

巍巍交大 百年书香  
www.jiaodapress.com.cn  
bookinfo@sjtu.edu.cn



策划编辑 朱代根  
责任编辑 胡思佳  
封面设计 刘文东

# 机械设计基础

高等院校机械系列精品教材

高等院校机械系列精品教材

# 机械设计基础

主编 王 远 朱代根 邓婷婷  
主审 詹肇麟 周 飞

机械设计基础



主编 王 远 朱代根 邓婷婷



上海交通大学出版社  
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



扫码二维码  
关注上海交通大学出版社  
官方微信

定价:65.00元



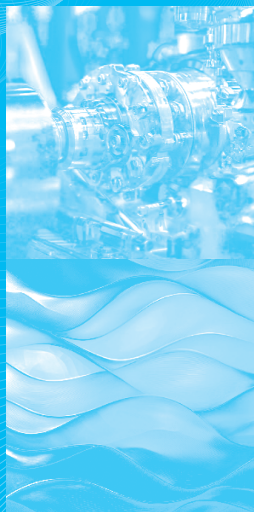
上海交通大学出版社  
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

免费提供  
精品教学资料包  
服务热线: 400-615-1233  
www.xinsijiaocai.com

高等院校机械系列精品教材

# 机械设计基础

主 编 王 远 朱代根 邓婷婷  
副主编 杨雯丹 罗廷芳 王 泉  
参 编 于晓华 苑振涛 杨灿宇  
      杜 坤 赵 宏 杨 刚  
主 审 詹肇麟 周 飞



上海交通大学出版社  
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

## 内容提要

本书共计 12 章,内容包括机械设计概述、平面机构的自由度和运动分析、平面连杆机构、齿轮机构及其传动、蜗杆传动、轮系、常用间歇运动机构、带传动和链传动、连接、轴、轴承和其他常用机械零部件。

本书既可作为普通本科院校、高等职业院校机械或近机械类专业的教材,亦可作为继续教育相关专业的教材,还可以作为相关行业技术人员、硕士研究生和专升本入学考试科目“机械设计基础”的参考、复习资料。

## 图书在版编目(CIP)数据

机械设计基础 / 王远,朱代根,邓婷婷主编.

上海:上海交通大学出版社,2026. 3. -- ISBN 978-7-313-34332-1

I. TH122

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 2026CS6250 号

## 机械设计基础

JIXIE SHEJI JICHU

主 编:王 远 朱代根 邓婷婷

出版发行:上海交通大学出版社

地 址:上海市番禺路 951 号

邮政编码:200030

电 话:021-64071208

印 制:大厂回族自治县聚鑫印刷有限责任公司

经 销:全国新华书店

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:23.75

字 数:718 千字

版 次:2026 年 3 月第 1 版

印 次:2026 年 3 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-313-34332-1

电子书号:ISBN 978-7-89564-665-0

定 价:65.00 元

版权所有 侵权必究

告读者:如您发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:0316-8836866

本书严格依据高等学校机械设计基础课程教学基本要求,紧扣“厚基础、强实践、重创新”的教学理念,深度融入党的二十大报告中关于“加快建设制造强国”“加快实现高水平科技自立自强”“弘扬劳动精神”等一系列重大部署的要求,是一部知识传授与价值引领深度融合、基础理论与工程实践紧密联系的新形态教材。

为主动对接新工科建设要求,努力探索价值塑造、知识传授与能力培养深度融合的路径,编者以学生为中心,以产出为导向,以持续改进为指引,在夯实理论知识的基础上,有机融入现代设计方法,着力打破学科壁垒,注重联系工程材料、力学等多学科知识,初步培养学生的系统思维与跨学科整合能力。本书强调“案例引领”,精选“大国重器”及贴近工程实际的鲜活案例,将抽象理论置于具体情境,以此激发学生研究工程的兴趣,提升其创新潜能与解决复杂工程问题的实战能力。

本书编写始终坚持鲜明的工程教育价值属性,强调机械设计不仅关乎技术经济性,更深层次地关联着安全、伦理、环境与社会 responsibility。因此,本书自觉将思政教育作为灵魂,致力于构建“知识—能力—价值”三位一体的育人体系。在知识传授中,梳理千年机械智慧,筑牢文化自信与创新使命的根基;融汇国家战略需求,厚植科技报国的家国情怀;渗透辩证思维方法,培养系统权衡与科学决策的能力;恪守工程伦理底线,塑造敬畏生命、追求可持续发展的职业品格。

作为一本探索中的新形态教材,本书力求在整体架构与呈现方式上创新。章节内容组织以“引例思考—基本理论—例题详解—典型应用—课程思政融入—章节习题”为主线,帮助学生构建系统化的知识网络;中间穿插“引例及思考”“思海拾贝”“典型案例”等栏目,深度解读技术背后的精神、战略与哲理。同时,本书还进行了数字化转型,通过关联三维仿真模型、原理演示视频等资源,使复杂原理可视化,以适应混合式教学的需要。

本书由西南林业大学王远、宋代根和邓婷婷任主编;西南林业大学杨雯丹、罗廷芳和昆明理工大学王泉任副主编;昆明理工大学于晓华、苑振涛,西南林业大学杨灿宇、杜坤、赵宏和淮阴工学院杨刚参编;昆明理工大学詹肇麟教授、南京航空航天大学周飞教授任主审。全书由王远、于晓华负责统稿和定稿。

本书在编写过程中参考了大量文献资料 and 标准规范,在此对相关作者及对为本书的出版做出贡献的相关工作人员表示由衷的感谢。

由于编者水平有限,书中疏漏之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

编 者

## 第 1 章 机械设计概述 1

- 1.1 机器、机构的组成及其特征 2
- 1.2 机械设计的内容、要求和一般程序 5
- 1.3 机械零件的主要知识 7
- 1.4 机械零件的摩擦、磨损与润滑 11
- 习题 14

## 第 2 章 平面机构的自由度和运动分析 16

- 2.1 自由度与运动副 17
- 2.2 平面机构的运动简图 19
- 2.3 平面机构的自由度计算 22
- 2.4 机构运动分析方法 28
- 习题 32

## 第 3 章 平面连杆机构 36

- 3.1 平面四杆机构的类型与应用 37
- 3.2 平面四杆机构的工作特性 45
- 3.3 平面四杆机构的设计 52
- 习题 59

## 第 4 章 齿轮机构及其传动 64

- 4.1 齿轮机构的类型、渐开线齿廓及其传动特点 65
- 4.2 渐开线直齿圆柱齿轮的几何尺寸参数及啮合传动 70
- 4.3 渐开线齿轮的切齿与变位齿轮 78
- 4.4 齿轮传动的失效形式、设计准则和材料 84
- 4.5 直齿圆柱齿轮传动的强度计算 89

4.6	斜齿圆柱齿轮传动的强度计算	95
4.7	直齿锥齿轮传动的强度计算	101
4.8	齿轮的结构、润滑和效率	107
	习题	111

## 第 5 章 蜗杆传动 116

5.1	蜗杆传动的组成与类型	117
5.2	圆柱蜗杆传动的概述	120
5.3	蜗杆传动的失效形式、材料与结构	127
5.4	蜗杆传动的受力分析、设计准则、强度与刚度计算	129
	习题	134

## 第 6 章 轮系 138

6.1	轮系的类型	139
6.2	轮系的转向判定及传动比计算	142
6.3	轮系的应用	149
	习题	154

## 第 7 章 常用间歇运动机构 159

7.1	凸轮机构	160
7.2	凸轮机构的设计与应用	166
7.3	棘轮机构	178
7.4	槽轮机构	181
7.5	不完全齿轮机构	184
	习题	186

## 第 8 章 带传动和链传动 192

8.1	带传动的类型、特点与应用	193
-----	--------------	-----

8.2 V带和普通V带带轮的结构	196
8.3 带传动的工作情况分析	201
8.4 普通V带传动的设计计算	208
8.5 链传动的组成、特点及应用	215
8.6 链传动的工作情况分析	219
8.7 链传动的主要参数及其设计	223
8.8 链传动的布置、张紧与润滑	225
习题	229

## 第 9 章 连接 234

9.1 螺纹参数、螺纹紧固件及连接类型	235
9.2 螺旋副的受力分析、效率、预紧及防松	242
9.3 螺栓材料及连接强度计算	248
9.4 键连接	256
9.5 销连接	263
习题	265

## 第 10 章 轴 270

10.1 轴的类型与材料	270
10.2 轴的结构设计	274
10.3 轴的工作能力计算	280
习题	286

## 第 11 章 轴承 290

11.1 滚动轴承	290
11.2 滑动轴承	317
11.3 不完全液体润滑滑动轴承的校核计算	326

11.4 液体润滑滑动轴承的设计	328
习题	333

## 第 12 章 其他常用机械零部件 338

---

12.1 联轴器	339
12.2 离合器	346
12.3 制动器	351
12.4 弹簧	353
习题	367

参考文献	371
------	-----

# 第 1 章

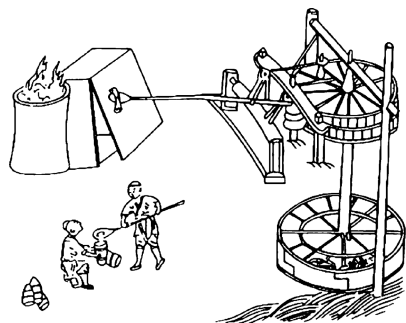
## 机械设计概述

### 本章导学

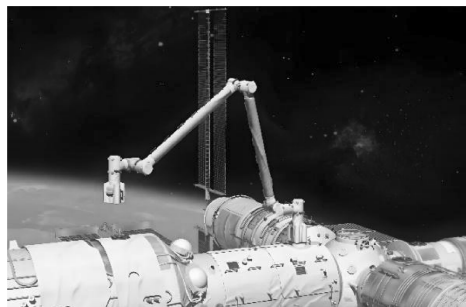
本章将在理解机器、机构、构件与零件等基本概念的基础上深入学习并掌握机械设计的内容、要求与一般程序,机械零件的失效形式与设计准则,机械零件的“三化”,以及机械零件的摩擦、磨损与润滑等知识。

### 引例及思考

图 1-1(a)所示的东汉水排,率先弃用人力、畜力,借用水力进行鼓风炼铁。水排的发明比欧洲使用水力鼓风设备的鼓风炉的出现早了 1 000 多年,它巧妙地利用脚轮、齿轮、转轴和连杆机构等传递水力,借助水力驱使水排往复运动,将风鼓进炼炉。图 1-1(b)所示为 2021 年航天科技集团五院(中国空间技术研究院)研制的空间七自由度冗余机械臂,它融合了机械、电学、热学、控制、光学等多个专业,臂长 10 m、最大负载 25 t,可在轨运行 10 年以上,能满足中国建造、维护和使用大型长期有人照料空间站的需求。空间机械臂作为我国航天事业发展新领域的杰作,在关键技术、材料选用、制造工艺、适应空间站环境的长寿命设计等方面均取得重大突破与创新,不断向世界展示着中国智慧和力量。



(a)



(b)

图 1-1 中国典型机械设计

(a)东汉水排示意图; (b)空间机械臂

请思考:东汉水排、空间机械臂都包括哪些机构?

## 1.1

# 机器、机构的组成及其特征



## 1.1.1 机器

人们在生产和生活中,广泛地使用各种类型的机器,如洗衣机、缝纫机、内燃机、拖拉机、金属切削机床、起重机、包装机、复印机等。机器是一种人为实物组合的、具有确定机械运动的装置,它用来完成一定的工作过程,以代替或减轻人类的劳动,提高生产率和产品质量。

### 1. 机器的分类

机器种类繁多,根据使用功能不同,可分为动力机器、加工机器和信息机器三大类。其中,动力机器主要实现能量的转换,如内燃机将燃料燃烧时的热能转化为机械能,电动机将电能转化为机械能,蒸汽机将蒸汽的能量转化为机械能。常见的动力机器如图 1-2 所示。

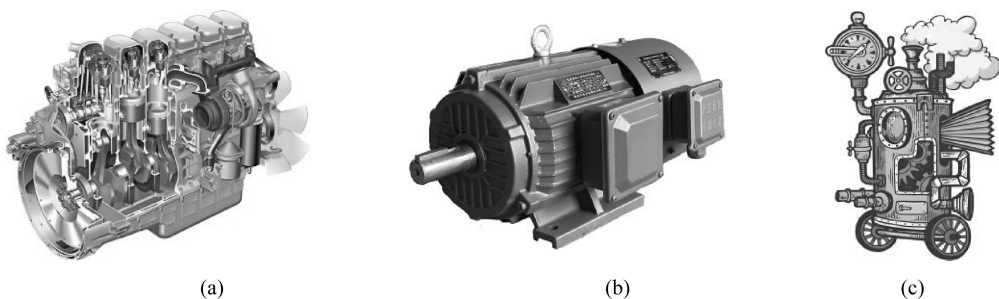


图 1-2 常见的动力机器

(a) 内燃机; (b) 电动机; (c) 蒸汽机

加工机器主要做有用的机械功,如车床利用机械能进行工件的切削加工,汽车利用发动机输出的动力行驶,起重机利用机械能提升重物。常见的加工机器如图 1-3 所示。



图 1-3 常见的加工机器

(a) 车床; (b) 汽车; (c) 起重机

信息机器主要完成信息的传递和转换,如打印机将电子文件、图片转换为纸质文档,复印机利用静电技术进行文书复制,照相机利用光学成像原理形成影像并进行记录,手机利用电磁波作为媒介进行语音或文字信息与电信号之间的相互转换。

## 2. 机器的组成

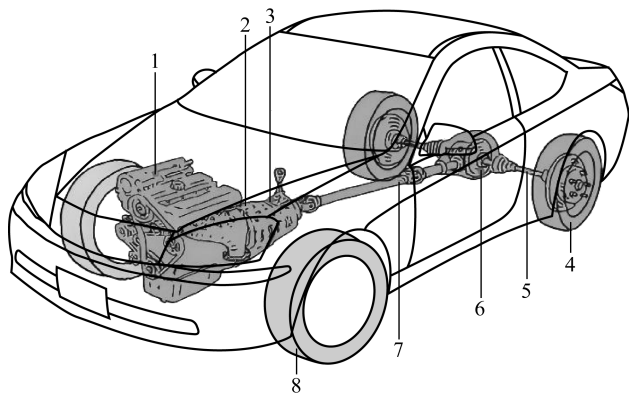
动力机器与加工机器一般由动力部分、传动部分、执行部分、控制部分、支撑及辅助部分组成,它们之间的相互关系如图 1-4 所示。

动力部分为机器提供动力来源,常由电动机、内燃机或液压马达等来完成。传动部分是将动力源的动力和运动传递给执行部分的中间环节,也称为传动装置,如汽车的万向联轴器将发动机输出的动力和运动传递给车轮轴。执行部分最终完成机器的各种功能,如车床上安装的车刀完成对工件的车削加工。控

制部分通过各类传感器将机器的工作参数如位移、速度、加速度、温度、压力等反馈给控制系统,以保证机器的启动、停止和正常协调动作。支撑及辅助部分一般包括润滑、显示、照明、冷却系统等,是保证机器正常工作必不可少的部分。如一台普通车床的动力源为电动机,传动部分为主轴箱与进给箱,执行部分为主轴与刀架等,控制部分为电气部分,支撑及辅助部分有机座、床身和润滑、冷却、照明系统等。

## 3. 机器的特征

在图 1-5 所示的后驱汽车传动原理图中,其动力和运动传动路线为发动机—离合器—变速器—万向轴—差速器—传动轴—后轮。可见,当离合器啮合时,发动机的输出运动经一系列传动驱使后轮转动,前轮产生随动,汽车便在公路上行驶。特别地,汽车转弯行驶时,万向轴的运动经差速器按一定的速度差分配给左右两侧后轮,有效避免了车轮与路面间的摩擦滑动,从而减轻轮胎磨损。



1—发动机；2—离合器；3—变速器；4—后轮；5—传动轴；6—差速器；7—万向轴；8—前轮。

图 1-5 后驱汽车传动原理图

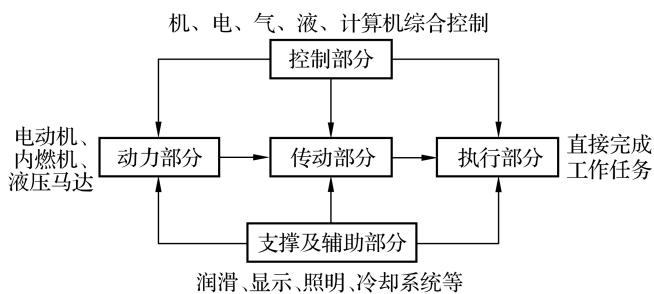


图 1-4 机器的组成

虽然机器种类繁多,构造、功能各不相同,但从分析后驱汽车传动原理路径可以得出机器的基本特征有以下几个。

(1)机器是人为的实物组合体。

(2)机器各运动单元具有确定的相对运动。

(3)机器必须能做有用功,完成物流、信息的传递或实现能量的转换,以代替或减轻人类劳动。

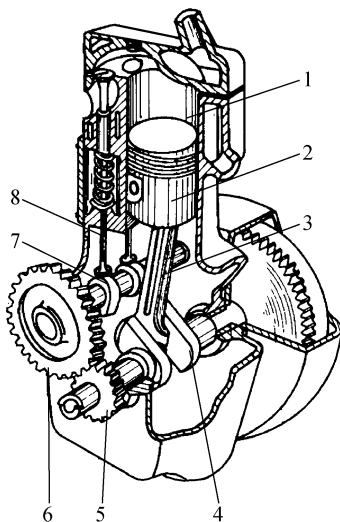


## 1.1.2 机构、构件与零件

### 1. 机构及其特征

凡是具备机器的特征(1)和特征(2)的实物或构件组合体都称为机构,即组成机构的各构件之间具有确定的相对运动,它用来传递运动和动力,但不能实现能量的转换或代替人的劳动去做有用功,不具备机器的特征(3)。可见,从结构和运动的观点看,机器与机构无区别,因而人们通常将机器与机构统称为机械。

在图 1-6 所示的单缸内燃机中,气缸体、活塞、连杆和曲轴的组合可以将活塞的往复直线运动转变为曲轴的转动,该组合称为曲柄滑块机构;凸轮、推杆和气缸体的组合可以将凸轮的转动转换为推杆的直线运动,该组合称为凸轮机构。



1—气缸体; 2—活塞; 3—连杆; 4—曲轴; 5—小齿轮; 6—大齿轮; 7—凸轮; 8—推杆。

图 1-6 单缸内燃机



动画  
单缸内燃机

### 2. 构件与零件

组成机构的运动单元体称为构件,组成构件的制造单元体称为零件。构件可以由一个或多个固定连接的零件组成,如图 1-6 中的小齿轮与曲轴为一个构件,大齿轮、凸轮及支撑它们的轴为另一个构件。零件则为机器中不可拆的一个最基本的制造单元体,也是加工制造中的最小单元体,如曲轴、齿轮、推杆等都为零件。一般地,各种机器中都能用到的零件,如螺栓、键、销、齿轮等称为通用零件;在特定机器中才能用到的零件,如发动机的曲轴与活塞、起重机的吊钩、汽轮机的叶轮等称为专用零件。

## 1.2

## 机械设计的内容、要求和一般程序



### 1.2.1 机械设计的内容

机械设计的总任务是规划和设计实现预期功能的新机械或改进原有机械的性能。一般情况下,机械设计的主要内容包括以下四个方面。

- (1) 确定机械的工作原理,选择适宜的机构。
- (2) 拟订设计方案。
- (3) 进行运动分析与动力分析,计算各构件上的载荷。
- (4) 进行零部件工作能力计算、总体设计与结构设计等。



### 1.2.2 机械设计的要求

机械设计的终极目标是为市场提供优质高效、价廉物美的机械产品,赢得市场竞争与用户,取得良好的经济效益。其基本要求是:在满足功能要求的前提下,设计的机器具有性能好、效率高、成本低、安全可靠、操作方便、维护简单和造型美观等特点。一般来说,对机械设计主要有以下要求。

#### 1. 功能要求

设计的机器要具有预期功能,满足使用要求为机械设计最重要的要求。产品功能不同,其设计要求、结果也不相同。例如,机械切削机床的主要功能是实现金属的切削加工,达到尺寸精度与表面质量要求;智能手机的主要功能是通信、联网、娱乐、拍照摄像与导航定位等。它们的设计要求,结果截然不同。切记,在进行机械设计时,不能盲目追求“多功能”,因为“多功能”会增加成本,降低可靠性。

#### 2. 安全、可靠耐用性要求

安全是机器正常工作的必要条件。一些重大事故的原因可能是机械故障,如汽车制动失灵酿成车祸,飞机起落架故障引发空难,密封件泄漏导致“挑战者号”航天飞机失事。因此,机械设计必须以人为本,凡关系到人身安全或可能造成重大设备事故的零部件都必须进行认真、严格的设计计算或校核计算,不能凭经验或以“类比”代替。暴露的运动构件要配置防护网,易造成人身伤害的部位必须有安全联锁装置或可实施远距离操纵。电气元件、导线的规格必须符合安全标准。除此之外,为了保护设备,还应设置保险销、安全阀等过载保护装置以及红灯、警铃等警示装置。

可靠耐用性是指设计的机器在预定的工作期限内必须能够可靠地工作,在预定的使用期限内不发生或极少发生故障,大修或更换易损件的周期不宜太短,以免频繁停机影响生产。但是,也不宜过分强调“耐用”,现代化生产推行定期更新和逾期强制报废制度,个别零部件的“长寿”对整机并无实际意义。追求“耐用”而滥用贵重材料会徒然增加成本,也不符

合现代社会对产品更新换代、使用生命周期等的要求。

### 3. 经济性要求

机器设计的经济性要求体现在设计、制造和使用的全过程中,设计机器时就要全面综合地进行考虑。设计、制造过程的经济性表现为低成本,使用过程的经济性表现为高生产率、高效率、低能耗、低管理和维护费用等。因此,机械设计中应尽可能多选用标准件、通用件或成套组件,它们不仅可靠、廉价,而且能大大节省设计工作量、缩短设计周期,提高产品市场竞争力。同时,设计零件应结构合理、加工工艺性好,力求减少加工制造费用。

### 4. 制造工艺性要求

零件的加工制造、装配费用是一台机器成本的重要组成部分。因此,机械产品及其零部件要具有良好的制造工艺性,在某种生产规模和生产条件下,应用最小的成本进行生产制造。同时,还应合理设计机械零件结构,使零件便于加工、装配和调整。

### 5. 劳动保护与环保要求

(1)劳动保护要求。一是要方便机器的操作者,设计时应按照人机工程学布置各种按钮、手柄等,使操作方式符合人们的心理和习惯;二是要改善操作者和机器的工作环境,即所设计的机器应符合相关规定,如限定机器的运转噪声,防止有毒、有害介质渗漏而造成危害。

(2)环保要求。机器设计中必须考虑环保因素,确保机器在使用过程中不会对环境造成负面影响,也要尽量减少对资源的消耗和有害废弃物的产生。环保要求主要体现在环保材料的选用、节能降耗、噪声污染的控制、工业“三废”(废气、废水废液和废渣)的处理、绿色设计与绿色工艺等方面。

### 6. 其他特殊要求

对不同的机器,会存在一些该机器的特殊要求。例如,机床在规定使用期限内须保持加工精度;经常搬动的机器,如塔式起重机、钻探机等要便于安装、拆卸与运输;用于食品、医药、纺织等行业的机械不得污染产品;大型机器要便于运输等。

虽然机械设计的要求众多,但在实际设计中,必须根据实际情况分清各项设计要求的主次,切忌简单照搬或乱提不合理要求。



## 1.2.3 机械设计的一般程序

机械设计是一项复杂、细致的工作,也是一项科学性与创造性极强的工作,一台机器的质量基本上取决于其设计质量。一台完整的机器是一个复杂的系统,要提高设计质量,必须规划一个科学的设计过程。

### 1. 产品规划阶段

产品规划阶段的主要工作是根据社会需求、结合市场调研,提出设计任务和明确的设计要求,它是机械设计的预备阶段。此时,所要设计的机器仍是一个模糊概念,需经充分调研分析后,明确机器所应具有的功能,并为以后的决策提出安全可靠、经济、制造与环保等各方面所确定的约束条件。还要明确写出设计任务的全面要求和细节,形成设计任务书。

### 2. 方案设计阶段

方案设计阶段对设计的成败起关键作用。根据设计对象的全面要求和细节,确定机器的工作原理,拟订总体方案。完成同一生产任务的机器,可以采用不同的设计方案,而同一设计方案中又有不同的设计参数组合。成功的设计往往基于总体方案的创新、突破及设计

参数的正确配置。构思出一个较好的方案,即便对于基础理论扎实、实践经验丰富的高级工程技术人员来说,也需要一个艰苦的思维过程。何况设计总是追求尽善尽美,人们经常会提出多种方案进行综合比较后择优而用。在这一阶段,必须恰当处理需要与可能、理想与现实、发展目标与当前目标之间可能产生的矛盾。

### 3. 技术设计阶段

技术设计阶段的任务是将设计方案具体化,使其成为机器及其零件的合理结构,完成总装配图、部件装配图和零件图。

### 4. 改进设计与技术文件编制阶段

改进设计阶段包括样机试制、测试、综合评价及改进等环节。根据设计任务书的要求,对样机进行测试,发现产品在设计、制造、装配及运行中出现的问题,并加以改进、完善,形成最终的技术文件。

技术文件种类繁多,常用的有机器设计说明书、使用说明书和其他技术文件等。编制设计说明书时,应包括方案选择和技术设计的全部结论性内容。编制面向用户的使用说明书时,应向用户介绍机器的性能参数、使用操作方法、日常保养方法、简单维修方法与备用件的目录等。其他技术文件,如检验合格单、外购件明细表、验收条件等,根据需要另行编制。

必须强调的是,整个机械设计的过程非常复杂,各个阶段可能是交叉进行的。在某一阶段发现问题,有时要回到前面的有关阶段查找原因并重新设计。因此,整个机械设计过程是一个不断反复、不断修改、不断完善的过程。

## 1.3

# 机械零件的主要知识



### 1.3.1 机械零件的主要失效形式

机械零件由于某些原因不能在既定的工作条件和使用期限内正常工作,即丧失工作能力或达不到设计功能的现象,称为失效。机械零件的主要失效形式大致有以下四种。

#### 1. 断裂

零件承受过大载荷,某一危险截面的应力超过零件的强度极限时,会发生断裂,这种断裂称为过载断裂。零件在循环交变应力作用下,即使工作应力未超过零件强度极限,甚至远低于材料强度极限,也会因长期工作而发生断裂,这称为疲劳断裂,它是承受循环交变应力机械零件的一种主要失效形式。断裂是零件的严重失效形式,它不仅使零件丧失工作能力,有时还会造成严重的人身伤害和设备损坏事故,应力求避免。

#### 2. 表面失效

由于机械中各零件接合面之间都是静和动的接触关系,载荷作用于接合表面,摩擦发生于接合表面,环境介质也包围于零件工作表面,故零件的损伤与失效常发生于工作表面。表

面失效主要有疲劳点蚀、胶合、磨损、压溃和腐蚀等,零件表面失效后通常会增大零件间的摩擦,使零件尺寸发生变化,最终造成零件报废。

### 3. 过量变形

零件受载后一般会产生弹性变形,过大的弹性变形会使零件或机器不能正常工作。当严重过载时,即工作应力超过零件材料的屈服极限时,会产生塑性变形,这不仅会改变零件的尺寸和形状,破坏零件间的配合关系,也会使零件失去工作能力。

### 4. 非正常工作条件的失效

有些零件只有在一定的工作条件下才能正常工作,否则就会失效。如摩擦传动的打滑、液体摩擦滑动轴承油膜破坏等均为非正常工作条件的失效。



## 1.3.2 机械零件的设计准则

进行机械零件设计时,必须根据零件的失效形式分析失效原因。在不发生失效的条件下,零件能安全工作的载荷限度,称为工作能力或承载能力。对于具体的零件,其失效形式取决于受载情况、结构特点和工作条件。针对不同失效形式建立的判定零件工作能力的条件,称为工作能力计算准则,或简称计算准则。由于计算中经常要做出设计,因此也称为设计准则。机械零件主要有以下设计准则。

### 1. 强度准则

强度是零件抵抗整体断裂、塑性变形和表面失效(磨粒磨损及腐蚀除外)的能力,是保证机械零件正常工作的基本要求,也是大多数机械零件的设计依据。为避免零件在工作中发生断裂,必须使零件在工作时满足强度条件,计算公式为

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

式中, $\sigma$ 、 $\tau$ 分别表示零件的工作正应力与剪应力,单位是 MPa;  $[\sigma]$ 、 $[\tau]$ 分别表示零件的许用正应力与许用剪应力,单位是 MPa;  $\sigma_{\text{lim}}$ 、 $\tau_{\text{lim}}$ 分别表示零件的极限正应力与极限剪应力,单位是 MPa;  $[S]$ 表示机械零件的许用安全系数,其值根据具体工况查表选取。零件在不同性质的应力作用下,失效形式不同,其极限应力的取值也不同。

### 2. 刚度准则

刚度准则针对的是零件的过大弹性变形失效,它要求零件在载荷作用下产生的弹性变形量不超过机器工作性能允许的值。刚度不足时,过大弹性变形将使零件产生过大挠度或转角,影响机器正常工作。刚度计算可以是控制指定点的线位移,也可以是指定平面的扭转变形角,其计算公式为

$$y \leq [y], \theta \leq [\theta], \varphi \leq [\varphi] \quad (1-2)$$

式中, $y$ 、 $\theta$ 、 $\varphi$ 分别表示零件的挠度、偏转角和扭转角;  $[y]$ 、 $[\theta]$ 、 $[\varphi]$ 分别表示零件的许用挠度、许用偏转角和许用扭转角。

### 3. 耐磨性准则

耐磨性准则主要针对的是零件的表面失效,它要求零件在正常条件下工作的时间能达到零件的寿命。腐蚀、磨损是影响零件耐磨性的两个主要因素,但关于材料耐腐蚀、耐磨损的计算尚无实用有效的方法。因此,在工程上对零件的耐磨性只能进行条件性计算,计算公式为

$$p \leq [p], pv \leq [pv] \quad (1-3)$$

式中,  $p$  表示工作表面上的压强;  $[p]$  表示材料的许用压强;  $v$  表示工作表面的线速度;  $[pv]$  表示  $pv$  的许用值。

#### 4. 振动准则

振动准则针对的是高速运转机器中零件出现的振动、振动的稳定性和共振,它要求零件的振动应控制在允许的范围内,且是稳定的,对于受迫振动应使零件的固有频率与激振源的振动频率错开。高速运转机械中存在着许多激振源,如齿轮的啮合、滚动轴承的运转、滑动轴承中的油膜振荡、柔性轴的偏心转动等。设计高速运转机械的运动零件除满足强度准则外,还应满足振动准则。对于受迫振动,振动准则的表达式为

$$f_p \leq 0.85f \text{ 或 } f_p \geq 1.15f \quad (1-4)$$

式中,  $f$  表示零件的固有频率;  $f_p$  表示激振源的振动频率。

对于上述各项衡量零件工作能力的计算准则,设计计算时并不是每一种零件均需按其逐项计算,而是根据零件的实际工作条件,分析出主要失效形式,按相应的设计准则进行设计计算,确定主要参数后,必要时再按其他设计准则进行校核。

### 1.3.3 机械零件的标准与标准化

标准与标准化是组织现代化大生产的重要手段,是实现零部件互换性的前提,是技术人员进行交流的必要保障。

标准是对重复性事物和概念所做的统一规定,它以科学、技术和实践经验的综合成果为基础,经有关方面协商一致,由主管机构批准,以特定的形式发布,作为共同遵守的准则和依据。它具有民主性、权威性、系统性和科学性,是各利益相关方协商一致的结果,必须由权威机构批准发布,协调处理标准化对象各要素之间的关系,源于科学研究和技术进步的成果。标准化是指在经济、技术、科学及管理等社会实践中,对重复性的事物和概念,通过制订、发布和实施标准达到统一,以获得最佳秩序和社会效益的过程。它是国民经济中一项重要的技术基础工作,对于改进产品、过程和服务的适用性,防止贸易壁垒,促进技术合作,提高社会经济效益具有重要意义。

我国颁布的标准从应用范围来分,有国家标准、行业标准与企业标准;根据使用强制性又可分为强制性标准与推荐性标准。为促进国际技术交流,我国于1978年加入国际标准化组织(International Organization for Standardization, ISO),现行许多新的国家标准已采用了相应的国际标准。我国也是ISO常任理事国,参与了多个领域的国际标准制定,推动了低空经济、人工智能与纳米技术等新兴领域的标准化,牵头开展的共享经济国际标准项目数量与比例大幅增加。

### 1.3.4 机械零件的“三化”

机械零件设计中的“三化”主要指标准化、系列化与通用化三个方面。

#### 1. 标准化

机械零件的标准化是指对零件的结构要素、尺寸、材料性能、检验方法、验收标准、制图要求等制定出大家共同遵守的标准。机械零件按标准化程度可以分为以下三大类。

(1)标准件:结构、尺寸已标准化并系列化的零件,不需设计绘图,可依据使用性能需求直接选用,如螺栓、螺母、垫圈、滚动轴承等。

(2)常用件:部分结构尺寸标准化,其余部分结构需要设计的零件,如齿轮、带轮、弹簧等。

(3)一般零件:除上述两类零件以外的零件,这类零件需要设计并绘出零件图,如轴、支架、轴承座、汽车钣金件等。常见的三类机械零件如图 1-7 所示。

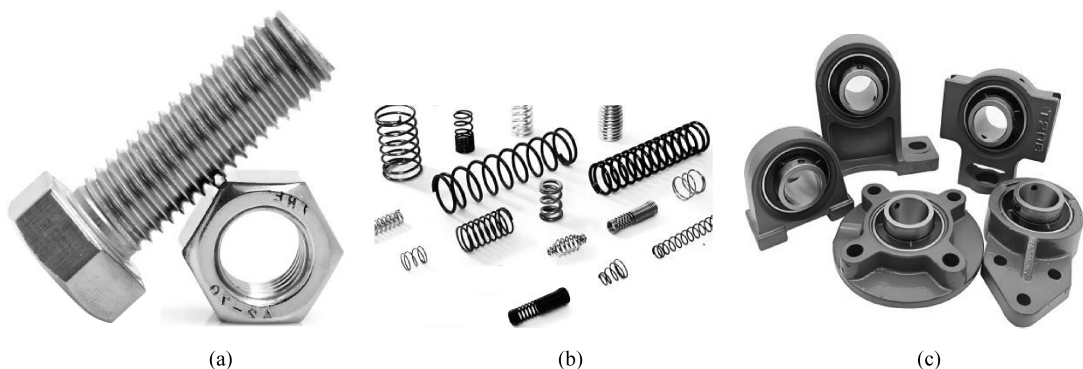


图 1-7 常见的三类机械零件

(a)标准件;(b)常用件;(c)一般零件

标准化是一项重要的技术经济政策和法规。机械制图的标准化保证了工程语言的统一,因此对设计图样的标准化是设计工作中的一个重要环节。

具有标准参数的零、部件被称为标准零部件,如机械中常用的螺栓、螺母、键、销和滚动轴承等。

## 2. 系列化

对于同一产品,为了满足不同的使用条件,在同一基本结构或基本尺寸的条件下,规定出若干个辅助尺寸不同的产品,形成系列产品。例如,对于同一结构、同一内径的滚动轴承,制定出不同外径和宽度的产品,称为滚动轴承的系列化。

## 3. 通用化

最大限度地减少与合并产品的形式、尺寸和材料,使零部件尽量在不同规格的同类产品中通用,以减少企业内部的零部件种类,从而简化生产管理,并获得较高的经济效率。

## 4. 采用“三化”的意义

在机械零件的设计、制造与使用维护过程中,采用“三化”具有如下重要意义。

(1)可以简化设计与缩短设计周期,提高设计质量,使设计人员把主要精力用在关键零件的设计上。

(2)可以采用最新先进技术在专门化的工厂中进行大规模集中生产,保证产品质量,并能大幅度降低劳动量,减少材料消耗和制造成本。

(3)可以集中成功经验,减少设计和制造过程中技术过失的重复出现。

(4)扩大零件的互换范围,方便维修。

## 1.4

## 机械零件的摩擦、磨损与润滑

机器在工作时,各零件相对运动的接触部分都存在着摩擦。摩擦不仅消耗能量,而且使零件发生磨损,甚至导致零件失效。据统计,世界上 $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}$ 的能源消耗在摩擦上,因磨损失效的机械零件约占全部失效零件的50%。磨损是摩擦的结果,润滑则是降低摩擦和减少磨损的有力措施,这三者相互联系,不可分割。



### 1.4.1 摩擦

外力作用下,一物体相对于另一物体运动或有运动趋势时,两物体接触面间产生的阻碍物体运动的切向阻力称为摩擦力;在接触区产生阻碍物体运动并消耗能量的现象称为摩擦;这两个既直接接触又产生相对摩擦运动的物体所构成的体系称为摩擦副。摩擦会造成能量损耗和零件磨损,在一般情况下是有害的,因此应尽量降低摩擦以减少磨损。但有些情况下却要利用摩擦来工作,如V带传动、摩擦制动等。

根据摩擦副表面间的润滑状态不同,可将摩擦状态分为四种,即干摩擦、边界摩擦、液体摩擦和混合摩擦,如图1-8所示。

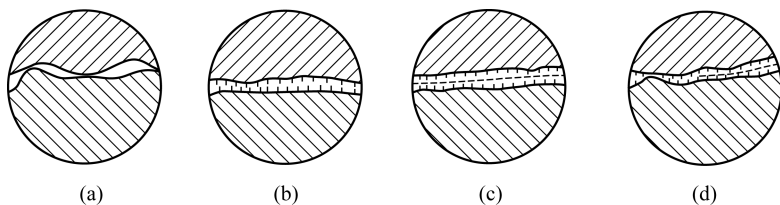


图1-8 摩擦状态

(a)干摩擦; (b)边界摩擦; (c)液体摩擦; (d)混合摩擦

#### 1. 干摩擦

两摩擦表面直接接触,其间无任何润滑剂或保护膜隔开的摩擦称为干摩擦。干摩擦状态会产生较大的摩擦功耗、严重的磨损和很高的温度,易烧毁摩擦零件,因此工业中一般不允许出现。

#### 2. 边界摩擦

两摩擦表面被吸附在表面的、厚度小于 $1 \mu\text{m}$ 的边界润滑膜隔开,处于干摩擦与液体摩擦之间的混合状态,这种摩擦称为边界摩擦。边界摩擦不足以将两表面分开,其表面微观高峰部分仍将相互锉削,摩擦因数为 $0.1 \sim 0.3$ 。

### 3. 液体摩擦

两摩擦表面不直接接触,被一层厚  $1.5\sim 2\ \mu\text{m}$  的润滑膜隔开的摩擦称为液体摩擦,其摩擦和磨损极轻,摩擦因数为  $0.001\sim 0.01$ 。

### 4. 混合摩擦

当动压润滑条件不具备,且边界润滑膜部分地遭到破坏时就会出现液体摩擦、边界摩擦和干摩擦同时存在的现象,这种状态称为混合摩擦。混合摩擦是一种不稳定状态,不能有效地降低摩擦、减轻磨损,因此工业中一般不允许出现。



## 1.4.2 磨损

两相对运动物体之间的摩擦将导致零件表面材料的逐渐损失,这种现象称为磨损。磨损量可以用体积、质量或厚度来衡量,单位时间内材料的磨损量称为磨损率。

### 1. 磨损的过程

机械运转中,依据磨损发生时间、表面变化、磨损率改变等可将磨损大致分为三个阶段,如图 1-9 所示。跑合磨损阶段 I,由于机械加工的表面存在一定的不平度,运转初期,摩擦副的实际接触面积较小,单位面积上的实际载荷较大,磨损速度较快。经跑合磨损后零件表面尖峰高度降低,峰顶半径增大,实际接触面积增加,磨损速度降低,进入稳定磨损阶段 II。此时,零件以平稳、缓慢的速度磨损,这个阶段的时间就代表零件的正常使用寿命。零件经稳定磨损后进入剧烈磨损阶段 III,其表面质量与加工精度降低、间隙增大,从而产生冲击、振动和噪声,磨损加剧,温度升高,使零件短时间内迅速报废。

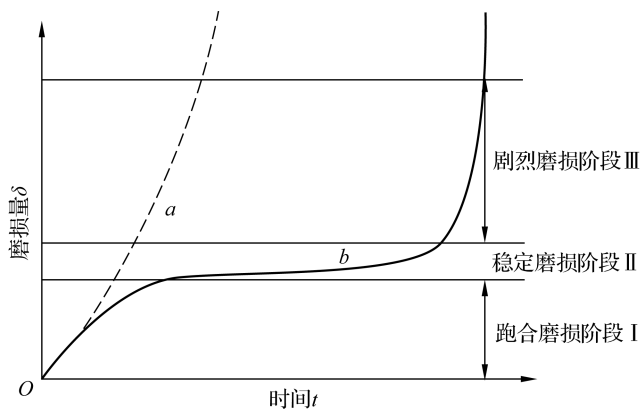


图 1-9 机械零件的磨损过程

正常情况下,经短期跑合后,应清洗零件,更换润滑油,使零件正常进入稳定磨损阶段,如图 1-9 中的实线  $b$  所示。但是,若跑合期压强过大、速度过高、润滑不良,则跑合期很短,并立即转入剧烈磨损阶段,使零件很快报废,如图 1-9 中的虚线  $a$  所示。在润滑油中掺入一定的添加剂,可以缩短跑合时间,提高跑合质量。

零件严重磨损后,将降低机器的工作效率和可靠性,使机器提早报废。因此,预先考虑如何避免或减轻磨损,是设计、使用、维护机器的一项重要内容。但另一方面,磨损也并非都是有害的,工程上常利用磨损的原理来减小零件表面的粗糙度,如磨削、研磨、抛光、跑合等。

## 2. 磨损的基本类型

按照磨损机理与零件表面磨损状态的不同,一般工况下把磨损分为磨粒磨损、黏着磨损、疲劳磨损、腐蚀磨损等四大类。

### 1) 磨粒磨损

摩擦表面上的硬质突出物或从外部进入摩擦表面的硬质颗粒对摩擦表面起到切削或刮擦作用,从而引起表层材料脱落的现象,称为磨粒磨损。这是最常见的一种磨损形式,应设法减轻。为减轻磨粒磨损,除注意满足润滑条件外,还应合理地选择摩擦副的材料,降低表面粗糙度值,加装防护密封装置等。

### 2) 黏着磨损

摩擦副受到较大正压力作用时,由于表面不平,其顶峰接触点受到高压作用而产生弹性、塑性变形,附在摩擦表面的吸附膜破裂、升温后使零件顶峰塑性面牢固地黏着并熔焊在一起,形成冷焊结点。在两摩擦表面相对滑动时,材料便从一个表面转移到另一个表面,成为表面凸起,促使摩擦表面进一步磨损。这种由于黏着作用引起的磨损,称为黏着磨损。

### 3) 疲劳磨损

两摩擦表面为点或线接触时,由于局部的弹性变形形成了小的接触区。这些小接触区形成的摩擦副受变化接触应力的反复作用,表层产生裂纹。随着裂纹的扩展与相互连接,表层金属脱落,形成许多月牙形的浅坑,这种现象称为疲劳磨损,也称疲劳点蚀。合理地选择高硬度材料,则抗疲劳磨损能力增强;选择黏度高的润滑油,加入极压添加剂及减小摩擦面的粗糙度值等,可以提高材料抗疲劳磨损的能力。

### 4) 腐蚀磨损

摩擦过程中,摩擦表面与周围介质发生化学或电化学反应而产生物质损失的现象,称为腐蚀磨损。腐蚀磨损可分为氧化磨损、特殊介质腐蚀磨损、气蚀磨损等。腐蚀也可以在无摩擦的条件下形成,这种情况常发生于钢铁类零件。



## 1.4.3 润滑

润滑是减轻摩擦和磨损的有效措施之一。所谓润滑,就是向承载的两个摩擦表面之间注入润滑剂,以改善摩擦和磨损状况;同时,润滑剂还能起减振、防锈等作用,液体润滑剂还能带走摩擦热、污物等。

## 思海拾贝

### 齿铸千秋道,器淬四维魂

人类文明长河中,中国机械史书写了璀璨篇章。“天有时,地有气,材有美,工有巧”的工艺哲学,奠定了中华匠人“道器合一”的智慧根基。候风地动仪、水运仪象台以精妙机械感知自然,体现的不仅是技术突破,更是中华文化“知行合一”的生动实践。回溯历史,祖先将“格物致知”的精神融入机械创新的血脉之中,给中华民族建起文化自信的底蕴。近代以来,京张铁路首创的“人”字形轨道、第一台“解放牌”汽车下线,标志着中国工业体系的百折不挠、破茧重生。今天的港珠澳大桥穿海而过,“复兴号”高铁驰骋神州,神

舟飞船遨游太空,这些科技领域的辉煌印证了一个真理:“四个自信”是中国机械从“追赶者”蜕变为“引领者”的核心动力。C919大飞机起落架用钢和高铁齿轮、轴承打破国外封锁等案例深刻诠释了中国特色社会主义理论体系的强大生命力。

从古代的青铜齿轮到今天的东方大国利器,中国机械文明始终贯穿着“以技载道、以器弘毅”的追求。站在“两个一百年”奋斗目标的历史交汇点,机械设计不仅是技术的创造,更是时代的答卷。期待同学们在学习中,以道路自信践行“需求导向、系统集成”的设计理念,以理论自信构建“交叉融合、突破边界”的知识体系,以制度自信融入新型举国体制下的协同创新,以文化自信传承“观天测地、制器利民”的工匠精神,既锤炼“三维建模、机构分析”的专业本领,更厚植“科技报国、智造强国”的理想情怀,让青春在实现中华民族伟大复兴的宏伟蓝图中绽放绚丽之花——设计未来,强国有我。

## 习题

### 一、填空题

1. 从加工与运动角度看,构件是机器的( )单元体,零件是机器的( )单元体;从运动的角度看,机构的主要功用是( )运动或( )运动的形式。
2. 机械零件在工作过程中的主要失效形式有( )、( )、( )和非正常工作条件的失效四种。
3. 在机械零件设计中,标准化工作包括( )、( )和通用化三个方面的内容。
4. 零件工作中,根据摩擦副表面间的润滑状态不同,摩擦状态可分为( )、( )、( )和混合摩擦四种。
5. 按照磨损机理及零件表面磨损状态的不同,可把磨损分为( )磨损、黏着磨损、疲劳磨损和( )磨损四类。

### 二、判断题

1. 相互之间能做相对运动的零件是构件,因此构件都是可动的。 ( )
2. 只从运动方面讲,机构是具有确定相对运动的构件组合。 ( )
3. 机构除了传递或改变运动的形式外,还有传递作用力的作用。 ( )
4. 机器是能完成有用功或实现能量转换的构件组合体。 ( )
5. 某两零件摩擦表面间的摩擦因数为 $0.001\sim 0.01$ ,说明其处于边界润滑状态。 ( )
6. 机械零件之间在工作中有相互摩擦时,都要求其摩擦副间的摩擦阻力尽量小。 ( )
7. 两零件表面之间有摩擦,一定产生磨损,且润滑是减轻磨损的有效措施之一。 ( )
8. 机械零件在磨损过程中,磨损速度最快的阶段是稳定磨损阶段。 ( )
9. 机械零件设计应根据其主要失效形式选择相应的设计准则。 ( )
10. 设计机械零件时,应在满足功能要求的前提下综合考虑其他要求。 ( )

### 三、选择题

1. 由多个构件组成的系统,且各构件间具有确定的相对运动,这种系统称为( )。  
A. 机械                      B. 机构                      C. 机器                      D. 都不是
2. 机械设计必须以人为本,关系到人身安全或重大设备的零部件故障时应考虑的基本要求是( )。  
A. 良好的使用性能    B. 可靠、耐用性            C. 安全                      D. 经济
3. 机械零件工作过程中,可能因断裂、塑性变形或表面失效的,应主要按照( )准则进行设计。  
A. 强度                      B. 刚度                      C. 耐磨性                      D. 可靠性
4. 在机械的正常运转中,磨损最剧烈的是( )磨损阶段。  
A. 跑合                      B. 稳定                      C. 急剧                      D. 以上都不是
5. 流体静压润滑轴承处于液体摩擦时,其摩擦因数的范围是( )。  
A. 0.1~1.0                  B. 0.01~0.10                C. 0.001~0.01                D. 0.000 1~0.001

### 四、综合题

1. 机械零件设计的基本要求、主要内容和程序各是什么?
2. 何为磨损? 写出三种不同机理下的磨损类型及其发生条件。
3. 标准化、系列化及通用化的含义和重要意义各是什么?
4. 机械零件的设计准则主要有哪几种? 说明其各自主要的应用场合。
5. 何为摩擦? 简述摩擦的四种状态。