



“十三五”国家重点出版物出版规划项目

现代 机械设计手册

MODERN
HANDBOOK
OF MECHANICAL
DESIGN

第6卷

第二版

秦大同 谢里阳 主编



化学工业出版社

“十三五”国家重点出版物
出版规划项目

现代机械设计手册

第二版

第 6 卷

秦大同 谢里阳 主编

MODERN
HANDBOOK
OF MECHANICAL
DESIGN

 化学工业出版社

· 北京 ·

《现代机械设计手册》第二版是顺应“中国制造 2025”智能装备设计新要求、技术先进、数据可靠的一部现代化的机械设计大型工具书，涵盖现代机械零部件及传动设计、智能装备及控制设计、现代机械设计方法三部分内容。第二版重点加强机械智能化产品设计（3D 打印、智能零部件、节能元器件）、智能装备（机器人及智能化装备）控制及系统设计、现代设计方法及应用等内容。

《现代机械设计手册》共 6 卷，其中第 1 卷包括机械设计基础资料，零件结构设计，机械制图和几何精度设计，机械工程材料，连接件与紧固件；第 2 卷包括轴和联轴器，滚动轴承，滑动轴承，机架、箱体及导轨，弹簧，机构，机械零部件设计禁忌，带传动、链传动；第 3 卷包括齿轮传动，减速器、变速器，离合器、制动器，润滑，密封；第 4 卷包括液力传动，液压传动与控制，气压传动与控制；第 5 卷包括智能装备系统设计，工业机器人系统设计，传感器，控制元器件和控制单元，电动机；第 6 卷包括机械振动与噪声，疲劳强度设计，可靠性设计，优化设计，逆向设计，数字化设计，人机工程与产品造型设计，创新设计，绿色设计。

新版手册从新时代机械设计人员的实际需求出发，追求现代感，兼顾实用性、通用性、准确性，涵盖了各种常规和通用的机械设计技术资料，贯彻了最新的国家和行业标准，推荐了国内外先进、智能、节能、通用的产品，体现了便查易用的编写风格。

《现代机械设计手册》可作为机械装备研发、设计技术人员和有关工程技术人员的工具书，也可供高等院校相关专业师生参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

现代机械设计手册. 第 6 卷/秦大同, 谢里阳主编. —2
版. —北京: 化学工业出版社, 2019. 3
ISBN 978-7-122-33384-1

I. ①现… II. ①秦… ②谢… III. ①机械设计-手册
IV. ①TH122-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 267806 号

责任编辑: 张兴辉 王焯 贾娜 邢涛 项激 曾越 金林茹
责任校对: 王素芹

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 装: 中煤 (北京) 印务有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 99½ 字数 3453 千字 2019 年 3 月北京第 2 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 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: 198.00 元

版权所有 违者必究

《现代机械设计手册》

第二卷 目



第 1 卷

- 第1篇 机械设计基础资料
- 第2篇 零件结构设计
- 第3篇 机械制图和几何精度设计
- 第4篇 机械工程材料
- 第5篇 连接件与紧固件

第 2 卷

- 第6篇 轴和联轴器
- 第7篇 滚动轴承
- 第8篇 滑动轴承
- 第9篇 机架、箱体及导轨
- 第10篇 弹簧
- 第11篇 机构
- 第12篇 机械零部件设计禁忌
- 第13篇 带传动、链传动

第 3 卷

- 第14篇 齿轮传动
- 第15篇 减速器、变速器
- 第16篇 离合器、制动器
- 第17篇 润滑
- 第18篇 密封

第 4 卷

- 第19篇 液力传动
- 第20篇 液压传动与控制
- 第21篇 气压传动与控制

第 5 卷

- 第22篇 智能装备系统设计
- 第23篇 工业机器人系统设计
- 第24篇 传感器
- 第25篇 控制元器件和控制单元
- 第26篇 电动机

第 6 卷

- 第27篇 机械振动与噪声
- 第28篇 疲劳强度设计
- 第29篇 可靠性设计
- 第30篇 优化设计
- 第31篇 逆向设计
- 第32篇 数字化设计
- 第33篇 人机工程与产品造型设计
- 第34篇 创新设计
- 第35篇 绿色设计

撰稿和审稿人员

手册主编

秦大同 (重庆大学)

谢里阳 (东北大学)

卷	篇	篇主编	撰稿人	审稿人
第 1 卷	第 1 篇	化学工业出版社组织编写	张红燕、刘梅、李翔、董敏	王建军
	第 2 篇	翟文杰(哈尔滨工业大学)	翟文杰	王连明
	第 3 篇	郑鹏(郑州大学) 方东阳(郑州大学)	郑鹏、方东阳、张琳娜、赵凤霞、 焦利敏、职占新、刘栋梁、吴江昊、 王敏、尹浩田、辛传福、武钰瑾	张爱梅
	第 4 篇	方昆凡(东北大学)	方昆凡、单宝峰、石加联、梁京、 夏永发、陈述平、崔虹雯、黄英	谭建荣
	第 5 篇	王三民(西北工业大学)	王三民、袁茹、高举、李洲洋	陈国定
第 2 卷	第 6 篇	吴立言(西北工业大学)	刘岚、李洲洋、吴立言	陈国定
	第 7 篇	郭宝霞 (洛阳轴承研究所有限公司)	郭宝霞、周宇、勇泰芳、张小玲、 秦汉涛、陈庆熙、张松	杨晓蔚
	第 8 篇	徐华(西安交通大学)	徐华、诸文俊、谢振宇、郭宝霞、 冯凯、张胜伦	朱均
	第 9 篇	王瑜(哈尔滨工业大学) 翟文杰(哈尔滨工业大学)	王瑜、翟文杰、郭宝霞	王连明
	第 10 篇	姜洪源(哈尔滨工业大学) 敖宏瑞(哈尔滨工业大学)	姜洪源、敖宏瑞、李胜波、王廷剑	陈照波
	第 11 篇	李瑰贤(哈尔滨工业大学) 郝振洁(陆军军事交通学院)	李瑰贤、郝振洁、孙开元、张丽杰、 徐来春、马超、李改玲、孙爱丽、 王文照、刘雅倩、赵永强	李瑰贤 孙开元
	第 12 篇	向敬忠(哈尔滨理工大学)	向敬忠、潘承怡、宋欣	于惠力 向敬忠
	第 13 篇	姜洪源(哈尔滨工业大学) 闫辉(哈尔滨工业大学)	姜洪源、闫辉	曲建俊 郭建华
第 3 卷	第 14 篇	秦大同(重庆大学) 陈兵奎(重庆大学)	张光辉、郭晓东、林腾蛟、林超、 秦大同、陈兵奎、石万凯、邓效忠、 罗文军、廖映华、张卫青、欧阳志喜	李钊刚
	第 15 篇	秦大同(重庆大学) 龚仲华(常州机电职业技术学院)	孙冬野、刘振军、秦大同、廖映华、 龚仲华	吴晓铃
	第 16 篇	秦大同(重庆大学)	秦大同、朱春梅、田兴林	孔庆堂
	第 17 篇	吴晓铃(郑州大学)	吴晓铃、刘杰、吴启东	陈大融
	第 18 篇	郝木明(中国石油大学)	郝木明、孙鑫晖、王淮维、刘馥瑜	陈大融

卷	篇	篇主编	撰稿人	审稿人
第4卷	第19篇	马文星(吉林大学)	马文星、杨乃乔、王宏卫、邹铁汉、宋斌、刘春宝、卢秀泉、王松林、宋春涛、曹晓宇、熊以恒、潘志勇、邓洪超、才委、何延东、赵紫苓、姜丽英、侯继海、王佳欣、魏亚宵	方佳雨 刘春朝 刘伟辉
	第20篇	高殿荣(燕山大学)	刘涛、吴晓明、张伟、张齐生、赵静一、高殿荣	高殿荣 姚晓先 吴晓明
	第21篇	吴晓明(燕山大学)	吴晓明、包钢、杨庆俊、向东	姚晓先
第5卷	第22篇	孟新宇(沈阳工业大学) 郝长中(沈阳理工大学)	孟新宇、刘慧芳、杨国哲、王剑、勾轶、谷艳玲、郝长中、王铁军、吴东生、杨青、高启扬	于国安
	第23篇	吴成东(东北大学) 姜杨(东北大学)	吴成东、姜杨、房立金、王斐、迟剑宁	贾子熙 丁其川
	第24篇	孙红春(东北大学)	王明赞、李佳、孙红春、胡智勇、叶大勇	林贵瑜
	第25篇	王洁(沈阳工业大学)	王洁、王野牧、谷艳玲、杨国哲、孙洪林、张靖	徐方
	第26篇	时献江(哈尔滨理工大学)	时献江、杜海艳、王昕、柴林杰	邵俊鹏
第6卷	第27篇	华宏星(上海交通大学)	华宏星、陈锋、谌勇、董兴建、黄修长、黄煜、焦素娟、蒋伟康、雷敏、李富才、刘树英、龙新华、饶柱石、塔娜、吴海军、严莉、张文明、张志谊	胡宗武 塔娜
	第28篇	谢里阳(东北大学)	谢里阳、王雷	赵少汴
	第29篇	谢里阳(东北大学)	谢里阳、钱文学、吴宁祥	孙志礼
	第30篇	何雪滋(东北大学)	何雪滋、张翔、张瑞金	颜云辉
	第31篇	盛忠起(东北大学) 朱建宁(大连交通大学)	盛忠起、谢华龙、许之伟、李飞、朱建宁、尤学文、韩朝建、徐超、葛亦凡、李照祥	卢碧红 隋天中
	第32篇	李卫民(辽宁工业大学)	李卫民、刘淑芬、赵文川、刘阳、刘志强、唐兆峰、宋小龙、于晓丹、邢颖	刘永贤
	第33篇	曾红(辽宁工业大学)	曾红、陈明	刘永贤
	第34篇	赵新军(东北大学)	赵新军、钟莹、孙晓枫	李赤泉
	第35篇	张秀芬(内蒙古工业大学)	张秀芬、蔚刚	胡志勇



《现代机械设计手册》第一版自 2011 年 3 月出版以来，赢得了机械设计人员、工程技术人员和高等院校专业师生广泛的青睐和好评，荣获了 2011 年全国优秀畅销书（科技类）。同时，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》还荣获 2009 年国家出版基金资助和 2012 年中国机械工业科学技术奖。

《现代机械设计手册》第一版出版距今已经 8 年，在这期间，我国的装备制造业发生了许多重大的变化，尤其是 2015 年国家部署并颁布了实现中国制造业发展的十年行动纲领——中国制造 2025，发布了针对“中国制造 2025”的五大“工程实施指南”，为机械制造业的未来发展指明了方向。在国家政策号召和驱使下，我国的机械工业获得了快速的发展，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。《现代机械设计手册》第二版最重要的原则就是紧密结合“中国制造 2025”国家规划和创新驱动发展战略，在内容上与时俱进，全面体现创新、智能、节能、环保的主题，进一步呈现机械设计的现代感。鉴于此，《现代机械设计手册》第二版被列入了“十三五国家重点出版物规划项目”。

在本版手册的修订过程中，我们广泛深入机械制造企业、设计院、科研院所和高等院校进行调研，听取各方面读者的意见和建议，最终确定了《现代机械设计手册》第二版的根本宗旨：一方面，新版手册进一步加强机、电、液、控制技术的有机融合，以全面适应机器人等智能化装备系统设计开发的新要求；另一方面，随着现代机械设计方法和工程设计软件的广泛应用和普及，新版手册继续促进传动设计与现代设计的有机结合，将各种新的设计技术、计算技术、设计工具全面融入传统的机械设计实际工作中。

《现代机械设计手册》第二版共 6 卷 35 篇，它是一部面向“中国制造 2025”，适应智能装备设计开发新要求、技术先进、数据可靠、符合现代机械设计潮流的现代化的机械设计大型工具书，涵盖现代机械零部件及传动设计、智能装备及控制设计、现代机械设计方法及应用三部分内容，具有以下六大特色。

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，获得过多项国家和省部级科技进步奖、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、新材料、新结构、新工艺、新产品、智能化、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。第二版重点加强机械智能化产品设计（3D 打印、智能零部件、节能元器件）、智能装备（机器人及智能化装备）控制及系统设计、数字化设计等内容。

（1）“零件结构设计”等篇进一步完善零部件结构设计的内容，结合目前的 3D 打印（增材制造）技术，增加 3D 打印工艺下零件结构设计的相关技术内容。



“机械工程材料”篇增加 3D 打印材料以及新型材料的内容。

(2) 机械零部件及传动设计各篇增加了新型智能零部件、节能元器件及其应用技术,例如“滑动轴承”篇增加了新型的智能轴承,“润滑”篇增加了微量润滑技术等内容。

(3) 全面增加了工业机器人设计及应用的内容:新增了“工业机器人系统设计”篇;“智能装备系统设计”篇增加了工业机器人应用开发的内容;“机构”篇增加了自动化机构及机构创新的内容;“减速器、变速器”篇增加了工业机器人减速器选用设计的内容;“带传动、链传动”篇增加并完善了工业机器人适用的同步带传动设计的内容;“齿轮传动”篇增加了 RV 减速器传动设计、谐波齿轮传动设计的内容等。

(4) “气压传动与控制”“液压传动与控制”篇重点加强并完善了控制技术的内容,新增了气动系统自动控制、气动人工肌肉、液压和气动新型智能元器件及新产品等内容。

(5) 继续加强第 5 卷机电控制系统设计的相关内容:除增加“工业机器人系统设计”篇外,原“机电一体化系统设计”篇充实扩充形成“智能装备系统设计”篇,增加并完善了智能装备系统设计的相关内容,增加智能装备系统开发实例等。

“传感器”篇增加了机器人传感器、航空航天装备用传感器、微机械传感器、智能传感器、无线传感器的技术原理和产品,加强传感器应用和选用的内容。

“控制元器件和控制单元”篇和“电动机”篇全面更新产品,重点推荐了一些新型的智能和节能产品,并加强产品选用的内容。

(6) 第 6 卷进一步加强现代机械设计方法应用的内容:在 3D 打印、数字化设计等智能制造理念的倡导下,“逆向设计”“数字化设计”等篇全面更新,体现了“智能工厂”的全数字化设计的时代特征,增加了相关设计应用实例。

增加“绿色设计”篇;“创新设计”篇进一步完善了机械创新设计原理,全面更新创新实例。

(7) 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。新版手册继续加强实用性,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:例如机械零部件数据资料主要依据最新国家和行业标准,并给出了相应的设计实例供设计人员参考;第 5 卷机电控制设计部分,完全站在机械设计人员的角度来编写——注重产品如何选用,摒弃或简化了控制的基本原理,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,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查阅使用,有利于提高设计人员的工作效率和设计速度。

为了进一步增加手册的承载容量和时效性,本版修订将部分篇章的内容放入二维码中,读者可以用手机扫描查看、下载打印或存储在 PC 端进行查看和使用。二维码内容主要涵盖以下几方面的内容:即将被废止的旧标准(新标准一旦正式颁布,会及时将二维码内容更新为新标



准的内容)；部分推荐产品及参数；其他相关内容。

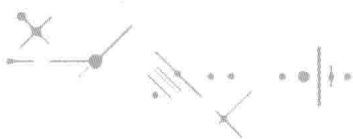
4. 通用性。本手册以通用的机械零部件和控制元器件设计、选用内容为主，主要包括机械设计基础资料、机械制图和几何精度设计、机械工程材料、机械通用零部件设计、机械传动系统设计、液压和气压传动系统设计、机构设计、机架设计、机械振动设计、智能装备系统设计、控制元器件和控制单元等，既适用于传统的通用机械零部件设计选用，又适用于智能化装备的整机系统设计开发，能够满足各类机械设计人员的工作需求。

5. 准确性。本手册尽量采用原始资料，公式、图表、数据力求准确可靠，方法、工艺、技术力求成熟。所有材料、零部件和元器件、产品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、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。因此，本手册力求实现零部件设计与整机系统开发的和谐统一，促进机械设计与控制设计的有机融合，强调产品设计与工艺技术的紧密结合，重视工艺技术与选用材料的合理搭配，倡导结构设计与造型设计的完美统一，以全面适应新时代机械新产品设计开发的需要。

经过广大编审人员和出版社的不懈努力，新版《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表示衷心的感谢！

主 编



第 27 篇 机械振动与噪声

第 1 章 概 述

1.1 机械振动的分类及机械工程中的振动问题	27-3
1.1.1 机械振动的分类	27-3
1.1.2 机械工程中的振动问题	27-4
1.2 有关振动的部分标准	27-6
1.2.1 有关振动的部分国家标准	27-6
1.2.1.1 基础标准和一般标准	27-6
1.2.1.2 平衡和试验台的振动标准	27-6
1.2.1.3 各种机器、设备的振动标准	27-7
1.2.1.4 振动测量仪器的使用和要求	27-8
1.2.1.5 人体振动与环境	27-8
1.2.2 有关振动的部分国际标准	27-9
1.2.3 机械振动等级的评定	27-10
1.2.3.1 振动烈度的评定	27-10
1.2.3.2 振动烈度的等级划分	27-10
1.2.3.3 泵的振动烈度的评定举例	27-10
1.3 允许振动量	27-12
1.3.1 机械设备的允许振动量	27-12
1.3.2 其他要求的允许振动量	27-12

第 2 章 机械振动基础

2.1 单自由度系统的自由振动	27-13
2.2 单自由度系统的受迫振动	27-15
2.2.1 简谐激励下的振动响应	27-15
2.2.2 一般周期激励下的稳态响应	27-17
2.2.3 扭转振动与直线振动的参数类比	27-17
2.2.4 机电类比	27-18
2.3 多自由度系统	27-18
2.3.1 多自由度系统的自由振动及其特性	27-18
2.3.2 多自由度系统的简谐激励稳态响应	27-20

2.3.3 常见二自由度系统简谐激励下的稳态响应	27-20
2.3.4 弹性连接黏性阻尼隔振系统的稳态响应	27-21
2.3.5 动力反共振隔振系统的稳态响应	27-22
2.4 振动系统对任意激励的响应计算	27-22
2.4.1 单自由度系统	27-22
2.4.2 多自由度系统的模态分析法	27-23
2.4.3 阻抗、导纳和四端参数	27-24

第 3 章 机械振动的一般资料

3.1 机械振动表示方法	27-26
3.1.1 简谐振动表示方法	27-26
3.1.2 周期振动幅值表示方法	27-27
3.1.3 振动频谱表示方法	27-27
3.2 弹性构件的刚度	27-28
3.3 阻尼系数	27-31
3.3.1 黏性阻尼系数	27-31
3.3.2 等效黏性阻尼系数	27-32
3.4 振动系统的固有角频率	27-33
3.4.1 单自由度系统的固有角频率	27-33
3.4.2 二自由度系统的固有角频率	27-37
3.4.3 各种构件的固有角频率	27-39
3.5 同向简谐振动合成	27-44
3.6 各种机械产生振动的扰动频率	27-45

第 4 章 非线性振动与随机振动

4.1 非线性振动	27-46
4.1.1 非线性振动问题	27-46
4.1.2 非线性恢复力的特性曲线	27-47
4.1.3 非线性阻尼力的特性曲线	27-49
4.1.4 非线性振动的特性	27-51
4.1.5 分析非线性振动的常用方法及示例	27-56

4.1.5.1	分析非线性振动的常用方法	27-56
4.1.5.2	非线性振动的求解示例	27-57
4.2	自激振动	27-58
4.2.1	自激振动系统的特性	27-58
4.2.2	机械工程中的自激振动现象	27-59
4.2.3	非线性振动的稳定性	27-61
4.2.4	相平面法及稳定性判据	27-61
4.3	随机振动	27-64
4.3.1	随机振动问题	27-64
4.3.2	平稳随机振动	27-66
4.3.3	单自由度线性系统的传递函数	27-66
4.3.4	单自由度线性系统的随机响应	27-66



第5章 机械振动控制

5.1	振动控制的基本方法	27-68
5.1.1	常见的机械振动源	27-68
5.1.2	振动控制的基本方法	27-68
5.1.3	刚性回转体的平衡	27-69
5.1.4	挠性回转体的动平衡	27-69
5.1.5	往复机械惯性力的平衡	27-69
5.2	定性减少振动的一些方法和手段	27-69
5.3	隔振原理及隔振设计	27-70
5.3.1	隔振原理及一级隔振动力参数设计	27-70
5.3.2	一级隔振动力参数设计示例	27-71
5.3.3	二级隔振动力参数设计	27-72
5.3.4	二级隔振动力参数设计示例	27-73
5.3.5	非刚性基座隔振设计	27-74
5.3.6	隔振设计的几个问题	27-74
5.3.6.1	隔振设计步骤	27-74
5.3.6.2	隔振设计要点	27-76
5.3.6.3	隔振系统的阻尼	27-76
5.3.7	隔振元件材料、类型与选择	27-76
5.3.7.1	隔振元件材料、类型	27-76
5.3.7.2	隔振元件选择	27-77
5.3.8	橡胶隔振器	27-78
5.3.9	橡胶隔振器设计	27-78
5.3.9.1	橡胶材料的主要性能参数	27-78
5.3.9.2	橡胶隔振器刚度计算	27-79
5.3.9.3	橡胶隔振器设计要点	27-81
5.3.10	钢丝绳隔振器	27-81
5.3.10.1	主要特点	27-81
5.3.10.2	选型原则与方法	27-82
5.4	阻尼减振	27-82
5.4.1	阻尼减振原理	27-82
5.4.2	阻尼类型	27-82
5.4.3	材料的损耗因子与阻尼结构	27-83
5.4.3.1	材料的损耗因子	27-83
5.4.3.2	阻尼结构	27-83
5.4.4	干摩擦阻尼	27-85
5.4.4.1	刚性连接的干摩擦阻尼	27-85
5.4.4.2	弹性连接的干摩擦阻尼	27-86
5.4.5	干摩擦阻尼减振器	27-87
5.5	动力吸振器	27-87
5.5.1	动力吸振器设计	27-87
5.5.1.1	动力吸振器工作原理	27-87
5.5.1.2	动力吸振器设计	27-88
5.5.1.3	动力吸振器设计示例	27-89
5.5.2	有阻尼动力吸振器	27-89
5.5.2.1	有阻尼动力吸振器的动态特性	27-89
5.5.2.2	有阻尼动力吸振器的最佳参数	27-90
5.5.2.3	有阻尼动力吸振器设计示例	27-98
5.6	缓冲器设计	27-98
5.6.1	设计思想	27-98
5.6.1.1	冲击现象及冲击传递系数	27-98
5.6.1.2	速度阶跃激励	27-100
5.6.1.3	缓冲弹簧的储能特性	27-100
5.6.1.4	阻尼参数选择	27-102
5.6.2	一级缓冲器设计	27-102
5.6.2.1	缓冲器设计原则	27-102
5.6.2.2	设计要求	27-102
5.6.2.3	一次缓冲器动力参数设计	27-102
5.6.2.4	加速度脉冲激励波形影响提示	27-102
5.6.3	二级缓冲器设计	27-103
5.7	机械振动的主动控制	27-103
5.7.1	主动控制系统的原理	27-103
5.7.2	主动控制的类型	27-103
5.7.3	控制系统的组成	27-104
5.7.4	作动器类型	27-105
5.7.5	主动控制系统的设计过程	27-105
5.7.6	常用的控制律设计方法	27-106
5.7.7	主动抑振	27-107
5.7.7.1	随机振动控制	27-107
5.7.7.2	谐波振动控制	27-107
5.7.8	主动吸振	27-107
5.7.8.1	惯性可调动力吸振	27-107
5.7.8.2	刚度可调式动力吸振	27-108
5.7.9	主动隔振	27-108
5.7.9.1	主动隔振原理	27-108
5.7.9.2	半主动隔振原理	27-108

第6章 典型设备振动设计实例

6.1 旋转机械的振动设计实例	27-109
6.1.1 汽轮发电机组轴系线性动力学设计	27-109
6.1.1.1 建模	27-109
6.1.1.2 运动方程和求解方法	27-109
6.1.1.3 临界转速的计算	27-109
6.1.1.4 不平衡响应计算	27-109
6.1.1.5 稳定性设计	27-109
6.1.2 200MW 汽轮发电机组轴系动力学线性分析	27-110
6.1.2.1 200MW 汽轮发电机组轴系模型	27-110
6.1.2.2 单跨轴段在刚性支承下的临界转速和模态	27-110
6.1.2.3 刚性支承轴系的临界转速及主模态	27-110
6.1.2.4 弹性支承轴系的临界转速	27-111
6.2 往复机械的振动设计实例——CA498 柴油机隔振系统设计及试验研究	27-112
6.2.1 柴油机振动扰动力分析	27-112
6.2.2 柴油机隔振系统设计模型	27-113
6.2.3 隔振方案的选择	27-113
6.2.4 结论	27-114
6.3 锻压机械的振动设计实例	27-114
6.3.1 锻锤隔振计算	27-114
6.3.1.1 锻锤隔振的基本计算	27-114
6.3.1.2 砧座下基础块的最小厚度要求	27-115
6.3.1.3 三心合一问题	27-115
6.3.1.4 阻尼问题	27-115
6.3.1.5 隔振基础的结构设计	27-115
6.3.2 锻锤隔振基础的设计步骤	27-115
6.3.2.1 搜集设计资料	27-115
6.3.2.2 初步确定基础块的质量和几何尺寸	27-115
6.3.2.3 确定隔振器应具备的参数并选用或设计隔振器	27-116
6.3.2.4 基础块振动验算	27-116
6.3.2.5 砧座振幅验算	27-116
6.3.2.6 基础箱的设计及振幅	27-117
6.3.3 设计举例 5t 模锻锤隔振基础设计	27-117
6.3.3.1 设计资料及设计值	27-117

6.3.3.2 确定基础块的质量和几何尺寸	27-117
6.3.3.3 隔振器的选用与设计	27-117
6.3.3.4 基础块振动验算	27-117
6.3.3.5 砧座振幅验算	27-118
6.3.3.6 基础箱设计	27-118
6.3.4 有关锻锤隔振新理论、新观念、新方法介绍	27-118
6.3.4.1 锻锤基础弹性隔振新技术	27-118
6.3.4.2 锻锤隔振系统的 CAD 二次开发与智能制造	27-119
6.3.4.3 锻锤基础隔振的参数优化设计方法	27-120

第7章 轴系的临界转速

7.1 概述	27-121
7.2 简单转子的临界速度	27-121
7.2.1 力学模型	27-121
7.2.2 两支承轴的临界转速	27-122
7.2.3 两支承单盘转子的临界转速	27-123
7.3 两支承多盘转子临界转速的近似计算	27-123
7.3.1 带多个圆盘轴的一阶临界转速	27-123
7.3.2 力学模型	27-123
7.3.3 临界转速计算公式	27-123
7.3.4 计算示例	27-124
7.4 阶梯轴的临界转速计算	27-126
7.5 轴系的模型与参数	27-126
7.5.1 力学模型	27-126
7.5.2 滚动轴承支承刚度	27-127
7.5.3 滑动轴承支承刚度	27-128
7.5.4 支承阻尼	27-131
7.6 轴系的临界转速计算	27-132
7.6.1 轴系的特征值问题	27-132
7.6.2 特征值数值计算实例	27-133
7.6.3 传递矩阵法计算临界转速	27-134
7.6.4 传递矩阵法计算实例	27-136
7.7 轴系临界转速设计	27-137
7.7.1 轴系临界转速修改设计	27-137
7.7.2 轴系临界转速组合设计	27-138
7.8 影响轴系临界转速的因素	27-139
7.8.1 支撑刚度对临界转速的影响	27-139
7.8.2 回转力矩对临界转速的影响	27-139
7.8.3 联轴器对临界转速的影响	27-139
7.8.4 其他因素的影响	27-139
7.8.5 改变临界转速的措施	27-139



第8章 机械振动的利用

8.1 概述	27-140	刚度的计算	27-166
8.1.1 振动机械的组成	27-140	8.5.8 近共振类振动机工作点的调试	27-167
8.1.2 振动机械的用途及工艺特性	27-143	8.6 电磁式振动机械的计算	27-167
8.1.3 振动机械的频率特性及结构特征	27-144	8.7 振动机械设计示例	27-167
8.1.4 工程中常用的振动系统	27-145	8.7.1 远超共振惯性振动机设计示例	27-167
8.1.5 有关振动机械的部门标准	27-145	8.7.1.1 远超共振惯性振动机的运动参数设计示例	27-167
8.2 振动机工作面上物料的运动学与动力学	27-146	8.7.1.2 远超共振惯性振动机的动力参数设计示例	27-169
8.2.1 物料的运动学	27-146	8.7.2 惯性共振式振动机的动力参数设计示例	27-169
8.2.1.1 物料的运动状态	27-146	8.7.3 弹性连杆式振动机的动力参数设计示例	27-170
8.2.1.2 物料的滑行运动	27-146	8.7.4 电磁式振动机的动力参数设计示例	27-171
8.2.1.3 物料的抛掷运动	27-148	8.8 主要零部件	27-172
8.2.2 物料的动力学	27-149	8.8.1 振动电机	27-172
8.2.2.1 物料滑行运动时的结合质量与当量阻尼	27-149	8.8.2 仓壁式振动器	27-177
8.2.2.2 物料抛掷运动时的结合质量与当量阻尼	27-150	8.8.3 复合弹簧	27-178
8.2.2.3 弹性元件的结合质量与阻尼	27-150	8.9 利用振动来监测缆索拉力	27-180
8.2.2.4 振动系统的计算质量、总阻尼系数及功率消耗	27-151	8.9.1 测量弦振动计算索拉力	27-180
8.3 常用的振动机械	27-152	8.9.1.1 弦振动测量原理	27-180
8.3.1 振动机械的分类	27-152	8.9.1.2 MGH型锚索测力仪	27-180
8.3.2 常用振动机的振动参数	27-152	8.9.2 按两端受拉梁的振动测量索拉力	27-181
8.4 惯性式振动机械的计算	27-153	8.9.2.1 两端受拉梁的振动测量原理	27-181
8.4.1 单轴惯性式振动机	27-153	8.9.2.2 高屏溪桥斜张钢缆检测部分简介	27-181
8.4.2 双轴惯性式振动机	27-155	8.9.3 索拉力振动检测的最新方法	27-182
8.4.3 多轴惯性式振动机	27-157		
8.4.4 自同步式振动机	27-158		
8.4.5 惯性共振式振动机	27-159		
8.4.5.1 主振系统的动力参数	27-159		
8.4.5.2 激振器动力参数设计	27-160		
8.5 弹性连杆式振动机的计算	27-160		
8.5.1 单质体弹性连杆式振动机	27-160		
8.5.2 双质体弹性连杆式振动机	27-161		
8.5.3 隔振平衡式三质体弹性连杆振动机	27-162		
8.5.4 非线性弹性连杆振动机	27-162		
8.5.5 弹性连杆振动机动力参数的选择计算	27-163		
8.5.6 导向杆和橡胶铰链	27-165		
8.5.7 振动输送类振动机整体刚度和局部			



第9章 机械振动测量

9.1 概述	27-184
9.1.1 机械振动测量意义	27-184
9.1.2 振动的测量方法	27-184
9.1.2.1 振动测量的内容	27-184
9.1.2.2 测振原理	27-184
9.1.2.3 振动量级的表述方法	27-184
9.1.3 振动测量系统	27-185
9.2 振动测量传感器	27-185
9.2.1 加速度传感器	27-185
9.2.1.1 加速度计的原理和结构	27-185
9.2.1.2 加速度计的类型	27-186
9.2.1.3 加速度计的主要性能指标	27-186
9.2.1.4 加速度计的安装	27-187

9.2.1.5	加速度计的选择	27-188	10.1.2	机械故障	27-199
9.2.1.6	适用于不同场合的 加速度计	27-188	10.1.3	基本维护策略	27-200
9.2.1.7	加速度计的标定	27-189	10.1.4	故障特征参量	27-201
9.2.2	速度传感器	27-190	10.1.5	机械振动信号的分类	27-201
9.2.2.1	磁电式速度传感器	27-190	10.2	振动信号处理基础	27-202
9.2.2.2	多普勒激光测速仪	27-190	10.2.1	频谱	27-203
9.2.3	位移传感器	27-190	10.2.2	模数(A/D)转换	27-205
9.2.3.1	电涡流传感器	27-190	10.2.3	模拟信号采样	27-205
9.2.3.2	激光位移传感器	27-191	10.2.4	量化误差	27-206
9.2.4	其他传感器	27-191	10.2.5	混叠与采样定理	27-206
9.2.4.1	力传感器	27-191	10.2.6	滤波器	27-207
9.2.4.2	阻抗头	27-191	10.2.7	振动传感器的选择	27-207
9.2.4.3	扭振/扭矩传感器	27-191	10.2.8	测试位置的选择	27-207
9.2.4.4	光纤振动传感器	27-192	10.3	机械振动信号时域分析与故障诊断	27-208
9.2.5	传感器标定	27-192	10.3.1	时域特征与故障检测	27-208
9.2.5.1	标定内容	27-192	10.3.2	相关分析	27-211
9.2.5.2	标定方法	27-192	10.4	机械振动信号频域分析与故障诊断	27-211
9.2.5.3	加速度传感器标定	27-192	10.4.1	傅里叶变换基础	27-212
9.3	其他测试仪器	27-192	10.4.2	利用频谱分析进行故障诊断	27-212
9.3.1	信号放大器	27-192	10.4.3	倒谱(cepstrum)分析基础	27-216
9.3.1.1	电荷放大器	27-192	10.4.4	利用倒谱分析进行故障诊断	27-217
9.3.1.2	电压放大器	27-193	10.5	旋转机械振动与故障诊断	27-218
9.3.2	电源供给器	27-193	10.5.1	旋转机械振动的基本特征	27-218
9.3.3	数据采集仪	27-193	10.5.1.1	强迫振动	27-219
9.3.3.1	有线数据采集仪	27-193	10.5.1.2	自激振动	27-219
9.3.3.2	无线数据采集仪	27-193	10.5.2	旋转机械常见故障机理与 诊断	27-220
9.3.4	便携式测振仪	27-194	10.5.2.1	振动测量与技术	27-220
9.4	激振设备	27-194	10.5.2.2	振动标准	27-221
9.4.1	力锤	27-194	10.5.2.3	旋转机械振动信号特征与故障 诊断	27-224
9.4.2	电磁式激振设备	27-195	10.6	往复机械振动与故障诊断	27-228
9.4.2.1	电磁式激振器	27-195	10.6.1	往复机械振动的基本特征	27-228
9.4.2.2	电磁式振动台	27-195	10.6.2	往复机械故障诊断	27-229
9.4.3	电液伺服振动台	27-196	10.7	滚动轴承和齿轮故障诊断	27-231
9.4.4	冲击试验机	27-196	10.7.1	滚动轴承故障诊断	27-231
9.4.5	压电陶瓷	27-196	10.7.1.1	滚动轴承故障诊断方法及 应用	27-231
9.5	数据处理与分析	27-196	10.7.1.2	锥形滚子轴承故障诊断 示例	27-233
9.6	振动测量方法举例	27-197	10.7.2	齿轮故障诊断	27-234
9.6.1	系统固有频率的测定	27-197	10.8	机械故障诊断中的现代信号处理 方法	27-236
9.6.2	阻尼参数的测定	27-197	10.8.1	小波变换及其机械故障诊断 应用	27-236
9.6.3	刚度和柔度测量	27-197	10.8.2	EMD及其机械故障诊断应用	27-238
第10章 机械振动信号处理与故障诊断					
10.1	概述	27-199			
10.1.1	机械故障诊断概述	27-199			

第 11 章 机械噪声基础

11.1 声学基本知识	27-240
11.1.1 声波的特性	27-240
11.1.2 描述声场与声源的物理量	27-240
11.1.3 声学物理量的关系及波动方程	27-241
11.1.4 平面、球面和柱面声波	27-241
11.1.5 声波的传播	27-242
11.1.5.1 反射、折射和透射	27-242
11.1.5.2 声波的干涉	27-243
11.1.5.3 散射、绕射和衍射	27-243
11.1.5.4 声波导	27-243
11.1.6 自由声场和混响声场	27-248
11.1.7 声源模型介绍	27-248
11.1.7.1 简单声源模型	27-248
11.1.7.2 组合声源	27-250
11.1.7.3 平面声源	27-250
11.1.7.4 声模态与声辐射模态	27-250
11.1.8 声辐射	27-253
11.2 噪声的评价	27-254
11.2.1 声压级、声强级和声功率级	27-254
11.2.2 声级的综合	27-254
11.2.3 等效声级	27-255
11.2.4 人耳的听觉特性	27-255
11.2.5 噪声的频谱分析	27-256
11.2.6 计权声级	27-256
11.2.7 噪声评价数 NR	27-257
11.3 噪声标准与规范	27-257
11.3.1 噪声的危害	27-257
11.3.2 噪声标准目录	27-257
11.3.3 机械设备噪声限值	27-259
11.3.4 工作场所噪声暴露限值	27-261
11.4 机械工程中的噪声源	27-261
11.4.1 机械噪声	27-262
11.4.2 齿轮噪声	27-262
11.4.3 滚动轴承噪声	27-263
11.4.4 液压系统噪声	27-263
11.4.4.1 液压泵噪声	27-263
11.4.4.2 液压阀噪声	27-264
11.4.4.3 机械噪声	27-264
11.4.5 电磁噪声	27-264
11.4.6 空气动力噪声	27-264

第 12 章 机械噪声测量

12.1 噪声测量概述	27-266
12.1.1 测量目的	27-266
12.1.2 测量注意事项	27-266
12.1.2.1 测点的选择	27-266
12.1.2.2 背景噪声的修正	27-266
12.1.2.3 环境的影响	27-266
12.1.2.4 测量仪器的校准	27-266
12.2 噪声测量仪器	27-267
12.2.1 噪声测量基本系统	27-267
12.2.2 传声器	27-267
12.2.2.1 传声器的性能指标	27-267
12.2.2.2 传声器种类及特点	27-268
12.2.2.3 电容传声器	27-269
12.2.2.4 传声器的使用	27-269
12.2.2.5 特殊传声器	27-270
12.2.2.6 前置放大器	27-270
12.2.3 声级计	27-270
12.2.3.1 声级计的原理及分类	27-270
12.2.3.2 声级计的主要性能	27-270
12.2.3.3 积分声级计	27-272
12.2.3.4 噪声暴露计	27-272
12.2.3.5 统计声级计	27-272
12.2.3.6 频谱声级计	27-272
12.2.4 附件的使用	27-272
12.2.5 记录及分析仪	27-274
12.2.5.1 数据记录与采集	27-274
12.2.5.2 数字式分析仪	27-274
12.2.6 声校准器	27-275
12.3 噪声测量方法	27-276
12.3.1 声级测量	27-276
12.3.1.1 试验目的	27-276
12.3.1.2 试验原理	27-276
12.3.1.3 测点选择	27-276
12.3.1.4 测试内容	27-276
12.3.2 声功率测量	27-277
12.3.2.1 试验目的	27-277
12.3.2.2 试验原理	27-277
12.3.2.3 测点布置	27-278
12.3.3 声强测量	27-279
12.3.3.1 试验目的	27-279
12.3.3.2 试验原理	27-279
12.3.3.3 双传声器探头	27-281
12.3.3.4 声强信号处理方法	27-281

12.3.4	声品质评价	27-282
12.3.4.1	评价目的	27-282
12.3.4.2	客观评价	27-282
12.3.4.3	主观评价	27-285
12.3.5	声成像测试	27-286
12.3.5.1	波束成型阵列测试技术	27-286
12.3.5.2	近场声全息测试技术	27-286

第 13 章 机械噪声控制

13.1	噪声源控制	27-288
13.1.1	噪声控制原则与方法	27-288
13.1.1.1	噪声源的控制	27-288
13.1.1.2	传播途径的控制	27-288
13.1.1.3	噪声接受者(点)的防护	27-288
13.1.2	机械噪声源控制	27-288
13.1.3	空气动力噪声源控制	27-289
13.2	隔声降噪	27-289
13.2.1	隔声性能的评价与测定	27-289
13.2.1.1	隔声量	27-289
13.2.1.2	计权隔声量 R_w	27-289
13.2.1.3	空气声隔声量的实验室测定	27-290
13.2.2	单层均质薄板的隔声性能	27-290
13.2.2.1	隔声频率特性曲线	27-290
13.2.2.2	隔声量计算	27-290
13.2.2.3	常用单层板结构隔声量	27-291
13.2.3	双层板结构的隔声性能	27-292
13.2.3.1	隔声频率特性曲线	27-292
13.2.3.2	隔声量计算的经验公式	27-292
13.2.4	轻型组合结构的隔声性能	27-293
13.2.4.1	各类轻型组合结构的隔声特性	27-293
13.2.4.2	轻型构造中的声桥和提高轻型构造隔声量的方法	27-294
13.2.5	隔声罩	27-294
13.2.5.1	隔声罩和半隔声罩的常用形式	27-294
13.2.5.2	隔声罩隔声效果计算公式	27-294
13.2.5.3	隔声罩设计步骤	27-294
13.2.5.4	隔声罩设计注意事项	27-295
13.2.6	隔声屏	27-295
13.2.6.1	隔声屏类型	27-295
13.2.6.2	隔声屏降噪效果	27-295

13.3	吸声降噪	27-296
13.3.1	吸声材料和吸声结构	27-296
13.3.2	吸声性能的评价与测定	27-297
13.3.2.1	吸声性能的评价	27-297
13.3.2.2	吸声系数的测量	27-298
13.3.3	多孔吸声材料	27-298
13.3.3.1	多孔吸声材料的基本类型	27-298
13.3.3.2	多孔吸声材料的吸声性能	27-299
13.3.4	共振吸声结构	27-299
13.3.4.1	穿孔板共振吸声结构	27-299
13.3.4.2	微穿孔板共振吸声结构	27-300
13.3.5	吸声降噪量计算	27-300
13.3.5.1	吸声降噪适用条件分析	27-300
13.3.5.2	单声源时的室内吸声降噪量计算	27-301
13.3.5.3	多声源时的室内吸声降噪量计算	27-301
13.3.5.4	吸声降噪设计程序	27-302
13.4	消声器	27-302
13.4.1	消声器的类型与性能评价	27-302
13.4.1.1	消声器的类型	27-302
13.4.1.2	消声器的性能评价	27-303
13.4.2	阻性消声器	27-303
13.4.2.1	常见形式	27-303
13.4.2.2	直管式消声器的消声量	27-303
13.4.2.3	其他消声器的消声量	27-304
13.4.3	抗性消声器	27-304
13.4.3.1	扩张式(膨胀式)消声器	27-304
13.4.3.2	共振式消声器	27-305
13.4.3.3	微穿孔板消声器	27-306
13.4.4	复合式消声器	27-306
13.4.5	喷注消声器	27-306
13.4.5.1	节流减压型排气消声器	27-306
13.4.5.2	小孔喷注型排气消声器	27-307
13.4.5.3	节流减压加小孔喷注复合型排气消声器	27-308
13.4.5.4	多孔材料耗散型排气消声器	27-308
13.5	有源降噪	27-308
13.5.1	有源降噪名词术语	27-308
13.5.2	自适应有源降噪应用实例	27-309

参考文献	27-310
------	--------

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	28-3
1.1.1 疲劳失效及其特点	28-3
1.1.2 机械零部件常见疲劳失效形式	28-3
1.1.3 疲劳设计准则	28-3
1.1.3.1 名义应力准则	28-3
1.1.3.2 局部应力应变准则	28-4
1.1.3.3 损伤容限设计准则	28-4
1.1.3.4 多轴疲劳准则	28-4
1.2 疲劳载荷	28-4
1.2.1 循环应力	28-4
1.2.2 循环计数法	28-5
1.2.3 载荷谱编制	28-6
1.2.3.1 累积频数曲线	28-7
1.2.3.2 载荷谱编制	28-7
1.2.3.3 应用举例	28-8
1.3 材料疲劳性能	28-8
1.4 疲劳损伤累积效应与法则	28-9
1.4.1 线性疲劳累积损伤 (Miner) 法则 ..	28-9
1.4.2 相对 Miner 法则	28-10
1.5 平均应力修正	28-10

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	28-11
2.1.1 应力分布及材料对应力集中的 敏感性	28-11
2.1.2 理论应力集中系数	28-11
2.1.3 有效应力集中系数	28-12
2.1.3.1 带台肩圆角的机械零件的有效 应力集中系数	28-12
2.1.3.2 带沟槽的机械零件的有效应力 集中系数	28-14
2.1.3.3 开孔的机械零件的有效应力集中 系数	28-17
2.1.3.4 其他常用零件的有效应力集中 系数	28-18
2.2 尺寸效应	28-22
2.3 表面状态效应	28-24
2.3.1 表面精度影响	28-24

2.3.2 表面强化效应	28-24
2.4 载荷影响	28-26
2.4.1 载荷类型影响	28-26
2.4.2 载荷频率影响	28-26
2.4.3 平均应力影响	28-27
2.5 环境因素	28-29
2.5.1 腐蚀环境	28-29
2.5.1.1 载荷频率的影响	28-29
2.5.1.2 腐蚀方式的影响	28-30
2.5.1.3 腐蚀介质的影响	28-30
2.5.1.4 结构尺寸与形状的影响	28-30
2.5.2 温度的影响	28-32
2.5.2.1 低温的影响	28-32
2.5.2.2 高温的影响	28-33
2.6 提高零件疲劳强度的方法	28-43
2.6.1 合理选材	28-43
2.6.2 材料改性	28-43
2.6.3 改进结构	28-43
2.6.4 表面强化	28-45
2.6.4.1 表面喷丸	28-45
2.6.4.2 表面辊压	28-46
2.6.4.3 内孔挤压	28-48
2.6.4.4 表面化学热处理	28-48
2.6.4.5 表面淬火	28-51
2.6.4.6 表面激光处理	28-51

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	28-53
3.1.1 材料疲劳极限	28-53
3.1.2 材料的 S-N 曲线	28-60
3.1.3 疲劳安全系数	28-74
3.2 无限寿命设计	28-77
3.2.1 单向应力状态下的无限寿命设计 ..	28-77
3.2.1.1 计算公式	28-77
3.2.1.2 设计实例	28-78
3.2.2 复杂应力状态下的无限寿命设计 ..	28-79
3.2.3 连接件的疲劳寿命估算——应力 严重系数法	28-79
3.3 有限寿命设计	28-81
3.3.1 计算公式	28-81
3.3.2 寿命估算	28-81
3.3.3 设计实例	28-81