

● 机械设计丛书

抗疲劳设计

赵少汴 编著

● 机械工业出版社

72.14
21.3

机械设计丛书

抗 疲 劳 设 计

赵少汴 编著
高镇同 主审



机械工业出版社

(京)新登字054号

本书是中国机械工程学会机械设计学会机械设计丛书编辑委员会组织编写的机械设计丛书之一,是专为机械设计人员编写的。

疲劳是机械零部件破坏的主要型式。本书总结了作者和他在机电部郑州机械研究所的同事们在抗疲劳设计方法方面的研究成果,并对各种抗疲劳设计方法和典型零部件的抗疲劳设计方法做了系统全面的介绍。本书内容新颖,提供了大量的国产机械材料的抗疲劳设计数据,有较强的实用性。全书共十三章,由五部分组成:一、疲劳的破坏机制、基础曲线与影响因素(第一~三章);二、各种抗疲劳设计方法(第四~八章);三、特殊工况下的疲劳强度(第九章);四、典型零部件的疲劳强度、抗疲劳设计方法与模拟疲劳试验方法(第十~十三章);五、国产机械材料的疲劳性能数据及抗疲劳设计图表(附录一~三)。

本书还可供其他工程技术人员、技术革新者、管理人员和大专院校研究生、本科生参考或自学。

抗 疲 劳 设 计

赵少平 主编

责任编辑: 赵少平 版式设计: 胡金琪

封面设计: 方 芳 责任校对: 杨淑惠

责任印制: 王 光

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

邮政编码: 100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社京丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ · 印张 $13^{1/2}$ · 字数 339 千字

1994年1月北京第1版·1994年1月北京第1次印刷

印数 0 001—2 150 · 定价: 18.00元

*

ISBN 7-111-03574-7/TH·418

编辑委员会

主任委员 陈湖

副主任委员 周延佑 傅梦莲 郭可谦 徐家宗

委员(姓氏笔划序) 江 斌 任光华 刘存智 刘恒愉

何国伟 陈立周 吴宗泽 辛一行

周勤芝 林东初 郑效忠 徐 灏

高庆荣 夏曼苹 黄致甲 曾 英

专业编审组

1. 机械设计理论方法专业编审组

组长 周延佑

组员 陈立周 曾 英 傅家骥 刘光宁 万耀青

2. 机械结构强度专业编审组

组长 傅梦莲

组员 刘存智 高镇同 丁奎元 周辛庚 张如一

3. 机械零部件设计专业编审组

组长 郭可谦

组员 吴宗泽 林东初 舒森茂 余梦生 姜 勇

(其他专业编审组暂缺)

编 者 的 话

当前,国民经济各部门都迫切需要质量好、效率高、消耗低、价格便宜的先进的机械产品。而机械设计工作是决定机械产品质量、水平和经济效益的重要环节。一个机械产品的设计水平如果不高,即使制造得再好,也是一个落后的产品。所以必须加紧提高机械设计水平。

近三十年来,世界上科学技术的发展速度很快,机械设计工作也出现了崭新的局面。由于广泛运用了各学科和各技术领域里的新成就尤其是采用了电子计算机技术,在机械设计领域里,新原理、新方法、新技术与新结构不断涌现,从而,大大提高了设计水平和速度。特别是对于结构复杂、使用条件要求高的产品,改变了因设计难度大而不能设计或设计的质量低、周期长的状况。于是,许多大型、高精密度、高参数的质量高、效率高、消耗低和可靠耐用的各种机械产品,竞相出现。丰富了市场,并不断更新,以满足用户日益增长的需求。

在我国,随着国民经济的迅速发展,新产品的开发和老设备的技术改造工作日益增多,对机械设计工作的要求越来越高,机械设计人员迫切需要运用新的科学技术知识进行设计工作,但苦于缺乏学习和参考的资料。近几年来,一些进行产品研究、设计和教学的同志,一方面结合我国经验进行创新设计,一方面消化国外引进技术,均获得了可喜成果。这些成果也需要总结推广。因此,中国机械工程学会机械设计与传动学会机械设计丛书编辑委员会组织编写了这套机械设计丛书,以飨读者。

这套丛书编写的指导思想是:内容先进、实用。着重介绍新理论、新方法、新技术和新结构;对于传统的设计计算方法,要做总结提高工作。书中注意贯串整机设计思路。要求阐明本专题

的基本原理，避免深邃的数学，着重介绍物理概念及设计要点，给出实用的设计方法和计算公式、步骤、实际效果及经国内试验的数据、图表和实例 叙述深入浅出，分析透彻，使具有微积分数学知识的大中专程度的设计人员读得懂、用得上。花较少时间得到较大收获。

由于机械设计涉及面广，本丛书题目的选定，原则上是根据上述指导思想成熟一个定一个，不追求系统和全面。因此，全套丛书编写及出版时间将比较长。将采取分批出版的方式陆续出版。第一批 8 本将在近两年内出齐。它们是：《价值分析在产品中的应用》、《可靠性设计》、《防断裂设计》、《抗疲劳设计》、《机械零件可靠性设计》、《机械结构设计》和《耐磨损设计》、《联轴器》。

尽管我们朝上述设想作了许多努力，但因缺乏经验，并受水平限制，一定还存在一些缺点和不足之处，欢迎读者提出批评改进意见。

机械设计丛书编辑委员会

前 言

大多数机器零部件都承受动载荷，因此其破坏型式多数为疲劳破坏。但是，我国的机械设计现在基本上仍处在静强度设计阶段，多数产品仅做静强度计算，而没有进行抗疲劳设计。因此，设计出来的产品有些部分裕量过大，有些部分却又经常发生疲劳破坏。这是我国的机械产品使用寿命比发达国家低的主要原因之一。

我国的机械产品设计中未推行抗疲劳设计的主要原因有三：一是我国机械产品的技术条件中对使用寿命没有严格要求，制造厂家对疲劳问题不够重视；二是不少机械设计人员对抗疲劳设计方法还不太熟悉，习惯于按传统方法进行静强度设计乃至类比设计；三是缺乏常用国产机械材料的疲劳性能数据和抗疲劳设计数据，设计人员难为无米之炊。

为了提高我国机械产品的使用寿命和使用可靠性，我国的机械工业部门从80年代开始，对抗疲劳设计方法和设计数据进行了较系统的试验研究，迄今已经得出了一套使用国产机械材料进行常规疲劳设计的方法和数据。由于时间短促，这些方法和数据还不够完善，也不够全面，许多工作还需要也正在继续进行。但是，得出的成果已经为使用国产机械材料进行常规疲劳设计打下了初步基础。为了便于机械设计人员使用，本书对常规疲劳设计方法和国产机械材料的抗疲劳设计数据做了较系统的论述和介绍。同时，为了使广大机械设计人员更全面地了解各种现代抗疲劳设计方法，本书还对其它现行的抗疲劳设计方法和一些典型零部件及联接的抗疲劳设计方法做了较全面的介绍。

由于作者水平有限，谬误之处在所难免，敬希读者指正。书中的很多数据图表，都是取自郑州机械研究所、上海材料研究所、

东北工学院、浙江大学、哈尔滨科技大学、西安交通大学和郑州工学院的试验研究报告，另外，还参考了一些其他中外作者的资料，在此一并表示感谢。本书由高镇同教授进行了全面的审校，特在此致以衷心的感谢。

编者 1991年5月

符 号 表

- a —— 裂纹深度, 贯穿裂纹的半长度, 损伤系数, 直线拟合方程中的常数
 a_0 —— 初始裂纹尺寸
 a_c —— 临界裂纹尺寸
 a_{eff} —— 有效裂纹尺寸
 A —— 截面积, 应力比 ($A = \sigma_a / \sigma_m$)
 A_0 —— 初始截面积
 A_f —— 断裂截面积
 da/dN —— 裂纹扩展速率
 b —— 威布尔形状参数, 疲劳强度指数, 直线拟合方程中的系数
 c —— 裂纹半长度, 疲劳延性指数
 C —— 循环比, $S-N$ 曲线表达式中的常数, 帕里斯公式中的系数, 曼森-科芬方程中的常数
 d —— 直径
 D —— 直径, 疲劳损伤度 (损伤比)
 e —— 工程应变
 Δe —— 工程应变范围
 E —— 弹性模量
 f —— 疲劳比 ($f = \sigma_{-1} / \sigma_b$)
 F —— 截面积, 应力强度因子表达式中的系数
 G —— 剪切弹性模量, 应力梯度
 h —— 高度
 HB —— 布氏硬度
 i —— 试样序号
 I —— 截面轴惯性矩
 j —— 应力水平序号
 J —— 截面极惯性矩
 k —— 预紧系数

- K ——应力强度因子, 强度系数
 K' ——循环强度系数
 K_I ——I 型应力强度因子
 $K_{I\sigma}$ ——平面应变断裂韧性
 K_{II} ——平面应力断裂韧性
 K_{Isc} ——应力腐蚀界限应力强度因子
 ΔK ——应力强度因子范围
 ΔK_{eff} ——有效应力强度因子范围
 ΔK_{th} ——应力强度因子门槛值
 K_s ——分散系数, 试验载荷比设计载荷提高的倍数
 K_{SN} ——疲劳寿命为 N 时的分散系数
 K_{ss} ——试验数据的统计变化系数
 K_{so} ——试验频率影响系数
 K_{st} ——试验温度影响系数
 K_{sl} ——模型尺寸影响系数
 K_{sf} ——模型表面加工系数
 K_t ——理论应力集中系数
 K_f ——疲劳缺口系数
 K_{σ} ——正应力下的疲劳缺口系数, 真应力集中系数
 $K_{\sigma D}$ ——正应力下的零件疲劳强度降低系数
 $K_{\sigma N}$ ——疲劳寿命为 N 时的疲劳缺口系数
 K_{τ} ——切应力下的疲劳缺口系数
 $K_{\tau D}$ ——切应力下的零件疲劳强度降低系数
 K_{ϵ} ——真应变集中系数
 l ——应力水平级数
 m ——S-N 曲线表达式的指数, 帕里斯公式中的指数
 L_{max} ——上限尺寸
 L_{min} ——下限尺寸
 M ——弯矩
 M_t ——扭矩
 n ——循环次数, 工作安全系数, 子样大小, 应变硬化指数
 n' ——循环应变硬化指数
 n_0 ——每个程序块的循环次数

- n_1 ——附加安全系数
 n_a ——应力幅的安全系数
 n_o ——零件的总工作循环次数
 n_i ——应力安全系数
 n_s ——强度安全系数
 n_R ——可靠性安全系数
 n_σ ——正应力下的工作安全系数，最大应力的安全系数
 n_τ ——切应力下的工作安全系数
 $[n]$ ——许用安全系数
 N ——以循环次数计的疲劳寿命
 $2N$ ——以反复次数计的疲劳寿命
 N_0 ——裂纹形成寿命
 N_{50} ——中值疲劳寿命
 N_a ——威布尔分布的特征寿命参数
 N_D ——设计载荷下的疲劳寿命
 N_F ——裂纹扩展寿命
 p ——存活率
 p_0 ——最大接触压力
 $[p_0]$ ——许用接触压力
 P ——工作载荷，破坏率
 P_a ——载荷振幅
 P_F ——断裂载荷
 q ——疲劳敏感系数
 ΔP ——载荷范围
 Q ——载荷，相对应力梯度
 r ——半径，相关系数
 r_{min} ——相关系数的起码值
 r_y ——塑性区半径
 R ——应力比，可靠度，模型比，半径
 s ——子样标准差
 s^2 ——子样方差
 s_i ——尺寸的标准差
 s_{x_i} ——零件工作应力的标准差

- s_{σ_s} ——零件疲劳强度的标准差
 s ——工程应力, 名义应力螺距
 ΔS ——工程应力范围, 名义应力范围
 S_{oai} ——裂纹扩展所需的最小拉应力幅
 SFM ——模型表面加工粗糙度的平均值
 SFP ——零件表面加工粗糙度的平均值
 t ——时间, 缺口深度
 t_{op} ——零件在高温下的工作时间
 t_r ——蠕变寿命
 t_α ——显著度为 α 时的 t 分布值
 T ——温度, 周期, 预紧力
 u_p ——与存活率相关的标准正态偏量
 u_y ——与置信度相关的标准正态偏量
 x_i ——第 i 个个体的值
 x_p ——具有存活率 p 的对数安全寿命
 $\bar{x}$ ——子样均值
 $\bar{x}_\sigma$ ——零件疲劳强度的均值
 $\bar{x}_t$ ——零件工作应力的均值
 z ——联结系数(可靠度系数)
 Z ——弯曲截面模量
 Z_T ——扭转截面模量
 α ——显著度, 尺寸比, 载荷强化系数, 曼森-科芬方程中的指数
 β ——表面系数
 β_1 ——表面加工系数
 β_{1N} ——疲劳寿命为 N 时的表面加工系数
 $\beta_{1\tau}$ ——切应力下的表面加工系数
 β_2 ——腐蚀疲劳系数, 预腐蚀疲劳系数(也用 β_{cor} 表示)
 β_{2N} ——寿命为 N 次循环时的腐蚀疲劳系数(也用 β_{corN} 表示)
 β_3 ——表面强化系数
 γ ——切应变, 置信度
 δ ——延伸率, 相对误差, 裂纹尖张开位移
 δ_c ——临界裂纹尖张开位移
 ε ——真应变, 弯曲尺寸系数

- ε_0 ——纯粹尺寸系数
 ε_1 ——材质影响系数
 ε_a ——应变幅
 ε_e ——弹性应变
 ε_{ea} ——弹性应变幅
 ε_N ——疲劳寿命为 N 时的尺寸系数
 ε_p ——塑性应变
 ε_{pa} ——塑性应变幅
 ε_T ——总应变
 ε_f ——真断裂延性(拉伸断裂真应变)
 ε'_f ——疲劳延性系数
 ε_σ ——弯曲尺寸系数
 ε_τ ——扭转尺寸系数
 $\Delta\varepsilon$ ——真应变范围
 $\Delta\varepsilon_e$ ——弹性应变范围
 $\Delta\varepsilon_p$ ——塑性应变范围
 $\Delta\varepsilon_T$ ——总应变范围
 λ ——以周期数表示的总寿命
 μ ——母体均值
 ν ——泊松比, 变异系数, 自由度
 ν_{x_t} ——零件工作应力的变异系数
 ν_{x_s} ——零件疲劳强度的变异系数
 ρ ——曲率半径
 σ ——计算应力, 真应力, 母体标准差
 σ^2 ——母体方差
 σ_{-1} ——对称弯曲疲劳极限
 $\sigma_{-1\text{cor}}$ ——腐蚀疲劳极限, 预腐蚀疲劳极限
 $\sigma_{-1\text{cor}N}$ ——疲劳寿命为 N 时的腐蚀疲劳极限
 σ_{-1d} ——尺寸为 d 的光滑试样的对称弯曲疲劳极限
 σ_{-1dk} ——尺寸为 d 的应力集中试样的对称弯曲疲劳极限
 σ_{-1D} ——零件的对称疲劳极限
 σ_{-1L} ——对称拉压疲劳极限
 $\sigma_{-1\beta}$ ——某种终加工方法试样的对称弯曲疲劳极限

- σ_c ——脉动循环下的弯曲疲劳极限
 $\sigma_{0.5}$ ——应力集中试样的脉动疲劳极限
 $\sigma_{0.1}$ ——脉动拉压疲劳极限
 σ_a ——应力幅
 σ_b ——强度极限
 σ_{bK} ——缺口试样的强度极限
 σ_d ——变幅应力下的等效应力幅
 σ_e ——复合应力下的等效应力
 σ_f ——真断裂强度(拉伸断裂真应力)
 σ'_f ——疲劳强度系数
 σ_i ——第 i 根试样的应力值
 σ_j ——第 j 级应力水平的应力值
 σ_m ——平均应力
 σ_{max} ——循环的最大应力值
 σ_{min} ——循环的最小应力值
 σ_n ——有应力集中截面的名义应力
 σ_{OP} ——裂纹尖张开应力
 σ_r ——应力比为 R 时的疲劳极限
 σ_{ra} ——应力比为 R 时的极限应力幅
 σ_{rD} ——零件疲劳极限
 σ_{rm} ——应力比为 R 时的极限平均应力
 σ_{rR} ——疲劳极限的半径向量
 σ_R ——蠕变断裂强度, 应力的半径向量
 σ_s ——拉伸屈服极限
 σ_{-s} ——压缩屈服极限
 σ_t ——真应力(缺口处的局部应力)
 $\bar{\sigma}$ ——应力的均值
 $\bar{\sigma}_r$ ——疲劳极限的均值
 $\Delta\sigma$ ——应力范围, 应力级差
 $\Delta\sigma_t$ ——真应力范围
 τ ——切应力
 τ_{-1} ——对称扭转疲劳极限
 τ_{-1K} ——应力集中试样的对称扭转疲劳极限

$\tau_{-1,d}$ ——尺寸为 d 的光滑试样的对称扭转疲劳极限

$\tau_{-1,d,K}$ ——尺寸为 d 的应力集中试样的对称扭转疲劳极限

τ_0 ——脉动扭转疲劳极限

τ_m ——扭转平均应力

τ_r ——应力比为 R 时的扭转疲劳极限

ψ ——截面收缩率

ψ_σ ——正应力下的平均应力折算系数

$\psi_{\sigma,K}$ ——缺口试样的平均应力折算系数

$\psi_{\sigma,D}$ ——零件的平均应力折算系数

ψ_r ——一切应力下的平均应力折算系数

$\psi_{r,K}$ ——缺口试样的平均应力折算系数

$\psi_{r,D}$ ——零件的扭转平均应力折算系数



1. 在对称循环应力作用下，材料的疲劳寿命与平均应力的关系。当平均应力为零时，疲劳寿命最长。随着平均应力的增加，疲劳寿命显著缩短。当平均应力达到材料的屈服极限时，材料将发生塑性变形，疲劳寿命为零。

常用术语

一、疲劳强度方面

疲劳——材料在循环应力或循环应变作用下，由于某点或某些点逐渐产生了局部的永久结构变化，从而在一定的循环次数以后形成裂纹或发生断裂的过程。

疲劳寿命 N ——疲劳失效以前所经历的应力或应变循环次数。

应力循环——循环应力下应力-时间函数的最小单元(见图0-1)。

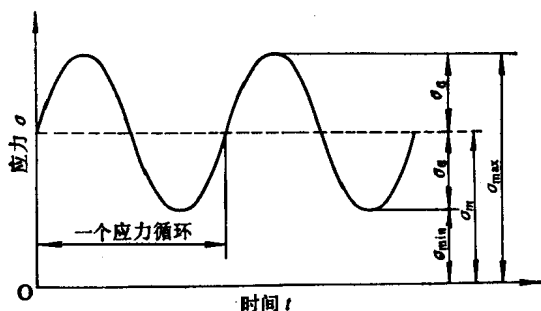


图0-1 应力循环示意图

最大应力 σ_{max} ——在应力循环中具有最大代数值 的应力 (见图0-1)。以拉应力为正，压应力为负。

最小应力 σ_{min} ——在应力循环中具有最小代数值 的应力 (见图0-1)。以拉应力为正，压应力为负。

平均应力 σ_m ——最大应力与最小应力的代数平 均值 (见图0-1)，即

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$$

为应力的静载分量。

应力幅 σ_a ——最大应力与最小应力代数差的一半(见图0-1), 即

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$$

为应力的动载分量。

应力比——最小应力与最大应力的代数比值称为应力比 R , 应力幅与平均应力之比称为应力比 A , 即:

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}, \quad A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m}$$

对称循环——平均应力等于零的应力循环。这时, $R = -1$ 。

脉动循环——最小应力等于零的应力循环, 也称脉动拉伸循环。这时, $R = 0$ 。

脉动压缩循环——最大应力等于零的应力循环。这时, $R = -\infty$ 。

非对称循环——除对称循环以外的应力循环统称为非对称循环。这时, $R \neq -1$ 。

应力水平——由一对应力分量 $\sigma_{\max}$ 和 $\sigma_{\min}$ 确定。在给定应力比 R 或平均应力 σ_m 的条件下, 应力水平可以用最大应力 $\sigma_{\max}$ 或应力幅 σ_a 表示。

$S-N$ 曲线——应力与中值疲劳寿命的关系曲线, 也称中值 $S-N$ 曲线。疲劳寿命常取对数坐标; 应力常取线性坐标, 有时也取对数坐标。

N 次循环时的中值疲劳强度——指定寿命为 N 次循环时的中值应力水平, 亦称 N 次循环时的条件疲劳极限。

疲劳极限——疲劳寿命 N 很大时的中值疲劳强度。

循环比 C ——在某一应力水平下所经历的应力循环次数 n , 与在 $S-N$ 曲线上查出的该应力水平下的疲劳寿命 N 的比值。

真应力 σ_t ——在缺口或应力集中处, 用弹性理论或实验应力分析方法确定出的当地应力。