

概率疲劳

PROBABILITY FATIGUE

徐 灏

东北大学出版社

责任编辑 郝蕴卿 崔华林

责任校对 米 戎 责任出版 秦 力

ISBN 7-81006-883-0



9 787810 068833 >

ISBN 7-81006-883-0/TH · 53

精装定价:22.50 元

平装定价:19.50 元

概 率 疲 劳

Probability Fatigue

徐 灏

东北大学出版社

(辽)新登字第8号

图书在版编目(CIP)数据

概率疲劳/徐灏著. —沈阳:东北大学出版社, 1994. 10

ISBN 7-81006-883-0

I. 概… II. 徐… III. 概率统计算法-应用-机械疲劳理论
IV. ①TG111.8 ②TH114

中国版本图书馆CIP数据核字(94)第03790号

内 容 简 介

概率疲劳是一门结构可靠性设计的基础学科。本书反映了概率疲劳学科的最新进展。是目前国内外较系统的一本专著。本书适用于机械、航空、工程力学、土建等类有关专业,可作为研究生和高年级大学生的结构可靠性设计课程的教材,也可供广大教师、从事可靠性研究和设计的人员参考。

©东北大学出版社出版

(沈阳·南湖 110006)

沈阳新华印刷厂印刷

东北大学出版社发行

1994年10月 第1版

1994年10月 第1次印刷

开本: 850×1168 1/32

印张: 15.625 插页: 1

字数: 408千字

印数: 1~1000册

精装 定价: 22.50元

平装 定价: 19.50元



作者简介

徐灏 江苏江阴人，1919年生，1943年毕业于西南联合大学机械系，现职东北大学教授，博士生导师。历任国务院学位委员会第一、二届学科评议组成员，中国机械设计学会副理事长，东北工学院机械系主任、机械工程研究所所长兼机械强度研究室主任，辽宁省机械工程学会副理事长、常委兼学术委员会主任，辽宁省机械设计学会理事长，沈阳市机械设计学会理事长，中国金属学会荣誉会员，《机械设计》期刊编委会主任委员，《中国大百科全书》机械工程卷编委会委员兼机械工程基础理论主编，大型工具书《机械设计手册》主编，工具书《新编机械设计师手册》主编。长期从事机械设计理论研究，专长结构疲劳强度理论，先后出版十余本著作，80年代后出版的著作有：《安全系数和许用应力》、《疲劳强度设计》、《机械强度的可靠性设计》、《机械设计》、《疲劳强度》。

前 言

概率疲劳是用概率统计方法研究机械零件和结构构件的疲劳损伤, 根据其存在的不确定因素及分布进行疲劳强度分析的一门学科。疲劳试验数据的离散性, 零件和构件加工允许的尺寸偏差, 材料中分布的原始缺陷, 以及受载零件危险部位应力响应的分布特性等, 都说明应力和强度以及影响它们的因素都是随机变量, 它们有各自的分布形式, 应该用概率统计理论和方法来处理, 才能使疲劳强度在工程中所确定的寿命, 成为保证某一概率下的可靠寿命。对于像压力容器、锅炉、动力设备、石油化工设备、航空航天器件、核反应堆及海洋钻井平台等重要设备, 安全性和经济性至关重要。

概率疲劳是以数学力学为基础的一门新兴的边缘学科。它涉及力学、材料和设计三个学科领域。它要求拥有大量的统计数据, 掌握引起结构破坏的各种参数的统计分布规律, 研究破坏概率的综合理论分析和计算, 正确预测结构的破坏概率和可靠寿命, 以确保设备的安全。概率疲劳的研究, 对民用的一般机械和结构的设计质量的提高, 也有美好的发展前景。概率疲劳是一门当前亟待发展的学科。

作者从 70 年代后期就开始概率疲劳的研究和教学工作, 与东北大学机械工程研究所的成员一起, 在国产钢材的疲劳性能试验数据的概率统计理论和方法、试样尺寸系数的概率统计数据、表面加工系数的概率统计数据、不同应力集中下平均应力影响系数的变化规律、实测载荷-时间历程的概率统计方法、零件危险区应力响应的处理、短裂纹的形成和扩展以及结构钢试样短裂纹尺寸

分布、在随机载荷下确定零件可靠寿命的理论与方法等方面，都进行了工作。这些工作汇同中外学者的研究成果，写成了本书。

本书共十二章，包括了概率疲劳的主要内容。其中第四章和第八章是作者和胡俏博士共同编写的。本书可作为研究生和高年级大学生的疲劳强度课程和结构可靠性设计课程的教材和教学参考书，也可作为广大教师、研究人员和设计人员的参考书。书中采用了中外学者的数据和资料，在此一并致谢。

徐 颢

1993 年

主要符号表

a	裂纹尺寸
a_c	临界裂纹尺寸
a_0	初始裂纹尺寸, 参考裂纹尺寸
A	有效度, 截面面积
B	厚度
c	循环
C	置信度
C_n	更换新构件费用
$C(t)$	在 t 时刻的修理费用
d	直径
D	直径, 疲劳损伤
E	弹性模量
$E(x)$	随机变量 X 的均值
EIFS	当量初始裂纹尺寸
$f(x)$	随机变量 X 的概率密度函数, 应力分布的概率密度函数
$f(\sigma)$	应力分布的概率密度函数
F	失效概率
$F(x)$	随机变量 X 的概率分布函数(简称分布函数)
$F_D(x)$	检出概率
$g(s)$	强度分布的概率密度函数
$g(y)$	随机变量 Y 的概率密度函数, 强度分布的概率密度函数
I	截面惯性矩
K	应力强度因子
K_c	断裂韧性

K_{Ic}	平面应变断裂韧性
K_{σ}	有效应力集中系数
M	弯矩
$M(\tau)$	维修度
MTBF	平均无故障工作时间
MTTF	故障前平均工作时间
(MTTFF),	系统的首次故障前平均工作时间
MTTR	平均修复时间
n	工作安全系数, 工作循环次数, 子样容量
$[n]$	许用安全系数
n_c	有效子样容量
N	失效循环次数, 疲劳循环数
N_a	威布尔分布的特征寿命参数
N_c	失效循环次数, 失效寿命
N_0	循环基数, 威布尔分布的最小寿命参数
N_p	裂纹扩展寿命
p	概率
$P(A)$	事件 A 发生的概率
$P(A B)$	在事件 B 已经发生的条件下事件 A 发生的条件概率
$P(i, \tau)$	裂纹超出数概率
$P(t)$	裂纹超出数概率(简写)
$[P(t)]$	许用裂纹超出数概率
q	敏性系数
Q	(短)裂纹扩展参数
r	半径, 应力比
R	半径, 可靠度
$R_{L1}(R')$	可靠度的单侧置信区间下限
R_{L2}	可靠度的双侧置信区间下限
R_{U2}	可靠度的双侧置信区间上限

R_{U1}	可靠度的单侧置信区间上限
s	子样标准离差
s_x	应力子样标准离差
s_y	强度子样标准离差
s^2	子样方差
S	应力
t	时间
T	转矩, 扭矩
T_c	经济寿命
TSE	总标准误差
TTCI	裂纹形成时间
u	标准正态随机变量
u_p	标准正态偏量
v	频数
$V(x)$	随机变量 X 的方差
w	宽度
x_u	EIFS 上界极限
$\bar{x}$	随机变量 X 的子样均值
$\tilde{x}$	中位秩
X	随机变量, 应力随机变量
$\bar{y}$	随机变量 Y 的子样均值
Y	随机变量, 强度随机变量, 应力强度因子修正系数
z	可靠度系数, 联结系数
α	风险, 显著性水平
α_s	理论应力集中系数
β	表面加工系数, 威布尔分布的形状系数
γ	风险, 置信度的风险
ϵ	尺寸系数
η	威布尔分布的尺度参数

λ	失效率
μ	母体均值
$\mu(\tau)$	修复率
ν	自由度, 变异系数, 泊松比
ρ	相关系数, 维修系数
σ	应力, 母体标准离差
$\hat{\sigma}$	标准离差估计值
σ_a	应力幅
σ_b	强度极限
σ_m	平均应力
σ_r	应力比为 r 的疲劳极限
σ_s	屈服极限
σ_{-1}	应力比为 -1 的疲劳极限
$\varphi(u)$	标准正态随机变量的概率密度函数
$\Phi(u)$	标准正态随机变量的分布函数

目 录

前 言

主要符号表

第一章 概论	(1)
§ 1-1 疲劳和疲劳设计	(1)
§ 1-2 概率疲劳和概率疲劳设计	(5)
§ 1-3 疲劳寿命估算	(7)
§ 1-4 概率疲劳发展史	(10)
第二章 概率疲劳的统计分析基础	(13)
§ 2-1 事件、概率和随机变量的统计	(13)
§ 2-2 常用的概率分布	(25)
§ 2-3 统计分析中的几种分布	(46)
§ 2-4 参数估计和假设检验	(54)
§ 2-5 回归与相关	(68)
§ 2-6 正态分布函数的代数运算	(73)
§ 2-7 随机变量函数的数字特征的近似计算方法	(78)
第三章 载荷谱	(81)
§ 3-1 载荷-时间历程	(81)
§ 3-2 随机过程	(89)
§ 3-3 载荷-时间历程的统计处理	(117)
§ 3-4 疲劳载荷谱编制准则	(129)
第四章 结构的疲劳应力分析	(141)
§ 4-1 概述	(141)
§ 4-2 危险部位的确定	(144)
§ 4-3 危险部位的应力响应	(167)

§ 4-4 实例	(188)
第五章 概率疲劳的材料数据	(195)
§ 5-1 材料的疲劳试验方法	(195)
§ 5-2 材料疲劳性能的统计数据	(203)
§ 5-3 疲劳极限分布图	(219)
第六章 疲劳强度分布的修正	(223)
§ 6-1 概率疲劳的修正系数	(223)
§ 6-2 零件和构件的疲劳极限	(230)
第七章 应力-强度干涉理论	(236)
§ 7-1 概述	(236)
§ 7-2 用应力-强度干涉模型求可靠度	(238)
§ 7-3 等效正态分布法计算可靠度	(261)
§ 7-4 图解法求可靠度	(273)
§ 7-5 蒙特卡罗法求可靠度	(277)
§ 7-6 可靠度与安全系数	(281)
第八章 随机载荷下的疲劳可靠性设计	(288)
§ 8-1 概述	(288)
§ 8-2 载荷和强度的二维概率分布	(294)
§ 8-3 概率相对迈因纳定律	(303)
§ 8-4 迈因纳定律-干涉模型综合法	(308)
第九章 可靠度的置信度和置信区间	(314)
§ 9-1 置信度	(314)
§ 9-2 考虑单侧置信区间下限的可靠度	(315)
§ 9-3 有效子样容量	(324)
§ 9-4 考虑置信区间的概率疲劳设计	(329)
第十章 系统的可靠性	(342)
§ 10-1 可靠性模型	(342)
§ 10-2 系统的可靠性特征量	(351)
§ 10-3 有贮备的不可修复系统	(351)

§ 10-4	可修复系统的可靠性	(354)
§ 10-5	可靠性预测	(367)
§ 10-6	可靠性分配	(370)
第十一章	概率断裂力学	(382)
§ 11-1	缺陷的统计特性	(382)
§ 11-2	材料断裂性能的统计特性	(386)
§ 11-3	裂纹扩展的统计特性	(388)
§ 11-4	线弹性断裂力学概率分析	(390)
§ 11-5	短裂纹的扩展特性	(398)
§ 11-6	短裂纹的裂纹尺寸分布	(410)
第十二章	耐久性设计	(419)
§ 12-1	裂纹形成时间(TTCI)分布	(420)
§ 12-2	当量初始裂纹尺寸(EIFS)分布	(431)
§ 12-3	裂纹超出数概率和损伤度	(437)
§ 12-4	结构疲劳的经济寿命	(439)
§ 12-5	耐久性设计步骤	(443)
附 录		(445)
参考文献		(468)
外国人名译名对照		(476)
Synopsis		(480)
Contents		(482)

第一章 概 论

§ 1-1 疲劳和疲劳设计

材料、零件和构件在循环应力或循环应变作用下，在某点或某些点逐渐产生局部的永久的结构变化，并在一定循环次数后形成裂纹或继续扩展直到完全断裂的现象，称为疲劳。由于疲劳断裂常常突然发生，往往导致灾难性的设备和人身事故，所以疲劳成为力学、材料和工程设计界所共同重视的学科。

对承受循环应力或应变的零件和构件，根据疲劳强度理论和疲劳试验数据，决定其合理的结构和尺寸的机械设计方法，称为疲劳强度设计，简称疲劳设计。机械零件和结构构件对疲劳破坏的抗力，称为零件和构件的疲劳强度。疲劳强度由零件的局部状态和该处的材料性能确定，所以疲劳设计是以零件最弱区为依据的。通过改进零件的形状以降低峰值应力，或在最弱区的表面层采用强化工艺，就能显著地提高其疲劳强度。

据资料统计，机械零件和受力构件的断裂事故中，80%左右是属于疲劳失效，疲劳设计成为现代设计的一个重要组成部分。第一次对疲劳进行系统试验的是德国人 A. 沃勒，他从 1847 年到 1889 年期间设计了一个旋转弯曲疲劳试验机，进行了多种疲劳试验，引入了 $S-N$ 曲线和疲劳极限的概念。以后，以材料疲劳极限和 $S-N$ 曲线为依据所进行的疲劳设计，称为常规疲劳设计。

在双对数坐标中的 $S-N$ 曲线由两直线段组成。设两条直线交点的循环数以 N_0 表示，则循环数大于 N_0 的一段直线与横轴平行，循环数 N 可到无限远处，所以 $N > N_0$ 的区域为无限寿命区，

根据这段直线所作的疲劳设计，称为无限寿命设计。左边的另一段是斜直线，即 $N < N_0$ 的区域为有限寿命区，根据这段斜直线所作的疲劳设计，称为有限寿命设计（图 1-1）。由于实际工作中，机器和设备都要求有一定的使用寿命，按照规定的使用寿命作有限寿命设计，与按无限寿命设计的结果相比较，机器和设备的重量和尺寸都可减小，设计更为合理。但因无限寿命设计所需的设计参数较少，方法简单，对于一般用途的机械产品，目前仍广为应用无限寿命设计。

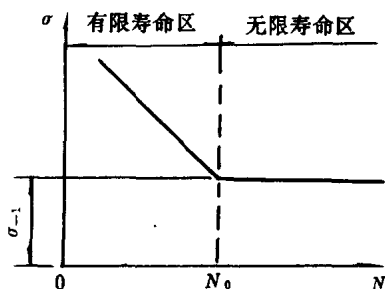


图 1-1 $S-N$ 曲线与常规疲劳设计
(双对数坐标)

对于某些机械产品，例如汽车等，因为技术发展速度快，更新周期短，不需要很长的使用寿命，减轻重量常是这类产品性能水平提高的关键。为此，即使整台产品需要较长的寿命，也愿以定期更换某些零件的办法，让这些零件设计得寿命较短而重量较轻。

在有限寿命设计中，当应力水平高并进入塑性， $S-N$ 曲线必须用应变来描述。根据科芬-曼森公式，在弹性范围内原为应力幅与载荷反复次数的关系曲线，转化成应变幅的一条曲线 2（在双对数坐标中），与另一直线即塑性应变幅与载荷反复次数的关系曲线（在双对数坐标中也是一条直线 1），两条直线有一交点 P （图 1-2）。反复次数小于 P 点的为塑性应变范围，属于低周疲劳（或称塑性疲劳），相应的为低周疲劳设计。大于 P 点的为弹性范围，相应的为高周疲劳设计。压力容器、飞机起落架等的疲劳是低周疲劳，一般的机械零件的疲劳属高周疲劳。

常规疲劳设计方法是在实验的基础上发展起来的。最理想的实验是通过对被研制的设备或其零件、构件，在模拟真实载荷和环

境下进行的整机或其零件、构件的疲劳试验,得出其疲劳破坏曲线,来验证疲劳强度设计中设备的承载能力或估算寿命。由于这种试验费用昂贵,所以一般用标准试样进行试验得到材料的疲劳试验数据,应用于零件和构件的设计中。这样,试验简单,通用性大,可以采用已有的疲劳试验数据,为设计单位广泛采用。问题是:这样与零件之间存在一段距离,如何从试样过渡到零件设计,这是常规疲劳设计要解决的问题。

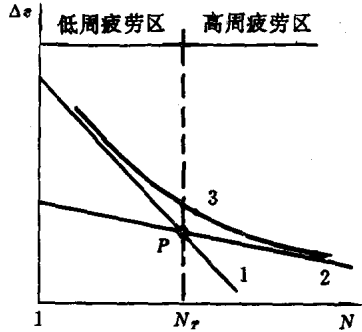


图 1-2 应变-寿命曲线

- 1—塑性应变幅度 $\Delta\epsilon_p-N$;
- 2—弹性应变幅度 $\Delta\epsilon_e-N$;
- 3—总应变幅度 $\Delta\epsilon-N$

进行零件和构件的常规疲劳设计,必须要知道作用于其上的载荷,制造该零件和构件的材料的疲劳性能,从试样试验数据用到零件和构件疲劳设计上去的方法。

一、载荷

首先,必须要知道零件和构件的危险部位以及其应力变化。因此,需测定零件和构件在运行中的载荷-时间历程,并由这载荷-时间历程求得零件和构件危险部位的应力响应。假使能直接测定危险点的应力-时间历程,则问题得到简化。但对于几何形状复杂的零件,很难直接测得零件危险部位的应力-时间历程,所以载荷和应力-时间历程的获得,常分两步来完成。

载荷-时间历程的获得,常用电阻应变计测量技术(简称电测法)在同类产品运行中直接测定。这里要注意必须选择典型工况,根据所测得的载荷-时间历程,用动态有限元法就可以算出零件和构件危险点的应力响应。在计算中一个关键问题是危险点的确定,