


B

普通高等教育机电类规划教材

精密机械设计

庞振基 黄其圣 主编

 机械工业出版社
China Machine Press

普通高等教育机电类规划教材

精密机械设计

主编 庞振基 黄其圣
参编 王继平 卢 钢 吕丽娜 李永新
陈雍乐 邢晓正 赵 英 洪海涛
陶晓杰 董明利 谢 驰
主审 初允绵 陈文贤



机械工业出版社

本书对精密机械及仪器仪表中常用机构和零、部件的工作原理,适用范围,结构,设计计算方法,以及工程材料、零件几何精度的基础知识等诸方面,均作了较为详细的阐述。

全书除绪论外共分十六章,其中包括:精密机械设计的基础知识,工程材料和热处理,零件的几何精度,平面机构的结构分析,平面连杆机构,凸轮机构,摩擦轮传动和带传动,齿轮传动,螺旋传动,轴、联轴器、离合器,支承,直线运动导轨,弹性元件,联接,仪器常用装置和机械的计算机辅助设计。

本书是高等学校仪器仪表类专业精密机械设计课程的教材,亦可供有关专业师生和工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

精密机械设计/庞振基,黄其圣主编. —北京:机械工业出版社,2000.7
普通高等教育机电类规划教材
ISBN 7-111-07901-9

I.精... II.①庞...②黄... III.机械设计—高等学校—教材 IV.
TH122

中国版本图书馆CIP数据核字(2000)第04047号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
责任编辑:贡克勤 版式设计:霍永明 责任校对:张佳
封面设计:姚毅 责任印制:何全君
北京第二外国语学院印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
2000年7月第1版·第1次印刷
787mm×1092mm¹/₁₆·26.5印张·647千字
0 001—5 000册
定价:33.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68993821、68326677-2527

前 言

国家机械工业总局（原机械工业部）“九五”规划教材——《精密机械设计》一书，是应全国高等学校仪器仪表类专业教学指导委员会委托而组织编写的。

过去，仪器仪表类专业多开设有“精密机械零件”课程。在此之前，分别开设有“机械原理”、“金属材料及热处理”和“互换性与技术测量”等课程。由于各门课程是按照各自课程体系来组织教学的，因此，不但课程设置偏多，讲授分散，往往还会造成彼此脱节；而且，也不利于运用辩证唯物主义的观点，从机构的选型、工作能力、精度、结构等诸方面，较全面地去分析和研究精密机械中常用机构及其零、部件设计和计算的基本规律。

为了全面贯彻落实《中国教育发展和改革纲要》，推进面向 21 世纪高等工程教育的教学内容和课程体系的改革计划，在重新审定的全国高等学校仪器仪表类专业教学计划中，提出将上述四门课程合并为一门新的课程——精密机械设计，并于 1997 年 6 月开始，组织进行新教材的编写工作。

《精密机械设计》一书，是以精密机械中常用机构和零、部件为研究对象，从设计该类机构和零、部件时应具备的基础理论、基本技能和基本方法等方面组织教学内容，进一步优化教材结构，以期建立新的课程体系和教材体系。通过教学实践，全面培养学生工程设计能力和创造性，更好地适应市场经济和新技术发展的需要。

本书除了保持理论的系统性和基本内容外，还适当反映国内外先进技术在本门学科中的新成就，如除选编了某些新型机构和零、部件外，还将计算机辅助设计、优化技术等新的工程设计方法引入教材。

目前，各高等学校仪器仪表类专业规定学习本门课程的学时数不尽一致，且对各章的具体教学要求、讲授重点也不尽相同，为了使该书具有较大的适用性，本书各章一般均按较高要求编写。希各院校使用时，视教学需求，对教材内容可作某些取舍或增补。

本书由庞振基、黄其圣教授主编。

参加本书编写的有天津大学庞振基（绪论，齿轮传动）；合肥工业大学黄其圣（精密机械设计的基本知识，直线运动导轨）；上海交通大学卢钢（工程材料和热处理，轴、联轴器、离合器）；四川大学王继平（零件的几何精度）；合肥工业大学陶晓杰（平面机构的结构分析）；重庆大学陈雍乐（平面连杆机构，联接）；天津大学赵英、吕丽娜（凸轮机构，弹性元件）；北京机械工业学院董明利（摩擦轮传动和带传动）；四川大学谢驰（螺旋传动，仪器常用装置）；中国科技大学邢晓正、李永新（支承）；上海交通大学洪海涛（机械的计算机辅助设计）。吕丽娜曾为本书绘制了部分插图。

本书由初允绵、陈文贤教授审阅，对本书提出了许多宝贵意见，在此深表谢意。

编者衷心希望广大读者对本书提出宝贵的意见和批评，对其中不妥之处予以指正。

编 者

1999 年 12 月 4 日

基本物理量符号表

<p>A——面积</p> <p>a——中心距, 加速度, 系数</p> <p>B, b——宽度</p> <p>C——系数, 弹簧旋绕比, 常数</p> <p>c——系数</p> <p>D, d——直径</p> <p>E——弹性模量, 能</p> <p>e——偏心距</p> <p>F——力, 载荷</p> <p>f——频率, 摩擦系数, 系数</p> <p>G——切变模量, 重力</p> <p>g——重力加速度</p> <p>H——高度</p> <p>HBS——布氏硬度</p> <p>HRC——洛氏硬度</p> <p>HV——维氏硬度</p> <p>h——高度, 厚度</p> <p>I——转动惯量</p> <p>I_a——截面惯性矩</p> <p>I_p——极惯性矩</p> <p>i——传动比</p> <p>K, k——系数</p> <p>L——长度, 寿命</p> <p>l——长度, 距离</p> <p>M——力矩</p> <p>M_b——弯矩</p> <p>m——模数, 质量, 系数</p> <p>N——循环次数</p> <p>n——转速</p> <p>P——功率,</p> <p>p——压强, 齿距</p> <p>R——半径, 锥距, 可靠度</p> <p>r——半径</p>	<p>S——安全系数</p> <p>$[S]$——许用安全系数</p> <p>s——厚度, 弧长</p> <p>T——转矩, 温度, 周期</p> <p>t——摄氏温度, 时间</p> <p>V——体积</p> <p>v——速度</p> <p>W——截面系数, 功</p> <p>x, y, z——坐标轴符号</p> <p>Y, Z——系数</p> <p>z——齿数, 个数</p> <p>α, β——角度</p> <p>γ——角度, 重度</p> <p>δ——角度, 厚度, 相对误差</p> <p>Δ——绝对误差</p> <p>ϵ——应变, 重合度</p> <p>η——效率</p> <p>θ——角度</p> <p>λ——变形量, 挠度</p> <p>μ——泊松比, 粘度</p> <p>ρ——摩擦角, 曲率半径</p> <p>σ——正应力, 拉应力</p> <p>σ_b——抗拉强度</p> <p>σ_s——屈服点</p> <p>σ_{bb}——抗弯强度</p> <p>σ_c——临界应力</p> <p>σ_p——比例极限</p> <p>τ——切应力, 角齿距</p> <p>φ——角度</p> <p>ω——角速度</p> <p>x——移距系数</p> <p>ψ——系数, 角度</p>
---	---

目 录

前 言	
基本物理量符号表	
绪论	1
第一章 精密机械设计的基础知识	3
第一节 概述	3
第二节 零件的工作能力及其计算	4
第三节 零件与机构的误差估算和精度	10
第四节 工艺性	12
第五节 标准化、系列化、通用化	12
第六节 零件的设计方法及其发展	13
思考题及习题	16
第二章 工程材料和热处理	17
第一节 概述	17
第二节 金属材料的力学性能	17
第三节 常用的工程材料	19
第四节 钢的热处理	23
第五节 表面精饰	26
第六节 材料的选用原则	27
思考题及习题	28
第三章 零件的几何精度	29
第一节 概述	29
第二节 极限与配合的基本术语和定义	30
第三节 光滑圆柱件的极限与配合及其选择	33
第四节 形状与位置公差及其选择	44
第五节 表面粗糙度及其选择	55
思考题及习题	62
第四章 平面机构的结构分析	64
第一节 概述	64
第二节 运动副及其分类	64
第三节 平面机构的运动简图	66
第四节 平面机构的自由度	68
第五节 平面机构的组成原理和结构分析	71
思考题及习题	75
第五章 平面连杆机构	77
第一节 概述	77
第二节 铰链四杆机构的基本型式及其演化	77
第三节 平面四杆机构曲柄存在的条件和几个基本概念	80
第四节 平面四杆机构的设计	84
思考题及习题	97
第六章 凸轮机构	99
第一节 概述	99
第二节 从动件常用运动规律	100
第三节 图解法设计平面凸轮轮廓	102
第四节 解析法设计平面凸轮轮廓	104
第五节 凸轮机构基本尺寸的确定	106
思考题及习题	108
第七章 摩擦轮传动和带传动	109
第一节 概述	109
第二节 摩擦轮传动	109
第三节 摩擦无级变速器	113
第四节 带传动	114
第五节 同步带传动	127
第六节 其它带传动简介	133
思考题及习题	134
第八章 齿轮传动	135
第一节 概述	135
第二节 齿廓啮合基本定律	135
第三节 渐开线齿廓曲线	137
第四节 渐开线齿轮各部分的名称、符号和几何尺寸的计算	140
第五节 渐开线直齿圆柱齿轮传动	144
第六节 渐开线齿廓的切削原理、根切和最少齿数	147
第七节 变位齿轮	151
第八节 斜齿圆柱齿轮传动	157
第九节 齿轮传动的失效形式和材料	161
第十节 圆柱齿轮传动的强度计算	165
第十一节 圆锥齿轮传动	177
第十二节 蜗杆传动	182
第十三节 轮系	191

第十四节 齿轮传动精度	201	第十三章 弹性元件	332
第十五节 齿轮传动的空回	210	第一节 概述	332
第十六节 齿轮传动链的设计	214	第二节 弹性元件的基本特性	332
思考题及习题	227	第三节 螺旋弹簧	336
第九章 螺旋传动	230	第四节 游丝	345
第一节 概述	230	第五节 片簧	348
第二节 滑动螺旋传动	230	第六节 热双金属弹簧	350
第三节 滚珠螺旋传动	247	第七节 其它弹性元件简介	351
第四节 静压螺旋传动简介	252	思考题及习题	353
思考题及习题	253	第十四章 联接	355
第十章 轴、联轴器、离合器	254	第一节 概述	355
第一节 概述	254	第二节 机械零件的联接	355
第二节 轴	255	第三节 机械零件与光学零件的联接	369
第三节 联轴器	263	思考题及习题	372
第四节 离合器	271	第十五章 仪器常用装置	373
思考题及习题	273	第一节 概述	373
第十一章 支承	275	第二节 微动装置	373
第一节 概述	275	第三节 锁紧装置	376
第二节 滑动摩擦支承	275	第四节 示数装置	378
第三节 滚动摩擦支承	281	第五节 隔振器	385
第四节 弹性摩擦支承	302	思考题及习题	389
第五节 流体摩擦支承及其它形式支承	303	第十六章 机械的计算机辅助设计	390
第六节 精密轴系	304	第一节 概述	390
思考题及习题	308	第二节 计算机辅助设计系统的原理与构成	390
第十二章 直线运动导轨	310	第三节 表格和线图的处理	393
第一节 概述	310	第四节 机械优化设计	398
第二节 滑动摩擦导轨	311	第五节 设计举例	411
第三节 滚动摩擦导轨	321	思考题及习题	414
第四节 弹性摩擦导轨	327	参考文献	415
第五节 静压导轨简介	328		
思考题及习题	331		

绪 论

随着生产和科学技术的发展,精密机械已经广泛地应用于国民经济和国防工业的许多部门,如各种精密仪器仪表,精密加工机床,医疗器械,计算机外围设备;仿生技术中的机械臂、机器人;宇航技术中的火箭、卫星以及雷达和通信设备伺服系统中的动力传动和精密传动等。因此,精密机械本身的完善程度,将直接影响各部门产品的质量和可靠度。

生产和科学技术的日益发展和创新,对精密机械及其产品无论在质量数量和品种上,都不断地提出更新和更高的要求。同时,也为精密机械这一门学科的发展,创造了更好条件,开辟了更加广阔的途径。

“机械”这个名词,我们是很熟悉的,一般认为它是“机器”和“机构”的总称。在工程实际中,常见的机构有连杆机构,凸轮机构,齿轮机构等。各种机构都是用来传递运动和力的可动装置。在日常生活和生产中,我们都会接触到许多机器,例如缝纫机、洗衣机、复印机、各种机床、汽车等。各种不同类型的机器,具有不同的形式、构造和用途,但通过分析不难看出,这些不同的机器,就其组成而言,却都是由各种机构组合而成,而机构是由构件组成的。机构中的构件可以是单一的零件,也可以是几个零件的组合体称为部件。所以,构件和零件是两个不同的概念,构件是“运动单元”,而零件是“制造单元”。

随着数学、电子学、自动控制、计算机等现代科学技术的巨大进步和发展,人类综合应用了各方面的知识和技术,不断创造出各种新型的精密机械及其产品。这类精密机械除具有使其内部各机构正常动作的先进控制系统外,有时还包含有信息采集、处理和传递系统。

“精密机械设计”课程,主要是研究精密机械中常用机构和常用的零件和部件。是从机构分析、工作能力、精度和结构等诸方面来研究这些机构和零、部件,并介绍其工作原理、特点、应用范围、选型、材料、精度以及设计计算的一般原则和方法。

本课程的主要任务:

- 1) 使学生初步掌握常用机构的结构分析、运动分析、动力分析及其设计方法。
- 2) 使学生掌握通用零、部件的工作原理、特点、选型及其计算方法,培养学生能运用所学基础理论知识,解决精密机械零、部件的设计问题。
- 3) 培养学生具有设计精密机械传动和仪器机械结构的能力;以及对某些典型零、部件的精度分析,并提出改进措施。
- 4) 使学生了解常用机构和零、部件的实验方法;初步具有某些零、部件的性能测试和结构分析能力。
- 5) 使学生了解材料与热处理、公差与配合方面的基本知识,并能在工程设计中如何正确选用。
- 6) 使学生初步掌握计算机辅助设计、优化技术、自动绘图在机械工程设计中的运用;以及某些典型机构及零、部件的程序设计方法。

由于本课程是一门理论与实践紧密结合的设计性课程,因此,在教学过程中,除进行理论讲授外,尚安排有习题课(讨论课)、实验课、实物教学及课程设计等实践性教学环节。

这对于全面培养学生的分析问题和解决问题的能力，以及工程设计能力，是至关重要的。

机构和零、部件的种类众多，完成同一工作任务，可以选用不同类型的机构和零、部件。例如，传递两平行轴之间的运动，可以用带传动，也可以用圆柱齿轮传动；此外，同一种零件（如轴或齿轮），使用场合不同，其受力状况、设计原则和方法亦不尽相同。因此，在学习和工程设计的实践中，必须树立辩证观点，理论联系实际，学会具体问题具体分析的方法，在熟知和掌握各种机构和零、部件基本理论和基本知识的基础上，根据具体使用条件，合理地进行选型及采用正确的设计和计算方法。

在高等学校仪器仪表类专业的教学计划中，“精密机械设计”课程被列为主干课程，是该类专业机械方面的最后一门技术基础课程。将综合运用工程力学、机械制图和本课程所学知识，来解决有关精密机械设计方面的问题。同时，该门课程又为学习有关专业课程准备了必要的条件。

第一章 精密机械设计的基础知识

第一节 概 述

一、设计精密机械时应满足的基本要求

1. 功能要求 设计精密机械时首先应满足它的功能要求。例如仪器的监测、控制功能，自动显示和记录功能，数据处理功能，打印数据功能，误差校正和补偿功能等。

2. 可靠性要求 要使精密机械在一定的时间内和一定的使用条件下有效地实现预期的功能，则要求其工作安全可靠，操作维修方便。为此，零件应具有一定的强度、刚度和振动稳定性等工作能力。

3. 精度要求 精度是精密机械的一项重要技术指标，设计时必须保证精密机械正常工作时所要求的精度。如支承的回转精度，导轨的导向精度等。

4. 经济性要求 组成精密机械的零、部件能最经济的被制造出来，这就要求零件结构简单、节省材料、工艺性好，尽量采用标准尺寸和标准件。

5. 外观要求 设计精密机械时应使其造型美观大方、色泽柔和。

二、精密机械设计的一般步骤

精密机械与普通机械产品一样，都必须经过设计过程。产品设计大体上有三种类型：开发性设计，即利用新原理、新技术设计新产品；适应性设计，即保留原有产品的原理及方案不变，为适应市场需要，只对个别零件或部件进行重新设计；变参数设计，即保留原有产品的功能、原理方案和结构，仅改变零、部件的尺寸或结构布局形成系列产品。

新产品开发设计，从提出任务到投放市场的全部程序要经过下述四个阶段（图 1-1）：

1. 调查决策阶段 在设计精密机械时，需进行必要的调查研究，了解用户的要求和意见，市场供销情况和前景，收集有关的技术资料及新技术、新工艺、新材料的应用情况。在此基础上，拟订新产品开发计划书。在设计开始阶段，应充分发挥创造性，构思方案应多样化，以便经过反复分析比较后作出决策，从中选取最佳方案。决策是非常关键的一步，直接影响设计工作和产品的成败。

2. 研究设计阶段 此阶段应在决策后开始，一般分两步

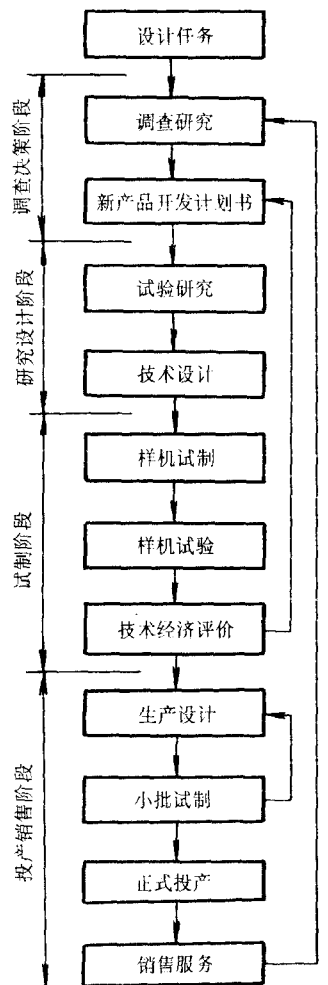


图 1-1 新产品开发设计程序

进行。第一步主要为功能设计研究，称为前期开发，任务是解决技术中的关键问题。为此，需要对新产品进行试验研究和技术分析，验证原理的可行性和发现存在的问题。第一步完成后，应写出总结报告、总布局图和外形图等等。第二步为新产品的技术设计，称为后期开发。第二步完成后，应绘出总装配图、部件装配图、零件工作图，各种系统图（传动系统、液压系统、电路系统、光路系统等）以及详细的计算说明书、使用说明书和验收规程等各种技术文件。以上各部分内容常需互相配合，设计工作也常需多次修改，逐步逼近，以便设计出技术先进可靠、经济合理、造型美观的新产品。在技术设计中，需进行大量的结构设计工作。为保证设计质量，分阶段进行设计的检查是十分必要的。

3. 试制阶段 样机试制完成后，应进行样机试验，并作出全面的技术经济评价，以决定设计方案是否可用或需要修改。即使可用的方案，一般也需作适当修改，以便使设计达到最佳化。需要修改的方案，应检查数学、物理模型是否符合实际，必要时，改进模型后进行试验，甚至重新设计。

4. 投产销售阶段 样机试验成功后，对于批量生产的产品，尚需进行工艺、工装方面的生产设计。经小批试制、用户试用、改进和鉴定后，即可投入正式生产和销售。开展销售服务工作（如传授正确使用方法、规定免费保修期限、定期跟踪检查等），不但有利于保证产品质量，提高产品信誉、开拓市场销路，而且可从市场反馈信息中，发现产品的薄弱环节，这对于进一步完善产品设计，提高产品可靠度，萌生新的设计构思，开发新产品都有积极的意义。

第二节 零件的工作能力及其计算

一、强度

强度是零件抵抗外载荷作用的能力。强度不足时，零件将发生断裂或产生塑性变形，使零件丧失工作能力而失效。

（一）载荷和应力

在计算零件强度时，需要根据作用在零件上载荷的大小、方向和性质及工作情况，确定零件中的应力。作用在零件上的载荷和相应的应力，按其随时间变化的情况，可分为以下两类：

1. 静载荷和静应力 不随时间变化或变化缓慢的载荷和应力，称为静载荷和静应力（图 1-2）。例如，零件的重力及其相应的应力。

2. 变载荷和变应力 随时间作周期性变化的载荷和应力，称为变载荷和变应力（图 1-3）。变应力既可由变载荷产生，也可以由静载荷产生，例如，轴在不变弯矩作用下等速转动时，轴的横截面内将产生周期性变化的弯曲应力。

应力作周期性变化时，一个周期所对应的应力变化称为应力循环。应力循环中的平均应力 σ_m 、应力幅

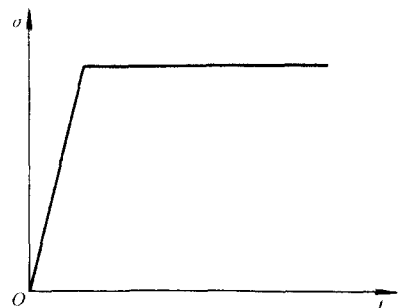


图 1-2 静应力

度 σ_a 、循环特性 r 与其最大应力 σ_{\max} 和最小应力 σ_{\min} 有如下的关系

$$\left. \begin{aligned} \sigma_m &= \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \\ \sigma_a &= \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \\ r &= \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

当 $r = -1$ 时, 称为对称循环; 当 $r \neq -1$ 时称为非对称循环, 其特例是 $r = 0$, 称为脉动循环。

在进行强度计算时, 作用在零件上的载荷又可分为

(1) 名义载荷 在稳定和理想的工作条件下, 作用在零件上的载荷称为名义载荷。

(2) 计算载荷 为了提高零件的工作可靠性, 必须考虑影响零件强度的各种因素, 如零件的变形、工作阻力的变动、工作状态的不稳定等。为计入上述因素, 将名义载荷乘以某些系数, 作为计算时采用的载荷, 此载荷称为计算载荷。

(二) 零件的整体强度

零件整体抵抗载荷作用的能力称为整体强度。判

断零件整体强度的方法有两种, 第一种是把零件在载荷作用下产生的应力 (σ 、 τ) 与许用应力 ($[\sigma]$ 、 $[\tau]$) 相比较, 其强度条件为

$$\sigma \leq [\sigma] \text{ 或 } \tau \leq [\tau] \quad (1-2)$$

而

$$[\sigma] = \frac{\sigma_{\text{lim}}}{[S_\sigma]}, \quad [\tau] = \frac{\tau_{\text{lim}}}{[S_\tau]}$$

式中 σ_{lim} 、 τ_{lim} ——零件材料的极限应力;

$[S_\sigma]$ 、 $[S_\tau]$ ——许用安全系数。

第二种是把零件在载荷作用下的实际安全系数与许用安全系数进行比较, 其强度条件为

$$S_\sigma = \frac{\sigma_{\text{lim}}}{\sigma} \geq [S_\sigma] \text{ 或 } S_\tau = \frac{\tau_{\text{lim}}}{\tau} \geq [S_\tau] \quad (1-3)$$

1. 静应力下的强度 静应力下零件的整体强度, 可以使用上述两种判断方法中的任何一种。对于用塑性材料制成的零件, 取材料的屈服极限 σ_s 或 τ_s 作为极限应力对于用脆性材料制成的零件, 取材料的强度极限 σ_b 或 τ_b 作为极限应力。当材料缺少屈服极限的数据时, 可取强度极限作为极限应力, 但安全系数应取得大一些。

2. 变应力下的强度 在变应力作用下, 零件的一种失效形式将是疲劳断裂, 这种失效形式不仅与变应力的有关, 也与应力循环的次数有关。表面无缺陷的金属材料的疲劳断裂过程可分为两个阶段, 第一阶段是在变应力的作用下, 零件材料表面开始滑移而形成初始裂纹; 第二阶段是在变应力作用下初始裂纹扩展以致断裂。实际上, 由于材料具有晶界夹杂、微孔以及机械加工造成的表面划伤、裂纹等缺陷, 材料的疲劳断裂过程只经过第二阶

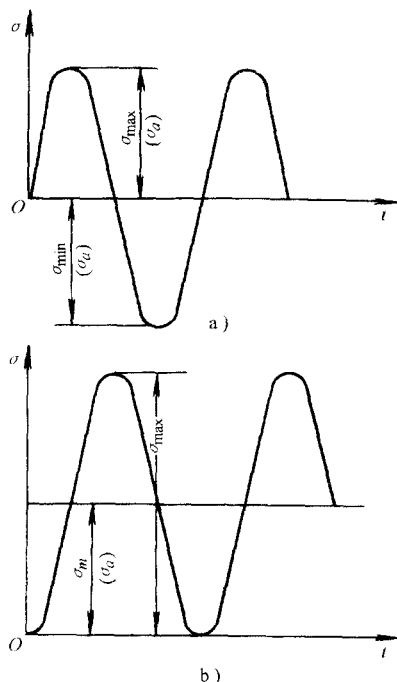


图 1-3 变应力

段。零件上的圆角、凹槽、缺口等造成的应力集中也会促使零件表面裂纹的生成和扩展。

当循环特性 r 一定时，应力循环 N 次后，材料不发生疲劳破坏时的最大应力称为疲劳极限，用 σ_{rN} 表示。

表示应力循环次数 N 与疲劳极限 σ_{rN} 间关系的曲线称为应力疲劳曲线。金属材料的疲劳曲线有两种类型：一种是当循环次数 N 超过某一值 N_0 以后，疲劳极限不再降低，曲线趋向水平（图 1-4a）， N_0 称为循环基数。另一种疲劳曲线则没有水平部分（图 1-4b），有色金属及某些高硬度合金钢的疲劳曲线多属于这一类。

有明显水平部分的疲劳曲线可分为两个区域： $N \geq N_0$ 区为无限寿命区； $N < N_0$ 区为有限寿命区。在无限寿命区，疲劳极限是一个常数，而在有限寿命区，疲劳极限 σ_{rN} 将随循环次数 N 的减小而增大，其疲劳曲线方程为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{rN}^m N &= \sigma_r^m N_0 = C \\ \tau_{rN}^m N &= \tau_r^m N_0 = C' \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

式中 σ_r （或 τ_r ）——循环特性为 r ，对应于无限寿命区的疲劳极限；

m ——与应力状态有关的指数；

C 、 C' ——常数。

由式 (1-4) 可按 σ_r 求出循环次数为 N 的疲劳极限

$$\sigma_{rN} = \sigma_r \sqrt[m]{\frac{N_0}{N}} = K_L \sigma_r \quad (1-5)$$

$$K_L = \sqrt[m]{\frac{N_0}{N}}$$

式中 K_L ——寿命系数。

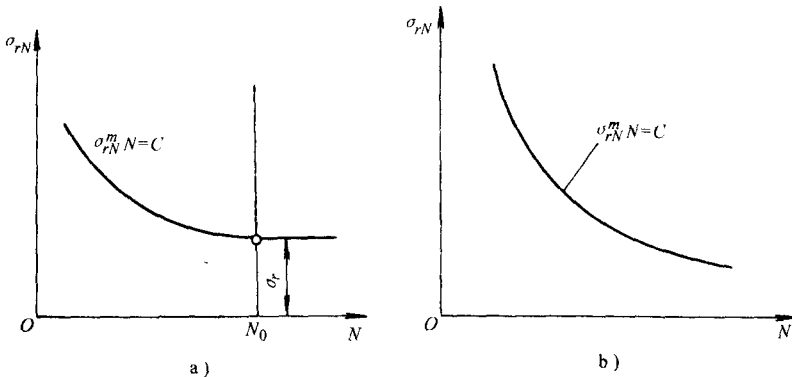


图 1-4 疲劳曲线

所谓无限寿命，是指零件承受的变应力低于疲劳极限 σ_r 时，工作应力总循环次数可大于 N_0 ，但并不意味着零件永远不会失效。

零件处于变应力状态下工作时，通常以材料的 σ_r 作为极限应力 σ_{lim} ，然后用寿命系数 K_L 来考虑零件实际应力循环次数 N 的影响。

提高零件的疲劳强度可采取以下措施：①应用屈服极限高和细晶粒组织的材料；②零件

截面形状的变化应平缓，以减小应力集中；③改善零件的表面质量，如减小表面粗糙度，进行表面强化处理（表面喷丸、表面辗压）等；④减少材料的冶金缺陷，如采用真空冶炼，使非金属夹杂物减少。

（三）零件的表面强度

1. 表面接触强度 在精密机械中，经常遇到两个零件上的曲面相互接触以传递压力的情况。加载前两个曲面呈线接触或点接触，加载后由于接触表面的局部弹性变形，接触线或接触点扩展为微小的接触面积。如图 1-5a 所示，原为线接触的两圆柱体，加载后接触区域扩展为 $2ab$ 的小矩形面积；图 1-5b 所示的原为点接触的两球，加载后接触点扩展成直径为 $2a$ 的小圆面积。两个零件在接触区产生的局部应力称为接触应力。

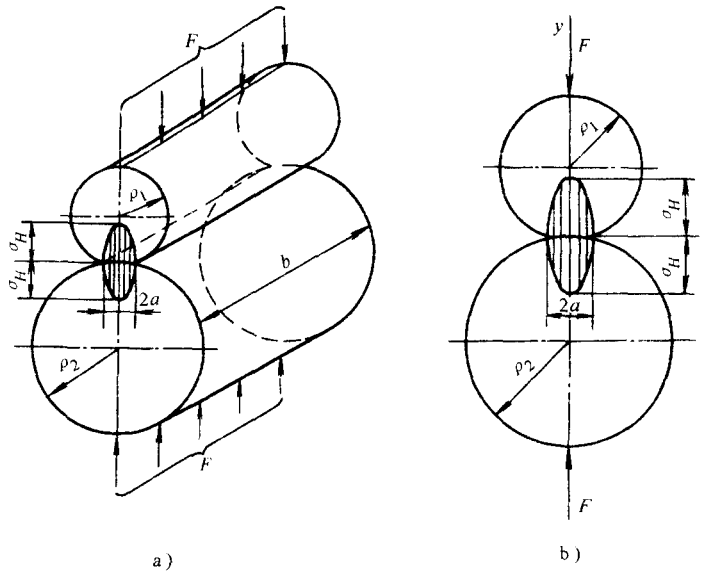


图 1-5 微小接触面积和接触应力

根据赫兹公式，轴线平行的两个圆柱体相压时，其最大接触应力可按下式计算，即

$$\sigma_H = \sqrt{F_u \left[\rho \pi \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right) \right]} \quad (1-6)$$

式中 σ_H ——最大接触应力；

F_u ——接触线单位长度上的载荷， $F_u = F/b$ ；

ρ ——两圆柱体在接触处的综合曲率半径， $1/\rho = 1/\rho_1 \pm 1/\rho_2$ ，其中正号用于外接触，负号用于内接触；

E_1 、 E_2 ——两圆柱体材料的弹性模量；

μ_1 、 μ_2 ——两圆柱体材料的泊松比。

当 $\mu_1 = \mu_2 = \mu$ 时，上式可简化为

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{F_u}{\rho} \frac{E}{2\pi(1-\mu^2)}} \quad (1-7)$$

式中 E ——两圆柱体材料的综合弹性模量， $E = 2E_1E_2 / (E_1 + E_2)$ 。

当两个钢制球体在力 F 作用下相压时（图 1-5b），最大接触应力 σ_H 为

$$\sigma_H = 0.388 \sqrt[3]{\frac{FE^2}{\rho^2}} \quad (1-8)$$

在循环接触应力作用下，接触表面产生疲劳裂纹，裂纹扩展导致表层小块金属剥落，这种失效形式称为疲劳点蚀。点蚀将使零件表面失去正确的形状，降低工作精度，引起附加动载荷，产生噪声和振动，并降低零件的使用寿命。

提高表面接触强度可采取以下措施：①增大接触处的综合曲率半径 ρ ，以降低接触应力；②提高接触表面的硬度，以提高接触疲劳极限；③提高零件表面的加工质量，以改善接触情况；④采用粘度较大的润滑油，以减缓疲劳裂纹的扩展。

2. 表面磨损强度 零件的表面形状和尺寸在摩擦的条件下逐渐改变的过程称为磨损，当磨损量超过允许值时，即产生失效。引起磨损的原因，一种是由于硬质微粒落入两接触表面间而引起的，另一种是两接触表面在相对运动中相互刮削作用而引起的。

磨损会降低零件的强度，增大接触面间的摩擦，降低传动效率和零件的工作精度。但磨损并非都有害，如跑合、研磨都是有益的磨损。

从零件开始工作到磨损量 Δ 超过允许值而失效的整个工作期间，可以分为三个阶段（图 1-6）。第一阶段称为跑合阶段（见图 1-6a 曲线段 1）。机械加工后在零件表面遗留下来的粗大锯齿体（见图 1-6b），有的被刮削掉，有的发生塑性变形，填充了锯齿体的波谷底，因而增加了实际接触的平滑表面，直到平滑表面的宽度超过了残余波谷底的宽度时（见图 1-6c），跑合结束，

磨损速度随之减缓并趋于稳定。第二阶段称为稳定磨损阶段（见图 1-6a 曲线段 2）。在该阶段中磨损速度较稳定，是零件的正常工作阶段。第三阶段称为崩溃磨损阶段（见图 1-6a 曲线段 3）。在这一阶段，接触表面的磨损量超过了允许的数值，致使零件在工作中出现冲击，并降低运动精度，使零件很快失效。

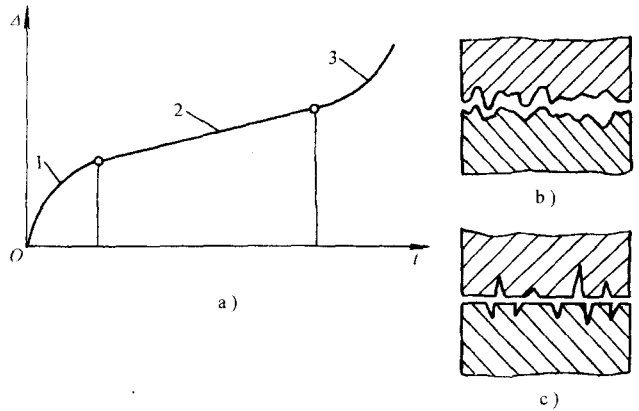


图 1-6 零件的磨损阶段

减小磨损的基本方法有：①充分润滑摩擦表面，使接触表面部分或全部脱离接触；②定期清洗或更换润滑剂；③采用适当的密封装置；④合理选择摩擦表面材料。对于一对相互摩擦的零件，为了避免其中比较贵重的零件过早磨损，常把另一零件的摩擦表面选用减摩材料制造，以减小摩擦阻力。常用的减摩材料有巴氏合金、青铜、某些牌号的铸铁和塑料等；⑤用热处理、电镀、熔镀等方法提高接触表面的耐磨性；⑥合理减小摩擦表面的粗糙度，以改善摩擦面的接触情况。

由于影响磨损的因素很多，如载荷的大小和性质、相对滑动速度、润滑和冷却条件等，所以很难建立起有充分理论基础的抗磨损强度计算方法。通常根据摩擦表面的压强 p 和与摩擦功成正比的 pv 值，近似地判断零件的抗磨损强度，即令 p 和 pv 的计算值满足下列条件：

$$\left. \begin{aligned} p &\leq [p] \\ pv &\leq [pv] \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

式中 v ——接触表面的相对滑动速度 (m/s)；

$[p]$ ——许用压强 (N/mm^2)；

$[pv]$ ——许用 pv 值。

二、刚度

刚度是反映零件在载荷作用下抵抗弹性变形的能力。刚度的大小用产生单位变形所需要

的外力或外力矩来表示。

由静载荷与变形关系所确定的刚度称为静刚度，而由变载荷与变形关系所确定的刚度称为动刚度。用金属材料制造的零件，其静刚度与动刚度的数值基本上是相同的；用某些非金属材料制造的零件，例如橡胶零件，在静载荷 F_1 作用下的变形量 λ_1 ，将大于在变载荷（其载荷的最大值为 F_1 ）作用下的变形量 λ_2 （如图 1-7 所示），因此其静刚度与动刚度是不同的。

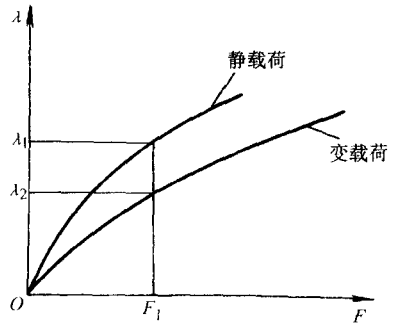


图 1-7 橡胶零件的载荷—变形曲线

对于某些零件，要求有足够的刚度，当零件的刚度不足时，将使互相联系的一些零件不能很好地协同工作，降低了零件的工作精度。例如在齿轮传动中，如果轴的刚度不足，将会破坏齿轮的正确啮合，引起齿轮的运动误差。

对于另外一些零件，则要求有一定的刚度，即在载荷作用下，零件应产生给定的变形。例如弹性元件、减震器等。满足刚度要求是这类零件设计计算的出发点。

由工程力学可知，零件刚度的大小与材料的弹性模量、零件的截面形状和几何尺寸有关，而与材料的强度极限无关。如图 1-8 所示的片簧，其刚度为



图 1-8 片簧的刚度计算简图

$$F' = \frac{F}{\lambda} = \frac{3EI_a}{L^3} = \frac{Ebh^3}{4L^3} \quad (1-10)$$

式中 L ——片簧的工作长度；

I_a ——片簧的截面惯性矩， $I_a = bh^3/12$ ，其中 b 为片簧的宽度；

h ——片簧的厚度；

E ——片簧材料的弹性模量。

由于碳素钢和高强度合金钢两者的弹性模量相差很小，所以，如对零件仅有刚度要求时，应选用价格低廉的碳素钢。提高零件刚度的有效措施是改变零件的截面形状和尺寸，缩短支承点间的距离，或采用加强筋等结构措施。

部件刚度受多种因素的影响，很难精确计算。因此，目前部件的刚度计算只是估算，即把计算求得的变形值与许用值加以比较。变形的许用值是根据试验或从实践中整理出来的统计资料而确定的。

三、振动稳定性

在变载荷作用下，零件将产生机械振动，如果零件的固有频率与载荷的频率相同时，将发生共振。一般情况下，共振将使零件丧失工作能力而失效。

任何零件都具有一定的刚度，同时又有一定的质量。因此，任何零件都有一定的固有频

率。例如，圆柱形拉压螺旋弹簧的固有频率为

$$\omega_n = \sqrt{\frac{F'}{m}K} \quad (1-11)$$

式中， F' 为螺旋弹簧的刚度； m 为弹簧的质量； K 为与螺旋弹簧两端固定方法有关的系数。

弹性元件或由弹性元件与其它零件组成的系统，固有频率较低，因而常常容易与载荷频率相同而产生共振。

防止共振最根本的方法是消除引起共振的载荷。例如，为消除回转零件的惯性力对振动的影响，可采用静平衡、动平衡或加平衡重的方法来解决。但是利用这个原理防止出现共振的可能性往往是有限的，通常是用改变零件的固有频率的方法来解决，或将零件安放在由减震器组成的隔振系统上，以防止共振的发生。

第三节 零件与机构的误差估算和精度

误差的概念可以用于不同的对象和不同的场合，故可把其概括地理解为实际值与理想值之间的差异。

在精密机械设计中，精度的高低是用误差的大小来度量的，误差越小，则精度越高。设计时必须保证精密机械正常工作所要求的精度。

一、零件与机构的误差

零件的误差，按其使用场合不同可分为加工误差和特性误差。加工误差是指加工时零件的实际尺寸或几何形状与理想值之间的差异；特性误差是指零件的实际特性与给定特性之间的差异。

机构的误差是指实际机构运动精度与理想机构运动精度之间的偏差，常用机构的位置误差和位移误差来表示。

所谓理想机构系指能绝对精确地实现给定运动规律的机构。但机构的各构件并非绝对刚体，各构件的尺寸也不可避免地存在制造误差，因此，理想机构并不存在，实际机构的运动与理想机构的运动总是有差别的。

机构的位置误差是当实际机构与理想机构的主动件位置相同时，两者从动件位置的偏差。如图 1-9 所示的曲柄滑块机构中，理想机构的初始位置为 OA_0B_0 ，滑块的初始位置在 B_0 点，由于存在制造误差，当机构的主动件曲柄 OA_0 的位置相同时，实际机构的位置为 $OA'_0B'_0$ ，滑块位置在 B'_0 点，则 $B_0B'_0$ 即为该机构的初始位置误差 ΔS 。

机构的位移误差是指实际机构与理想机构的主动件位移相同时，两者从动件位移量的偏差。如图 1-9 所示，当主动件 OA_0 和 OA'_0 的位置角由 α_0 转到 α_1 后，理想机构从动件的位移为 B_1B_0 ，实际机构从动件的位移为 $B'_1B'_0$ ，故机构的位移误差 $\Delta S'$ 为

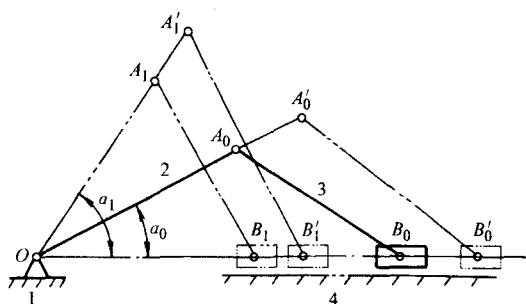


图 1-9 机构的位置和位移误差