



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

机械疲劳与可靠性设计

李舜酩 编著



科学出版社
www.sciencep.com

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

机械疲劳与可靠性设计

李舜酩 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要介绍在交变载荷作用下常规疲劳寿命设计与疲劳强度可靠性设计的基本理论与设计方法。全书共分9章,分别介绍机械材料的疲劳强度、影响机械零件疲劳强度的因素、无限寿命设计法、名义应力有限寿命设计法、局部应力应变分析法、损伤容限设计、疲劳强度的可靠性设计及特殊载荷与环境下的疲劳强度的基本概念和设计方法。各个章节给出了典型例题,章后附有复习思考题。书末附有若干附表。

本书可作为大机械类专业,如机械工程、飞行器设计与制造、飞行器动力工程、动力机械及工程、船舶工程、热能工程、车辆工程等专业的本科生专业教材,也可供从事疲劳强度方面研究的科技工作者和其他相关专业的大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械疲劳与可靠性设计 / 李舜酩编著. —北京:科学出版社,2006

(普通高等教育“十一五”国家级规划教材)

ISBN 7-03-017831-9

I. 机… II. 李… III. ①机械-疲劳寿命-设计-高等学校-教材 ②机械设计-结构可靠性-高等学校-教材 IV. ①TH114 ②TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 094221 号

责任编辑:资丽芳 贾瑞娜 / 责任校对:纪振红

责任印制:张克忠 / 封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双 青 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006年9月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2006年9月第一次印刷 印张: 16

印数: 1—3 000 字数: 298 000

定价: 22.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换<环伟>)

序

疲劳破坏是机械零部件早期失效的主要形式。随着现代机械向高速和大型化方向发展,许多零部件在高温、高压、重载和腐蚀等恶劣工况下运行,疲劳破坏事故更是层出不穷。因此,研究机械零部件的疲劳寿命和推广疲劳与可靠性设计,对提高机械产品的可靠性和使用寿命有着十分重要的意义。

疲劳寿命设计是建立在实验基础上的一门科学。通过实验方法的研究和结构的大量实验,并综合运用相关学科理论,人们已经并正在发展出若干疲劳寿命的设计理论和方法。我国的一大批科技工作者几十年来不畏艰难,不断探索,在疲劳寿命与可靠性设计中取得了很大的成就。这些成就对我国机械工业领域、特别是航空工业领域的结构安全与可靠性方面起到了重要的作用。同时,这些成就也得到了国际社会的高度评价。但是总体上我国在理论深度、工作的系统性和试验手段以及工业应用等诸多方面,与国际先进水平尚存在较大差距,还需要做更多的工作和努力。

值此国家科技迅速发展的时期,在我国机械工业领域各个行业,加强对疲劳寿命与可靠性设计技术的推广与应用是十分必要的。这将进一步提高我国在该领域的整体设计水平,从而提高产品的国际竞争力。

尽管机械疲劳的研究已有 160 多年历史,但我国高等院校开设“机械疲劳与可靠性设计”课程还主要是在航空学科范围内,并且这方面的教材不多。十分欣慰地看到普通高等教育“十一五”国家级规划教材中推出了这本面向大机械学科的教材。该书在一些专著和论文的基础上编纂而成,为高等院校相关专业的教学创造了有利条件。

马镇同

2006 年 8 月

前 言

本书主要介绍在交变载荷作用下常规疲劳寿命的疲劳寿命设计与疲劳强度可靠性设计的基本理论与设计方法。本书介绍机械疲劳与可靠性的概念、机械结构的疲劳特性、影响因素;详细介绍材料与零件的疲劳分析方法和设计方法、寿命估算与可靠性设计等方法;较深入地论述了典型分析方法的基本理论和实验数据的选取,较深入地论述了有关设计理论公式的应用范围及影响参数的选择方法;用若干典型例题,对机械零件进行了疲劳寿命和可靠性分析与计算,使学习者对一般机械结构零件的疲劳寿命与可靠性具有初步分析能力和设计能力,为从事机械结构疲劳及可靠性分析与设计打下良好的理论基础。

本书所介绍的设计方法与常规机械设计方法不是平行的,而是在常规机械设计方法的基础上,进一步提高与发展的一种更高层次的设计方法。

本书可作为大机械类专业,如机械工程、飞行器设计与制造、飞行器动力工程、动力机械及工程、船舶工程、热能工程、车辆工程等专业的本科生专业课教材。本书的目的,是把疲劳寿命与可靠性的设计思想贯彻到大学本科生的知识结构中,为其日后开展相关方面的研究与设计提供必要的基本知识,为我国相关行业的制造技术与方法的发展提供条件基础。

本书是在原有讲义的基础上编写而成的。全书贯穿了范引鹤教授的若干教学经验,且得到了高德平教授的若干具体指导。基于知识结构的连续性和完整性,本书在选材内容上进行了适当拓宽。

本书在章节内容的选材上主要参阅了赵少汴先生、高镇同先生、徐灏先生和吴富民先生的相关著作,在此表示衷心感谢。

西北工业大学吕国志教授仔细审阅了书稿并提出了宝贵的意见和建议。

在本书编写过程中,得到南京航空航天大学各级领导、能源与动力学院和学校教材科老师的大力支持和帮助,在此表示感谢。特别感谢江小丽同志,她在全书的文字、图表的整理方面做出了重要贡献。高岳文、尚伟燕、门秀花等同志参与校对了部分章节的内容,也一并表示感谢。

由于时间仓促,文中会存在若干缺点或错误,敬请读者批评指正。

编 者

2006年05月06日

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 疲劳强度的重要性	1
1.2 疲劳发展简史	2
1.3 国内外情况与发展水平	4
1.3.1 国外情况与发展水平	4
1.3.2 国内发展情况	4
1.4 现代抗疲劳设计方法	6
1.4.1 现行的抗疲劳设计方法	6
1.4.2 抗疲劳设计的两个阶段	6
1.4.3 机械结构强度设计思想的发展和演变	7
复习思考题	10
第 2 章 材料的疲劳强度	11
2.1 基本概念	11
2.1.1 疲劳破坏的特征	11
2.1.2 疲劳寿命	11
2.2 金属疲劳破坏机制	12
2.2.1 疲劳裂纹的萌生	12
2.2.2 疲劳裂纹的扩展	13
2.2.3 失稳断裂	14
2.3 疲劳破坏断口分析	14
2.3.1 断口的宏观分析	14
2.3.2 断口的微观分析	15
2.3.3 构件的断口分析	15
2.4 疲劳试验试样及其制备	16
2.4.1 试样类型	16
2.4.2 试样制备	19
2.5 材料的 S-N 曲线	22
2.5.1 应力循环	22
2.5.2 描述材料疲劳性能的 S-N 曲线	23

2.5.3	S-N 曲线的测定方法(左支)	25
2.6	材料的疲劳极限	27
2.6.1	材料疲劳极限的定义	27
2.6.2	材料疲劳极限的测定方法	28
2.6.3	材料疲劳极限与强度极限及其他机械性能的关系	34
2.7	对数疲劳寿命的正态分布	36
2.7.1	统计分析基础知识	37
2.7.2	正态分布概率密度函数	38
2.7.3	对数疲劳寿命的正态分布	39
2.8	材料的 P-S-N 曲线	41
2.8.1	定义	41
2.8.2	P-S-N 曲线的测定方法	42
2.8.3	P-S-N 曲线试验数据处理方法	42
	复习思考题	45
第3章	影响机械零件疲劳强度的因素	47
3.1	形状因素	47
3.1.1	理论应力集中系数 K_t	47
3.1.2	有效应力集中系数(疲劳缺口系数、疲劳强度降低系数) K_f (K_σ)	48
3.2	尺寸效应	53
3.2.1	尺寸系数 ϵ	53
3.2.2	尺寸效应的机制和影响因素	53
3.2.3	尺寸系数 ϵ 的确定	54
3.3	表面加工的影响	55
3.3.1	影响机制	55
3.3.2	表面切削加工影响	56
3.3.3	切削用量的影响	57
3.3.4	表面加工系数曲线	57
3.3.5	表面加工系数与疲劳缺口系数的关系	60
3.4	平均应力的影响	60
3.4.1	极限应力线图	60
3.4.2	拉伸平均应力的影响	62
3.5	载荷持续情况的影响	65
3.5.1	加载频率的影响	65
3.5.2	应力波的影响	66
3.5.3	中间停歇的影响	66
	复习思考题	66

第4章 无限寿命设计法	68
4.1 引言	68
4.2 设计计算公式	69
4.2.1 对称循环($R = -1$)	69
4.2.2 简单非对称循环($R = \text{常数}$)	69
4.2.3 平均应力 σ_m 保持不变	70
4.2.4 最小应力 $\sigma_{\min}$ 保持不变	70
4.3 σ_{-1} 与 τ_{-1} 的确定方法和影响系数确定方法	71
4.3.1 σ_{-1} 与 τ_{-1} 的确定方法	71
4.3.2 影响系数的选取	71
4.3.3 平均应力折算系数 φ_σ 、 φ_τ 的选取	72
4.3.4 许用安全系数的确定	72
4.4 例题	75
复习思考题	77
第5章 名义应力有限寿命设计法	78
5.1 引言	78
5.2 疲劳累积损伤	78
5.2.1 线性累积损伤理论及其应用	78
5.2.2 非线性累积损伤理论	81
5.2.3 双线性累积损伤理论	86
5.2.4 修正的线性累积损伤法	87
5.3 等幅应力下的有限寿命设计	89
5.3.1 对称循环下的有限寿命设计	89
5.3.2 非对称循环下的有限寿命设计	93
5.4 变幅应力下的有限寿命设计	95
5.4.1 分析确定零件的载荷谱和应力谱	95
5.4.2 疲劳强度校核	97
5.4.3 疲劳寿命估算	99
5.5 例题	100
复习思考题	106
第6章 局部应力应变分析法	108
6.1 引言	108
6.1.1 局部应力应变分析法的出发点	108
6.1.2 局部应力应变分析法的优缺点	108
6.1.3 局部应力应变法与名义应力法的不同之处	109
6.2 低周疲劳	109

6.2.1	循环应力-应变曲线与单调应力-应变曲线	109
6.2.2	应变-寿命(ϵ - N)曲线	116
6.3	计数法	118
6.3.1	雨流法的计数规则	119
6.3.2	举例	119
6.4	用局部应力应变法估算疲劳寿命	120
6.4.1	用局部应力应变法估算疲劳寿命的流程图	120
6.4.2	常幅载荷下疲劳寿命的估算	121
6.4.3	变幅载荷下疲劳寿命的估算	126
6.5	例题	126
	复习思考题	133
第7章	损伤容限设计	134
7.1	引言	134
7.2	应力强度因子与断裂韧性	134
7.2.1	应力强度因子	134
7.2.2	断裂韧度	136
7.3	疲劳裂纹扩展速率	137
7.3.1	(da/dN)- ΔK 曲线	137
7.3.2	平均应力的影响	138
7.3.3	变幅应力下的 da/dN	138
7.3.4	影响疲劳裂纹扩展速率的其他因素	139
7.4	剩余寿命估算	139
7.4.1	初始裂纹尺寸 a_0 的确定	139
7.4.2	临界裂纹尺寸 a_c 的确定	140
7.4.3	疲劳裂纹扩展寿命估算	140
7.5	断裂控制	141
7.5.1	精心选材	141
7.5.2	结构合理布局	142
7.5.3	制订合理的检验程序	142
7.5.4	控制安全工作应力	142
	复习思考题	144
第8章	疲劳强度的可靠性设计	146
8.1	可靠性的基本概念	146
8.1.1	可靠性研究的重要性及发展概况	146
8.1.2	可靠性技术	147
8.1.3	可靠性设计	149

8.1.4 衡量可靠性的尺度	151
8.2 正态分布函数及其代数运算	157
8.2.1 二元随机变量	157
8.2.2 正态分布函数的代数运算	160
8.3 疲劳强度的可靠性设计方法	161
8.3.1 疲劳强度概率分布图	161
8.3.2 应力-强度分布的干涉模型	162
8.3.3 可靠度计算	164
8.4 系数修正	165
8.4.1 基本影响系数	166
8.4.2 不同应力比 r 对应的疲劳极限	167
8.4.3 零件的疲劳极限	169
8.5 安全系数的确定	169
8.5.1 安全系数 n	169
8.5.2 附加安全系数 n_1	170
8.6 例题	170
8.7 威布尔分布	181
8.8 可靠度的置信度	186
复习思考题	189
第9章 特殊载荷与环境下的疲劳强度	190
9.1 复合应力疲劳	190
9.1.1 对称循环下的复合应力疲劳	190
9.1.2 对称循环下的弯扭复合疲劳	190
9.1.3 非对称循环下的复合应力疲劳	193
9.2 冲击疲劳	197
9.3 腐蚀疲劳	198
9.3.1 引言	198
9.3.2 腐蚀介质的影响	199
9.3.3 预腐蚀疲劳	200
9.3.4 气相疲劳	201
9.3.5 水介质疲劳	202
9.3.6 应力条件与试样情况的影响	203
9.3.7 腐蚀疲劳的设计方法	205
9.3.8 腐蚀疲劳的试验方法与试验装置	206
9.4 高低温疲劳与热疲劳	209
9.4.1 低温疲劳	209

9.4.2 高温疲劳	209
9.4.3 热疲劳	214
9.5 微动磨损疲劳与接触疲劳	215
9.5.1 微动磨损疲劳	215
9.5.2 接触疲劳	219
复习思考题	222
参考文献	224
附录	225
附表 A 给定可靠度 $R=P(\xi>x_p)$ 下的标准正态偏量 u_p 和对数疲劳寿命 x_p	225
附表 B t 分布数值表	227
附表 C 由连接系数 z 求可靠度 R	228
附表 D 由可靠度 $R(0.5\sim 0.99)$ 求连接系数 z	229
附表 E 由可靠度 $R(0.5\sim 0.999999999)$ 求连接系数 z	229
附表 F 标准离差修正系数 $\hat{k}$	229
附表 G 20 种常用国产材料标准光滑旋转弯曲试样或漏斗型旋转弯曲试样 P-S-N 曲线的 a_p 与 b_p 值	230
附表 H 20 种常用国产材料标准缺口试样 P-S-N 曲线的 a_p 与 b_p 值	231
附表 I 某些美国工程合金的单调与循环应变特性	232
附表 J 某些国产金属材料的单调与循环应变特性	233
附表 K 20 种常用国产材料的疲劳极限及标准缺口试样(缺口半径 $r=$ 0.75mm , $K_t=2$) 的疲劳极限	234
附表 L 调质结构钢的疲劳极限均值及标准离差	235
附表 M 铝合金的疲劳极限均值及标准离差	239
附表 N $\left \frac{x_i - \bar{x}}{s} \right $ 的起码值	241
附表 O 调质结构钢的疲劳极限均值及标准离差	242
附表 P 30CrMnSiA* 钢和 40CrNiMoA* 钢在 $r=-1$ 时的应力集中敏感系 数 q	243
附表 Q 疲劳缺口系数的变异系数	243

第 1 章 绪 论

1.1 疲劳强度的重要性

工程构件的破坏形式主要有三种:磨损、腐蚀和断裂。

磨损和腐蚀进行得很慢,一般可通过定期检查、修理、更换来解决。而断裂常常是突发性的,往往造成灾难性的设备事故或人身事故。

造成断裂的原因很多,有过载、低温脆性断裂、应力腐蚀、氢脆、镉脆、疲劳等。

疲劳强度不仅在航天、航空、车辆、造船和原子能等尖端工业部门有着十分重要的意义,也是影响一般机械产品使用可靠性和使用寿命的一个重要问题。

根据国外的统计,机械零件的破坏 50%~90%为疲劳破坏。例如,轴、曲轴、连杆、齿轮、弹簧、螺栓、压力容器、海洋平台、汽轮机叶片和焊接结构等;很多机械零部件和结构件的主要破坏方式都是疲劳。过去的研究表明,军用飞机喷气发动机构件的主要失效原因是高周疲劳。疲劳失效占喷气发动机全部构件损伤的 49%,而高周疲劳又几乎占有所有疲劳失效的一半。

疲劳定义: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。

近几十年来,随着机械向高温、高速和大型方向发展,机械的应力越来越高,使用条件越来越恶劣,疲劳破坏事故更是层出不穷。因此,许多发达国家越来越重视疲劳强度研究工作。这一点也反映在疲劳学术论文数量的直线上升上。

我国虽然尚未对疲劳破坏问题做过全面调查,但同类产品的使用寿命往往比发达国家为低,问题更为严重。因此,开展疲劳强度研究工作对我国的机械工业也是刻不容缓的。

疲劳问题首先是 19 世纪初,由于蒸汽机车问题提出的,但在后来的其他领域,如航空航天、交通车辆、轮船、桥梁、建筑等,也都出现了众多的疲劳破坏。

第二次世界大战中,有若干战斗机是自己坠落而非被敌方击落的。当时约有 20 架“惠灵顿”号重型轰炸机发生疲劳破坏。

20 世纪 50 年代以来,航空事业得到全面发展,但全球性的飞机事故接连不断,大部分是属于结构疲劳破坏造成的。1951 年英国“鸽式”飞机因机翼的翼梁疲劳破坏而在澳大利亚失事;1952 年美国 F-89 蝎式歼击机因机翼接头疲劳破坏而连续发生事故;1953 年英国“维金”号又因主梁疲劳破坏而在非洲失事;1954 年英国喷气式客机“彗星-I”号因铆钉边缘出现疲劳裂纹而连续两次在航线上坠毁。

20 世纪 80 年代,某石油钻井平台沉船事件,从技术角度分析也是疲劳破坏导

致的。由于在钻井平台的一个支撑立柱上,在接近海平面的位置开了一个作业用工艺圆孔,导致海水腐蚀,从而强度减弱,经过若干次随机载荷作用后导致裂纹破坏,最终丧失抵抗力。

20 世纪 90 年代初以来,日本、韩国不断发生桥梁、高架公路的支撑立柱出现裂纹、断裂、扭曲的事件,都是由于支撑立柱承受高周载荷的长期作用导致的疲劳破坏。

1998 年 6 月德国一列高速列车在行驶中突然出轨,造成 100 多人遇难身亡。造成事故的原因是一节车厢的车轮内部疲劳断裂。

2000~2001 年,某汽车股份有限公司的轻型汽车在试验过程中,其飞轮壳、离合器壳和变速器壳出现裂纹现象,称为“三壳破裂”。经过研究,发现其中的问题是典型的疲劳破坏。

2005 年 5 月,中国台湾华航某班机在飞行中因飞机后部的金属疲劳断裂而导致机体在空中解体,造成机上 225 人全部遇难的悲剧。

1.2 疲劳发展简史

疲劳问题的产生,可追溯到 19 世纪初。产业革命以后,随着蒸汽机车和机动运载工具的发展以及机械设备的广泛应用,运动部件的破坏经常发生。破坏往往发生在零部件的截面突变处,破坏处的名义应力不高,低于材料的强度极限和屈服极限。这些破坏事故使工程师们烦恼了很久。

19 世纪:

1829 年德国的 Albert 用矿山卷扬机焊接链条进行的疲劳试验阐明了疲劳破坏的原因。

1839 年法国工程师 J. V. Poncelet 首先采用了“疲劳”这一术语,用来描述材料在交变载荷下承载能力逐渐耗尽以致最终断裂的破坏过程。

1842 年 Hood 提出了疲劳的“结晶”理论,认为金属强度在重复应力下的降低是振动引起的结晶化所致。

1843 年英国的 W. J. M. Rankine 发表了第一篇疲劳论文“关于机车车辆的疲劳破坏问题”。

直到 1847 年德国工程师、机车车辆厂厂长沃勒(Wöhler)开始对金属的疲劳进行深入系统的研究。1850 年他设计出了第一台疲劳试验机(即沃勒疲劳试验机),用来进行全尺寸机车车轴的疲劳试验。以后,他又研制出许多种形式的疲劳试验机,并首次用金属试样进行了疲劳试验。他在 1871 年发表的论文中,系统论述了疲劳寿命与循环应力的关系,提出了 S-N 曲线和疲劳极限的概念,确定了应力幅是疲劳破坏的决定因素,奠定了金属疲劳的基础。因此,公认沃勒是疲劳研究的奠基人,有“疲劳试验之父”之称。

19 世纪 70~90 年代, Gerber 研究了平均应力对疲劳强度的影响, 提出了 Gerber 抛物线方程。英国的古德曼 (Goodman) 提出了著名的简化曲线——古德曼图。

1884 年包辛格 (J. Bauschinger) 在验证沃勒的疲劳试验时, 发现了在循环载荷下弹性极限降低的“循环软化”现象, 引入了应力-应变滞后回线的概念。但他的工作当时并未引起人们重视, 直到 1952 年 Keulyan 在做铜棒试验时才把它重新提出来, 并命名为“包辛格”效应。因此, 包辛格是首先研究应力循环的人。

20 世纪:

人们开始用金相显微镜来研究疲劳机制;

研究循环应力产生的滑移痕迹;

研究循环硬化和循环软化;

研究多轴疲劳的弯扭复合作用, H. J. Gough 1924 年发表巨著《金属疲劳》;

1910 年 A. A. Griffith 用玻璃研究脆断的理论和实验, 奠定了断裂力学的基础, 被称为“断裂力学之父”;

研究应力集中系数的理论值;

进行缺口应变分析, 提出内应力的概念;

研究用喷丸提高疲劳强度的机制——主要是表面层内建立的压缩残余应力的作用;

引入了应力梯度的概念;

提出线性累积损伤理论公式化, 形成了帕尔姆格伦-迈因纳 (Palmagram-Miner) 线性累积损伤法则;

提出常规疲劳设计计算公式, 奠定了常规疲劳设计的基础;

20 世纪 50 年代对疲劳有三大贡献:

(1) 研制出了闭环控制的电液伺服疲劳试验机。

(2) 电子显微镜出世。

(3) 1952 年美国国家航空航天管理局 NASA 刘易斯研究所的曼森 (S. S. Manson) 和科芬 (L. F. Coffin) 在大量试验数据的基础上提出了表达塑性应变和疲劳寿命间关系的曼森-科芬方程, 奠定了低周疲劳的基础。

1961 年诺伯 (Neuber) 开始用局部应力应变研究疲劳寿命, 提出了诺伯法则;

1963 年美国的帕里斯 (C. Paris) 在断裂力学方法的基础上, 提出了估算裂纹扩展规律的著名关系式——帕里斯公式; 发展出了损伤容限设计, 使断裂力学和疲劳这两门学科逐渐结合越来越来。

20 世纪 60 年代开始将统计学应用于疲劳试验和疲劳设计。

1971 年, 威茨 (R. M. Wetzel) 在曼森-科芬方程的基础上, 提出了根据应力-应变分析估算疲劳寿命的一整套方法——局部应力-应变分析方法;

此后, 可靠性理论和损伤容限设计也开始在疲劳设计中应用。

1.3 国内外情况与发展水平

1.3.1 国外情况与发展水平

第二次世界大战以后,国外的疲劳研究工作发展很快,主要表现在如下几个方面:

(1) 在疲劳研究中应用了电子显微镜和扫描电镜,研究疲劳裂纹的产生、扩展机理。

(2) 通过对机械零部件的形状、尺寸、表面加工情况等因素对疲劳强度的影响机理的研究,提出了一些解释或假说,但不很成熟,还不能定量解释各种试验现象,许多实际工程问题的解决,主要还是靠试验曲线。

(3) 疲劳的累积损伤理论与试验研究没有得出显著成效。在机械设计中估算变幅载荷下的疲劳寿命时,仍然主要采用最简单的线性累积损伤理论——迈因纳法则。

(4) 抗疲劳设计方法的研究,主要有如下几种设计方法:

①无限寿命设计;②有限寿命设计(包括名义应力法、局部应力应变法);③损伤容限法;④疲劳可靠性设计法。

(5) 低周疲劳。在曼森-科芬关系式基础上,提出了几种低周疲劳的设计计算公式:

新局部应力-应变法——在低周疲劳关系式的基础上,发展出了一种新的有限寿命设计方法。

双频疲劳——已开始进行研究,但工作还做的不多。

(6) 疲劳试验。

(7) 疲劳可靠性设计。由于这方面的基础数据不够,目前还处在探索和积累数据阶段。

(8) 损伤容限设计。在断裂力学的基础上,发展起来的一种新的有效方法。

(9) 特种疲劳问题的研究,扩展到特殊条件下的疲劳问题——腐蚀疲劳、接触疲劳、微动磨损疲劳、随机疲劳、高温疲劳、热疲劳、复合应力疲劳等。这些疲劳问题大多还没有很好解决,都还在研究中。

(10) 疲劳故障分析,各国都十分重视。

(11) 疲劳强度的强化方法,特别是对表面冷作方法进行了越来越多的研究,很多方法成效显著,已经在生产中广泛使用。

1.3.2 国内发展情况

我国的疲劳强度工作开展很晚。

(1) 20世纪50年代,才在个别的科研单位开始开展一些试验研究工作。

(2) 20 世纪 60 年代初期,几个部属的研究院针对新产品设计和生产中的问题进行了一些试验研究,虽然零星地解决了一些生产问题,但由于没有做系统的基础工作,基础不牢,总的来说研究水平不高。

(3) “文化大革命”初期,由于众所周知的原因,疲劳研究工作与全国其他科研工作一样,陷于完全停顿的地步。1970 年航空工业部召开疲劳大会,与会 400 余人。会议认为科学合理地确定飞机的使用寿命已刻不容缓。

(4) 20 世纪 70 年代初,疲劳研究工作得到一些恢复,但由于“四人帮”的干扰,发展非常缓慢。

(5) 打倒“四人帮”以后,我国的疲劳强度研究工作开始蓬勃地开展,进展最快的是航空工业部门。

(6) 1978 年由第一机械工业部郑州机械研究所负责,机械工业系统在浙江莫干山召开了全国性的疲劳问题讨论会。1982 年召开了首届全国疲劳学术会议。以后,全国性的航空学会、金属学会、力学学会和机械工程学会等也单独或联合地召开了几次全国性的疲劳学术交流会。这些会议的召开,对我国疲劳强度工作的开展起了很大的推动作用。

(7) 现在,我国已有很多科研部门、高等院校和工厂开展了疲劳强度的研究工作。

① 在疲劳裂纹扩展速率方面的工作做得较多。

② 在疲劳试验数据处理方面取得了较大的成绩,有些工作已达到世界先进水平。在飞机结构定寿和延寿方面取得了举世瞩目的成就,保障了飞行安全。

③ 在疲劳机制,疲劳失效分析,典型零部件的疲劳强度、腐蚀疲劳、接触疲劳、低周疲劳和表面强化等方面都做了若干工作。

④ 总的来说,与发达国家相比还有一定差距。

在我国的飞机设计中,已经采用了抗疲劳设计和可靠性设计。而一般机械设计则基本上仍处于静强度设计阶段,只是在轴和曲轴等少数零件中使用过抗疲劳设计。

我国的机械设计部门较少使用抗疲劳设计的主要原因,除了机械设计人员对疲劳问题认识不足以外,主要是缺乏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。

有关单位在“六五”和“七五”期间对抗疲劳设计方法和抗疲劳设计基础问题进行了大量的实验研究工作,已经取得了某些常用国产机械材料的疲劳性能数据。并在这些实验研究工作的基础上,总结写出了《疲劳设计参考资料》一书和几本研究著作。这些工作为使用国产材料进行无限寿命设计和有限寿命设计打下了初步基础。但此后的系统实验研究没有继续下去。仅能找到的几本新参考书中,绝大多数系统实验内容也是以前研究的结果。近 20 年来人们在机械结构与材料的疲劳与可靠性的理论、分析方法等方面做了大量的研究,取得了许多可喜的成绩。

1.4 现代抗疲劳设计方法

1.4.1 现行的抗疲劳设计方法

现行的抗疲劳设计方法很多,大致可分为以下四种:

1) 名义应力疲劳设计法

名义应力疲劳设计法是以名义应力为基本设计参数,以 $S-N$ 曲线为主要设计依据的抗疲劳设计法。这种设计方法历史最悠久,可分为如下两种方法:

(1) 无限寿命设计法。要求零部件在无限长的使用期限内不破坏,主要的设计依据是疲劳极限,也就是 $S-N$ 曲线的水平部分。

(2) 有限寿命设计法。要求零部件在一定的使用期限内不破坏,其主要设计依据是 $S-N$ 曲线的斜线部分。这种设计方法常称为安全寿命设计法。

2) 局部应力应变分析法

局部应力应变分析法是在低周疲劳的基础上发展起来的一种疲劳寿命估算方法,其基本设计参数为应变集中处的局部应变和局部应力。

3) 损伤容限设计法

损伤容限设计法是在断裂力学基础上发展起来的一种抗疲劳设计方法。这种设计方法的思想与前两种设计方法不同。前两种设计方法都假定材料内没有初始缺陷,而这种设计方法则是以承认材料内有初始缺陷为依据,并把这种初始缺陷看作裂纹,根据材料在使用载荷下的裂纹扩展性质,估算其剩余寿命。这种方法的思路是,零部件内具有裂纹是不可避免也并不可怕的,只要正确估算其剩余寿命,采取适当的断裂控制措施,确保零部件在使用期限内能够安全使用,则这样的裂纹是允许存在的。

从原则上来说,上述三种抗疲劳设计方法都可以应用概率统计的方法进行疲劳可靠性设计,但目前用得最多和最成熟的是无限寿命设计法。

4) 疲劳可靠性设计法

疲劳可靠性设计法是概率统计方法和疲劳设计方法相结合的产物,因此也称为概率疲劳设计。这种设计方法考虑了载荷、材料疲劳性能和其他疲劳设计数据的分散性,可以把破坏概率限制在一定的范围之内,因此其设计精度比其他抗疲劳设计方法高。

1.4.2 抗疲劳设计的两个阶段

(1) 疲劳计算。根据材料的疲劳数据和零件的使用条件,对零件的尺寸进行计算,或在已经知道零件尺寸的条件下,对零件的疲劳强度或疲劳寿命进行校核。在机械设计中,常使用先由静强度计算初步定出零件尺寸,然后再进行疲劳强度校核的方法。