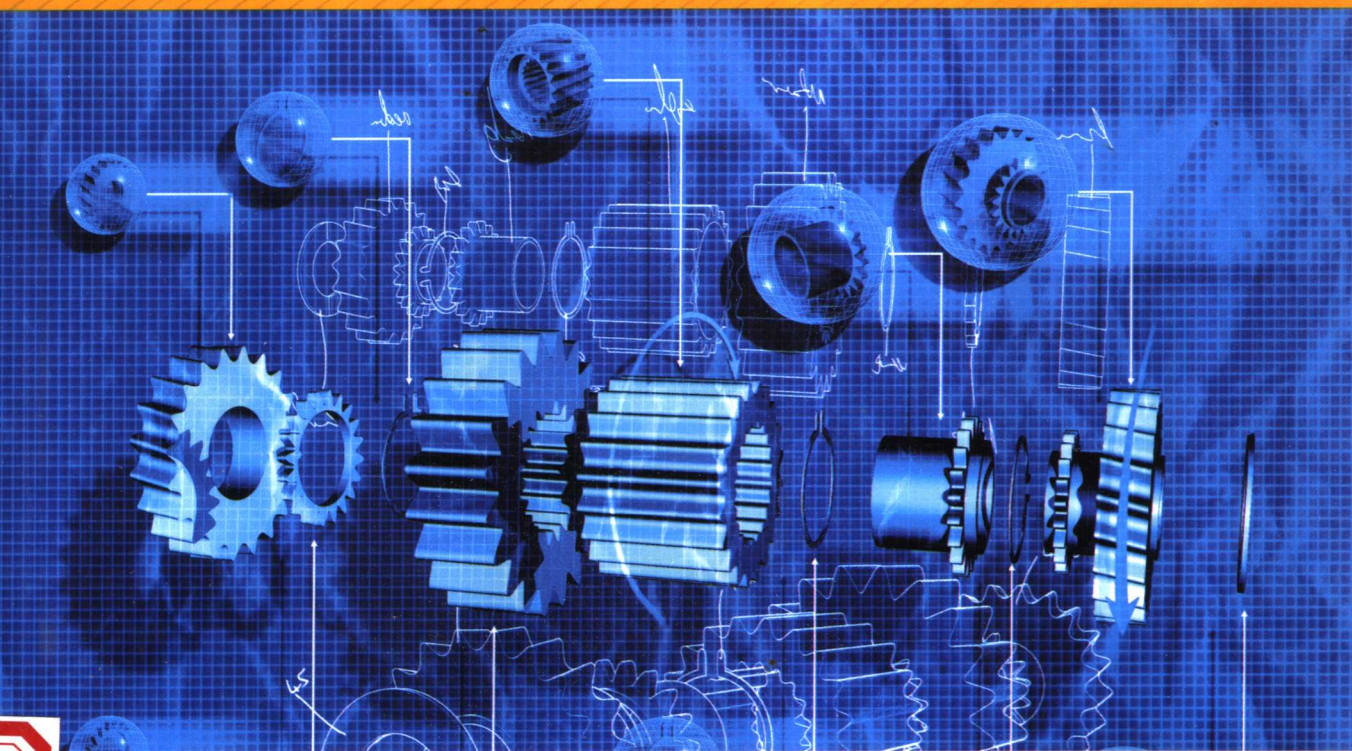




21 世纪高等院校应用型规划教材

机械设计教程

主 编 吴 玮 任红英
副主编 蔡厚道 徐 明
主 审 张岐生



 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书是根据高等院校机械类或近机械类各专业教学实践改革要求,对传统的工程材料和机械设计基础教材重新整合,并结合多年教学经验编写而成。全书共分14章,主要包括:概论、机械静力分析的基本原理与方法、机械零件基本变形时的承载能力、常用机构、带传动与链传动设计、齿轮传动设计、蜗杆传动设计、轮系设计概论、轴的设计、轴承选型设计、连接、其他常用机构及零部件、机械零件优化设计概论、机械创新设计。每章后均附有一定数量的思考与练习题目。

本书可作为高等院校、成人高校机械类或近机械类各专业的教材,也可作为各级各类学校相关专业师生的参考书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

机械设计教程/吴玮,任红英主编. —北京:北京理工大学出版社,
2007.8

ISBN 978-7-5640-1273-1

I. 机… II. ①吴… ②任… 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(2007)第126512号

出版发行/北京理工大学出版社

社 址/北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编/100081

电 话/(010)68914775(办公室) 68944990(营销中心) 68911084(读者服务部)

网 址/http://www.bitpress.com.cn

经 销/全国各地新华书店

印 刷/保定市中画美凯印刷有限公司

开 本/787毫米×1092毫米 1/16

印 张/26

字 数/611千字

版 次/2007年8月第1版 2007年8月第1次印刷

印 数/1~4000册

定 价/39.00元

责任校对/张 宏

责任印制/吴皓云

图书出现印装质量问题,本社负责调换

前 言

本书是为了满足高等院校机械类和近机械类各专业的教学改革实践要求,并适应当前各类学校机械和近机械类各专业教学体系及内容改革的发展趋势而编写的教材。考虑到目前许多学校机械和近机械类专业培养计划中在技术基础课程教学内容和学时数上出现的新变化,本书在原工程材料和机械设计基础教材的基础上,对体系和内容进行了适当的重新组合,使之能够满足机械和近机械类学生用较少的学时数完成技术基础课程的学习,并具备扎实和广博的机械设计基础知识。

本书具有以下主要特点:

(1) 从工程应用到机械系统整体考虑,将工程材料和机械设计基础的教学内容重新整合,使这门课程形成了完整的知识体系,并达到能够用较少的课时完成学习机械设计基础知识的目的。

(2) 强调现场对实际问题的分析能力和测绘、装拆、调试、运用、维护一般机械装置的技能培养,并注重提高学生的创新意识和能力。

(3) 教材体系和内容安排上符合学生认知规律和课程的教学规律,同时尽可能反映学科前沿的最新发展动态。在内容编排上,以工程需要为原则,注意各机构和机械零部件在工程中应用的介绍,注重对学生创新意识的熏陶和训练。

本书共分 14 章。参加本书编写工作的有张伶俐(第一章)、蔡厚道(第二、三章)、徐明(第十一、十三章)、邹波(第四、十四章)、任红英副教授(第五、七、八章)、吴玮(第六、九、十、十二章)。全书由吴玮、任红英副教授担任主编,蔡厚道、徐明担任副主编,全书由张岐生教授主审。

在编写过程中,许多教师提出了宝贵意见和建议,为提高本书质量给予了很大的帮助;出版社的编辑人员也为本书的出版和质量提高花费了大量心血,我们在此一并致以衷心的感谢。

由于我们的水平和时间有限,书中错误或不妥之处在所难免,殷切希望使用本书的教师和读者批评指正。

编 者

目 录

第1章 概述	(1)
第一节 总论	(1)
第二节 机械设计基础知识	(6)
思考与练习	(47)
第2章 机械静力分析的基本原理与方法	(49)
第一节 力的基本性质	(50)
第二节 力矩	(52)
第三节 力偶	(56)
第四节 力系的简化	(57)
第五节 约束反力与受力图	(60)
第六节 力系的平衡方程及其应用	(66)
第七节 摩擦	(74)
思考与练习	(76)
第3章 零件基本变形时的承载能力	(82)
第一节 变形固体的基本概念	(82)
第二节 杆件的拉伸与压缩	(85)
第三节 连接件的剪切与挤压计算	(91)
第四节 轴的扭转	(93)
第五节 梁的弯曲强度	(100)
第六节 提高梁承载能力的合理途径	(109)
第七节 组合变形时杆件的强度计算	(112)
思考与练习	(116)
第4章 常用机构	(121)
第一节 自由度及机构运动简图	(121)
第二节 平面连杆机构	(125)
第三节 平面四杆机构的演化与设计	(130)
第四节 凸轮机构	(135)
思考与练习	(142)
第5章 带传动和链传动设计	(145)
第一节 带传动概述	(145)

第二节 带传动的工作情况分析	(150)
第三节 V带传动设计	(153)
第四节 带传动的张紧、安装与维护	(163)
第五节 链及链轮	(164)
第六节 链传动的工作情况分析	(168)
第七节 链传动设计	(169)
第八节 链传动的布置和润滑	(174)
思考与练习	(178)
第6章 齿轮传动	(180)
第一节 齿轮传动的特点和类型	(180)
第二节 齿廓啮合基本定律	(182)
第三节 渐开线及渐开线齿廓啮合特性	(183)
第四节 渐开线标准直齿圆柱齿轮的几何尺寸计算	(185)
第五节 渐开线标准直齿圆柱齿轮的啮合条件	(189)
第六节 渐开线齿轮的加工方法与根切现象	(192)
第七节 变位齿轮传动简介	(196)
第八节 圆柱齿轮传动的精度	(198)
第九节 齿轮传动的失效形式、计算准则与齿轮传动常用材料	(201)
第十节 齿轮传动的受力和计算载荷	(210)
第十一节 直齿圆柱齿轮的强度计算	(212)
第十二节 斜齿圆柱齿轮传动	(219)
第十三节 直齿圆锥齿轮传动	(229)
第十四节 齿轮的结构设计	(236)
思考与练习	(239)
第7章 蜗杆传动设计	(241)
第一节 蜗杆蜗轮的形成、类型和特点	(241)
第二节 蜗杆蜗轮机构正确啮合条件、主要参数及几何尺寸计算	(243)
第三节 蜗杆传动的失效形式及设计准则	(246)
第四节 蜗杆蜗轮结构	(251)
思考与练习	(252)
第8章 齿轮系与减速器	(253)
第一节 轮系及其类型	(253)
第二节 定轴轮系传动比的计算	(255)
第三节 行星轮系传动比的计算	(257)
第四节 混合轮系传动比的计算	(259)
第五节 轮系的功用	(260)

思考与练习	(263)
第9章 轴的设计	(265)
第一节 轴的类型、功用和常用材料	(265)
第二节 轴的结构设计	(267)
第三节 轴的强度计算、设计步骤与设计实例	(270)
思考与练习	(274)
第10章 轴承选型设计	(275)
第一节 滑动轴承的典型结构	(275)
第二节 滑动轴承的材料和轴瓦结构	(277)
第三节 非液体摩擦滑动轴承的校核计算	(281)
第四节 滚动轴承的类型、结构和代号	(283)
第五节 滚动轴承的寿命计算和尺寸选择	(290)
第六节 滚动轴承的组合设计	(298)
思考与练习	(301)
第11章 连接	(302)
第一节 键连接	(302)
第二节 销连接	(308)
第三节 螺纹连接	(308)
第四节 联轴器和离合器	(330)
第五节 不可拆连接	(338)
思考与练习	(341)
第12章 其他常用机构及零部件	(343)
第一节 弹簧机构	(343)
第二节 螺旋机构	(352)
第三节 棘轮机构	(353)
第四节 槽轮机构	(355)
第五节 不完全齿轮机构	(355)
第六节 减速器的类型、特点和应用	(356)
思考与练习	(359)
第13章 机械零件优化设计概论	(360)
第一节 优化设计和示例	(360)
第二节 优化问题的分类	(362)
第三节 优化设计的数学模型	(363)
第四节 设计变量与设计空间	(366)

第五节	约束条件和可行域	(367)
第六节	目标函数	(369)
第七节	优化设计的几何解释	(370)
第八节	目标函数的等值线(面)	(373)
第九节	线性规划与非线性规划	(373)
第十节	几何规划与整数规划	(374)
第14章	机械创新设计	(376)
第一节	机械创新原理	(376)
第二节	创新设计方案及步骤	(381)
第三节	机构的创新设计	(385)
第四节	机械传动的创新设计	(391)
第五节	机械创新设计案例	(399)
参考文献		(406)

第1章

概 述

人类从使用简单工具到今天能够设计、制造和利用现代机械改造自然，造福社会经历了漫长的过程。如今，人们的日常生活和工作中已广泛使用着各种各样的机械，且人们也越来越离不开机械。在当今世界，机械设计水平和机械现代化程度已成为衡量一个国家工业发展水平的重要标志之一。因此努力学习机械方面的基础知识，掌握机械方面的基本技能是十分必要的。

第一节 总 论

一、机构、机器与机械的概念

（一）机器与机构

为了满足生活和生产的需要，人们普遍使用着各式各样的机器，人们熟知的如汽车、火车、飞机、轮船、自行车、洗衣机、发电机和各种机床等都是机器。机器的种类繁多，其结构、性能和用途也各不相同，但在机器的组成、运动和功能关系上都具有一些共同的特征。下面来分析两种机器实例。

如图1-1所示的单缸内燃机，它是由活塞1、连杆2、曲轴3、气缸体（机架）4、齿轮5和6、凸轮7、推杆8、进排气阀9和10等组成。它可把燃料燃烧产生的热能转化为机械能。具体工作原理如下：燃气通过进气阀被下行的活塞1吸入气缸，然后进气阀关闭，活塞上行压缩燃气，点火使燃气在气缸中燃烧，燃烧的气体膨胀产生压力，推动活塞下行，通过连杆带动曲轴转动，向外输出机械能。当活塞再次上行时，排气阀打开，废气通过排气阀排出。这种内燃机可视为下列三部分的组合：主体部分（由活塞、连杆、曲柄和机架构成），其作用是将活塞的往复移动转化为曲柄的连续转动；控制部分（由凸轮、推杆和机架构成），其作用是将凸轮的连续转动转变为推杆的往复移动；传动部分（由齿轮和机架构成），其作用是改变转速的大小和方向。

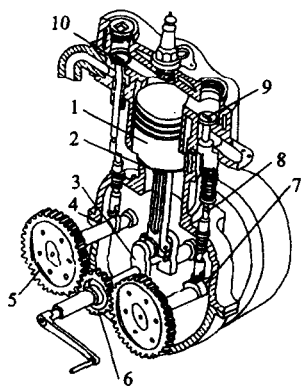


图1-1 单缸内燃机

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

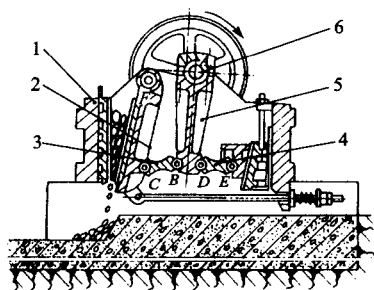


图 1-2 颚式碎矿机

1—机架；2—动颚板；
3、4、5—杆件；6—曲轴

又如图 1-2 所示的颚式碎矿机。它主要是由机架 1、动颚板 2、杆件 3、4、5 和曲轴 6 等组成。当电动机（图中未示出）驱动曲轴绕轴心 A 连续转动时，动颚板绕轴心 F 做往复摆动，从而将矿石轧碎。

从以上两个实例可以看出，尽管这些机器结构、性能和用途不同，但却具有以下共同特征：（1）都是一种人为的实物组合体；（2）各实体间具有确定的相对运动；（3）能做有用的机械功或进行功能转换。

凡具备上述三个特征的实物组合体称为机器，也可以说机器是执行机械运动的装置，用来变换或传递能量、物料与信息。具有前两个特征的实物组合体称为机构，

可见，机构是具有确定相对运动的实物组合体，它的作用是传递运动和力，它能实现各种预期的机械运动。机构中接受外部给定运动规律的活动构件称为主动件，随主动件的运动而运动的活动构件称为从动件，支承活动构件的构件称为固定件（机架）。

从组成上看，机构是机器的主要组成部分，一台机器可由一个机构组成，也可由多个机构组成。图 1-1 所示的内燃机中包括连杆机构、凸轮机构和齿轮机构等多个机构。从功能上看，机器能做有用的机械功或完成能量形式的转换，图 1-2 所示的颚式碎矿机工作时即是电能转化为机械能，而机构主要用于传递和转换运动。若单从运动观点来看，机器与机构并无本质区别，因此，常把机器与机构统称为机械。

机械一般由以下几个部分组成：原动机、传动部分和工作机。原动机是机械的动力来源，它主要为工作机提供运动和动力。常用的原动机有电动机、内燃机和液压机等。传动部分处于原动机和工作机之间，其作用是将原动机的运动和动力传给工作机。工作机是执行工作任务的部分，处于整个传动路线的终端。随着微电子技术、计算机技术和自动检测等技术的发展，现代机械又增加了控制部分和检测部分，使机械的结构、功能达到了更高的水平。

（二）零件、构件和部件

从制造角度看，机器是由若干个零件装配而成的，零件是构成机器的基本要素，是机器中不可拆卸的制造单元。从运动角度看，机器是由若干个运动的单元所组成，这种运动单元称为构件。构件可以是一个单独的零件，如图 1-1 中的齿轮，也可以是若干个零件刚性连接而成的，如内燃机中的连杆，如图 1-3 所示，由连杆体 1、轴套 2、连杆盖 3、轴瓦 4、螺杆 5 和螺母 6 等零件刚性连接而成的。

零件按其是否具有通用性可以分为两大类：一类是通用零件，它的应用很广泛，几乎在任何一部机器中都能找到它，例如齿轮、轴、螺母、销钉、键等；另一类是专用零件，它仅用于某些机器中，常可表征该机器的特点，例如内燃机中的活塞（见图 1-1）、起重机的吊钩等。

工程中也常将一组协同工作的零件分别装配或制造成一

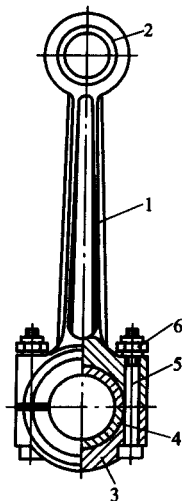


图 1-3 连杆的组成

1—连杆体；2—轴套；3—连杆盖；
4—轴瓦；5—螺杆；6—螺母

个个相对独立的组合体,然后再装配成整机,这种组合体常称之为部件(或组件),例如汽车的发动机、变速器及后桥等,车床的主轴箱、尾座、进给箱以及自行车的脚蹬子等部件。将机器看成是由零部件组成的,不仅有利于装配,也有利于机器的设计、运输、安装和维修等。

二、本课程的性质、内容和任务

本课程是一门理论性和实践性都很强的专业技术基础课,是后续专业课程学习或解决工程实际问题的必备基础,是机械类和近机械类专业的主要基础课程。本课程的研究对象为工程机械中的常用机构及一般工作条件下和常用参数范围内的通用零部件。主要研究其工作原理、种类、结构特点,基本设计理论,设计计算方法和选用及维护等方法;通过对本课程的学习,初步具备一般机构和零部件的分析和设计问题。

本课程的主要任务是:

- (1) 培养学生树立正确的设计思想和机械设计能力,尤其是创新设计能力。
- (2) 培养学生掌握机械设计的一般规律和常用机构及通用零部件设计原理、方法,要求学生具有与本课程有关的解题、运算、绘图、执行国家标准、收集和使用技术信息与资料的技能。
- (3) 培养学生熟悉常用机构及通用零部件的工作原理、特点、应用、结构和标准等。要求学生初步具有测绘、装拆、调整、检测一般机械装置的技能,并具有正确使用和维护机械传动装置的能力。
- (4) 培养学生掌握典型机械零件实验方法的技能。
- (5) 了解机械设计的最新发展状况及现代设计方法在机械设计中的应用。

三、机械设计的基本要求、原则和一般程序

(一) 机械设计的基本要求

机械设计是人们从生产和生活的实际需要出发,运用设计理论、方法和技能,经过构思、计算、绘图等过程,创造新机械的活动。机械设计可以是开发新产品,也可以是改造现有的机械。机械产品的设计阶段是决定其各项性能指标高低优劣的关键。机械产品的结构、性能、质量、成本、交货时间、可制造性、可维修性及人机环境等原则上都是设计阶段确定的。尽管机械产品的类型很多,但其设计应满足的基本要求大致相同,主要有以下几个方面。

1. 使用要求

使用要求是对机械产品的首要要求。是指机械产品必须满足用户对所需要的功能的要求,这是机械设计最根本的出发点。

2. 可靠性和安全性要求

机械产品在规定的使用条件下、规定的时间内,应具有完成规定功能的能力。安全可靠是机械产品的必备条件。

3. 经济性和社会性要求

经济性要求是指所设计的机械产品在设计、制造方面周期短、成本低;在使用方面效率高、能耗少、生产率高、维护与管理的费用少等。应该指出,在机械中采用标准零件,不仅

可以优化设计,保证互换性,便于机械的修配,而且有利于保证零件的质量并降低其成本。此外,机械产品应操作方便、安全,具有宜人的外形和色彩,符合国家环境保护和劳动法规的要求。

4. 其他特殊要求

有些机械产品由于工作环境和要求不同,对设计提出了某些特殊要求。例如对航空飞行器有质量小、飞行阻力小和运载能力大的要求;流动使用的机械(如塔式起重机、钻探机等)要便于安装、拆卸和运输;对机床有长期保持精度的要求;对食品、印刷、纺织、造纸机械等则要求保持清洁,不得污染产品等要求。

(二) 机械设计应遵循的基本原则

为了满足上述要求,机械设计应注意遵循以下基本原则。

1. 以市场需求为导向的原则

机械设计作为一种生产活动,与市场是紧密联系在一起。从确定设计任务、使用要求、技术指标、设计与制造工期到拿出总体方案、进行可行性论证、综合效用分析(尤其是实际使用效果的综合分析)、盈亏分析直至具体设计、试制、鉴定、产品投放市场后的信息反馈等都是紧紧围绕市场需求来运作的。设计人员要时时刻刻想着如何设计才能使产品更具竞争力,能够占领市场、受到用户青睐。

2. 创造性原则

创造是人类的本质。人类如果不发挥自己的创造性,生产就不能发展,科技就不会进步,也不会有人类的今天。设计只有作为一种创造性活动才具有强大的生命力。因循守旧,不敢创新,只能永远落在别人后面。特别是在当今世界科技飞速发展的情况下,在机械设计中贯彻创造性原则尤为重要。

3. 标准化、系列化、通用化原则

标准化、系列化、通用化简称为机械产品的“三化”。“三化”是我国现行的一项很重要的技术政策,在机械设计中要认真贯彻执行。

标准化就是对产品(特别是零部件)的尺寸、结构要素、材料性能、检验方法、设计方法和制图要求等方面的技术指标制定出各种大家共同遵守的标准。实行标准化,能以最先进的技术在专门化工厂中对应用面极广、数量巨大的已标准化的零件(称为标准件)进行大量的、集中的制造,以提高质量、降低成本;采用标准结构和标准件,可以简化设计工作,缩短设计周期,提高设计质量;此外,实行标准化还统一了材料和零件的性能指标,使其能够进行比较,并提高了零件性能的可靠性。

现已发布的与机械零部件设计有关的标准,从使用范围上来讲,分为国家标准(GB)、行业标准(如机械行业标准JB)和企业标准三个等级。国家标准分为强制性国家标准,其代号为GB××××(为标准序号)××××(为批准年代);推荐性国家标准,其代号为GB/T××××××××。强制性国家标准只占整个国家标准中的极少数,但必须严格遵照执行,否则就是违法。推荐性国家标准占到整个国家标准中的绝大多数,如无特殊理由和需要,也应当遵守这些标准,以期获得良好的效果。目前,我国的某些标准正在迅速向国际标准化组织标准(ISO)靠拢。

为了组织生产,常将一种产品的主要参数系列化,称为产品系列化。不同的产品中,可以有些零部件是相同的,这称为零部件的通用化。

贯彻“三化”的好处主要是：减轻了设计工作量，有利于提高设计质量并缩短生产周期；减少了刀具和量具的规格，便于设计与制造，从而降低其成本；便于组织标准件的规模化、专门化生产，易于保证产品质量、节约材料、降低成本；提高了互换性，便于维修；便于国家的宏观管理与调控以及内、外贸易；便于评价产品质量，解决经济纠纷等。

4. 整体优化原则

机械设计要贯彻“系统论”和优化的思想。性能最好的机器其内部零件不一定是最好的；性能最好的机器也不一定是效益最好的机器；只要是有利于整体优化，机械部件也可以考虑用电子或其他元器件代替。总之，设计人员要将设计方案放在大系统中去考察，寻求最优，要从经济、技术、社会效益等各个方面去分析、计算，权衡利弊，尽量使设计效果达到最佳。

5. 联系实际原则

所有的设计都不要脱离实际。设计人员要考虑当前的原材料供应情况、企业的生产条件、用户的使用条件和要求等。

6. 人机工程原则

机器是为人服务的，但也是需要人去操作使用的。如何使机器适应人的操作要求，人机合一后，投入产出比最高，整体效果最好，这是摆在设计人员面前的一个课题。好的设计一定要符合人机工程学原理。

（三）机械设计的一般过程

机械产品的设计类型大致分为开发性设计（应用新原理、新技术对产品进行全新的设计）、适应性设计（根据生产技术的发展和使用部门的要求，对产品的结构和性能进行更新和改造的设计）和变型设计（产品的工作原理和功能不变，为了适应工艺条件和使用要求，改变产品的具体参数或结构的设计）。显然，设计类型的不同以及机械产品本身类型的不同，都会影响到设计过程的繁简程度和设计重点。虽然机械产品种类繁多，用途各异，但其设计过程却相差不多。机械产品设计一般可分为以下几个阶段。

1. 提出设计任务阶段

本阶段应根据市场信息（含预测）或用户要求确定设计任务。应组织有关人员应在设计的机械产品需求情况反复调查研究、分析、收集整理信息资料的基础上，进一步明确产品应具备的功能、经济价值、加工时限要求和对环境的影响情况等，经过论证，编制设计任务书。设计任务书中应明确规定机械产品的功能要求、经济性、环保要求、制造要求、基本使用要求及完成设计任务的预计期限等。

2. 方案设计阶段

根据设计任务书，通过充分的调查研究和必要的试验分析，提出若干个可行的设计方案，经过对方案的对比分析和评价，确定最佳设计方案。方案设计要提出机械产品的原理图、机构运动简图和传动系统图等，它是下一步工作的基础，对整个设计的成败起关键的作用。应力求做到所设计的方案技术先进、使用可靠、经济、合理。要说明的是，如果经过筛选之后还剩下两个方案难分伯仲，条件允许时可以齐头并进，在设计过程中，根据实际情况决定取舍。

3. 技术设计阶段

本阶段要进行运动学设计、动力学设计、结构设计和主要零部件的工作能力（强度、

刚度、振动稳定性、寿命等)设计等技术设计工作,完成总体设计草图、部件及产品装配图、零件工作图等的绘制。在此阶段,由于影响设计的因素太多,它们之间又存在相互联系、相互制约的关系,造成设计工作出现反复、绘图与计算交叉进行的现象是不足为怪的。

4. 整理技术文档阶段

本阶段要根据设计时的实际情况编写设计计算说明书、使用说明书等技术文件,还要整理图样,将全部图样装订成册、编写图样目录。必要时可以将全部技术文档存入计算机硬盘、复制软盘、制成光盘或进行微缩处理。

5. 试验分析阶段

用技术设计阶段提供的图样等技术文件进行产品试制,并应进行样机的有关试验,根据样机存在的问题,对原设计方案进行修改完善。

6. 生产设计阶段

根据修改后的设计图样和其他技术文件,进行工艺流程和工艺装备的设计,完成生产准备。

7. 投产、使用与考核阶段

产品在成批制造后;可以投放市场,这时需广泛征求用户的意见,为产品的改进和更新设计提供依据。

在设计工作中,特别要注意处理好继承与创新的关系,既要借鉴成功的经验,特别是新技术、新结构等,以免走弯路,又要敢于突破旧的框框,运用创造性思维方法和创造技法去寻找新颖独特的设计,使产品具有竞争力。

应当注意,在机械设计过程中,各个阶段的工作会不断的交叉和反复,极少出现一次就能依次进行到底的情况,这是机械设计中经常遇到的正常情况。

第二节 机械设计基础知识

设计和制造机械零件时,经常要考虑选择什么材料、经过怎样的热处理才能保证其使用性能以及便于加工等问题。实际上,合理地选择材料和加工工艺,不仅对保证机械的使用性能,而且对提高产品质量,降低加工成本、获取较高的经济效益都有重要意义,为了正确、合理地使用金属材料,必须了解其性能。

一、金属材料的性能

金属材料是现代机械制造业的基本材料,广泛地应用于制造机械零件和生活用品。金属材料之所以获得广泛的应用是由于它具有许多良好的性能。

金属材料的性能可分为物理性能、化学性能、力学性能和工艺性能等。物理性能包括密度、熔点、热膨胀性、导热性、导电性和磁性等。化学性能表现为材料在室温、高温下抵抗各种化学作用的性能,如耐蚀性、抗氧化性等。工艺性能是指材料对某种加工工艺的适应性,包括铸造性能、锻造性能、焊接性能、热处理性能和切削加工性能等。

(一) 金属材料的力学性能

在机械设备及工具的设计、制造中选用金属材料时,大多以其力学性能为主要依据,所以熟悉和掌握金属材料的力学性能是非常重要的。因此这里重点介绍金属材料的力学性能。

金属材料的力学性能是指材料在外力作用下所表现出来的各种性能。力学性能包括强度、塑性、硬度、冲击韧性及疲劳强度等。

金属材料由于受到外力的作用而产生的形状改变称为变形。变形一般分为弹性变形和塑性变形两种。弹性变形能随着载荷的去除而消失，塑性变形则是永久变形，不能随着载荷的去除而消失。

金属材料在加工及使用过程中所受的外力称为载荷。根据载荷作用性质的不同，它可以分为静载荷、冲击载荷及交变载荷等3种：

- (1) 静载荷是指大小不变或变动很慢的载荷。
- (2) 冲击载荷在短时间内以较高速度作用于零件上的载荷。
- (3) 交变载荷是指大小、方向或大小和方向随时间发生周期性变化的载荷。

此外，根据作用形式的不同，载荷又可分为拉伸载荷、压缩载荷、弯曲载荷、剪切载荷和扭转载荷等如图1-4所示。

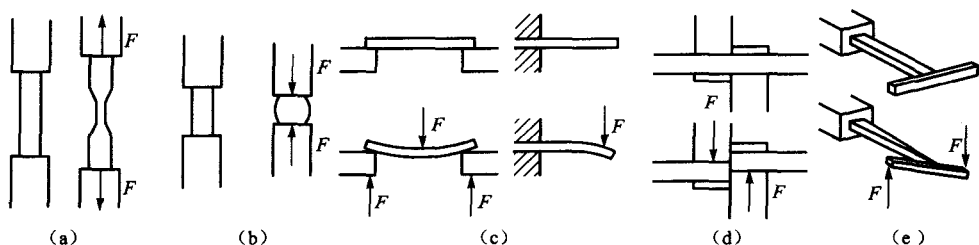


图1-4 载荷的作用形式

(a) 拉伸载荷；(b) 压缩载荷；(c) 弯曲载荷；(d) 剪切载荷；(e) 扭转载荷

1. 强度

金属材料抵抗塑性变形（永久变形）或断裂的能力称之为强度，抵抗能力越大，则强度越高。强度的大小通常用应力来表示。测定强度高低的通常采用试验法。其中拉伸试验应用最普遍。

(1) 拉伸试验。

做拉伸试验要使用拉伸试验机和试样。为了保证在不同的试验机上试验相同的材料能得到同一结果，应对试样的形状和尺寸等做出统一规定。在国家标准（GB/T 6397—1986）中，对试样的形状、尺寸及加工要求均有明确规定。拉伸试样的形状一般有圆形

和矩形2种。最常用的试样（图1-5）为圆形拉伸试样，其中 d_0 表示原始直径， l_0 表示原始标距长度。根据标距长度与直径之间的关系，试样分长试样（ $l_0 = 10d_0$ ）和短试样（ $l_0 = 5d_0$ ）2种。

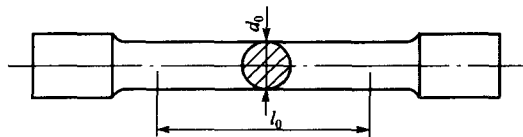


图1-5 圆形拉伸试样

做拉伸试验时，先将试样按要求装夹在试验机上，然后对试样缓慢施加轴向力（又称为拉伸力），试样会随着拉伸力的增加而逐渐变长，当载荷达到最大值后，试样的某处直径发生局部收缩，这种现象称为“缩颈”。由于试样缩颈处横截面积的减小，试样变形所需的载荷也随之降低，这时伸长主要集中于缩颈部位，直至断裂。在整个试验中，可以通过自动

记录装置将拉伸力与试样伸长量之间的关系记录下来。如果以试样的伸长量作横坐标, 拉伸力作纵坐标, 则按试验的全过程绘制出的曲线表达了拉伸力和伸长量之间的关系, 则此关系曲线称为力-伸长曲线, 也称为拉伸曲线图。

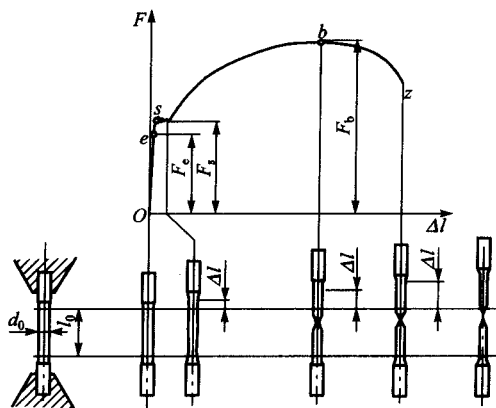


图 1-6 低碳钢的力-伸长曲线

图 1-6 是某低碳钢的力-伸长曲线。图中明显地表现出下面几个变形阶段:

① 弹性变形阶段 (oe 段)。试样变形完全是弹性的, 此时如果卸载, 试样就会恢复原状。 F_e 为试样能恢复到原始形状和尺寸的最大拉伸力。

② 屈服阶段 (es 段)。当载荷超过 F_e 再卸载时, 试样的伸长只能部分地恢复, 而保留一部分残余变形。当载荷增加到 F_s 时, 图上出现平台或锯齿状, 这种在载荷不增加或略有减小的情况下, 试样还继续伸长的现象叫做屈服。 F_s 称为屈服载荷。屈服后, 材料开始出现明显的塑性变形。

③ 强化阶段 (sb 段)。在屈服阶段以后, 欲使试样继续伸长, 必须不断加载。随着塑性变形增大, 试样变形抗力也逐渐增加, 这种现象称为形变强化 (或称加工硬化), 此阶段试样的变形是均匀发生的。 F_b 为试样拉伸试验时的最大载荷。

④ 缩颈阶段 (bz 段)。此阶段也称为局部塑性变形阶段, 当载荷达到最大值 F_b 时, 试样的抗拉能力下降, 到 z 点时, 试样在缩颈处被拉断。

(2) 强度指标。

为了便于比较, 强度指标 (即表征和判定强度所用的指标) 采用应力的大小来度量。

应力是单位面积上的内力。内力则是指材料受到外力作用后为保持其不变形, 在材料内部作用着与外力相对抗的力。做拉伸试验时, 试样没有断裂前处于平衡状态, 可以认为内力与外力 (即拉伸力) 相等。单位面积上的内力称为应力。应力用符号 σ 表示, 其单位为 Pa (帕) 或 MPa (兆帕) $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$, $1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa} = 1 \text{ N/mm}^2$ 。

常用的强度指标有三个: 弹性极限 σ_e 、抗拉强度 σ_b 和屈服点 σ_s 。它们的计算公式分别为

$$\sigma_e = \frac{F_e}{S_0} \quad (1-1)$$

$$\sigma_b = \frac{F_b}{S_0} \quad (1-2)$$

$$\sigma_s = \frac{F_s}{S_0} \quad (1-3)$$

式中 F_e ——试样产生完全弹性变形时的最大载荷 (N);

F_b ——试样拉断前承受的最大载荷 (N);

F_s ——试样屈服时的载荷 (N);

S_0 ——试样原始横截面积 (mm^2)。

抗拉强度表示材料在拉断前所承受的最大应力。它是机械零件设计和选材的主要依据之一。屈服点是指试样在试验过程中力不增加（保持恒定）仍能继续伸长（变形）时的应力。对于无明显屈服现象的金属材料则测定其规定残余伸长应力 $\sigma_{0.2}$ 。 $\sigma_{0.2}$ 表示试样卸除拉伸载荷后，其标距部分的残余伸长达到规定的原始标距 0.2% 时的应力。机械零件在工作时如受力过大，则会因过量的塑性变形而失效。材料的屈服点或规定残余伸长应力越高，允许的工作应力也越高，则零件的截面尺寸及自身质量就可以减少。因此，材料的屈服点或规定残余拉伸应力是机械设计的主要依据，也是评定金属材料优劣的重要指标。

2. 塑性

塑性是指金属材料断裂前发生不可逆永久变形的能力。塑性好的金属材料便于进行压力加工成型。判断金属材料塑性好坏的主要指标有断后伸长率 δ 和断面收缩率 ψ 。它们也可以通过前面提到的拉伸试验进行分析。

断后伸长率是试样被拉断后，标距的伸长量同原始标距的百分比。即

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\% \quad (1-4)$$

式中 l_1 ——试样被拉断后的长度（mm）；

l_0 ——试样原始标距的长度（mm）。

断面收缩率是试样拉断后，缩颈处横截面积的缩减量与原始横截面积的百分比。即

$$\psi = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \times 100\% \quad (1-5)$$

式中 S_0 ——试样原始横截面积（mm²）；

S_1 ——试样拉断后缩颈处的横截面积（mm²）。

金属材料的伸长率（ δ ）和断面收缩率（ ψ ）数值越大，表示材料的塑性越好。塑性好的金属可以发生大量塑性变形而不破坏，易于通过塑性变形加工成复杂形状的零件。例如，工业纯铁的 δ 可达 50%， ψ 可达 80%，可以拉制细丝，轧制薄板等。铸铁的 δ 几乎为零，所以不能进行塑性变形加工。塑性好的材料，在受力过大时，首先产生塑性变形而不致发生突然断裂，因此比较安全。

下面举例说明强度、塑性的计算方法。

例 1-1 有一个直径 $d_0 = 10$ mm， $l_0 = 100$ mm 的低碳钢试样，拉伸试验时测得 $F_s = 21$ kN， $F_b = 29$ kN， $d_1 = 5.65$ mm， $l_1 = 138$ mm。求此试样的 σ_s ， σ_b ， δ ， ψ 。

解 （1）计算 S_0 ， S_1 。

$$S_0 = \frac{\pi d_0^2}{4} = \frac{3.14 \times 10^2}{4} \text{ mm}^2 = 78.5 \text{ mm}^2$$

$$S_1 = \frac{\pi d_1^2}{4} = \frac{3.14 \times 5.65^2}{4} \text{ mm}^2 = 25 \text{ mm}^2$$

（2）计算 σ_s ， σ_b 。

$$\sigma_s = \frac{F_s}{S_0} = \frac{21\,000}{78.5} \text{ MPa} = 267.5 \text{ MPa}$$

$$\sigma_b = \frac{F_b}{S_0} = \frac{29\,000}{78.5} \text{ MPa} = 369.4 \text{ MPa}$$

(3) 计算 δ , ψ 。

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\% = \frac{138 - 100}{100} \times 100\% = 38\%$$

$$\psi = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \times 100\% = \frac{78.5 - 25}{78.5} \times 100\% = 68\%$$

3. 硬度

硬度是指金属材料抵抗局部变形,特别是局部塑性变形、压痕或划痕的能力,硬度是各种零件和工具必须具备的性能指标。机械制造业所用的刀具、量具、模具等都应具备足够的硬度,才能保证使用性能和寿命。有些机械零件如齿轮等,也要求有一定的硬度,以保证足够的耐磨性和使用寿命。因此硬度是衡量材料软硬的指标,也可以从一定程度上反映材料的综合力学性能。硬度值也可以间接地反映金属的强度及金属在化学成分、金相组织和热处理工艺上的差异。材料的硬度可通过硬度试验来测定。常用的硬度试验方法有布氏测试法、洛氏测试法、维氏测试法和里氏测试法,其中前两种方法应用最广泛。

1) 布氏硬度

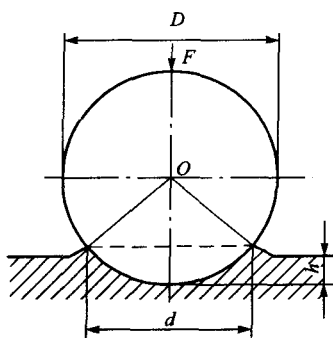


图 1-7 布氏硬度试验原理图

用布氏测试法测定的硬度称为布氏硬度。布氏测试法的原理如图 1-7 所示。试验时,按照一定的规范,用直径为 D 的淬火钢球或硬质合金球作为压头,在规定的试验力 F 的作用下,压入试样表面并保持一段时间,然后撤去试验力 F ,测量压痕直径 d ,以压痕单位面积上的压力表示材料的布氏硬度值,用符号 HBS (淬火钢球) 或 HBW (硬质合金球) 表示。

在实际应用时,布氏硬度值既不用计算,也不用标注单位,只需测出压痕直径 d 后再查压痕直径与布氏硬度对照表即可。当试验力 (F) 和压头球体直径 (D) 一定时,布氏硬度值仅与压痕直径 (d) 的大小有关。 d 越小,布氏硬度

值越大。也就是硬度越高。相反, d 越大,布氏硬度值越小,硬度也越低。

布氏硬度的表示方法:布氏硬度值+压头球体的直径/试验力/试验力保持的时间(10~15 s 不标注)。例如:170 HBS 10/1000/30 表示用直径为 10 mm 的钢球,在 1 000 kgf (9 807 N) 的试验力作用下保持 30 s 时,测得的布氏硬度值为 170。530HBW5/750 表示用直径为 5 mm 的硬质合金球,在 750 kgf (7 355 N) 的试验力作用下,保持 10~15 s 时测得的布氏硬度值为 530。布氏硬度主要适用于测定灰铸铁、有色金属、各种软钢等硬度不是很高的材料。用钢球压头测量时,材料硬度值必须小于 450;用硬质合金球压头时,材料硬度值必须小于 650。又因其压痕较大,布氏硬度不宜于测量成品及薄件。

2) 洛氏硬度

用洛氏测试法测出的硬度值称为洛氏硬度。洛氏测试法采用金刚石圆锥体或淬火钢球压头,压入金属表面后,经规定保持时间后卸除主试验力,以测量的压痕深度来计算洛氏硬度值。在具体实际工作中,洛氏硬度值既不用计算,也不用查表,可方便地在洛氏硬度测试仪上直接读出。根据试验时采用的压头和试验力的不同,洛氏硬度常采用三种标尺:HRA、HRB 和 HRC,其中 HRC 应用最多。