | 材料的脉动扭转疲劳极限         | MPa |
| $\tau_{-1}$       | 材料的对称扭转疲劳极限         | MPa |
| $(\tau_{-1})_d$   | 对称循环下光滑大试样扭转疲劳极限    | MPa |
| $(\tau_{-1})_d^K$ | 对称循环下应力集中大试样扭转疲劳极限  | MPa |
| $\tau_a$          | 切应力幅值               | MPa |
| $\tau_m$          | 切应力均值               | MPa |
| $\psi$            | 断面收缩率               | %   |

## 单位制式换算表

|        |                                                                                                                                          |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 长度     | $1\text{ mm}=0.039\ 37\text{ in}$<br>$1\text{ in}=25.4\text{ mm}$<br>$1\text{ 英尺}=0.304\ 8\text{ m}$<br>$1\text{ m}=3.280\ 84\text{ ft}$ |
| 力      | $1\text{ N}=0.224\ 8\text{ lb}$<br>$1\text{ lb}=0.453\ 6\text{ kgf}=4.445\ 28\text{ N}$                                                  |
| 面积     | $1\text{ in}^2=645\text{ mm}^2$<br>$1\text{ mm}^2=0.001\ 550\ 4\text{ in}^2$                                                             |
| 应力     | $1\text{ MPa}=1\text{ N/mm}^2=1\text{ MN/m}^2$<br>$1\text{ lb/in}^2=0.006\ 890\ 17\text{ MPa}$                                           |
| 应力强度因子 | $1\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}=31.623\text{ N/mm}^{3/2}=1\text{ MN/m}^{3/2}$                                                               |

# 目 录

## 主要符号

## 单位制式换算表

## 第一章 绪 论

- 1.1 飞行器结构疲劳设计的发展 ..... 1
- 1.2 结构全寿命主动可靠性设计 ..... 2

## 第二章 疲劳的基本概念

- 2.1 疲劳破坏的特征和断口分析 ..... 6
- 2.2 交变应力与  $S-N$  曲线 ..... 8
  - 2.2.1 交变应力 ..... 8
  - 2.2.2  $S-N$  曲线 ..... 10
- 2.3 等寿命曲线与广义  $S-N$  曲面 ..... 13
- 2.4 循环应力-应变曲线和应变-寿命曲线 ..... 17
- 习题与思考题 ..... 21

## 第三章 影响疲劳强度的因素

- 3.1 缺口效应 ..... 24
- 3.2 尺寸效应 ..... 32
- 3.3 表面加工及表面处理 ..... 33
- 3.4 机械零件疲劳强度 ..... 35
  - 3.4.1 对称循环下零件的拉(压)、弯曲、扭转疲劳强度 ..... 35
  - 3.4.2 弯扭组合疲劳强度 ..... 37
  - 3.4.3 非对称循环下零件的疲劳强度 ..... 38
- 习题与思考题 ..... 42

## 第四章 零部件的细节设计与工艺方法

- 4.1 改进结构减缓局部应力 ..... 45
  - 4.1.1 增大圆角半径 ..... 46
  - 4.1.2 减缓力流线的变化 ..... 46
  - 4.1.3 减载槽 ..... 47
  - 4.1.4 孔洞的加强 ..... 48
  - 4.1.5 窗口的合理设计 ..... 49



|                   |     |
|-------------------|-----|
| 4.2 提高疲劳强度的工艺方法   | 49  |
| 4.2.1 表面加工        | 50  |
| 4.2.2 表面强化        | 50  |
| 4.2.3 预紧力         | 51  |
| 4.3 连接件的细节设计      | 52  |
| 4.3.1 耳片和销钉的连接接头  | 52  |
| 4.3.2 螺栓接口        | 55  |
| 4.3.3 铆钉接头        | 58  |
| 4.3.4 焊接接头        | 59  |
| 习题与思考题            | 61  |
| <b>第五章 疲劳载荷谱</b>  |     |
| 5.1 飞机疲劳载荷谱介绍     | 63  |
| 5.2 实测载荷谱编制       | 64  |
| 5.3 雨流-回线法        | 66  |
| 5.4 波动中心法         | 70  |
| 5.5 变均值法          | 73  |
| 5.6 二维疲劳载荷分布      | 76  |
| 5.7 裂纹形成的损伤当量折算   | 77  |
| 5.8 裂纹扩展的损伤当量折算   | 79  |
| 5.9 飞机加速试验载荷谱的编制  | 80  |
| 习题与思考题            | 82  |
| <b>第六章 安全寿命设计</b> |     |
| 6.1 名义应力法         | 85  |
| 6.1.1 局部模拟试验      | 86  |
| 6.1.2 线性累积损伤理论    | 89  |
| 6.2 应力严重系数法       | 93  |
| 6.2.1 应力严重系数的概念   | 93  |
| 6.2.2 寿命估算方法      | 98  |
| 6.3 局部应力-应变法      | 102 |
| 6.3.1 材料疲劳特性      | 105 |
| 6.3.2 载荷-应变标定曲线法  | 106 |
| 6.3.3 修正 Neuber 法 | 109 |
| 习题与思考题            | 111 |



## 第七章 损伤容限设计

|                                                    |     |
|----------------------------------------------------|-----|
| 7.1 线弹性断裂力学介绍 .....                                | 116 |
| 7.1.1 穿透型裂纹的受力状态与扩展形式 .....                        | 117 |
| 7.1.2 平面应力状态和平面应变状态 .....                          | 118 |
| 7.1.3 平面应变状态下的应力强度因子 $K_I$ 与断裂韧性 $K_{IC}$ .....    | 119 |
| 7.1.4 平面应力状态下的应力强度因子 $\bar{K}_I$ 与断裂韧性 $K_C$ ..... | 120 |
| 7.1.5 断裂门槛值 $\Delta K_{th}$ .....                  | 121 |
| 7.1.6 有限宽板的应力强度因子 .....                            | 122 |
| 7.1.7 裂纹尖端塑性区的影响 .....                             | 123 |
| 7.2 疲劳裂纹扩展速率 .....                                 | 125 |
| 7.2.1 疲劳裂纹的亚临界扩展 .....                             | 125 |
| 7.2.2 裂纹扩展速率 $da/dN$ 表达式 .....                     | 127 |
| 7.2.3 裂纹扩展广义 $da/dN - \Delta K$ 曲面 .....           | 129 |
| 7.3 剩余寿命估算 .....                                   | 131 |
| 7.4 断裂控制 .....                                     | 132 |
| 7.4.1 材料选择 .....                                   | 132 |
| 7.4.2 结构布局 .....                                   | 133 |
| 7.4.3 检测程序与安全工作能力 .....                            | 135 |
| 习题与思考题 .....                                       | 135 |

## 第八章 耐久性设计

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 8.1 概率断裂力学方法(PFMA) .....       | 143 |
| 8.1.1 TTCI 分布与 EIFS 控制曲线 ..... | 143 |
| 8.1.2 通用 EIFS 分布 .....         | 146 |
| 8.1.3 使用期裂纹扩展控制曲线(SCGMC) ..... | 149 |
| 8.1.4 损伤度评估与经济寿命预测 .....       | 151 |
| 8.2 确定性裂纹增长方法(DCGA) .....      | 154 |
| 8.3 裂纹萌生方法(CIA) .....          | 155 |
| 习题与思考题 .....                   | 156 |

## 第九章 结构寿命可靠性评定与预测

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 9.1 无限寿命设计的概率方法 ..... | 158 |
| 9.2 一维疲劳极限概率分布 .....  | 160 |
| 9.2.1 图解法 .....       | 160 |
| 9.2.2 数据转换法 .....     | 161 |
| 9.3 二维疲劳极限概率分布 .....  | 162 |



|                        |                      |     |
|------------------------|----------------------|-----|
| 9.4                    | 二维断裂门槛值概率分布 .....    | 164 |
| 9.5                    | 应力-强度干涉模型的普遍式 .....  | 165 |
| 9.6                    | 断裂干涉模型 .....         | 166 |
| 9.7                    | 全寿命分散系数法 .....       | 168 |
| 9.7.1                  | 完全寿命的分散系数 .....      | 168 |
| 9.7.2                  | 不完全寿命的分散系数 .....     | 171 |
| 9.8                    | 经济寿命耐久性模型 .....      | 172 |
| 9.9                    | 细节疲劳额定值(DFR)方法 ..... | 175 |
|                        | 习题与思考题 .....         | 176 |
| <b>第十章 在特殊环境下的疲劳问题</b> |                      |     |
| 10.1                   | 腐蚀疲劳 .....           | 178 |
| 10.2                   | 擦伤疲劳 .....           | 179 |
| 10.3                   | 高温疲劳和低温疲劳 .....      | 180 |
| 10.4                   | 低频疲劳 .....           | 181 |
| 10.5                   | 热疲劳 .....            | 184 |
| 10.6                   | 声疲劳(噪声疲劳) .....      | 185 |
| 10.7                   | 疲劳试验中的一些影响因素 .....   | 186 |
|                        | 习题与思考题 .....         | 188 |
| <b>附表</b>              |                      |     |
| <b>参考文献</b>            |                      |     |