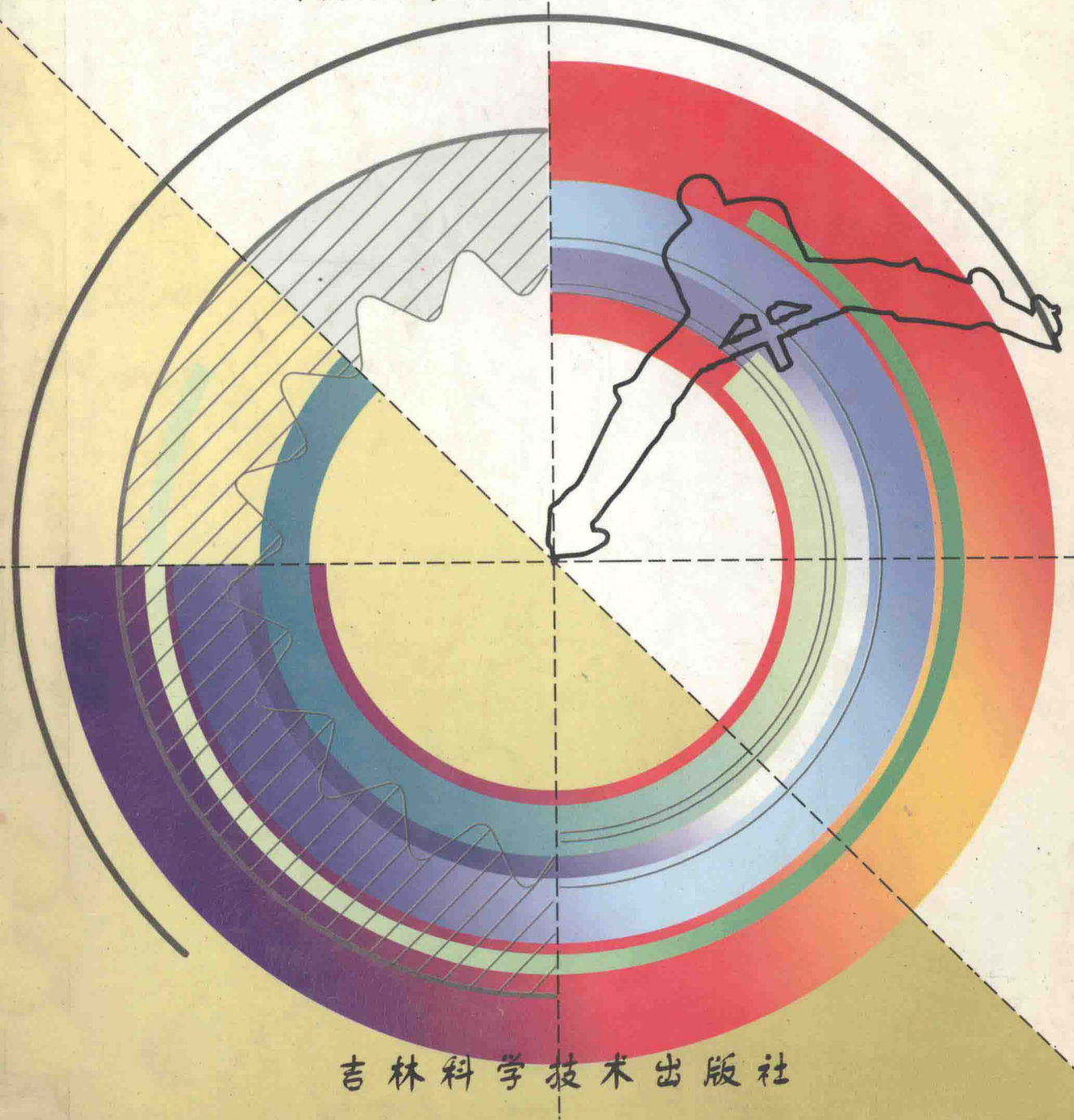


面向21世纪普通高等专科教学改革用书

# 实用机械设计

刘明保 李宏德 王志伟 等编著



吉林科学技术出版社

面向 21 世纪普通高等专科学校教学改革用书

# 实用机械设计

刘明保 李宏德 王志伟

孟玲琴 刘静香 孙爱芳 翟振辉

等编著

吉林科学技术出版社

## 内容简介

本书是根据国家教委审定的高等工程专科机械类专业机械基础系列课程的教学基本要求,结合多年来教学改革的实践,并吸取兄弟院校教学改革的成功经验,将原高工专机械类专业的材料力学和机械零件两门课程的内容有机地整合而成的一本改革力度极大的教学用书。

全书共十二章,包括:引言,机械零件设计概述,螺纹联接(附螺旋传动),齿轮传动,蜗杆传动,带传动,链传动,滑动轴承,滚动轴承,联轴器、离合器及制动器,轴及轴毂,其他常用零件,机械 CAD 技术。各章备有一定数量习题,以便选用。

本书为进行高工专机械类专业面向 21 世纪改革试点实践中机械设计课程的教学用书,也可供有关专业师生及工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

实用机械设计/刘明保等编著. —长春:吉林科学技术出版社,2003

ISBN 7-5384-2130-0

I. 实… II. 刘… 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(2003)第 011245 号

面向 21 世纪普通高等专科教学改革试用教材 实用机械设计

刘明保 等编著

---

责任编辑:王玉峰

封面设计:张志林

---

|    |              |                          |       |                   |         |
|----|--------------|--------------------------|-------|-------------------|---------|
| 出版 | 吉林科学技术出版社    | 787×1092 毫米              | 16 开本 | 68 千字             | 26.5 印张 |
| 发行 |              | 2003 年 4 月第 1 版          |       | 2003 年 4 月第 1 次印刷 |         |
| 印刷 | 中国电波传播研究所印刷厂 | ISBN 7-5384-2130-0/TH·31 |       | 定价:39.00 元        |         |

---

地址:长春市人民大街 124 号

邮编:130021

电话:5635177

传真:5635185

电子信箱:JLKJCBS@public.cc.jl.cn

---

## 前 言

本书是根据国家教委审定的高等工程专科机械类专业机械基础系列课程的教学基本要求,结合多年来教学改革的实践,并吸取兄弟院校教学改革的成功经验而编写的,是进行高工专机械类专业面向 21 世纪改革试点实践中机械设计课程的教学用书,也可供有关专业师生及工程技术人员参考。本书的主要特点如下:

1. 本书是根据高等工程专科教育培养工程、生产第一线技术应用型人才的总目标及加强课程整合和整体优化的教改原则,将原高工专机械类专业的材料力学和机械零件两门课程的内容有机地整合而成的一本改革力度极大的教学用书。全书以机械设计为主线,遵循“以应用为目的”、“以必需够用为度”和“少而精”、“浅而广”的原则,打破了旧的课程界限和学科体系,精选内容,精心编排,构建了应用型机械设计教材新体系,基本实现了两门课程内容的有机整合和整体优化,减少了重复,缩减了教学时数。

2. 根据教学改革的原则和要求,本书力求内容简明、联系实际,尽力为专业课教学打好必要的基础。对于基本理论及有关公式,突出应用,简化论证与推导;对机械零件、部件,突出失效形式、设计准则、材料选择、结构设计及工作能力计算等方面内容,降低对强度设计理论的要求;加强了针对性和岗位要求,力求在应用性和工程化方面有所突破。

3. 根据高工专教育培养技术应用型人才的总目标,本书突出应用性,着重培养学生灵活运用基本知识解决工程实际问题的能力,同时加强学生创新能力的培养。

4. 考虑到 21 世纪我国高等工程专科教育及机械设计现代化的发展前景,本书加强了计算机辅助设计能力的培养,并专门设置一章介绍机械 CAD 技术。

5. 作为专科教材,力求概念把握准确,叙述深入浅出,层次分明,详略得当,文句通顺,体现了较好的“可教性”和“自学性”。

6. 本书尽量引用了较新的标准、规范和资料,采用了我国国家标准规定的名词术语和符号。

本书由河南机电高等专科学校刘明保、李宏德、王志伟等三同志为负责人,并担任主编,其中刘明保同志为总负责人。具体章节为:刘明保(引言、第一章、第四章、第十章),李宏德(第二章),王志伟(第三章、第五章),孟玲琴(第七章、第八章),刘静香(第三章的第 5 节,第六章),孙爱芳(第九章、第十二章),翟振辉(第十一章)。

本书由河南科技大学胡师金教授担任主审,另外长春工程学院康云武教授、南京工程学院徐锦康教授、哈尔滨理工大学工业技术学院陈德祺、陈锐芬教授对本书的内容和体系提出了许多宝贵的意见和建议,在此表示衷心的感谢。

高等工程专科学校的教学改革是一项长期而艰苦的工作,目前仍处于探索阶段。如果本书的出版能对教学改革起到推动作用,给工程技术人员切实提供了帮助,将是我们最大的欣慰。由于我们水平有限,经验不足,书中难免有不妥之处,恳请广大师生和读者批评指正。

刘明保

2003 年 3 月

# 目 录

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 引 言                     | 1   |
| 第一章 机械零件设计概述            | 4   |
| 第一节 机械零件应满足的基本要求        | 4   |
| 第二节 机械零件的载荷,变形和失效       | 6   |
| 第三节 机械零件的内力和应力          | 7   |
| 第四节 机械零件的疲劳和疲劳寿命        | 11  |
| 第五节 机械零件的设计准则、方法和一般设计步骤 | 12  |
| 第六节 机械零件材料的选择原则         | 15  |
| 第七节 机械零件的结构工艺性          | 16  |
| 第二章 螺纹联接(附螺旋传动)         | 24  |
| 第一节 螺纹的类型和应用            | 24  |
| 第二节 螺纹联接的主要类型           | 26  |
| 第三节 螺纹联接件的拧紧与防松         | 29  |
| 第四节 机械零件的拉伸变形和拉伸应力      | 33  |
| 第五节 机械零件的扭转变形和扭转应力      | 36  |
| 第六节 机械零(构)件的机械性能实验      | 46  |
| 第七节 螺栓组的结构设计与受力分析       | 52  |
| 第八节 普通螺栓的强度计算           | 56  |
| 第九节 配合螺栓的强度计算和许用应力      | 60  |
| 第十节 提高螺栓联接强度的措施         | 63  |
| 第十一节 螺旋传动的计算简介          | 65  |
| 第十二节 压杆稳定               | 69  |
| 第三章 齿轮传动                | 83  |
| 第一节 齿轮传动的失效形式和计算准则      | 83  |
| 第二节 常用齿轮材料及其热处理         | 86  |
| 第三节 齿轮传动的精度             | 89  |
| 第四节 齿轮传动的受力分析和计算载荷      | 91  |
| 第五节 机械零件的弯曲变形和弯曲应力      | 97  |
| 第六节 标准直齿圆柱齿轮传动的强度计算     | 122 |
| 第七节 标准斜齿圆柱齿轮传动的强度计算     | 135 |
| 第八节 标准直齿圆锥齿轮传动的强度计算     | 140 |
| 第九节 齿轮的结构设计和润滑          | 145 |

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 第四章 蜗杆传动                | 157 |
| 第一节 蜗杆传动的特点和失效形式        | 157 |
| 第二节 蜗杆传动的材料             | 158 |
| 第三节 蜗杆传动的受力分析、强度计算和许用应力 | 159 |
| 第四节 蜗杆传动的热平衡计算          | 165 |
| 第五节 蜗杆传动的结构设计           | 167 |
| 第五章 带传动                 | 173 |
| 第一节 概述                  | 173 |
| 第二节 V 带与 V 带轮           | 175 |
| 第三节 带传动工作情况分析           | 182 |
| 第四节 普通 V 带传动的设计计算       | 184 |
| 第五节 带传动的张紧和维护           | 192 |
| 第六节 同步齿形传动简介            | 196 |
| 第六章 链传动                 | 201 |
| 第一节 概述                  | 201 |
| 第二节 滚子链和链轮的构造           | 202 |
| 第三节 机械零件的动载荷            | 206 |
| 第四节 链传动的运动分析            | 211 |
| 第五节 链传动的设计计算            | 213 |
| 第六节 链传动的使用与维护           | 218 |
| 第七章 滑动轴承                | 224 |
| 第一节 概述                  | 224 |
| 第二节 摩擦和润滑               | 224 |
| 第三节 滑动轴承的类型和典型结构        | 229 |
| 第四节 轴承材料和轴瓦结构           | 233 |
| 第五节 混和摩擦滑动轴承计算          | 238 |
| 第六节 液体动压轴承的基本知识         | 239 |
| 第八章 滚动轴承                | 245 |
| 第一节 滚动轴承的构造、类型和特点       | 245 |
| 第二节 滚动轴承的代号和类型选择        | 250 |
| 第三节 滚动轴承的失效形式和计算准则      | 255 |
| 第四节 滚动轴承的型号选择           | 256 |
| 第五节 滚动轴承的组合设计           | 268 |
| 第六节 滚动轴承的使用与维护          | 276 |
| 第七节 国内外滚动轴承的代用          | 279 |
| 第九章 联轴器、离合器及制动器         | 283 |
| 第一节 概述                  | 283 |
| 第二节 联轴器                 | 283 |
| 第三节 离合器                 | 291 |

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 第四节 制动器.....                    | 293 |
| 第十章 轴及轴毂联接.....                 | 298 |
| 第一节 轴的类型、应用和设计要求 .....          | 298 |
| 第二节 轴的常用材料及其选择.....             | 300 |
| 第三节 轴的结构设计.....                 | 302 |
| 第四节 机械零件的复杂应力状态和强度理论简介.....     | 310 |
| 第五节 机械零(构)件的组合变形及其强度计算.....     | 326 |
| 第六节 轴的强度计算.....                 | 335 |
| 第七节 轴的刚度校核计算及振动稳定性简介.....       | 344 |
| 第八节 轴毂联接.....                   | 345 |
| 第十一章 其它常用零件.....                | 363 |
| 第一节 弹簧.....                     | 363 |
| 第二节 圆柱形压缩(拉伸)螺旋弹簧的结构参数的特性线..... | 366 |
| 第三节 机架零件.....                   | 376 |
| 第十二章 机构 CAD 技术 .....            | 380 |
| 第一节 CAD 技术概述 .....              | 380 |
| 第二节 齿轮传动 CAD 技术 .....           | 389 |
| 第三节 机械 CAD 技术的发展方向 .....        | 408 |
| 附录.....                         | 415 |

# 引言

在工农业生产和日常生活中,人们都使用或接触过许多机器。这些机器的作用能承担人力不能或不便承担的工作,能大大地提高人们的劳动生产率,改进产品质量;还能改善人们的劳动环境、减轻劳动强度,尤其是使用机器可大规模进行生产、实现高度的机械化和自动化,创造极大的物质财富,最大限度地满足人们物质文化生活的需要。因此,使用机器进行生产的水平是一个国家综合国力的标志,也是这个国家工业化水平的标志。

机器的类型很多,其型式,构造和用途差异很大。仔细剖析各种机器之后,可以看出任何一台机器或机械设备都是由许多机械零件,按照一定的规律和要求组合而成的。这些机械零件在机器或机械设备中都具有各自的特殊结构和功能。只有组成机器的机械零件,尤其是主要零件安全、可靠地进行工作,机器才具有良好的性能,才能正常地完成其预定的职能。

如图 0-1 是机械工程中常用的内燃机,就是由气缸体、活塞、连杆、曲轴、齿轮、凸轮轴、弹簧、进气阀、排气阀等多个机械零件装配而成的。为了将气缸中燃料燃烧的热能转换成机械能,必须靠组成内燃机的各种零件安全、可靠并协调地工作来完成。在内燃机的各种零件中,活塞将燃气的热能转变为往复直线运动,连杆将活塞的运动和动力传递给曲轴,通过曲轴将运动形式转变为转动;齿轮通过啮合,将曲轴的转动传递给工作机的轴,以完成预定的工作;同时齿轮还将带动凸轮轴转动,使凸轮协调工作,保证进气阀和排气阀按要示顺序启闭,以实现内燃机的进气和排气,从而保证内燃机正常地工作。如果组成内燃机的零件中,任何一个零件发生了折断、变形、磨损等失效,则内燃机就不能正常工作,而停车。

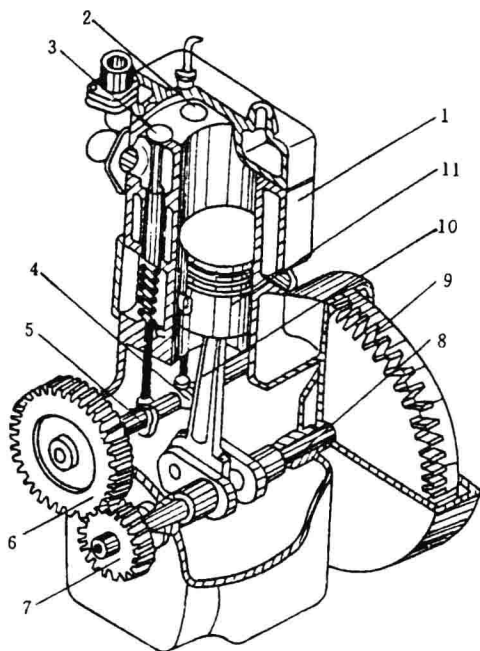


图 0-1 内燃机

1—气缸体 2—进气阀 3—排气阀 4、5—凸轮  
6、7、9—齿轮 8—曲轴 10—连杆 11—活塞

再如图 0-2 所示的减速机。是机器中的一个传动部件。其由箱体、齿轮、轴、滚动轴承、键、螺栓、通气帽、油窗等多个零件,按一定的规律和要求装配组合而成。为了将原动机的高转速减小为符合使用要求的低转速,必须靠减速机中各种机械零件的安全、可靠和协调地工作来完成。这些零件,由于设计、制造、使用、维护等方面的原因,会出现种种失效而不能正常工作。如

果组成减速机的各种零件中,任何一个零件不能正常地工作,那么减速机就不能正常地工作,就不能发挥其应有的职能,就会给使用者造成的不必要的损失。

综上所述,机器的职能和性能是由机械零件来实现和保证的。在机械工程中我们通常把组成机器的不可拆的基本单元体称为机械零件,简称零件。如机器中的螺栓、齿轮、轴、轴承等。为完成同一职能,在结构上组合在一起的,一套协同工作的零件称为部件,如机器中的变速箱、减速机、联轴器等。机器中的零件一般分为两大类。在各种机器中都经常使用的,且具有同一职能的零件称为通用零件。如齿轮、轴、轴承、螺栓、弹簧等。只有在特定的机器中才使用的零件称为专用零件。如前述内燃机中的活塞、连杆、曲轴等。

本课程的主要研究对象是在普通条件下工作的,一般参数的通用机械零件,即不包括那些尺寸特大或特小,环境温度过高或过低以及高速、高压或其它特殊条件下工作的通用零件,这些零件将在专业课程中来研究。

本书的主要内容是从机械零件的受力、变形、失效分析出发,考虑机械零件的承载能力,结构、工艺和维护等条件,研究一般工作条件下通用零件的设计问题。其中包括如何选定零件的类型;如何确定零件最适当的外形和尺寸;如何选择零件的材料、精度等级,表面质量以及规定制造时的技术条件等。具体内容如下:

1、机械零件设计基础 介绍机械零件的设计方法和一般设计步骤;机械零件设计过程中的一些共性问题,如零件的载荷、变形、应力和疲劳的概念,失效形式和设计准则,机械零件的结构工艺性及标准化等基本知识。

2、机械传动 传动装置是大多数机器的主要组成部分。本书只研究机械传动中的摩擦传动和啮合传动。其中包括带传动,链传动,齿轮传动,蜗杆传动和螺旋传动等。

3、联接 机器一般都由数以百计甚至数以万计的零件组合而成。这些零件都是以一定的方式结合起来成为一个整体,即机器。在机器中,零件与零件之间的结合方式称为联接。联接的种类很多。本书主要研究机器中最常用的螺纹联接、键和花键联接以及结构简单的销联接等。

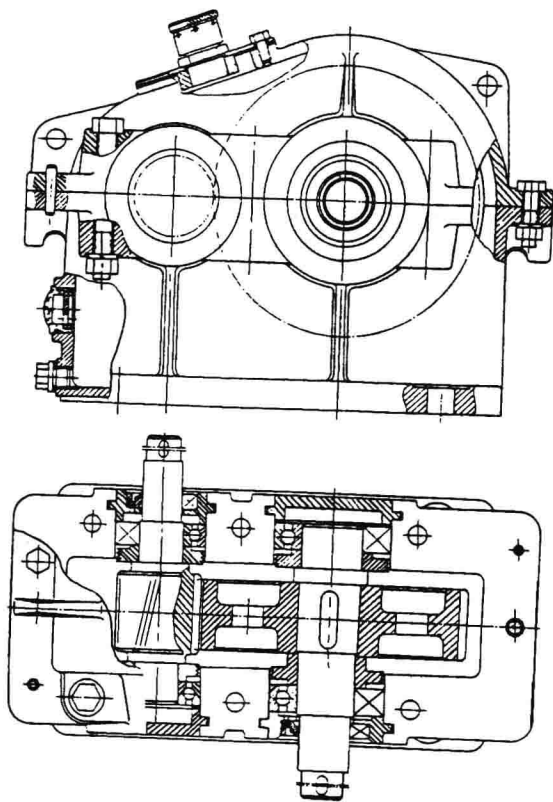


图 0-2 减速机

4、轴系 凡是作回转运动的零件都必须装配在轴上并保证其正确位置才能实现其回转运动。因此,轴是组成机器的重要零件。机器的轴(或轴上的回转零件)必须用轴承来支承。同时,为联接不同机构中的两根轴使之一同回转并传递转矩还要需要联轴器或离合器等。有时为了使机器迅速停车,减少辅助时间或控制速度,还需设置制动器。

5、其它零件 本书主要研究弹簧,箱体类零件等的设方法。

本课程是一门综合性、实践性很强的技术基础课。通过本课程的学习、作业、实验、课题设计和课程设计等环节,可培养读者树立工程观点及正确的设计思想;掌握一般通用零、部件的工作原理、特点、选用、维护以及设计理论和设计方法;了解机械设计的一般知识,具备设计机械传动装置和简单机械的能力以及分析解决机械工程问题、运用规范、标准和设计资料的能力。

# 第一章 机械零件设计概述

## 第一节 机械零件应满足的基本要求

如前所述,机器是由机械零件组成的。机器的职能和性能是由机械零件来实现和保证的。然而,机械零件在机器中工作时,能否安全、正常、可靠的运行、符合使用要求,首先表现在机械零件设计的合理性。因此,机械零件设计时,必须从机器的整体性能出发,满足下列基本要求。

一、工作可靠 即在规定的使用寿命内不发生各种失效。

### 1、强度

零件在工作中发生断裂或不允许的塑性变形属于强度不足,这类失效除了用于安全装置中预定适时破坏的机械零件外,对任何机械零件都是必须避免的。否则,轻则使机器停止工作,影响经济效益;重则发生事故,造成机毁人亡,使生命财产遭受重大损失。因此,具有适当的强度是机械零件必须满足的最基本要求。

为提高机械零件的强度,设计时可采用如下的措施:选择高强度材料;使零件具有足够的剖面尺寸;确定合理的零件剖面形状;对零件进行热处理、化学处理等强化处理;提高运动零件的制造精度;合理配置机器中各零件的相互位置等。

### 2、刚度

零件在工作时所产生的弹性变形不超过允许的限度,则该零件就叫做满足了刚度要求。这一要求并非所有机械零件都需要考虑,只有当弹性变形过大就会影响机器工作性能的零件才需考虑。例如电机轴,内燃机中的凸轮轴,机床主轴、导轨和丝杠等。对于这类零件,设计时除了要作强度计算外,还必须进行刚度计算。

提高机械零件刚度的措施有:采用宜于抵抗弹性变形的剖面形状;增加辅助支撑或筋板;减小支撑跨距等。

### 3、寿命

有些零件在工作初期虽然能够满足工作要求,但在工作一定时间后,就会由于某些原因而不能正常工作。设计时,把零件正常工作延续的时间称做零件的寿命。

影响零件寿命的主要因素有:相对运动零件接触表面的磨损;零件材料的腐蚀和疲劳等。

设计时应从零件的结构形状,尺寸大小,表面质量和表面防护等多方面采取措施,以保证零件具有一定的使用寿命。

### 4、可靠性

机械零件的可靠性一般用“可靠度”度量。可靠度是指机器或机械零件在一定的工作和环境条件下,在规定使用期限内能连续正常工作的概率。对于绝大多数零件来说,其失效都具有随机性。造成这种随机性的原因主要是因零件工作条件的随机性变化和零件本身物理、机械性能的随机性变化,因此,评价零件的可靠性,可按零件类型及用途不同而采用不同的评价指标。

机械零件的可靠性要求涉及的面很广。对于同样的零件,由于零件所从属的机械不同,可靠性要求也是不同的。例如齿轮,在拖拉机和飞机中的可靠性要求是明显不同的。

## 二、成本低廉 即机械零件的生产、装配、维修耗费最少。

### 1、零件的工艺性

机械零件应具有良好的工艺性,即在一定的生产条件下,以最小的劳动量,花最少的费用制造能满足使用要求的零件,并能以最简单的方法在机器中装拆与维修。

现代机器制造业以大规模生产为主,材料品种繁多,热处理工艺不断改进,加工方法与设备不断更新,因此,机械零件的工艺性已成为提高生产率的一个重要因素,因此,也是影响其成本的一个重要因素。

工艺性,就应当熟悉当前的生产水平及条件。同时,对零件工艺性具有决定性影响的零件结构设计,在零件的整个设计工作中占有很大的比重,因而必须予以足够的重视。

### 2、质量要求

在现代设计中,绝大多数零件都应力求减小质量。这有两方面的好处。一方面可节省材料;另一方面,对于运动零件来说,可以减少惯性,改善机器的动力性能。尤其是对于运输机械中的零件,更具有重要的意义。由于减轻了自重,可以增加运载量,从而提高机器的经济效能。

### 3、标准化要求

标准化是组织现代化大生产的重要手段,也是实行科学管理的重要措施之一。所谓零件的标准化,就是通过对零件的尺寸,结构型式,材料性能,检验方法,设计方法,制图规范等,制定出各式各样的大家共同遵守的标准加以限定。按规定标准设计和生产的零件称为标准零件,不按规定标准设计和生产的零件称为非标准零件。

我国现行标准有国家标准(GB),部颁标准(JB、YB)和地方、企业标准。需要指出,我国已参加了国际标准化组织(ISO),出口机械产品的设计和生產应采用国际标准(ISO),随着我国改革开放的不断深入和发展,国家标准已逐步,靠近国际标准。

标准零件可采用先进工艺组织大批量专业生产,节约材料,保证质量,降低零件成本。同时可节省设计时间,方便机器维修,提高零件的可靠性。

在设计中,只有标准零件不能满足要求时,才允许采用非标准零件。

### 4、经济性要求

经济性是机械产品的重要指标之一,从产品设计到制造,应始终贯彻经济性原则。

设计中,在满足零件使用要求的前提下,可以从下列几方面考虑零件的经济性。

- 1、应用先进的设计理论和方法,提高设计质量和效率,缩短设计周期,降低设计费用。
- 2、尽量选择一般材料,避免使用高级材料,以减少材料费用。同时应降低材料消耗。例如无切削加工,少切削加工或减少加工余量等。
- 3、零件结构应最简单,尽量采用标准零件,尽量选用允许的最大公差或最低精度。
- 4、提高机器的效率,节约能源。如尽可能减少运动件中的摩擦,创造良好的润滑条件等。
- 5、注意降低包装和运输费用。

## 三、造形美观要求

对机械产品中的某些零件中,应在满足工作可靠,成本低廉要求的前提下,注意造型美观,色调和谐。使产品的造形符合时代和人们的审美要求。

## 第二节 机械零件的载荷,变形和失效

### 一、机械零件的载荷

#### 1、载荷

机械零件在工作时,由于零件间的相互作用,必然要受到载荷的作用。

所谓载荷,即进行零件强度计算时所依据的,作用在零件上的外力  $F$ ,弯矩  $M$ 。扭矩  $T$  和冲击能量  $A_k$  等作用量的总称。由此可知,载荷为矢量。

#### 2、载荷的分类

作用在机械零件上的载荷按其随时间的变化规律可分为两大类。

静载荷:大小或方向不随时间变化或变化很缓慢(在零件寿命内不超过  $10^3$  次)的载荷,称为静载荷。如机床对地面的压力,锅炉的压力等。

变载荷 大小或方向随时间发生变化的载荷称为变载荷。呈周期性变化的载荷称为交变载荷。如空压机的曲轴,汽车车箱下面的板弹簧等所受的载荷。

### 二、机械零件的变形

任何物体受到外力作用后都会产生变形。就其变形性质来说,可分为弹性变形和塑性变形。当外力不超过一定限度时,卸去载荷后可恢复物体原来形状和尺寸的变形称为弹性变形;若外力过大时,卸去载荷后,物体的变形只能部分恢复而残留下一部分不能消失的变形,这种卸载后不能消失的变形称为塑性变形。

机械零件在载荷作用下,同其它物体一样,也必然要产生变形。而且不同型式的载荷引起的变形也各不相同。因此机械零件的变形型式很多。常见的基本变形形式有:

- 1、轴向拉伸或轴向压缩变形;
- 2、剪切变形;
- 3、扭转变形;
- 4、弯曲变形。

应当指出,有些机械零件工作时要同时承受几种基本变形,例如车床主轴工作时就同时承受弯曲,扭转和压缩三种基本变形;钻床立柱同时承受拉伸和弯曲两种基本变形。这种机械零件同时承受几种基本变形的现象叫组合变形。在研究机械零件的变形时,一般先研究基本变形时的强度及刚度计算,然后再研究组合变形时的强度及刚度计算。

必须指出,机械零件的这些变形会影响其工作的安全可靠。若变形超过允许的限度,机械零件就会失效而不能正常工作。

### 三、机械零件的失效

机械零件由于某些原因不能正常工作时,称为失效。失效并不单纯意味着破坏,只要零件不能正常工作即为失效。

机械零件的结构和工作情况是多种多样的。它们的失效形式亦各不相同。通用机械零件常见的失效形式有:

1、断裂：如螺栓被拧断；齿轮轮齿根部断裂等。断裂是一种严重的失效形式，它不但使零件失效，有时还会导致严重的人身及设备事故。

2、塑性变形：如齿轮过载时整个轮齿发生塑性变形，就会破坏啮合条件，在运转过程中会产生剧烈振动和噪声，甚至无法运转。

### 3、过量的弹性变形

机械零件受载时，必然会发生弹性变形。在允许范围内的微小弹性变形，对机器工作影响不大。但过量弹性变形会使零件或机器不能正常工作，有时还会造成较大的振动，致使零件损坏。例如机床主轴若过量弹性变形就会降低加工精度，电机轴若过量弹性变形，就会改变定子与转子间的气隙，影响电机的性能。

### 4、表面失效

绝大多数零件都与别的零件发生静的或动的接触与配合关系。因此，载荷作用于零件表面；摩擦和磨损发生在零件表面；环境介质包围着零件表面。所以表面失效是很多机械零件的主要失效形式。表面失效形式很多，常见的有磨损、点蚀、胶合、压溃和腐蚀等。表面失效出现后，会增大摩擦，增加能量消耗，破坏零件工作表面，最终导致零件报废。

### 5、破坏正常工作条件引起的失效

有些零件只有在一定的工作条件下才能正常工作。当正常工作条件受到破坏时，就会发生不同形式的失效。例如，在带传动中，若传递的载荷超过了带与带轮接触面上产生的最大摩擦力，就会发生打滑，使传动失效；高速转子的转速接近系统固有频率时会产生共振，振幅增大，以致引起断裂失效。在冲击、变载作用下和在高温或温差变化较大情况下工作的螺纹联接，会出现松脱，导致联接失效。应当说明，同一种零件可能有很多失效形式。以轴为例，它可能发生疲劳断裂，也可能发生过大的弹性变形，在高转速工作时还可能发生共振。在各种失效形式中，到底以哪一种为主要失效形式，这应根据零件的材料、结构和工作条件等来确定。仍以轴为例，对于载荷稳定，一般用途的转轴，疲劳断裂是其主要失效形式，而精密主轴，弹性变形量过大是其主要失效形式；若该轴为高速转轴，则发生共振，失去振动稳定性可能是其主要失效形式。

## 第三节 机械零件的内力和应力

### 一、机械零件的内力

机械零件受到外力作用而发生变形时，其材料内部各质点的相对位置和相互作用力必然要发生变化。这种由于外部载荷作用而引起的零件材料内部各质点之间的相互作用力的改变量，称为附加内力，通常简称为内力。

内力的大小与零件承受的外载荷有着密切的关系。通常情况下，内力随载荷增大而增大。当内力达到某一限度时就会使零件破坏。内力在零件内部的分布方式与载荷的种类和零件的结构有关。

内力与零件的强度，刚度和稳定性密切相关。

## 二、内力的种类

根据零件工作时所受载荷不同和由此而产生的变形形式不同,零件内力种类也不同。常见通用零件的内力有多种类型。

零件受到轴向拉力或轴向压力而产生轴向拉伸或轴向压缩变形时,零件材料中产生的内力为拉伸内力或压缩内力,通常称为轴力。零件受到剪切力而产生剪切变形时,零件材料中在受剪切的部位必然会产生剪切内力,通常称为剪力。零件受到转矩而产生扭转变形时,零件材料中在扭转部位截面上必然会产生扭转内力,通常称为扭矩。零件受到弯曲力矩而发生弯曲变形时,零件材料中的弯曲部位截面上必然会产生弯曲内力,通常称为弯矩。

## 三、机械零件的应力

在机械设计时,单凭零件材料中内力的大小并不能判断零件是否安全。例如用相同材料制成的粗细不同的两根等截面拉杆,在相同拉力下,两杆横截面上的内力肯一是相同的。但当拉力逐渐增大时,细杆必然会先被拉断。这种现象说明,拉杆的工作是否安全可靠,即其强度是否足够,不仅与截面上的内力大小有关,而且与截面的大小有关。研究表明,拉杆的强度取决于单位面积上的内力的大小,即内力在截面上的分布集度。在机械设计中,把内力在截面上的分布集度称为应力。并以应力的大小作为衡量零件所受外截载荷作用程度的尺度。

应力为矢量。单位为帕(Pa),量纲为  $\text{N}/\text{m}^2$ ;在机械工程上常用的单位为兆帕( $\text{MPa} = 10^6\text{Pa}$ )和吉帕( $\text{GPa} = 10^9\text{Pa}$ )。应当指出,零件截面上的应力不一定是均匀分布的。对于不同载荷产生的不同变形形式,应力在截面上的分布也是不同的。同时应力的方向不一定垂直于截面。为了应用方便,一般将应力投影为垂直于截面的法向分量 $\sigma$ 和位于截面内的切向分量 $\tau$ 。而且称垂直于截面的法向分量 $\sigma$ 为正应力,称位于截面内的切向分量 $\tau$ 为剪应力(亦称切应力)。同时规定,和截面外法线方向一致的正应力为正,反之为负;剪应力的符号和剪力一致。有关正应力、剪应力和内力符号的确定方法,将在后续有关章节详述。

## 四、应力的类型

按应力随时间变化的特性不同,可分为静应力和变应力两大类。

1、静应力:不随时间变化或变化缓慢的应力称为静应力。静应力只能在静载荷作用下产生。如图 1-1 所示。

2、变应力

1)变应力的产生

在机械工程中,有许多零件常在变载荷下工作。在其材料内部,应力的大小或方向不断地随时间而变化。例如,蒸汽机中的活塞杆,时而受拉,时而受压,其横截面上的应力必定随时间作周期性的变化。如图 1-2 所示。图 a 为其工作情况,图 b 为活塞杆内部应力变化图线。

还有一些零件虽然在静载荷下工作,但零件本身在不停地转动,从而在零件内部各处(轴心处除外)应力的大小或方向不断地随时间而变化。例如列车车厢轮轴,如图 1-3 所示。轮轴 I-I 截面上 A 点的应力,将随轴的转动不断地变化。在位置 1 处, A 点所受的应力为最大拉应力;当 A 点也随轴转动到位置 2 处时,该处的应力减小为零。A 点转到位置 3 处时,其受到的应力又变为最大,且应力的方向由拉应力变为压应力。当 A 点继续转到位置 4 处时, A 点所受

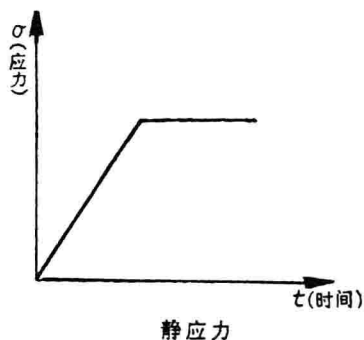


图 1-1 静应力

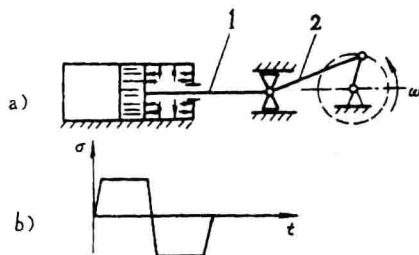


图 1-2 活塞杆工作示意图

的应力又减小为零。最后，当 A 点再转动到位置 1 处时，A 点应力又变为最大拉应力。这样随着轴的转动，A 点应力的大小和方向周而复始，不断地连续变化。

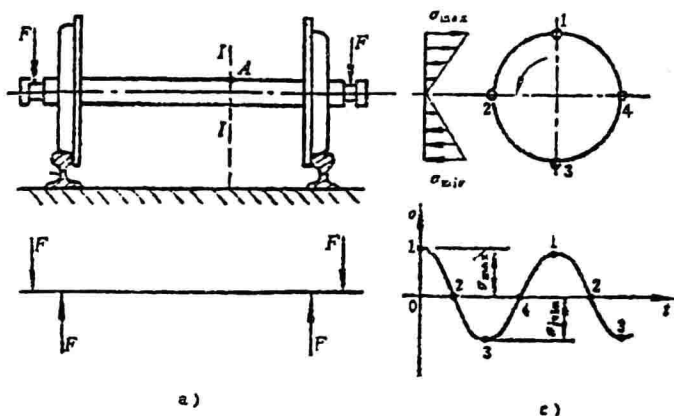


图 1-3 列车轮轴受力

零件中一点处的应力随时间变化而变化时称为变应力。由以上分析可知，变应力既可在变载荷作用下产生，也可在静载荷作用下产生。

## 2) 变应力的组成要素和循环特性

由前分析可知，变应力的大小或方向将不断地随时间变化而变化。为描述变应力随时间的变化情况，必需要了解变应力的组成要素和循环特性。

如图 1-4 为一杆件横截面上一点的应力随时间 (T) 的变化曲线。图中  $\sigma$  为正应力。

### (1) 应力循环

应力变化一个周期叫做一次应力循环。例如，应力从最大值变到最小值，又从最小值变回到最大值，即为一次应力循环。

### (2) 最大应力 $\sigma_{\max}$

应力循环变化中的最大极值叫最大应力。

### (3) 最小应力 $\sigma_{\min}$

应力循环变化中的最小极值叫最小应力。

(4)平均应力  $\sigma_m$

最大应力与最小应力的平均值叫平均应力。

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

(5)应力幅

应力变化的幅值叫应力幅

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

(6)循环特性

应力变化的规律叫循环特性。常用最小应力与最大应力之比来表示。

$$r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (1-3)$$

工程中,把比值  $r$  称为应力循环特性系数。

3)变应力的主要类型

工程中的变应力是多种多样的,常用的分类方法是按循环特性进行的。按照变应力的循环特性,常用的变应力有三种基本类型。

(1)对称循环变应力

这种变应力的特征是  $\sigma_{\max} = \sigma_{\min}$ ,  $\sigma_m = 0$ ,  $r =$

$\frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = -1$ 。如图 1-5 所示。

(2)脉动循环变应力

这种变应力的特征是  $\sigma_{\min} = 0$ ,  $\sigma_m = \sigma_a =$

$\frac{\sigma_{\max}}{2}$ ,  $r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = 0$  如图 1-6 所示。

(3)非对称循环变应力

这种变应力的特征是  $\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a$ ,  $\sigma_{\min} = \sigma_m - \sigma_a$ ,  $-1 < r < 1$ , 如图 1-7 所示。

应当说明的是,静应力的特征可以视为  $\sigma_m = \sigma_{\max} = \sigma_{\min}$ ,  $\sigma_a = 0$ ,  $r = +1$ 。

根据上述各类变应力的特征可以判断零件工作时应力类型,这是对零件进行强度计算的先决条件。

值得指出,上述对变应力的讨论同样适用于剪应力。对于剪应力,只要把符号  $\sigma$  更换为  $\tau$  即可。

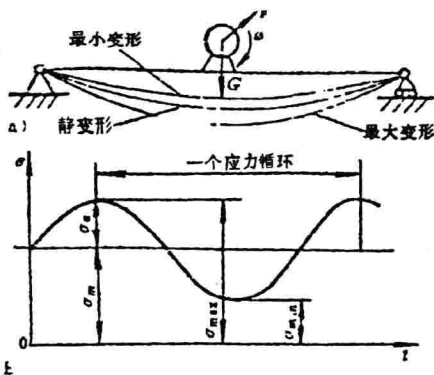


图 1-4 变应力的组成要素

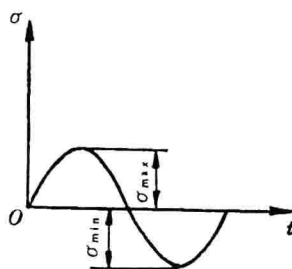


图 1-5 对称循环变应力

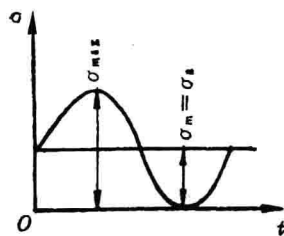


图 1-6 脉动循环变应力

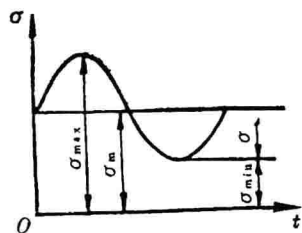


图 1-7 非对称循环变应力