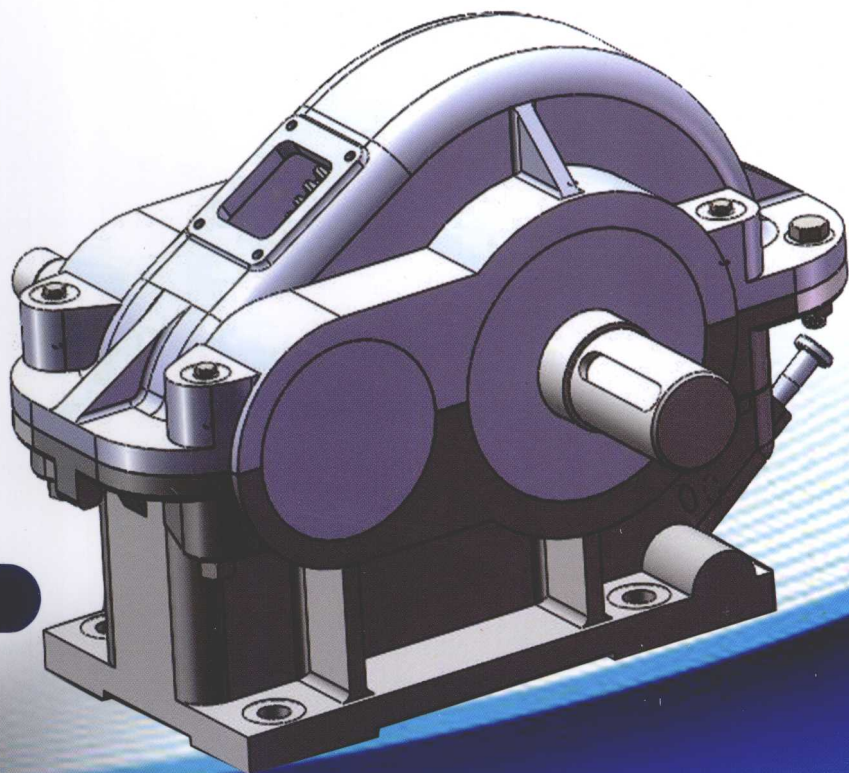
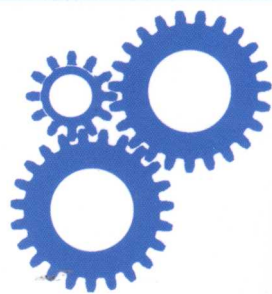


普通高等教育“十二五”规划教材（机电类专业教材）

机械设计基础

JI XIE SHE JI JI CHU



主 编：谢宜燕

副主编：郜海超 张光锋

主 审：赵玉奇 常新中



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

013926373

普通高等教育“十二五”规划教材（机电类专业教材）

机械设计基础

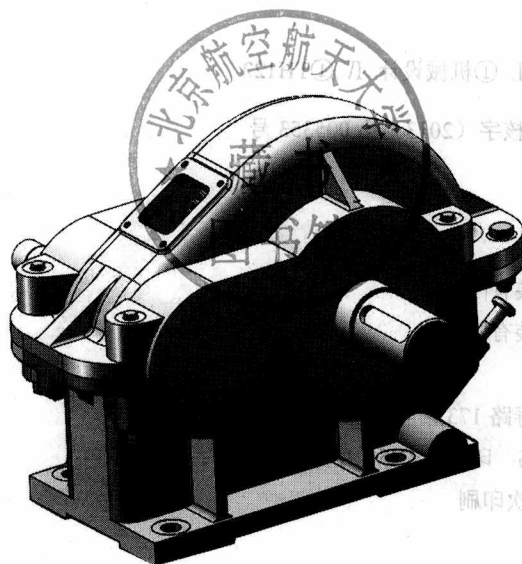
JI XIE SHE JI JI CHU

TH122-43
343

主 编 谢宜燕

副主编 郜海超 张光锋

主 审 赵玉奇 常新中



電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry



北航

C1633905

内 容 简 介

本教材是根据高等教育教学要求及教学改革发展的需要,以“必需、够用”为原则,注重理论与实践、学校与企业实际相结合,结合高等院校近年来教学改革的经验与成果进行编写的。

全书共分为五个模块,分别为构件承载能力分析模块、常用标准零件设计模块、常用的平面机构设计模块、带传动和链传动设计模块、减速器设计模块,下设 16 个项目分别是静力学基础分析、构件承载能力概念的认识、螺纹连接设计、键连接及其他常用连接的设计与选用、轴承的设计与选用、其他常用标准零件的选用、平面连杆机构设计、凸轮机构设计、间歇机构分析、带传动设计、链传动设计、轴的设计、齿轮传动设计、蜗杆传动设计、轮系的应用、减速器的设计。

本教材可作为高等教育、高职高专、高等专科学校、成人专科教育等院校的机械类、机电类、电子类、数控类专业教学用教材,也可供作为相关专业工程技术人员参考用书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

机械设计基础 / 谢宜燕主编. —北京:电子工业出版社, 2013.1
ISBN 978-7-121-19414-6

I. ①机… II. ①谢… III. ①机械设计 IV. ①TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 005353 号

策划编辑: 祁玉芹

责任编辑: 鄂卫华

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司

装 订: 三河市鑫金马印装有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 21.5 字数: 550 千字

印 次: 2013 年 1 月第 1 次印刷

定 价: 39.80 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

前言

PREFACE

本教材是根据高等教育教学要求及教学改革发展的需要,以“必需、够用”为原则,以“做中学、学中做”为出发点,注重理论与实践、学校与企业实际相结合。采用最新国家标准,在机械设计基础课程改革的基础上,结合高等院校近年来教学改革的经验与成果进行编写的。

本教材具有以下鲜明特色:

(1) 采用最新的国家标准,尽量使用国家标准规定的术语和符号,并充分体现新技术,新工艺、新材料、新规范、新产品。

(2) 以五大模块为主线把机械工程中所涉及的理论力学、材料力学、机械原理、机械零件等内容有机地融入其中,对各部分内容进行整合和精选,通过融合和渗透,减少彼此之间内容上的重叠,使各部分内容联系更加密切。

(3) 图文有机搭配,力求文字精练,图文并茂,文字叙述贴近学生,在保证基本理论的前提下,简化甚至舍去繁琐的理论推导和复杂的计算,突出实用性和实践性。插图清晰直观,对于那些由较多零件组成的机械部件等比较复杂的机械表达图样,用立体润饰图替代,增强视觉效果和感染力,以提高学习效率。

(4) 教材内容的取舍上,体现以生产实际为依据,突出应用性;以技能培养为主线,突出实践性;渗透“产业、行业、企业、职业、实践”5个要素,突现职业教育特点。

(5) 为了更好地引导教师和学生实现教学目标,教材以行动为导向,以工学结合、人才培养模式、改革与实践为基础,按照典型性、对知识和能力的覆盖性、可行性原则,设计教学载体,明确教学内容,使学生在职业情境中“学中做,做中学”。

本书适用学时为100~120学时,少学时的教学内容可根据需要进行删减。本教材可作为高等教育、高职高专,高等专科学校,成人专科教育等院校的机械类、机电类、电子技术类、数控类专业教学用教材,也可作为相关专业的工程技术人员参考用书。

本书由谢宜燕任主编,郅海超、张光锋任副主编。各项目编写分工为:谢宜燕编写绪论、模块一构件承载能力概念的认识项目,模块五齿轮传动设计项目;常新中编写模块二;郅海

超编写模块三、模块五轴的设计项目；张光锋编写模块四、模块五蜗杆传动设计项目，轮系的应用项目，减速器设计项目；李远红编写模块一静力学基础分析项目。

本书由赵玉奇副教授、常新中副教授主审，并为全书提出了许多宝贵的意见，编者所在单位领导和同事为本书的编写给予了大力支持和帮助，本书由漯河召陵区实验中学张娟老师负责图像处理以及封面设计工作，在此表示感谢。

由于编者水平有限和时间仓促，书中难免有不妥之处，恳请读者批评指正。

编 者

2012年11月



目录

CONTENTS

绪论	1
任务一 机器的认识	1
任务二 机械设计的要求	3
任务三 本课程教学简介	5
模块一 构件承载能力分析	7
项目一 静力学基础分析	7
任务一 静力学基础知识	7
任务二 工程中常见约束的分析	11
任务三 平面特殊力系分析	17
任务四 平面任意力系分析	27
项目二 对构件承载能力概念的认识	35
任务一 杆件承载能力的概述	35
任务二 材料拉伸与压缩时的力学性能	38
模块二 常用标准零件设计	47
项目一 螺纹连接设计	47
任务一 螺纹连接的基本知识	48
任务二 零件轴向拉伸与压缩的强度计算	50
任务三 零件剪切与挤压的强度计算	61
任务四 普通螺栓连接的强度计算	69
任务五 螺纹连接的结构设计与维护	73
项目二 键连接及其他常用连接的设计与选用	78
任务一 常用键连接设计与选用	79
任务二 花键连接设计与选用	85



任务三 销连接设计与选用	87
任务四 铆接、焊接、过盈和黏结分析	89
项目三 轴承的设计与选用	93
任务一 滑动轴承分析	93
任务二 滚动轴承设计与选用	99
项目四 其他常用标准零件的选用	117
任务一 联轴器的选用	117
任务二 离合器的选用	122
任务三 制动器的选用	125
任务四 弹簧的选用	126
模块三 常用的平面机构设计	129
项目一 平面连杆机构设计	129
任务一 平面连杆机构分析	129
任务二 平面四杆机构的基本形式分析	136
任务三 平面四杆机构的工作特性分析	139
任务四 平面四杆机构的图解法设计	143
项目二 凸轮机构设计	146
任务一 凸轮机构分析	146
任务二 凸轮从动件的常用运动规律分析	148
任务三 盘形凸轮轮廓曲线的设计	151
项目三 间歇机构分析	154
任务一 棘轮机构的工作分析	155
任务二 槽轮机构的工作分析	157
任务三 不完全齿轮机构的工作分析	158
模块四 带传动和链传动设计	161
项目一 带传动设计	161
任务一 带传动的基础知识	161
任务二 带传动工作特性分析	166
任务三 V 带传动的设计	170

任务四 带传动的安装与维护	179
项目二 链传动设计	182
任务一 链传动的基础知识	182
任务二 链传动工作特性分析	186
任务三 链传动的设计	187
任务四 链传动的安装与维护	193
模块五 减速器设计	197
项目一 轴的设计	197
任务一 轴的基础知识	198
任务二 轴的结构设计	200
任务三 轴的受力分析	203
任务四 轴扭转的强度计算	211
任务五 构件弯曲的强度计算	222
任务六 轴组合变形的强度计算	249
任务七 轴的设计	255
项目二 齿轮传动设计	261
任务一 齿轮传动的基础知识	262
任务二 渐开线标准直齿圆柱齿轮的基本参数	266
任务三 标准直齿圆柱齿轮的啮合传动分析	270
任务四 齿轮传动设计准则	274
任务五 标准直齿圆柱齿轮传动的强度计算	278
任务六 斜齿圆柱齿轮传动的强度计算	285
任务七 直齿圆锥齿轮传动的强度计算	290
任务八 齿轮传动的结构及维护	294
项目三 蜗杆传动设计	297
任务一 蜗杆传动的基础知识	297
任务二 蜗杆传动的基本参数	299
任务三 蜗杆传动的设计准则	303
任务四 蜗杆传动的强度计算	305
任务五 蜗杆传动的结构及维护	312



项目四 轮系的应用	315
任务一 轮系的基础知识	316
任务二 定轴轮系的传动比计算	317
任务三 行星轮系的传动比计算	320
项目五 减速器的设计	325
任务一 减速器结构选择及相关性能参数计算	326
任务二 齿轮的设计计算	327
任务三 轴的设计计算	331
任务四 轴承、键和联轴器的选择	333
任务五 减速器的安装与维护	334
参考文献	336

绪 论

人类在日常生活和生产实践中为了减轻劳动强度、提高生产效率和产品质量，创造出各种各样代替人们劳动的工具和装置，称为机械，如机床、内燃机、挖土机、起重机、汽车、火车、轮船、飞机、航天飞船等。机械一般分为机器和设备两大类。机械不仅是人类从事生产和劳动的重要工具，也是衡量一个国家科学技术和经济发展水平的标志之一。作为新一代高素质的劳动者和高、中、初级技能专门人才，学习并掌握有关的机械设计的基础知识和基本技能显得十分必要。

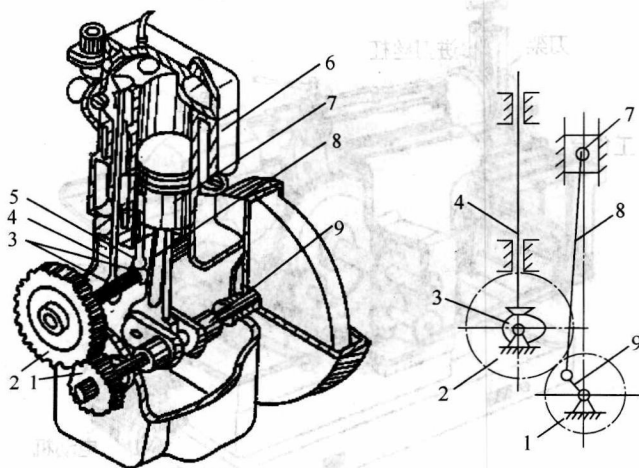
《机械设计基础》是一门综合性的重要专业技术基础课程，综合地运用多种相关的基础理论与生产实践知识，来解决工程中的机械设计问题。是机械类及相关工科专业必修的一门课程，是为学习专业课程提供必要的理论基础。

常用机械零件的设计计算和常用机构的设计计算是《机械设计基础》课程的基本教学内容。通过学习，使学生掌握常用机械零件和常用机械的工作原理、结构特点、基本设计理论、设计计算方法和选用方法；使学生具备运用机械设计手册、图册、标准规范等有关技术资料 and 所学知识，解决机械工程中生产实际问题的能力。本教材以机器和机械零件的设计为主要学习内容：

- (1) 认识机器
- (2) 了解机械的设计要求
- (3) 了解本课程教学大纲

任务一 机器的认识

如图 0-1 所示是一个单缸内燃机，它是由齿轮 1 和 2、凸轮 3、排气阀顶杆 4、进气阀顶



(a) 结构简图

(b) 机械运动简图

图 0-1 内燃机

杆 5、汽缸 6、活塞 7、连杆 8、曲柄 9 组成的。当燃气推动活塞作直线运动时,经连杆使曲柄作连续转动。凸轮和顶杆用来开启和关闭进气阀和排气阀。在曲柄和凸轮轴之间两个齿轮的齿数比为 1:2,曲柄转两周时,进排气阀各启闭一次。这样就把活塞的运动转变为曲柄的转动,将燃气的热能转换为曲柄转动的机械能。

一、机器的定义

机器是人类为了减轻体力劳动和提高生产率而创造出来的重要工具,是一种用来转换或传递能量的,能执行机械运动的装置。

二、机器的特征

- (1) 组成:机器都是一种人为的实物组合。
- (2) 运动特性:机器各部分运动单元之间具有确定的相对运动。
- (3) 功、能关系特性:能够代替人类的劳动完成有用的机械功,能够实现能量的转换或传递。

因此,凡具备上述三个特征的实物组合就称为机器。仅具备前两个特征的称为机构,如图 0-1 中的齿轮机构和滑块机构。这些机构只能实现预期的机械运动,不能做有用的机械功或能量的转换。机器的功能是靠机构来完成的,所以机器是由机构组成的。从运动的观点来看,机器与机构并无差别,工程上统称为“机械”。

三、机器的组成

以如图 0-2 所示的牛头刨床为例来分析机械的组成,电动机的动力通过带传动和一系列的齿轮传动传给大齿轮。大齿轮通过转动通过销钉带动滑块在导杆槽中上下滑行,最终推动滑枕前后移动,其刀架上的刀具随之也作往复直线运动,从而实现对工件的加工。由此可以看出机器通常由四部分组成。

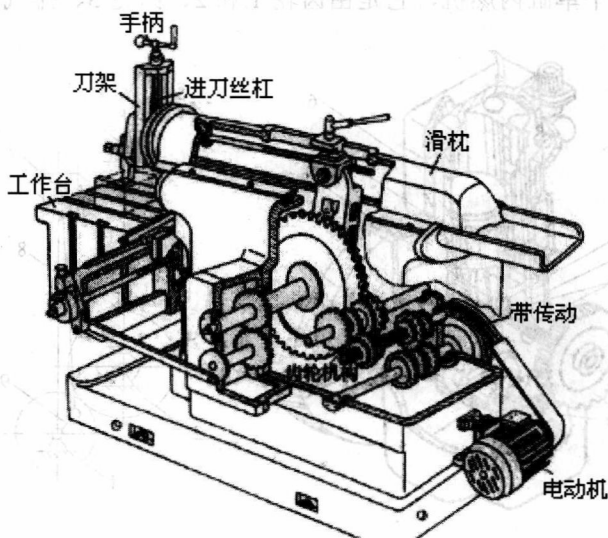


图 0-2 牛头刨床

(1) 原动机部分：把其他形式的能量转换为机械能，以驱动机器各部件运动，如电动机、内燃机等。

(2) 工作机部分：直接完成工作的部分，处于整个机器的终端，结构取决于机器的用途，如刨床的刀具、汽车的车轮等。

(3) 传动机构部分：用以完成原动机和工作机之间的运动速度、运动形式的改变和能量的传递，处于原动机和工作机之间，如汽车的变速箱、刨床中的齿轮机构等。

(4) 操纵控制部分：通过人工操作实现并准确可靠地完成整个机器的功能，使原动机部分、传动部分和工作机部分彼此协调工作，如汽车内的各种控制装置，电动车的控制把手等。

组成机器各部分之间的关系如图 0-3 所示。

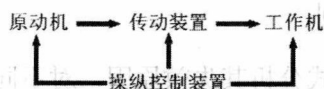


图 0-3 组成及其各部分的关系

四、机构、构件、零件的概念

机器与机构的主要区别在于：机器与机构都是由构件和零件构成的，并都具有确定的相对运动，但机器具有能代替或减轻人类的劳动，完成能量转换的特征，而机构则不具有此特征。

构件：机械中能够作独立运动的基本单元，一般由若干零件刚性地连接在一起组成一个构件，也可以是单一的零件。图 0-1 中的活塞、连杆、曲柄均为构件。

零件：机械中的最小制造单元，机械是由若干个不同的零件而组成的。零件一般分为标准零件、通用零件和非标准零件。

由以上可知机器、机构、构件、零件之间的关系如图 0-4 所示。

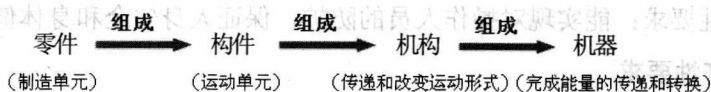


图 0-4 机器、机构、构件、零件之间的关系

任务拓展训练

- (1) 机器由哪几部分组成？
- (2) 机器和机构有何区别？
- (3) 构件和零件有何区别？

任务二 机械设计的要求

一、机械零件的失效形式

机械零件在规定的时间内或规定的条件下，不能完成正常的功能称为失效。

机械零件的主要失效形式有：强度失效、刚度失效和磨损失效等形式。

强度失效：构件因强度不足而失去正常功能，称为强度失效。强度是指构件在载荷作用下，抵抗破坏或塑性变形的能力。

刚度失效：构件因刚度不足而失去正常工作能力，称为刚度失效。刚度是指构件在载荷作用下，抵抗弹性变形的能力。

磨损失效：构件因表面疲劳、磨损、压溃和腐蚀而失去正常工作能力，称为磨损失效。

非正常工作条件下的失效：带传动中因过载或摩擦力不够引起的打滑失效、构件因频率相近或相同引起的共振失效等。

在实际生产中，机械零件可能同时出现几种失效形式，设计时应根据不同的情况，确定避免同时发生失效的设计方案。

二、机械零件的设计准则

根据机械零件产生的失效形式分析其失效原因，对不同的失效形式应建立起不同能力的判断条件，称为设计准则。因此，机械零件的设计准则是以防止零件的失效作为零件设计计算的依据的。

三、机械设计的基本要求

机械设计包含两种意思：一是应用新技术、新方法开发出具有自主知识产权的新机械；二是在原有机机械的基础上利用新技术、新方法进行重新设计或局部改造，从而改变原来机械的性能。无论哪种设计，其基本要求都是相同的，可归纳为以下几个方面。

1. 满足使用性要求

(1) **功能要求：**满足机器预期的功能要求。如机器工作部分的运动形式、速度、精度、平稳性、生产率、需要传递的功率等，以及某些使用上的特殊要求（如自锁、防潮、高温）。

(2) **可靠性要求：**零件应具有足够的寿命，在规定的工作期限内要可靠地达到功能要求而不发生各种损坏和失效。

(3) **安全性要求：**能实现对操作人员的防护，保证人身安全和身体健康。

2. 满足经济性要求

(1) **成本费：**设计、制造、安装成本低。

(2) **使用费：**操作、维护、管理费用少。

3. 满足工艺性要求

(1) **结构简单、制造容易、安装方便。**

(2) **便于操作、维护和管理。**

(3) **造型美观；尽可能地降低噪声，减轻对环境的污染，达到国家规定的标准。**

在产品的整个设计过程中，必须把产品设计、制造及销售三方面作为一个系统工程来考虑，要求设计及制造成本低，机器生产率高，能源和材料消耗、销售、维护和管理费用少等。设计机械系统和选用零件时，应尽可能实现“三化”原则，即标准化、通用化和系列化。标准化是国家规定的标准零件；系列化是对于标准零件指定一系列的常用规格尺寸。通用化是指在不同规格的同类产品或不同类产品中采用同一结构或尺寸的零件。机械设计“三化”的

意义是减轻设计计算的工作量,保证零件的质量,增大互换性,节约材料,便于维修,降低成本。

四、机械零件设计的一般步骤

机构零件设计计算的步骤可按图 0-5 所示的流程进行。

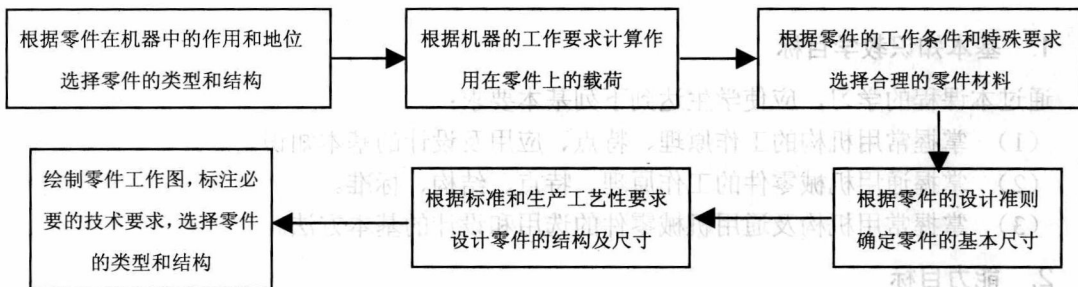


图 0-5 机械零件设计计算步骤

任务拓展训练

1. 填空题

- (1) 机器或机构都是由_____组合而成的。
- (2) 在机器中属于制造单元的是_____。
- (3) 在机器中独立运动的单元称为_____。
- (4) 机器可以用来_____人的劳动,完成有用功的_____。
- (5) 构件因强度不足而丧失正常功能,称为_____失效。

2. 判断题

- (1) 构件都是可动的。()
- (2) 机构能完成有用的机械能或实现能量的转换。()
- (3) 机构中的主动件和从动件都是构件。()
- (4) 机器都是由机构组成的。()
- (5) 减速器是机器。()

3. 下列物品中哪些是机器? 哪些是机构?

- (1) 千分尺 (2) 机械手表 (3) 电子手表 (4) 机床 (5) 洗衣机
- (6) 飞机 (7) 电梯 (8) 电动自行车 (9) 千斤顶

任务三 本课程教学简介

一、课程性质和任务

本课程是一门介绍常用机构和通用机械零件设计的基本知识、基本理论及设计方法的技术基础课,是机械类及相关专业的必修课程。

机械零件的设计和计算是本课程的基本教学内容,但本课程的最终目的在于综合运用各

种机械零件、各种机构的知识以及其他先修课程的知识,掌握设计机械传动装置和一般机械的能力,使学生具备机械工程、机电产品的生产、服务、技术和管理的高素质劳动者和高级应用型人才所必需的机械设计基本知识和基本技术,为专业知识和职业技能的进一步学习打下必要的基础。

二、课程教学目标

1. 基本知识教学目标

通过本课程的学习,应使学生达到下列基本要求:

- (1) 掌握常用机构的工作原理、特点、应用及设计的基本知识。
- (2) 掌握通用机械零件的工作原理、特点、结构、标准。
- (3) 掌握常用机构及通用机械零件的选用和设计的基本方法。

2. 能力目标

- (1) 初步具有分析机构和选择传动方案的能力。
 - (2) 初步具有分析、选用和设计机械零件及简单机械传动装置的能力。
- 具有运用标准、规范、手册、图册等有关技术资料的能力。

3. 思想教育目标

- (1) 培养学生具有创新精神和实践能力。
- (2) 培养严谨的科学态度和良好的职业道德。

三、课程的适用范围

本课程适用于三年制高等职业技术教育机械类专业及汽车类专业,其他相近专业也可选用。

四、本课程与相关课程的联系

本课程应在学完《高等数学》、《机械制图》等课程以后进行学习,可与《公差配合与技术测量》课程同时开设,并为《机械制造技术》、《模具设计》等专业课打下基础。

五、教学建议

- (1) 教学以机械设计所必需的基本内容为基础,既有重点又有一定知识面,理论分析适当。精讲多练,学以致用。
- (2) 设置必要的实践环节,配合讲课安排有讨论题,实验及课程设计等。
- (3) 充分发挥各种媒体在教学中的优势,兼顾各种媒体的协调配合。
- (4) 对重点项目任务,教师应适当布置课外任务实践,并检查学生的完成情况。

模块一 构件承载能力分析

静力学是研究物体在力系作用下平衡规律的学科。力系是作用于物体上的一群力，力系分为平面力系和空间力系两大类。平衡状态是物体相对静止或做匀速直线运动的状态。若物体处于平衡状态，则作用于物体上的力系必须满足一定的条件，这些条件称为力系的平衡条件。

静力学建立力系平衡条件的主要方法是力系的简化。所谓力系的简化就是用一个简单的力系代替复杂的力系。因此，静力学主要研究以下两个基本问题：

- (1) 力系的简化；
- (2) 物体在力系作用下的平衡问题。

项目一 静力学基础分析

项目分析

图 1-1 所示为塔式起重机。已知轨距 $b=4\text{m}$ ，机身重 $G=220\text{kN}$ ，其作用线到右轨的距离 $e=1.5\text{m}$ ，起重机的平衡重 $Q=100\text{kN}$ ，其作用线到左轨的距离 $a=6\text{m}$ ，荷载 P 的作用线到右轨的距离 $l=8\text{m}$ ，试分析：(1) 验证空载时 ($P=0$ 时) 起重机是否会向左倾倒？(2) 求出起重机不向右倾倒的最大荷载 P 。要完成塔式起重机的静力学分析，需要完成以下学习目标：

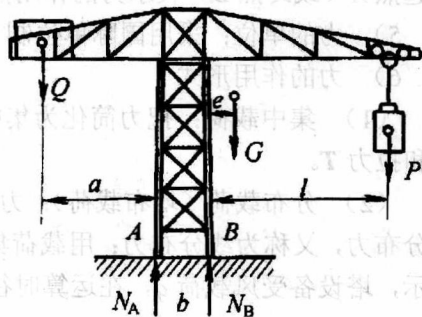


图 1-1 起重机的平衡

- (1) 掌握静力学的基本概念和静力学公理；
- (2) 熟练并正确画出构件的受力图；
- (3) 掌握平面任意力系的简化；
- (4) 熟练运用平面力系的平衡方程。

任务一 静力学基础知识

一、刚体的概念

刚体就是在外力作用下永不发生变形的物体，即物体在外力的作用下，其物体内部任意两点之间的距离始终保持不变。刚体是实际物体的理想模型，引入刚体的概念有助于突出研究对象的主要特征，从而使问题的研究简化。因此，静力学的研究对象是刚体或刚体组。

二、力的概念

1) 力的定义：力是物体之间的相互作用，力具有物质性。力是矢量。

力的概念产生于人类从事生产劳动之中。当人们用手握、拉、掷、举物体时，由于肌肉紧张而感受到力的作用，这种作用广泛地存在于人与物及物与物之间。例如，用手推小车，

小车就由静止开始运动，运动的速度由慢变快，或者使其运动方向有了改变；锻压加工时，工件受到锻锤的打击会变形等。

2) 力的作用效果：一种是力能使物体的运动状态发生改变，称为力的外效应；另一种是力能使物体的形状发生改变，称为力的内效应。

由于静力学是以刚体为研究对象的，因此，本章只讨论力的外效应。

3) 力的三要素：力的大小、方向和作用点。力的大小表示物体相互作用的强弱，力的方向表示力的作用具有方向性，力的作用点表示物体相互作用的部位。

当力的三个要素中任何一个要素改变时，力的作用效果就会改变。如图 1-2 所示，用扳手拧螺母时，作用在扳手上的力，其大小、方向或作用点位置不同，产生的效果就不一样。

4) 力的矢量表示：用一个有方向的线段表示力矢量，如图 1-3 所示。符号用黑斜体字 F 表示力矢量。

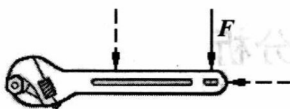


图 1-2 扳手上的作用力

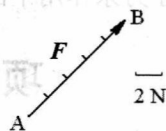


图 1-3 力的矢量表示

有向线段的长度按一定比例表示力的大小，有向线段的箭头指向表示力的方向，有向线段的起点 A （或终点 B ）表示力的作用点；通过力的作用点沿力方向的直线，称为力的作用线。

5) 力的单位：采用国际单位制（SI 制），牛（N）或千牛（kN）。 $1\text{kN}=10^3\text{N}$ 。

6) 力的作用形式

(1) 集中载荷：把力简化为集中作用在物体的某一点上。如图 1-4 所示，物体受重力 G 和拉力 T 。

(2) 分布载荷（均布载荷）：力的作用范围是沿狭长面积分布的，一般将其简化为沿长度分布力，又称为线分布力；用载荷集度 q 表示。线分布力载荷集度的单位是 N/m 。如图 1-5 所示，塔设备受风载荷 q ，在运算时往往将其等效为一力 Q ，即 $Q=qh$ ，作用点在塔的中点。

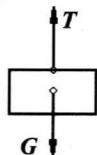


图 1-4 集中载荷

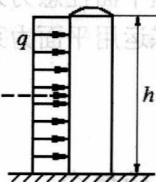


图 1-5 均布载荷

三、静力学基本公理

所谓公理，就是符合客观实际普遍规律的真理。静力学公理是人类经过长期的经验积累和反复实践验证总结出来的最基本的力学规律，是静力学全部理论的基础。

1. 公理一：二力平衡公理

作用在同一刚体上的两个力，使刚体处于平衡状态的必要与充分条件是：这两个力大小