

秦大同 谢里阳 主编

MODERN
HANDBOOK
MECHANICAL
DESIGN

现代
机械设计手册

单行本

疲劳强度与可靠性设计



化学工业出版社

秦大同 谢里阳 主编

MODERN
HANDBOOK
OF MECHANICAL
DESIGN

现代
机械设计手册

单行本

疲劳强度与可靠性设计



化学工业出版社

·北京·

《现代机械设计手册》单行本共 16 个分册，涵盖了机械常规设计的所有内容。各分册分别为：《机械制图及精度设计》、《零部件结构设计与禁忌》、《常用机械工程材料》、《连接件与紧固件》、《轴及其连接件设计》、《轴承》、《机架、导轨及机械振动设计》、《弹簧设计》、《机构设计》、《机械传动设计》、《润滑与密封设计》、《液力传动设计》、《液压传动与控制设计》、《气压传动与控制设计》、《机电系统设计》、《疲劳强度与可靠性设计》。

本书为《疲劳强度与可靠性设计》，主要介绍了机械零部件疲劳强度与寿命、疲劳失效影响因素与提高疲劳强度的措施、高周疲劳强度设计方法、低周疲劳强度设计方法、裂纹扩展寿命估算方法、疲劳试验与数据处理；机械失效与可靠性、可靠性设计流程、可靠性数据及其统计分布、故障模式及危害度分析、故障树分析、机械系统可靠性设计、机构可靠性设计、零件静强度可靠性设计、零部件动强度可靠性设计、可靠性评价、可靠性试验与数据处理等。本书可作为机械设计人员和有关工程技术人员的工具书，也可供高等院校有关专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

疲劳强度与可靠性设计/秦大同，谢里阳主编. —北京：
化学工业出版社，2013.3
(现代机械设计手册：单行本)
ISBN 978-7-122-16325-7

I. ①疲… II. ①秦… ②谢… III. ①机械-疲劳强度-设计-技术手册②机械-可靠性-设计-技术手册 IV. ①TH114-62
②TH122-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 009831 号

责任编辑：张兴辉 王 焯 贾 娜
责任校对：关雅君

装帧设计：尹琳琳

出版发行：化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷：北京永鑫印刷有限责任公司

装 订：三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 20 字数 612 千字 2013 年 3 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询：010-64518888(传真：010-64519686) 售后服务：010-64518899

网 址：<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：58.00 元

版权所有 违者必究



《现代机械设计手册》单行本出版说明

《现代机械设计手册》是化学工业出版社顺应现代机械设计时代发展要求而精心策划的大型出版项目，旨在将传统设计和现代设计有机结合，即结构设计、传动设计和控制设计有机融合，力求体现“内容权威、凸现代代、实用可靠、简明便查”的特色。

《现代机械设计手册》自2011年3月出版以来，赢得了广大机械设计工作者的青睐和好评，荣获2011年全国优秀畅销书和2012年中国机械工业科学技术奖。广大读者在给予《现代机械设计手册》充分肯定的同时，也指出了《现代机械设计手册》装帧厚重，不便携带和翻阅。为了给读者提供篇幅较小、便携便查、定价低廉、针对性更强的实用性工具书，根据读者的反映和建议，我们在深入调研的基础上，推出《现代机械设计手册》单行本。

单行本保留了《现代机械设计手册》的优势和特色，结合机械设计人员工作细分的实际状况，从设计工作的实际出发，将原来的6卷33篇进行合并、删减，重新整合为16个分册，分别为：《机械制图及精度设计》、《零部件结构设计与禁忌》、《常用机械工程材料》、《连接件与紧固件》、《轴及其连接件设计》、《轴承》、《机架、导轨及机械振动设计》、《弹簧设计》、《机构设计》、《机械传动设计》、《润滑与密封设计》、《液力传动设计》、《液压传动与控制设计》、《气压传动与控制设计》、《机电系统设计》、《疲劳强度与可靠性设计》。

《现代机械设计手册》单行本，是为了适应机械设计行业发展和广大读者的需要而编辑出版的，将与《现代机械设计手册》（6卷本）一起，成为机械设计工作者、工程技术人员和广大读者的良师益友。

化学工业出版社



FORWARD 前言

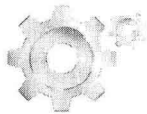
振兴装备制造业是中国由机械制造大国走向机械制造强国的必由之路。近年来,在国家大力发展装备制造业的政策号召和驱使下,我国的机械工业获得了巨大的发展,自主创新的能力不断加强,一批高技术、高性能、高精尖的现代化装备不断涌现,各种新材料、新工艺、新结构、新产品、新方法、新技术不断产生、发展并投入实际应用,大大提升了我国机械设计与制造的技术水平和国际竞争力。

但是,总体来看,我国的装备制造业仍处于较低的水平,距离世界发达国家还有很大的差距。机械设计是装备制造的龙头,是装备制造过程中的核心环节,因此全面提升我国机械设计人员的设计能力和技术水平非常关键。近年来,各种先进技术在机械行业的应用和发展,正在使机械设计的传统内涵发生巨大变化,这就给广大机械设计人员提出了更高的要求:一方面,当前先进的、现代化的机械装备都是机、电、液、光等技术的有机结合体,尤其是控制技术、信息技术、网络技术的发展和运用,使得设备越来越智能化、现代化,这已经成为现代机械设计的发展方向 and 趋势,如何实现这些技术的有机融合将至关重要;另一方面,各种现代的机械设计方法,已经突破前些年的理论研究阶段,正逐步应用于设计、生产实际,越来越发挥其重要的作用;还有,随着计算机硬件性能和软件水平的持续提高,计算机技术已全面深入地渗透到机械领域,各种设计技术、计算技术、设计工具在机械设计与制造中的广泛应用,使得设计人员的创造性思维得到前所未有的解放,设计手段极大丰富。

伴随着这些变化,传统的机械设计资料、机械设计工具书已逐渐呈现出诸多不足,不能完全满足新时期机械设计人员的实际工作需要。针对这种情况,化学工业出版社顺应时代发展的要求,在对高等院校、科研院所、制造企业的科研工作者和机械设计人员进行广泛调研的基础上,邀请众多国内机械设计界的知名专家合力编写了一套全新的、符合现代机械设计潮流的大型工具书——《现代机械设计手册》,这是一项与时俱进、有重大意义的创新工程,对推动我国机械设计技术的发展将发挥重要的作用。因其在机械设计领域重要的科学价值、实用价值和现实意义,《现代机械设计手册》荣获2009年国家出版基金资助。

化学工业出版社在机械设计大型工具书的出版方面历史悠久、经验丰富,深得广大机械设计人员和工程技术人员的信赖。为了扎实、高效地进行《现代机械设计手册》编写和出版工作,化学工业出版社组织召开了多次编写和审稿工作会议,充分考虑读者在手册使用上的特点和需求,确定了手册的整体构架、篇目设置、编写原则和风格,针对编写大纲进行了充分细致的研讨,对书稿内容的编、审工作进行了细致周密的安排,确保了整部手册的内容质量和工作进度。

《现代机械设计手册》的定位不同于一般技术手册,更不同于一般学习型的技术图书,



它是一部合理收集取舍、科学编排通用机械设计常用资料，符合现代机械设计潮流的综合性手册。具体来说，有以下六大特色。

1. 权威性 ★★★★★

《现代机械设计手册》阵容强大，编、审人员大都来自于设计、生产、教学和科研第一线，具有深厚的理论功底、丰富的设计实践经验。他们中很多人都是所属领域的知名专家，在业内有广泛的影响力和知名度，获得过多项科技进步奖、发明奖和技术专利，承担了许多机械领域国家重要的科研和攻关项目。这支专业、权威的编审队伍确保了手册准确、实用的内容质量。

2. 现代感 ★★★★★

追求现代感，体现现代机械设计气氛，满足时代的要求，是《现代机械设计手册》的基本宗旨。“现代”二字主要体现在：新标准、新技术、新结构、新工艺、新产品、现代的设计理念、现代的设计方法和现代的设计手段等几个方面。在体现现代元素的同时，也不是一味求新，而是收录目前已经普遍得到大家公认的、成熟的、实用的技术、方法、结构和产品。《现代机械设计手册》注意传统设计与现代设计的融合，注重机、电设计的有机结合，注重实用性的同时兼顾最新的研究应用成果。

在新技术方面，许多零部件的设计内容都兼顾了当前高新技术装备的设计，例如第13篇“带、链传动”介绍了金属带等新型的传动方式，第14篇“齿轮传动”收录了新型锥齿轮、塑料齿轮的设计和应用，第8篇“滑动轴承”收录了气体润滑轴承、箔片轴承、电磁轴承等新型轴承的设计和应用，第4篇“机械工程材料”收录了复合材料等目前已广泛应用的一些新型工程材料。

在现代设计手段的应用方面，例如机械零部件设计部分，注重现代设计方法（例如有限元分析、可靠性设计等）在机械零部件设计中的应用，并给出了相应的设计实例；第11篇“机构”篇中，平面机构的运动分析通过计算机编程来实现，并提供了相应的程序代码，大大提高了分析的准确性和设计效率；在产品的设计和选择方面，推荐了应用广泛的、节能的、可靠的产品。

在贯彻新标准方面，收录并合理编排了目前最新颁布的国家和行业标准。

3. 实用性 ★★★★★

即选编机械设计人员实际需要的内容。手册内容的选定、深度的把握、资料的取舍和章节的编排，都坚持从设计和生产的实际需要出发。例如第5卷机电控制设计中，完全站在机械设计人员的角度来写——注重产品如何选用，摒弃了控制的基本原理，突出机电系



统设计,控制元器件、传感器、电动机部分注重介绍主流产品的技术参数、性能、应用场合、选用原则,并给出了相应的设计选用实例;第6卷现代机械设计方法中摒弃或简化了繁琐的数学推导,突出了最终的计算结果,结合具体的算例将设计方法通俗地呈现出来,便于读者理解和掌握。

为方便广大读者的使用和查阅,手册在具体内容的表述上,采用以图表为主的编写风格。这样既增加了手册的信息容量,更重要的是方便了读者的使用和查阅,有利于提高设计人员的工作效率和设计速度。

4. 通用性 ★★★★★

本手册以通用的机械零部件和控制元器件设计、选用内容为主,不包括具体的专业机械设计的内容。主要包括机械设计基础资料、机械通用零部件设计、机械传动系统设计、液力液压和气压传动系统设计与控制、机构设计、机架设计、机械振动设计、光机电一体化系统设计以及控制设计等,能够满足各类机械设计人员的工作需求。

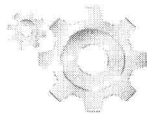
5. 准确性 ★★★★★

本手册尽量采用原始资料,公式、图表、数据准确,方法、工艺、技术成熟。所有产品、材料和工艺方面的标准均采用最新公布的标准资料,对于标准规范的编写,手册没有简单地照抄照搬,而是采取选用、摘录、合理编排的方式,强调其科学性和准确性,尽量避免差错和谬误。所有设计方法、计算公式、参数选用均经过长期检验,设计实例、各种算例均来自工程实际。手册中收录通用性强的、标准化程度高的产品,供设计人员在了解企业实际生产品种、规格尺寸、技术参数,以及产品质量和用户的实际反映后选用。

6. 全面性 ★★★★★

本手册一方面根据机械设计人员的需要,按照“基本、常用、重要、发展”的原则选取内容;另一方面兼顾了制造企业和大型设计院两大群体的设计特点,即制造企业侧重基础性的设计内容,而大型的设计院、工程公司侧重于产品的选用。本手册强调产品设计与工艺技术的紧密结合,倡导结构设计与造型设计的有机统一,重视工艺技术与选用材料的合理搭配,使产品设计更加全面和可行。

三年多来,经过广大编审人员和出版社的不懈努力,《现代机械设计手册》将以崭新的风貌和鲜明的时代气息展现在广大机械设计工作者面前。值此出版之际,谨向所有给过我们大力支持的单位和各界朋友们表示衷心的感谢!



CONTENTS 目录



上篇 疲劳强度设计

第 1 章 机械零部件疲劳强度与寿命

1.1 零部件疲劳失效与疲劳寿命	3
1.1.1 疲劳失效及其特点	3
1.1.2 机械零部件常见疲劳失效形式	3
1.1.3 疲劳设计准则	3
1.1.3.1 名义应力准则	3
1.1.3.2 局部应力应变准则	4
1.1.3.3 损伤容限设计准则	4
1.1.3.4 多轴疲劳准则	4
1.2 疲劳载荷	4
1.2.1 循环应力	4
1.2.2 循环计数法	5
1.2.3 载荷谱编制	6
1.2.3.1 累积频数曲线	7
1.2.3.2 载荷谱编制	7
1.2.3.3 应用举例	8
1.3 材料疲劳性能	8
1.4 疲劳损伤累积效应与法则	9
1.4.1 线性疲劳累积损伤 (Miner) 法则	9
1.4.2 相对 Miner 法则	10

第 2 章 疲劳失效影响因素与提高

疲劳强度的措施

2.1 应力集中效应	11
2.1.1 应力分布及材料对应力集中的敏感性	11
2.1.2 理论应力集中系数	12
2.1.2.1 带台肩圆角的机械零件的理论应力集中系数	13
2.1.2.2 带沟槽的机械零件的理论应力集中系数	17
2.1.2.3 开孔的机械零件的理论应力	

集中系数	22
2.1.2.4 其他典型零件的理论应力集中系数	25
2.1.3 有效应力集中系数	26
2.1.3.1 带台肩圆角的机械零件的有效应力集中系数	26
2.1.3.2 带沟槽的机械零件的有效应力集中系数	28
2.1.3.3 开孔的机械零件的有效应力集中系数	31
2.1.3.4 其他常用零件的有效应力集中系数	32
2.2 尺寸效应	36
2.3 表面状态效应	38
2.3.1 表面精度影响	38
2.3.2 表面强化效应	38
2.4 载荷影响	40
2.4.1 载荷类型影响	40
2.4.2 载荷频率影响	40
2.4.3 平均应力影响	41
2.5 环境因素	43
2.5.1 腐蚀环境	43
2.5.1.1 载荷频率的影响	43
2.5.1.2 腐蚀方式的影响	44
2.5.1.3 腐蚀介质的影响	44
2.5.1.4 结构尺寸与形状的影响	44
2.5.2 温度的影响	46
2.5.2.1 低温的影响	46
2.5.2.2 高温的影响	47
2.6 提高零件疲劳强度的方法	57
2.6.1 合理选材	57
2.6.2 材料改性	57
2.6.3 改进结构	57
2.6.4 表面强化	59
2.6.4.1 表面喷丸	59

2.6.4.2	表面辗压	60
2.6.4.3	内孔挤压	62
2.6.4.4	表面化学热处理	62
2.6.4.5	表面淬火	65
2.6.4.6	表面激光处理	65

第 3 章 高周疲劳强度设计方法

3.1	材料的常规疲劳性能数据	67
3.1.1	材料疲劳极限	67
3.1.2	材料的 S-N 曲线	74
3.1.3	疲劳安全系数	88
3.2	无限寿命设计	91
3.2.1	单向应力状态下的无限寿命设计	91
3.2.1.1	计算公式	91
3.2.1.2	设计实例	92
3.2.2	复杂应力状态下的无限寿命设计	93
3.2.3	连接件的疲劳寿命估算——应力严重系数法	93
3.3	有限寿命设计	95
3.3.1	计算公式	95
3.3.2	寿命估算	95
3.3.3	设计实例	95

第 4 章 低周疲劳强度设计方法

4.1	材料低周疲劳性能	97
4.2	循环应力-应变曲线	99
4.2.1	滞回线	99
4.2.2	循环硬化与循环软化	100
4.2.3	循环应力-应变曲线	100
4.3	应变-寿命曲线	103
4.3.1	应变-寿命方程	103
4.3.2	四点法求应变-寿命曲线	105
4.3.3	通用斜率法	106
4.4	低周疲劳的寿命估算	106
4.4.1	直接法	106
4.4.2	裂纹形成寿命估算方法	107
4.4.2.1	局部应力-应变分析	108
4.4.2.2	裂纹形成寿命估算方法	110
4.4.2.3	设计实例	111

第 5 章 裂纹扩展寿命估算方法

5.1	应力强度因子与断裂韧性	114
5.1.1	应力强度因子	114

5.1.2	断裂韧性	114
5.2	裂纹扩展特性与裂纹扩展速率	124
5.2.1	裂纹扩展过程	124
5.2.2	裂纹扩展门槛值 ΔK_{th}	125
5.2.3	裂纹扩展速率 da/dN	127
5.3	疲劳裂纹扩展寿命估算方法	138
5.4	算例	138
5.5	损伤容限设计	139
5.5.1	损伤容限设计概念	139
5.5.2	损伤容限设计的内容	140
5.5.2.1	确定关键件	140
5.5.2.2	材料选择	140
5.5.2.3	结构细节设计的控制	141
5.5.3	结构设计	141
5.5.4	缺陷假设	142
5.5.4.1	初始裂纹尺寸	142
5.5.4.2	连续损伤假设	142
5.5.4.3	剩余结构损伤	143
5.5.4.4	使用中检查后损伤假设	143
5.5.5	剩余强度	143
5.5.5.1	剩余强度概念	143
5.5.5.2	多途径传力结构剩余强度曲线	144
5.5.6	损伤检查	146
5.5.6.1	可检查度	147
5.5.6.2	检查能力评估方法	147
5.5.6.3	检查间隔	149

第 6 章 疲劳实验与数据处理

6.1	疲劳试验机	152
6.1.1	疲劳试验机的种类	152
6.1.2	疲劳试验加载方式	152
6.1.3	疲劳试验控制方式	152
6.1.4	疲劳试验数据采集	153
6.2	疲劳试样及其制备	153
6.2.1	试样	153
6.2.1.1	光滑试样	153
6.2.1.2	缺口试验	154
6.2.1.3	低周疲劳试样	154
6.2.1.4	疲劳裂纹扩展试样	155
6.2.2	试样制备	156
6.2.2.1	取样	156
6.2.2.2	机械加工	156
6.2.2.3	热处理	157
6.2.2.4	测量、探伤与储存	157

6.3 疲劳试验方法	157	6.4 疲劳试验数据处理	163
6.3.1 S-N 曲线试验	157	6.4.1 可疑观测值的取舍	163
6.3.1.1 单点试验法	157	6.4.2 S-N 曲线拟合	164
6.3.1.2 成组试验法	158	6.4.3 ϵ -N 曲线拟合	165
6.3.2 疲劳极限试验	159	6.4.4 应力-应变曲线拟合	166
6.3.3 ϵ -N 曲线试验	160	6.4.5 da/dN 曲线拟合	166
6.3.4 应力-应变曲线试验	161	6.4.6 断裂韧性试验数据处理	168
6.3.5 裂纹扩展速率 (da/dN 曲线) 试验	162	参考文献	170
6.3.6 断裂韧性试验	162		



下篇 可靠性设计

第 1 章 机械失效与可靠性

1.1 机械零部件的典型失效形式	173
1.1.1 静载失效	173
1.1.2 疲劳失效	173
1.1.3 腐蚀失效	173
1.1.4 磨损失效	174
1.1.5 冲击失效	174
1.1.6 振动失效	174
1.2 机械零部件的力学性能与失效影响 因素	174
1.2.1 静载拉伸特性	174
1.2.2 静强度性能	175
1.2.3 疲劳性能	176
1.3 安全设计准则	177
1.3.1 静强度准则	177
1.3.2 疲劳强度准则	177
1.3.3 断裂准则	178
1.3.4 磨损设计准则	178
1.3.5 振动稳定性准则	179
1.4 可靠性及其指标	179
1.4.1 产品质量	179
1.4.2 产品的可靠性	179
1.4.3 产品可靠性与全寿命周期费用	180
1.4.4 寿命均值与方差	180
1.4.5 平均无故障工作时间	181
1.4.6 产品寿命分布与可靠度	181
1.4.7 失效率	181
1.4.8 可靠寿命与特征寿命	183
1.4.9 维修度	183

1.4.10 有效度	183
------------------	-----

第 2 章 可靠性设计流程

2.1 可靠性目标及其分解	185
2.2 可靠性设计流程	185
2.3 设计各阶段的可靠性工作内容	186
2.3.1 方案设计阶段	186
2.3.2 系统设计阶段	187
2.3.3 详细设计阶段	187
2.3.4 设计评审阶段	187

第 3 章 可靠性数据及其统计分布

3.1 可靠性数据采集	188
3.1.1 可靠性设计与评估数据要求	188
3.1.2 可靠性数据来源与采集方法	188
3.2 可靠性数据统计内容及方法	189
3.2.1 可靠性数据统计内容	189
3.2.2 可靠性数据统计分析基本方法	189
3.3 载荷分布与强度分布	190
3.3.1 正态分布	190
3.3.2 极值分布	191
3.3.3 次序统计量及其分布	192
3.4 载荷作用次数分布及故障次数分布	193
3.4.1 二项分布	193
3.4.2 泊松 (Poisson) 分布	193
3.5 寿命分布	193
3.5.1 指数分布	193
3.5.2 威布尔 (Weibull) 分布	194
3.5.3 对数正态分布	196

第 4 章 故障模式、效应及危害度分析

4.1 基本概念与方法步骤	197
4.1.1 基本概念	197
4.1.2 FMECA 的层次与分析过程	198
4.1.3 FMECA 的实施步骤	198
4.2 危害度分析	200
4.2.1 定性分析	200
4.2.2 定量分析	201
4.3 FMECA 应用示例	202

第 5 章 故障树分析

5.1 基本概念与基本符号	212
5.1.1 故障树基本概念	212
5.1.2 故障树基本符号	213
5.1.3 割集与路集	214
5.2 故障树建树与分析方法	214
5.2.1 建立故障树的方法与步骤	214
5.2.2 故障树定性分析	215
5.2.3 故障树定量分析	217
5.3 故障树分析实例	219

第 6 章 机械系统可靠性设计

6.1 系统可靠性设计的内容	225
6.2 系统可靠性模型	225
6.2.1 串联系统可靠性模型	225
6.2.1.1 独立失效系统可靠性模型	225
6.2.1.2 一般串联系统可靠性模型	226
6.2.2 并联系统可靠性模型	227
6.2.2.1 独立失效系统可靠性模型	227
6.2.2.2 一般并联系统可靠性模型	227
6.2.3 串-并联系统可靠性模型	228
6.2.4 并-串联系统可靠性模型	228
6.2.5 表决系统可靠性模型	228
6.2.6 储备系统可靠性模型	229
6.2.7 复杂系统可靠性分析方法	230
6.3 参数化形式的系统可靠性模型	231
6.4 系统可靠性预测	231
6.4.1 数学模型法	232
6.4.2 上下限法	232
6.4.3 组合预测	233
6.5 可靠性分配方法	233
6.5.1 等分配法	234

6.5.2 再分配法	234
6.5.3 比例分配法	234
6.5.4 综合评分分配法	236
6.5.5 动态规划分配法	236
6.5.5.1 串联系统	237
6.5.5.2 并联系统	237
6.6 可靠性预测实例	238

第 7 章 机构可靠性设计

7.1 机构可靠性模型及评价指标	241
7.1.1 机构可靠性建模方法	241
7.1.2 机构工作过程分解	242
7.1.3 功能可靠性	242
7.2 曲柄滑块机构运动可靠性	242
7.2.1 机构运动误差	242
7.2.2 理想状态下机构运动关系	243
7.2.3 机构可靠性模型	243
7.2.3.1 考虑尺寸误差的计算模型	243
7.2.3.2 考虑运动副间隙误差的 计算模型	244

第 8 章 零件静强度可靠性设计

8.1 基本原理	247
8.1.1 安全系数及可靠性参数	247
8.1.2 可靠性设计计算基本原理	248
8.2 应力分布和强度分布影响因素	249
8.2.1 载荷	249
8.2.2 材料性能	249
8.2.3 制造工艺	249
8.2.4 几何形状及尺寸	249
8.3 随机变量函数的均值和标准差计算 方法	249
8.3.1 计算分布参数的矩方法	249
8.3.2 常用随机变量函数均值与标准差 公式	250
8.4 零件可靠度计算的应力-强度干涉模型	250
8.4.1 应力-强度干涉模型	250
8.4.1.1 基本概念	250
8.4.1.2 零件可靠度基本表达式	251
8.4.2 载荷多次作用下的可靠性模型	251
8.5 典型应力/强度分布的零件可靠度计算	253
8.5.1 应力与强度均为正态分布时可靠度 计算	253
8.5.2 应力与强度均服从对数正态分布时	

可靠度计算	253
8.6 静强度可靠性设计	254
8.6.1 零件静强度可靠性设计的主要内容与 步骤	254
8.6.2 静强度可靠性设计举例	255
8.7 断裂可靠性设计	255
8.7.1 断裂力学的基本概念	255
8.7.2 断裂可靠性设计	256
8.8 可靠性设计计算的蒙特卡罗方法	257
8.8.1 蒙特卡罗法求解可靠度的原理	257
8.8.2 随机数的产生	257
8.8.3 随机变量抽样方法	258
8.8.3.1 逆变换法	258
8.8.3.2 舍选抽样法	259
8.8.3.3 变换抽样法	260
8.8.4 重要抽样法	261
8.8.5 离散随机变量抽样	261
8.8.6 应用举例——发动机轮盘可靠性 仿真	261
8.9 典型机械零件可靠性设计举例	264
8.9.1 螺纹连接可靠性设计	264
8.9.2 过盈连接的可靠性设计	266

第 9 章 零部件动强度可靠性设计

9.1 疲劳强度可靠性设计	268
9.1.1 疲劳可靠性设计基本原理	268
9.1.2 概率疲劳等寿命图	268
9.1.3 疲劳强度可靠性设计计算	269
9.2 疲劳强度可靠性设计的递推法	271
9.3 随机恒幅循环载荷疲劳可靠度的统计 平均算法	271
9.3.1 疲劳可靠度计算的载荷统计加权 平均模型	271
9.3.2 疲劳寿命分布与循环应力水平之间 的关系	272
9.4 磨损可靠性	272
9.4.1 磨损的基本概念	272
9.4.2 给定寿命下的磨损可靠度计算	273
9.4.3 给定磨损可靠度时的可靠寿命 计算	273

第 10 章 可靠性评价

10.1 零件可靠性评价	275
--------------------	-----

10.1.1 复杂载荷工况可靠性评价	275
10.1.2 强度退化规律	275
10.1.3 存在强度退化时的可靠性模型	276
10.1.4 离散化的可靠性模型	276
10.2 系统可靠性评价	278
10.2.1 系统可靠性评价方法	278
10.2.2 行星齿轮系可靠度计算	278

第 11 章 可靠性试验与数据处理

11.1 可靠性试验	280
11.1.1 可靠性试验类型	280
11.1.2 可靠性试验数据类型	280
11.2 可靠性数据分布类型检验	281
11.2.1 χ^2 检验法	281
11.2.2 K-S 检验法	282
11.2.3 回归分析检验法	283
11.3 参数估计	284
11.3.1 矩估计	284
11.3.2 极大似然估计	285
11.4 指数分布假设检验与参数估计	285
11.4.1 拟合性检验	285
11.4.2 参数估计	286
11.5 正态分布统计检验与参数估计	287
11.5.1 拟合性检验	287
11.5.2 正态分布参数估计	288

附 录

附录 I 可靠性标准	290
I-1 中国国家可靠性标准	290
I-2 中国电子行业可靠性标准	292
I-3 中国机械行业可靠性标准	293
附录 II 概率分布表	295
II-1 标准正态分布表	295
II-2 χ^2 分布表	296
II-3 t 分布表	298
II-4 F 分布表	299
II-5 Γ 函数表	304

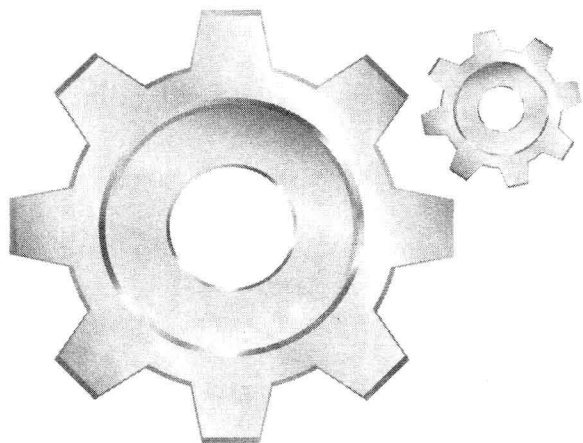
参考文献	306
------------	-----

上 篇

疲劳强度设计



篇 主 编 谢里阳
撰 稿 谢里阳 王 雷
审 稿 赵少汴



第1章 机械零部件疲劳强度与寿命

1.1 零部件疲劳失效与疲劳寿命

1.1.1 疲劳失效及其特点

工程装备中多数机械零部件承受的工作载荷都是随时间而变化的波动载荷。结构零部件在循环载荷作用下,在某个或某些高应力部位产生损伤并逐渐累积,导致性能退化,裂纹萌生、扩展直到完全断裂的失效形式,称为疲劳失效。由于疲劳这种失效机理存在,机械设备及其零部件就有了疲劳寿命的概念,或使用寿命问题。一般规律是,循环应力水平越高,承力零部件的疲劳寿命就越短。

疲劳失效与静强度失效有本质的区别。静强度失效是由于零件的危险截面上的应力大于其抗拉强度导致断裂失效,或大于屈服极限产生过大的残余形变导致失效;疲劳失效是由于零件局部应力最大处在循环应力作用下形成微裂纹,然后逐渐扩展为宏观裂纹,宏观裂纹再继续扩展而最终导致断裂。疲劳失效有如下特点:

1) 低应力性。在循环应力的最大值远低于材料的抗拉强度 σ_b ,甚至远低于材料屈服强度 σ_s 的情况下,疲劳失效就可能发生。

2) 突发性。不论是脆性材料还是塑性材料,其疲劳失效在宏观上均表现为无明显塑性变形的脆性突然断裂,即疲劳失效一般表现为低应力脆断。

3) 时间性。静强度失效是在一次最大载荷作用下发生的失效;疲劳失效是在循环应力的多次反复作用下损伤逐渐累积产生的,因而要经历一定的时间,甚至很长的时间之后才会发生。

4) 敏感性。静强度失效的抗力主要取决于材料本身,而疲劳失效的抗力对零件尺寸、几何形状、表面状态、使用条件以及环境介质等都很敏感。

5) 疲劳断口。疲劳失效的宏观断口上,存在疲劳源(比较光滑的疲劳裂纹形核区)、疲劳裂纹扩展区(平滑、波纹状)和瞬断区(粗粒状或纤维状)。

1.1.2 机械零部件常见疲劳失效形式

机械零部件的疲劳失效有高周疲劳、低周疲劳、高温疲劳、热疲劳、腐蚀疲劳等疲劳失效形式。

1) 高周疲劳。结构零部件在低于其屈服强度的

循环应力作用下,一般经过 $10^4 \sim 10^5$ 次以上的应力循环产生的疲劳失效。高周疲劳应力较低,材料处于弹性范围内,也称应力疲劳,它是机械结构与零部件最常见的疲劳形式。

2) 低周疲劳。结构零部件在接近或超过其屈服强度的循环应力作用下,在低于 $10^4 \sim 10^5$ 次载荷循环下产生的疲劳失效。由于其应力超过了弹性极限,产生较大塑性变形,损伤控制参量是应变,也称为应变疲劳。

3) 高温疲劳。在高温环境下,零件承受循环载荷发生的疲劳失效。高温是指约在材料熔点 T_m 的50%以上(T_m 以绝对温度表示)或再结晶温度以上的温度水平。高温疲劳一般是疲劳与蠕变共同作用的结果。

4) 热疲劳。由循环变化的温度引起结构零部件中的应力或应变循环变化,这种循环应力与循环应变产生的疲劳称为热疲劳。

5) 腐蚀疲劳。在腐蚀性介质(如酸、碱、海水、淡水、活性气体等)和循环载荷联合作用下产生的疲劳。

1.1.3 疲劳设计准则

结构零部件在较高的循环应力作用下服役,且在使用寿命要求时,需要进行抗疲劳设计。疲劳设计方法有名义应力法、局部应力应变法、损伤容限设计法(断裂力学方法)等。

1.1.3.1 名义应力准则

名义应力准则是以零部件上最大的名义应力值为控制参数进行疲劳强度设计的准则,适用于高周疲劳强度设计。具体做法是,从材料的S-N曲线出发,以零部件上最高应力点的名义应力值为载荷参数,计入有效应力集中系数 K_σ 、零件尺寸系数 ϵ 、表面系数 β 和平均应力系数 ψ_σ 等影响因素,得到零件的S-N曲线,依此进行零部件疲劳强度设计的方法。

当S-N曲线的纵坐标 σ 和横坐标 N 都取对数时,一般有如图1-1所示的以 P 为交点的两条直线段组成的折线形S-N曲线。对于钢材,交点的寿命 N_0 一般在 10^7 左右。该寿命对应的循环应力水平称为疲劳极限。

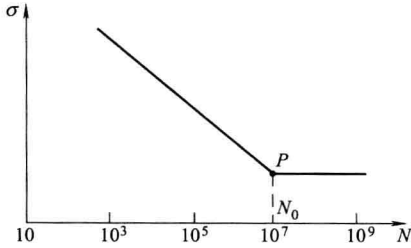


图 1-1 取对数坐标的 $\sigma-N$ 曲线

根据平行于横轴的直线（疲劳极限）进行的设计称为无限寿命设计。根据斜线进行的设计称为有限寿命设计。名义应力法通常也称为常规疲劳设计法。详见本篇第 3 章。

1.1.3.2 局部应力应变准则

在应力水平较高的场合，零部件局部最大应力处可能会出现塑性屈服现象。这时，只用应力参量已不能很好地表述零部件的疲劳特性。以零部件应力集中处的局部应力、应变为基本设计参数的疲劳强度设计准则，称为局部应力应变准则。零部件的破坏都是从应力集中部位或应力最高处开始的，应力集中处的塑性变形是疲劳裂纹形成和扩展的主要控制参量，因此局部最大应变决定了零部件的疲劳寿命。

根据相同的循环应变产生相同疲劳损伤的原则，可以根据光滑试样的应变-寿命曲线估算零部件危险部位的损伤及寿命，从而得到零部件的疲劳裂纹形成寿命。详见本篇第 4 章。

1.1.3.3 损伤容限设计准则

机械零部件，尤其是大型零部件，往往存在一定尺寸的初始缺陷甚至初始裂纹。损伤容限设计准则是在承认零部件存在初始裂纹的前提下，应用断裂力学方法来估算其剩余寿命（裂纹扩展寿命），保证在使用期内裂纹不至于扩展到引起破坏的程度，即保证有裂纹的零部件在服役期内的使用安全。详见本篇第 5 章。

1.1.3.4 多轴疲劳准则

多轴疲劳是指多向应力或应变作用下的疲劳。多轴疲劳损伤发生在多轴循环加载条件下，加载过程中有两个或三个应力（或应变）分量独立地随时间发生周期性变化。这些应力（应变）分量的变化可以是同相位的、按比例，也可以是非同相的、非比例的。

服役中的各种航空航天飞行器、压力容器、核电站、发电厂以及交通运输工具中的一些主要零件通常

是承受复杂的多轴比例与非比例交互循环载荷的作用。早期处理复杂应力状态下的多轴疲劳问题时，常将多轴问题利用静强度理论等效成单轴状态，然后利用单轴疲劳理论处理复杂的多轴疲劳问题。这样的处理方法在处理比例加载下的多轴疲劳问题是可行的。但对于非比例多轴加载问题，由于非比例加载下的疲劳行为完全不同于单轴或比例多轴疲劳加载下的特性，尤其在非比例变幅加载下，应用传统的单轴疲劳理论来预测其疲劳损伤十分困难。

近年来，预测多轴疲劳寿命的临界平面法得到较快的发展和应。该方法基于断裂模型及裂纹萌生机理，认为裂纹发生在某一特定平面上，疲劳损伤的累积、寿命预测都在该平面上进行，具有一定的物理意义。临界平面法首先要找到最大损伤平面（临界平面），然后将其面上的剪切和法向应力（应变）进行各种组合来构造多轴疲劳损伤参量，建立多轴疲劳寿命预测方程。确定临界平面的方法有多种，根据不同的损伤参量可以得到不同的判断准则。

1.2 疲劳载荷

载荷可分为两大类，即静载荷和动载荷。动载荷又分为周期载荷、非周期载荷和冲击载荷。周期载荷和非周期载荷统称为疲劳载荷。

一般机器和零件承受的载荷，大都是一个连续的随机载荷。承受随机载荷的零件，在进行疲劳强度计算、寿命估算和疲劳试验之前，必须先确定其载荷谱。在机器工作时直接测得的载荷-时间历程称为工作谱或使用谱。由于随机载荷的不确定性，一般需要对工作谱进行统计处理。经过处理后的载荷-时间历程称为载荷谱，能很好地反映零件的疲劳载荷特征。将实测的载荷-时间历程处理成具有代表性的典型载荷谱的过程称为编谱，编谱的重要环节是应用统计理论来处理所获得的实测子样。

统计处理随机载荷历程的方法主要有：循环计数法和功率谱法。循环计数法是从载荷-时间历程中确定出不同载荷参量值及其出现的次数。功率谱法是借助傅氏变换，将连续变化的随机载荷分解为无限多个频率成分，得出其功率谱密度函数。

对于疲劳强度与疲劳寿命来说，最主要的是载荷幅值的变化情况，故广泛使用循环计数法。

1.2.1 循环应力

随时间周期性变化的应力称为循环应力。最简单的循环应力为恒幅循环应力。图 1-2 是四种循环特征不同的应力变化规律。

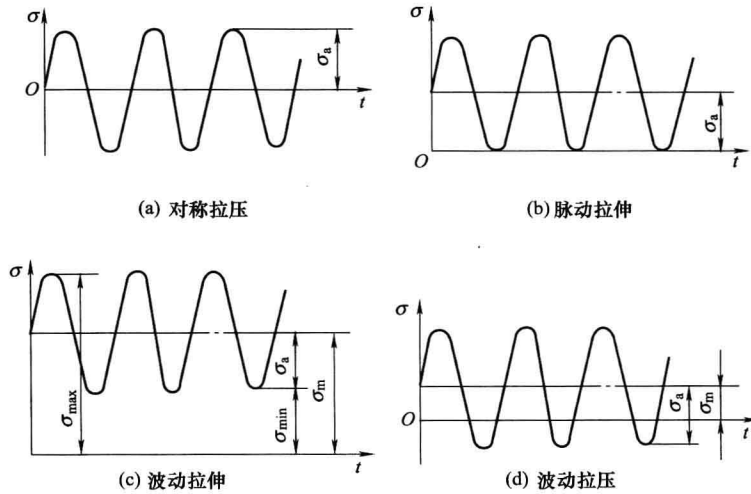


图 1-2 恒幅循环应力的种类

图中 σ 为正应力, t 为时间。各应力分量:

σ_{\max} ——最大应力, 即应力循环中具有最大代数值的应力;

σ_{\min} ——最小应力, 即应力循环中具有最小代数值的应力;

σ_m ——平均应力, 即应力循环中最大应力和最小应力的代数平均值;

σ_a ——应力幅, 即应力循环中最大应力和最小应力代数差的一半。应力符号规定拉应力为正, 压应力为负。

平均应力 σ_m 、应力幅 σ_a 、最大应力 σ_{\max} 、最小应力 σ_{\min} 之间有如下关系

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (1-1)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (1-2)$$

$$\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a \quad (1-3)$$

$$\sigma_{\min} = \sigma_m - \sigma_a \quad (1-4)$$

应力每一周期性变化称为一个应力循环。定义应力比 r 为

$$r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (1-5)$$

对于对称循环, $r = -1$; 对于脉动循环, $r = 0$; 静应力可以看作应力幅为零的循环应力, 此时 $r = +1$ 。应力循环的应力比在 $-1 \leq r \leq +1$ 范围内取值。

一种循环应力状态, 一般可用 σ_{\max} 、 σ_{\min} 、 σ_m 、 σ_a 和 r 五个参数中的任意两个来确定。如果作用的应力是切应力时, 各应力分量之间的关系有

$$\tau_m = \frac{\tau_{\max} + \tau_{\min}}{2} \quad (1-6)$$

$$\tau_a = \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{2} \quad (1-7)$$

$$\tau_{\max} = \tau_m + \tau_a \quad (1-8)$$

$$\tau_{\min} = \tau_m - \tau_a \quad (1-9)$$

1.2.2 循环计数法

把一个随机的载荷-时间历程处理成一系列的全循环或半循环的过程称为循环计数法。循环计数法可分成两大类: 单参数计数法和双参数计数法。单参数计数法只记录载荷谱中的一个参量, 如峰值或范围(变程), 不能给出载荷循环的全部信息。属于这种计数方法的有: 峰值计数法, 穿级计数法和范围计数法等。双参数计数法可以记录载荷循环中的两个参量。由于载荷循环中只有两个独立参量, 因此双参数计数法可以记录载荷循环的全部信息。属于这种计数方法的有: 范围对数法, 跑道计数法和雨流计数法等。使用最广泛的是雨流计数法。该法在计数原理上有一定的力学依据, 易于实现自动化、程序化。

雨流法的计数原理如下:

如图 1-3 所示。对一个实际的载荷时间历程, 取一垂直向下的纵坐标轴表示时间, 横坐标轴表示载荷。这样载荷-时间历程形同一座宝塔, 雨点以峰值、谷值为起点向下流动, 根据雨点向下流动的迹线, 确定载荷循环, 这就是雨流法(或称塔顶法)名称的由来。其计数规则如下。

1) 雨流的起点依次在每个峰(谷)值的内侧开始。

2) 雨流在下一个峰(谷)值处落下, 直到对面有一个比开始时的峰(谷)值更大(更小)值为止。