



“十四五”职业教育国家规划教材



首届全国机械行业职业教育优秀教材



全国优秀教材二等奖

# 汽车机械基础

中国汽车工程学会汽车应用与服务分会组织编写

总主编 朱 军 弋国鹏  
主 编 吴 飞

北京出版集团公司  
北 京 出 版 社

图书在版编目 (CIP) 数据

汽车机械基础 / 吴飞主编. —北京: 北京出版社,  
2014.5 (2023 重印)  
高职十二五规划教材: 2014 版  
ISBN 978-7-200-10548-3  
I. ①汽… II. ①吴… III. ①汽车—机械学—高等职  
业教育—教材 IV. ①U463  
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 099129 号

汽车机械基础

QICHE JIXIE JICHU

主 编: 吴 飞  
出 版: 北京出版集团公司  
北 京 出 版 社  
地 址: 北京北三环中路 6 号  
邮 编: 100120  
网 址: [www.bph.com.cn](http://www.bph.com.cn)  
总发行: 北京出版集团公司  
经 销: 新华书店  
印 刷: 定州市新华印刷有限公司  
版印次: 2014 年 5 月第 1 版 2023 年 7 月修订 2023 年 7 月第 7 次印刷  
开 本: 787 毫米 × 1092 毫米 1/16  
印 张: 17.5  
字 数: 317 千字  
书 号: ISBN 978-7-200-10548-3  
定 价: 65.00 元

教材意见建议接收方式: 010-58572162 邮箱: [jiaocai@bphg.com.cn](mailto:jiaocai@bphg.com.cn)  
如有印装质量问题, 由本社负责调换  
质量监督电话: 010-82685218 010-58572162 010-58572393

# 目录

## 学习工作页

|                         |             |
|-------------------------|-------------|
| <b>学习单元一 力学分析</b>       | <b>/ 2</b>  |
| 学习任务一 汽车构件静力分析          | / 2         |
| 学习任务二 构件承载能力分析          | / 6         |
| <b>学习单元二 汽车工程材料</b>     | <b>/ 9</b>  |
| 学习任务一 汽车金属材料的力学性能       | / 9         |
| 学习任务二 汽车典型零件选材及热处理      | / 13        |
| 学习任务三 有色金属与非金属材料在汽车上的应用 | / 16        |
| <b>学习单元三 汽车常用机构</b>     | <b>/ 21</b> |
| 学习任务一 单缸内燃机机构运动简图的绘制    | / 21        |
| 学习任务二 汽车前轮转向机构分析        | / 24        |
| 学习任务三 汽车发动机配气机构分析       | / 28        |
| 学习任务四 驻车制动锁止机构分析        | / 31        |
| <b>学习单元四 汽车常用机械传动</b>   | <b>/ 34</b> |
| 学习任务一 汽车带传动             | / 34        |
| 学习任务二 汽车链传动             | / 39        |
| 学习任务三 汽车齿轮传动和轮系         | / 41        |
| 学习任务四 汽车自动变速器行星齿轮传动机构   | / 44        |

## 学习单元五 汽车轴系零件 / 46

- 学习任务一 汽车常见轴结构 / 46
- 学习任务二 汽车常见轴承 / 49
- 学习任务三 汽车联轴器与离合器 / 54

## 学习单元六 零部件的连接 / 59

- 学习任务一 齿轮与轴的键连接 / 59
- 学习任务二 螺纹连接 / 64
- 学习任务三 汽车上的其他紧固连接 / 68

## 学习单元七 汽车液压与液力传动 / 71

- 学习任务一 液压系统工作原理及图形符号 / 71
- 学习任务二 汽车常用液压泵 / 74
- 学习任务三 汽车常用液压缸 / 77
- 学习任务四 汽车液压控制阀 / 79
- 学习任务五 液力传动 / 83

## 学习单元八 汽车零件配合与技术测量 / 86

- 学习任务一 学习量具的使用 / 86
- 学习任务二 学习公差与配合 / 89
- 学习任务三 学习表面结构要求 / 92

## 学习参考 ▽

### 学习单元一 力学分析 / 96

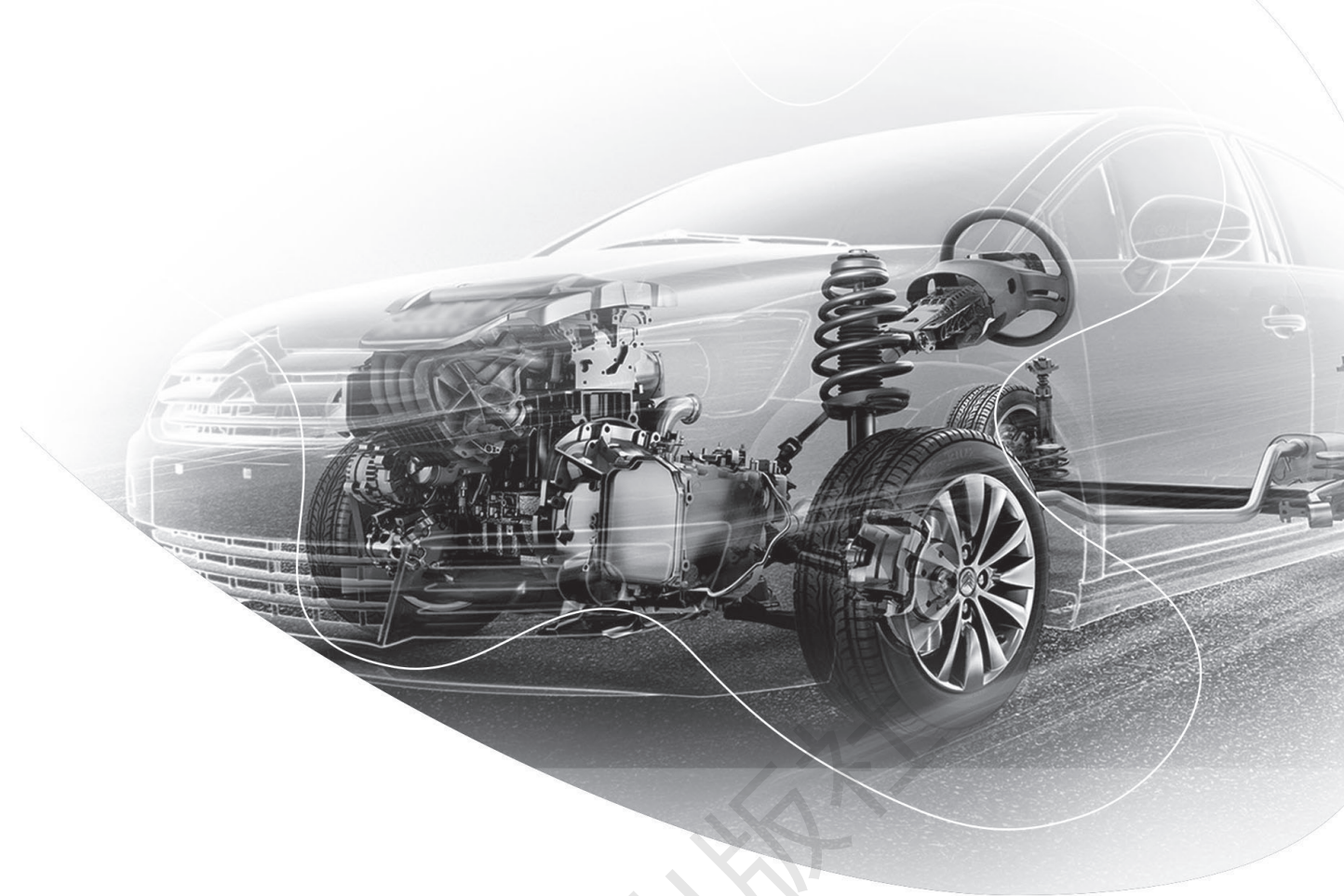
- 学习任务一 汽车构件静力分析 / 96
- 学习任务二 构件承载能力分析 / 105

### 学习单元二 汽车工程材料 / 113

- 学习任务一 汽车金属材料的力学性能 / 113
- 学习任务二 汽车典型零件选材及热处理 / 120
- 学习任务三 有色金属与非金属材料在汽车上的应用 / 126



|                          |              |
|--------------------------|--------------|
| <b>学习单元三 汽车常用机构</b>      | <b>/ 132</b> |
| 学习任务一 单缸内燃机机构运动简图的绘制     | / 132        |
| 学习任务二 汽车前轮转向机构分析         | / 136        |
| 学习任务三 汽车发动机配气机构分析        | / 142        |
| 学习任务四 驻车制动锁止机构分析         | / 146        |
| <b>学习单元四 汽车常用机械传动</b>    | <b>/ 148</b> |
| 学习任务一 汽车带传动              | / 148        |
| 学习任务二 汽车链传动              | / 154        |
| 学习任务三 汽车齿轮传动和轮系          | / 159        |
| 学习任务四 汽车自动变速器行星齿轮传动机构    | / 172        |
| <b>学习单元五 汽车轴系零件</b>      | <b>/ 174</b> |
| 学习任务一 汽车常见轴结构            | / 174        |
| 学习任务二 汽车常见轴承             | / 177        |
| 学习任务三 汽车联轴器与离合器          | / 185        |
| <b>学习单元六 零部件的连接</b>      | <b>/ 190</b> |
| 学习任务一 齿轮与轴的键连接           | / 190        |
| 学习任务二 螺纹连接               | / 194        |
| 学习任务三 汽车上的其他紧固连接         | / 203        |
| <b>学习单元七 汽车液压与液力传动</b>   | <b>/ 207</b> |
| 学习任务一 液压系统工作原理及图形符号      | / 207        |
| 学习任务二 汽车常用液压泵            | / 209        |
| 学习任务三 汽车常用液压缸            | / 216        |
| 学习任务四 汽车液压控制阀            | / 218        |
| 学习任务五 液力传动               | / 230        |
| <b>学习单元八 汽车零件配合与技术测量</b> | <b>/ 236</b> |
| 学习任务一 学习量具的使用            | / 236        |
| 学习任务二 学习公差与配合            | / 242        |
| 学习任务三 学习表面结构要求           | / 261        |



学习工作页

汽车在行驶过程中，汽车机械中的各个零件在不同的工作情况和工作场合下受到各种不同的载荷作用。对于一名汽车维修工程师而言，只有具备对汽车机械零件进行受力分析的能力，才能更好地对汽车故障进行诊断、制订维修方案并改进维修方法，最终确保汽车维修的质量，保证汽车使用的安全性和可靠性。力学分析是研究机构在力系作用下平衡规律的科学，通过完成以下两个典型学习任务，能叙述静力学的基本概念，运用基本的力学公理、约束与约束反力的知识、受力分析的方法，能对拉伸与压缩、剪切与挤压、扭转和弯曲时的强度进行计算，具有绘制机构受力图的能力。

### 学习任务一 汽车构件静力分析

#### 任务描述

通过对汽车发动机活塞连杆组和汽车转向盘在工作状态下的受力分析，学生能运用基本力学公理、约束与约束反力的知识对汽车构件进行受力分析。

#### 学习目标

1. 能运用力学公理；
2. 能概括约束与约束反力的概念及分类；
3. 能叙述受力分析的方法；
4. 能绘制受力图；
5. 通过讲述力学在我国先进工程技术领域的应用，激发爱国情怀，培养献身科研、报效祖国的奉献精神。



#### 学习准备

##### 一、知识准备

1. 力学公理（查阅“学习参考学习单元一 学习任务一”）。

2. 约束与约束反力的概念及分类（查阅“学习参考学习单元一 学习任务一”）。

3. 受力分析的方法（查阅“学习参考学习单元一 学习任务一”）。

请阅读学习参考，把自己需要掌握的知识点和技能点填入下表。

|     |    |
|-----|----|
| 知识点 | 1. |
|     | 2. |
|     | 3. |
| 技能点 | 1. |
|     | 2. |
|     | 3. |

## 二、工作场地

理实一体化教室。

## 三、工具准备

汽车发动机活塞连杆组实物、模型，装配有汽车转向盘的汽车整车或者台架。



## 计划与实施

在教师的引导下分组，以小组为单位学习相关知识。

一、汽车发动机活塞连杆组的受力分析，并绘制受力分析图。

1. 带着以下问题观察活塞连杆组：

（1）活塞连杆组由哪些构件组成？

（2）当活塞连杆组处于平衡状态时，各个组成构件是否可以看作是刚体并对其进行受力分析？

（3）活塞连杆组传递动力的顺序是怎样的？

（4）请指出活塞连杆组中相关的约束及约束反力的性质。

2. 绘制活塞连杆组受力分析图：

（1）把活塞连杆组作为一个整体，以简图的形式绘制出来。

（2）把活塞连杆组作为一个整体进行受力分析，并在作用点上绘制出所受的力。

（3）把活塞连杆组分解为两个构件——活塞与连杆，并分别以活塞和连杆为研究对象进行受力分析。

（4）在活塞和连杆各自的作用点上绘制出所受的力。

二、分析转向盘转向时所受的力。

1. 带着以下问题观察汽车的转向盘：

（1）转向盘在力学上有哪些作用？

（2）转向盘在常规工作下的受力性质是什么？

（3）单手握转向盘是否合理？为什么？

（4）双手如何用力才能保持转向盘静止不动？

(5) 双手如何用力才能使转向盘转动?

(6) 如果驾驶员双手施加的力增大一倍, 双手之间的距离减少一半, 转向盘的转动有无变化?

2. 如图 1-1-1 所示, 图中力  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ 、 $F_4$  作用线均与转向盘相切, 且  $F_1$  平行于  $F_3$ 、 $F_2$  平行于  $F_4$ , 大小分别为 60 N、80 N、60 N、80 N。方向盘的半径为 380 mm。请回答以下问题:



图 1-1-1 转向盘的受力情况

(1) 图中所示力系是否为平面汇交力系?

(2) 求每一个力对转向盘中心之矩。



## 评价与反馈

### 一、填空题

1. 平面汇交力系平衡的充分必要条件是\_\_\_\_\_。
2. 柔性约束对物体只有沿\_\_\_\_\_的\_\_\_\_\_力。
3. 铰链约束分为\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_。
4. 平面汇交力系的特点为\_\_\_\_\_。  
其平衡的充分必要条件为\_\_\_\_\_。
5. 力偶是指\_\_\_\_\_。
6. 作用于刚体上的力, 均可\_\_\_\_\_到刚体上任一点, 但必须同时\_\_\_\_\_一个\_\_\_\_\_。
7. 光滑面约束力必过\_\_\_\_\_沿\_\_\_\_\_并指向\_\_\_\_\_的物体。
8. 活动铰链的约束反力必通过\_\_\_\_\_并与\_\_\_\_\_相垂直。
9. 力偶对物体的转动效应取决于\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_三要素。
10. 任意力系平衡的充分必要条件是\_\_\_\_\_。

### 二、判断题

1. 凡在二力作用下的约束称为二力构件。 ( )
2. 在两个力作用下, 使刚体处于平衡的必要条件与充分条件是这两个力等值、反向、共线。 ( )
3. 力的可传性只适用于一般物体。 ( )



4. 合力比分力大。 ( )
5. 凡矢量都可以用平行四边形法则合成。 ( )
6. 汇交的三个力是平衡力。 ( )
7. 约束力是与主动力有关的力。 ( )
8. 作用力与反作用力是平衡力。 ( )
9. 力偶对其作用面内任意点的力矩值恒等于此力偶的力偶矩，同时与力偶及矩心间的相对位置相关。 ( )

### 三、受力分析题

1. 画出图 1-1-2 所示铰链约束物体的受力图。
2. 画出图 1-1-3 所示光滑面约束物体的受力图。
3. 画出图 1-1-4 所示各杆件的受力图。

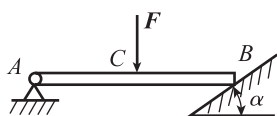


图 1-1-2

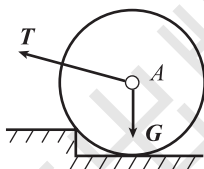


图 1-1-3

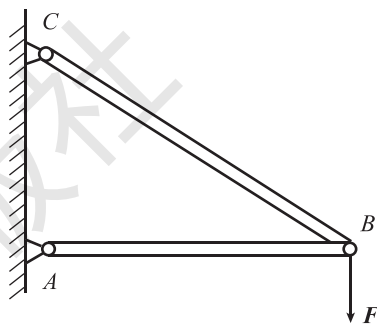


图 1-1-4

### 四、技能考核

请完成技能实践内容，填写下列表格。

学生实践记录表

|      |                                                                                      |       |       |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|
| 班级   |                                                                                      | 车型及年款 |       |
| 姓名   |                                                                                      | 车辆识别码 |       |
| 学号   |                                                                                      | 里程数   |       |
| 实践项目 |                                                                                      | 实践设备  |       |
| 资料查阅 |                                                                                      | 车型    |       |
| 拆装流程 |                                                                                      |       |       |
| 特点分析 |                                                                                      |       |       |
| 自我评价 | 良好 <input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格 <input type="checkbox"/> |       |       |
| 教师评价 | 良好 <input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格 <input type="checkbox"/> | 教师姓名: | 年 月 日 |

## 学习任务二 构件承载能力分析

### 任务描述

汽车杆件受力时会发生变形，若变形过大会导致杆件失效，进而影响汽车的安全性与可靠性。学生能够运用剪切和扭转的强度计算方法对汽车螺栓连接受剪切的强度和汽车传动轴受扭转的强度进行分析。

### 学习目标

1. 能对拉伸与压缩、剪切与挤压、扭转和弯曲时的强度进行计算；
2. 通过讲述构件承载能力分析方法，培养求真务实、不断探索、坚持不懈的科学精神。



### 学习准备

#### 一、知识准备

1. 拉压杆的强度计算（查阅“学习参考学习单元一 学习任务二”）。
  2. 剪切的实用计算（查阅“学习参考学习单元一 学习任务二”）。
  3. 圆轴扭转时强度和刚度的计算（查阅“学习参考学习单元一 学习任务二”）。
- 请阅读学习参考，把自己需要掌握的知识点和技能点填入下表。

|     |    |
|-----|----|
| 知识点 | 1. |
|     | 2. |
|     | 3. |
| 技能点 | 1. |
|     | 2. |
|     | 3. |

#### 二、工作场地

理实一体化教室。

#### 三、工具准备

手动挡（装备离合器踏板）小轿车、汽车传动轴。



## 计划与实施

### 一、汽车离合器踏板所受拉力的分析。

汽车离合器踏板如图 1-2-1 所示, 已知踏板受到压力  $F_1 = 400 \text{ N}$ , 拉杆直径  $d = 20 \text{ mm}$ , 杠杆长  $l = 330 \text{ mm}$ ,  $h = 56 \text{ mm}$ , 拉杆材料的许用应力  $[\sigma] = 40 \text{ MPa}$ 。试校核拉杆的强度。

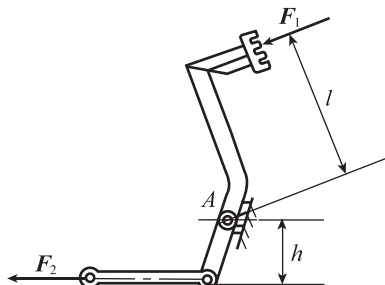


图 1-2-1 汽车离合器踏板

### 二、汽车传动轴受扭转的强度分析。

观察汽车用的传动轴实物, 结合所学过的圆轴扭转与变形的相关知识回答以下问题:

1. 汽车传动轴的横截面是什么形状的?

2. 转轴在受力情况下会发生何种变形?

3. 根据已知条件对汽车传动轴进行强度校核。

汽车传动轴由 45 钢无缝管制成, 其外径  $D = 90 \text{ mm}$ , 内径  $d = 85 \text{ mm}$ 。材料的许用切应力  $[\tau] = 60 \text{ MPa}$ , 工作时最大扭矩  $M_n = 1.5 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。试校核轴的强度。



## 评价与反馈

### 一、填空题

1. 圆轴扭转时, 横截面上各点只有剪应力, 其作用线\_\_\_\_\_, 同一半径的圆周上各点剪切应力\_\_\_\_\_。

2. 梁在集中力作用处, 剪力  $Q$ \_\_\_\_\_, 弯矩  $M$ \_\_\_\_\_。

3. 以截面左侧的外力计算剪力时, 向\_\_\_\_\_的外力取正号; 向\_\_\_\_\_的外力取负号。若以右侧的外力计算, 则外力正负规定与此\_\_\_\_\_。

4. 梁在集中力偶作用处, 剪力  $Q$ \_\_\_\_\_, 弯矩  $M$ \_\_\_\_\_。

5. 梁某截面的弯矩, 若梁在该截面附近弯成\_\_\_\_\_, 则弯矩为正; 弯成\_\_\_\_\_, 则弯矩为负。

6. 当梁的材料是钢时, 应选用\_\_\_\_\_的截面形状; 若是铸铁, 则应采用\_\_\_\_\_的截面形状。

## 二、计算题

如图 1-2-2 所示, 已知  $F_r = 2 \text{ kN}$ ,  $F_t = 5 \text{ kN}$ ,  $M = 1 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ,  $l = 600 \text{ mm}$ , 齿轮直径  $= 400 \text{ mm}$ , 轴的  $[\sigma] = 100 \text{ MPa}$ , 求传动轴直径  $d$ 。

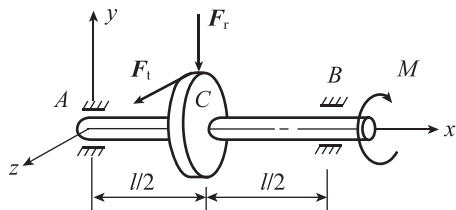


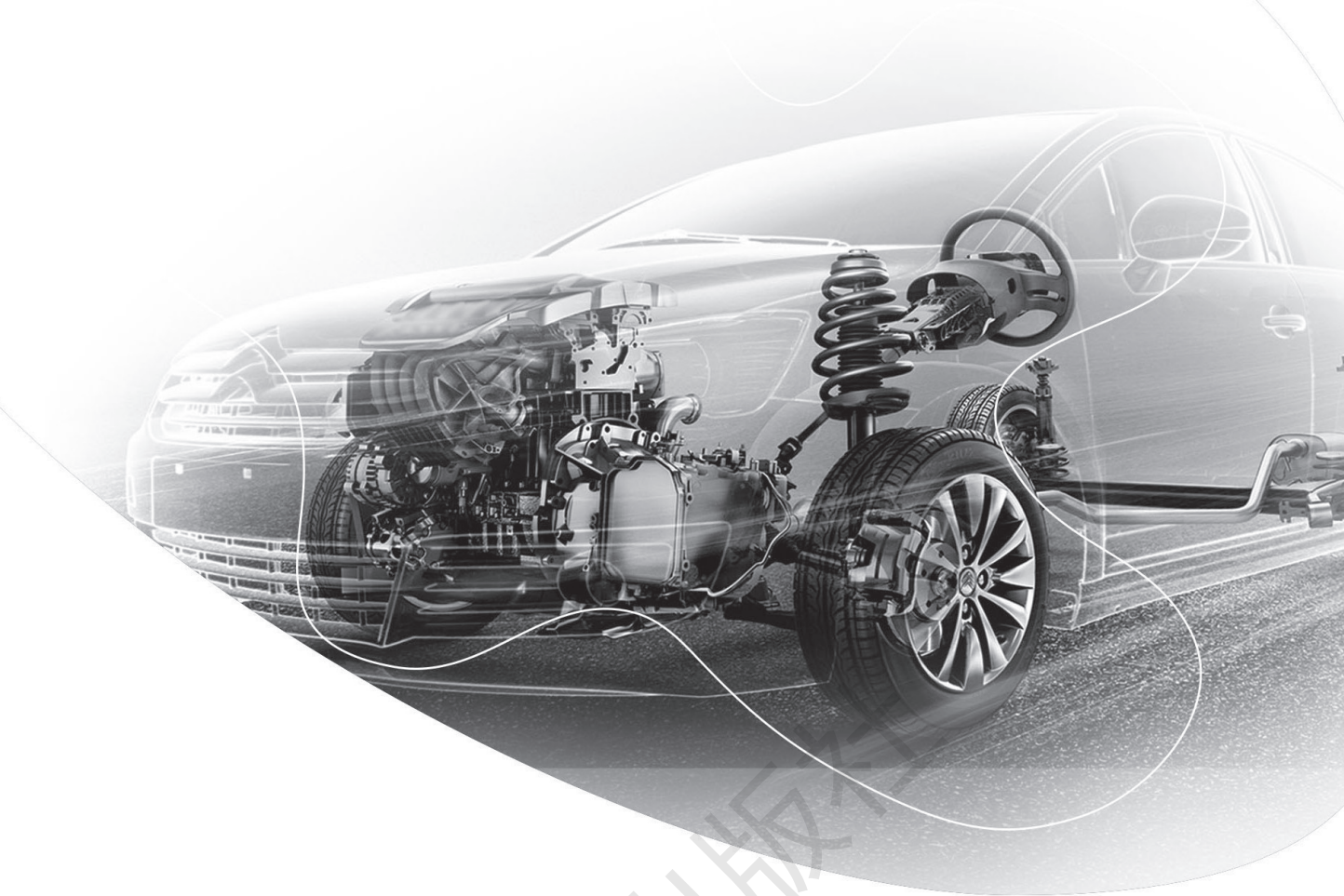
图 1-2-2

## 三、技能考核

请完成技能实践内容, 填写下列表格。

学生实践记录表

|      |                                                                                      |             |             |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------|
| 班级   |                                                                                      | 车型及年款       |             |
| 姓名   |                                                                                      | 车辆识别码       |             |
| 学号   |                                                                                      | 里程数         |             |
| 实践项目 |                                                                                      | 实践设备        |             |
| 资料查阅 |                                                                                      | 车型          |             |
| 拆装流程 |                                                                                      |             |             |
| 特点分析 |                                                                                      |             |             |
| 自我评价 | 良好 <input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格 <input type="checkbox"/> |             |             |
| 教师评价 | 良好 <input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格 <input type="checkbox"/> | 教师姓名: _____ | 年    月    日 |



学习参考

## 学习任务一 汽车构件静力分析



## 相关知识

## 一、静力学基础

## 1. 力

力是人们通过长期的生产实践和科学实验、观察逐步建立起来的概念。力和人们的日常生活、生产实践息息相关、密不可分。力作用的例子相当普遍，无处不在，例如：人用手推、拉、投掷、举起物体使其运动状态改变；空中物体受到地球引力的作用而坠落；行驶中的汽车受到制动力的作用而停下；汽车发动机的活塞在气缸内燃料燃烧所产生的作用力下，沿着气缸的轴线移动；等等。

(1) 力是物体间相互的机械作用，这种作用使物体的运动状态或形状发生改变。力使物体的运动状态发生改变的效应称为外效应，使物体形状发生改变的效应称为内效应。

(2) 力的三要素。实践表明，力对物体的作用效果取决于力的大小、方向和作用点三个要素。当这三个要素中任何一个要素发生改变时，力的作用效果就会发生改变。

(3) 力是矢量，是一个既有大小又有方向的量。可用一带箭头的有向线段表示，如图 1-1-1 所示。图中的有向线段  $AB$ ，按一定的比例尺所作的线段长度  $AB$  表示力的大小；箭头的指向表示力的方向；线段的起点（或终点）表示力的作用点；通过力的作用点沿力的方向的直线称为力的作用线。

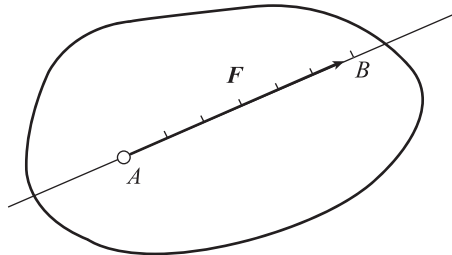


图 1-1-1 力的表示法

(4) 力的单位。力的国际制单位是牛顿 (N) 或千牛顿 (kN)。



## 2. 力系

力系是指作用于被研究物体上的一组力。如果一个力系能使物体处于平衡状态,则称该力系为平衡力系;若两力系分别作用于同一物体时效应相同,则二者互称等效力系;若一个力与一个力系等效,则称此力为该力系的合力。所谓力系的简化就是用简单的力系等效替代复杂的力系。

力系按照作用线是否共面分为平面力系和空间力系。若力系中各个力的作用线均在同一平面内,则称为平面力系;若力系中各个力的作用线不在同一平面内,则称为空间力系。本单元主要讲述平面力系的知识。

## 3. 刚体

刚体是指在外力作用下,大小和形状保持不变的物体。刚体是抽象化的理想力学模型。在工程实际中机械零件和结构构件,均有足够的抵抗变形的能力。因此,受力产生的变形是极其微小的。在许多工程问题中,构件的这些微小变形对研究物体的平衡问题来说可以忽略不计。实践证明,在静力学中把所研究的物体抽象为刚体,不仅是解决工程实际问题所允许的,也是认识力学规律所必需的。抽象简化可以使许多工程实际问题的解决大为简便,而且计算结果也足够精确。但是在研究物体的变形问题时,就不能把物体看作是刚体,否则会导致错误的结果,甚至无法进行研究。本单元以刚体为研究对象。

## 4. 静力学公理

静力学基本公理是人们在生活和生产实践中经过反复观察和实践得出的结论。静力学的全部理论,就是以静力学公理为依据推导出来的;静力学公理是静力学的理论基础。

### (1) 二力平衡公理(公理一)

作用于同一刚体上的两个力,使刚体处于平衡的必要且充分条件,是这两个力的大小相等,方向相反,作用线重合(简称等值、反向、共线),如图 1-1-2 所示。

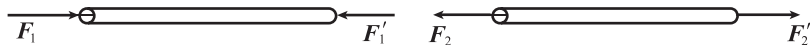


图 1-1-2 二力平衡

此公理适用于“刚体”,是力系平衡的理论基础。对非刚体而言,二力平衡条件只是必要条件,而不是充分条件,如绳索一类的柔性体,当受等值、反向、共线的两个拉力作用时,处于平衡状态,但受两个等值、反向、共线的压力作用时,就不能平衡。

只受两个力作用而处于平衡的构件,称为二力构件,当构件为杆件时则称为二力杆。二力杆的受力特点是二力的作用线必定沿着两作用点的连线。

### (2) 加减平衡力系公理(公理二)

在已知力系上加上或减去任意一个平衡力系,不会改变原力系对物体的作用效果。此公理适用于“刚体”,是力系简化的理论基础。

推论:力的可传性原理:作用在刚体上的力,其作用点可以沿着作用线在刚体内任

意移动而不改变它对刚体的作用效果。

证明如下：如图 1-1-3 所示，刚体上  $A$  点作用力  $F$ ，在力作用线上任取一点  $B$ ，在  $B$  点沿力  $F$  的作用线加上一对平衡力  $F_1$  和  $F'_1$ ，且令  $F_1 = F'_1 = F$ ，则由公理二可知，加上  $F_1$ 、 $F'_1$  后，并不影响刚体的效应，最后剩下作用于  $B$  点的力  $F_1 = F$ ，就相当于把力  $F$  由  $A$  点沿着作用线移至  $B$  点，而刚体的运动效应不变，推论得以证明。

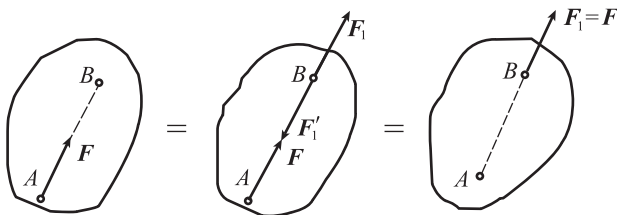


图 1-1-3 力的可传性原理

在实践中，人们有这样的体会：以等量的力在车后  $A$  点推和在车前  $B$  点拉，效果是一样的，如图 1-1-4 所示。

由力的可传性原理可以看出，对刚体来说，力的作用点已不再是决定其效应的要素之一，而是由力的作用线取代，因此作用在刚体上的力的三要素是力的大小、方向和作用线。但必须注意，力的可传性原理只适用于刚体，而不适用于变形体。

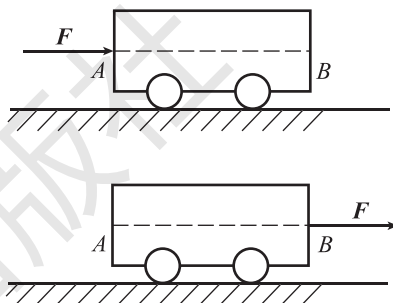


图 1-1-4 力的可传性

### (3) 作用力与反作用力公理（公理三）

一个物体对另一个物体有一作用力时，另一物体对此物体必有一反作用力，这两个力大小相等，方向相反，沿同一直线分别作用在两个物体上。如图 1-1-5 (b) 所示， $N$  和  $N'$  即为一对作用力和反作用力，我们常用加“撇”的方法来表示。

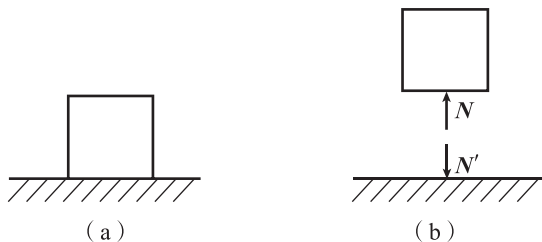


图 1-1-5 作用力与反作用力

应当注意，作用力和反作用力是分别作用在两个不同的物体上的，因此，尽管二者大小相等，方向相反，沿同一作用线，但不能相互平衡，即它们不是一对平衡力。二力平衡条件中的一对平衡力是作用在同一物体上的等值、反向的共线力。

### (4) 力的平行四边形法则（公理四）

作用在刚体上的两个汇交力可合成为一个合力，合力的作用点在二力的汇交点，合力的大小和方向由以此二力为邻边所构成的平行四边形的对角线矢量表示，如图 1-1-6 (a) 所示。此公理是研究力系合成和力分解的基础。

根据这个公理所作出的平行四边形，称为力的平行四边形。这种求合力的方法，称为力的平行四边形法则。

两个力的合成不是简单的代数和，而是要用平行四边形法则求几何和，即矢量和。力的平行四边形法则还可用于矢量式表示为  $\mathbf{R} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2$ 。由图 1-1-6 (b) 可见，求合力  $\mathbf{R}$  时，实际上不必作出整个平行四边形，只要以力  $\mathbf{F}_1$  ( $AB$ ) 的末端  $B$  作为  $\mathbf{F}_2$  ( $BD$ ) 的始端画出  $\mathbf{F}_2$  (即两分力首尾相接)，那么矢量  $AD$  就代表合力  $\mathbf{R}$ 。合力和分力所构成的三角形  $ABD$  称为力三角形；用力三角形求两力合力的方法，称为力三角形法。

在工程中，通常是将一个已知力分解为两个相互垂直的分力，或用两个相互垂直的分力来表示一个方向不定的未知力，且一般选这两个分力沿  $x$ 、 $y$  坐标轴方向，如图 1-1-6 (c) 所示。可用矢量式表示为  $\mathbf{F} = \mathbf{F}_x + \mathbf{F}_y$ 。

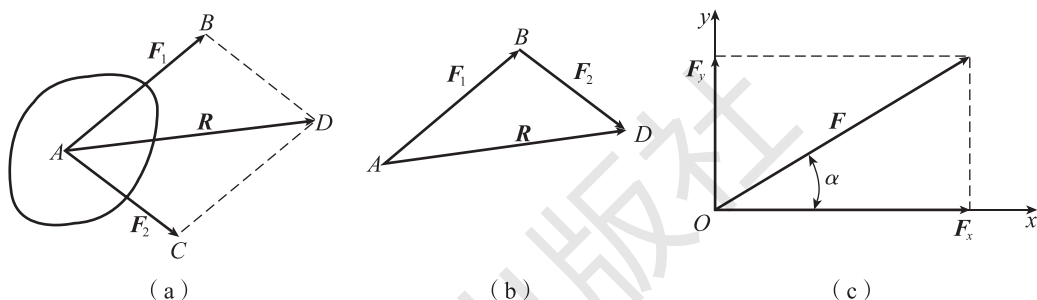


图 1-1-6 力的平行四边形法则

$F$ 、 $F_x$ 、 $F_y$  之间的关系式为：

$$\begin{aligned} F &= \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \\ F_x &= F \cos \alpha \\ F_y &= F \sin \alpha \end{aligned} \quad (1-1-1)$$

应用上述力的基本性质，可以推导出三力平衡汇交定理：如果物体在三个不平行的共面力作用下处于平衡时，则这三个力的作用线必汇交于一点。

若物体受三个互不平行的共面力作用而平衡，则根据三力平衡汇交定理，通常只要已知两个力的方向，第三个力的方向便可推知。在解力系平衡问题时，常利用这个定理确定未知力的方向。

## 二、受力分析与受力图

### 1. 约束和约束反力

在工程中，构件总是以一定的形式与周围其他构件相互连接的，例如转轴受到轴承的限制，只能产生绕轴心的转动；列车受到钢轨的限制，只能沿轨道运动；等等。这种限制物体某些运动的周围其他物体，称为约束。上面提到的轴承就是转轴的约束，钢轨就是列车的约束。



约束和约束反力

物体的受力可分为主动力和约束反力两类。主动力是指使物体产生运动或运动趋势的力，如物体的重力、零件的载荷等；约束反力是对物体运动起限制作用的力，作用在被约束物体上。由于约束的作用是限制物体的运动，所以约束反力的方向总是与它限制的物体运动方向相反，其作用点在约束与被约束物体相互连接或接触之处。约束反力也常称为约束力。

工程中约束的种类很多，下面介绍几种典型的约束模型。

### (1) 柔体约束

由绳索、链条或皮带等非刚性物体所构成的约束称为柔性约束。这些物体只能受拉不能受压，约束反力作用于连接点，方向沿着中心线而背离被约束物体。约束反力符号通常用字母  $T$  来表示。如图 1-1-7 中绳索对物体的约束反力  $T_1$  和  $T_2$ 。

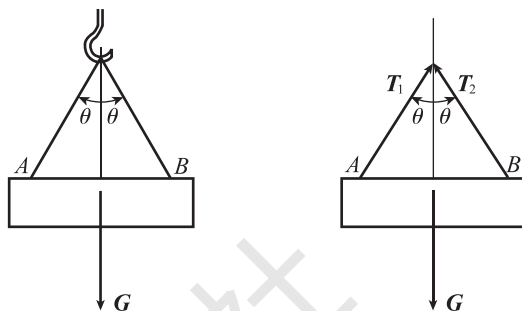


图 1-1-7 柔性约束

### (2) 光滑面约束

当两物体直接接触且表面光滑，接触处摩擦力很小可略去不计时所形成的约束称为光滑面约束。这种约束不能限制物体沿约束表面切线方向的位移，只能限制物体沿接触面法线并指向约束内部的位移。因此，其约束反力必通过接触点，沿着接触面在该点的公法线方向并指向物体。这类约束反力称为法向反力，通常用字母  $N$  表示，如图 1-1-8 所示。光滑面可以是平面，如导轨、滑块等，也可以是曲面，如图 1-1-9 (a) 所示，所以齿轮啮合也属于光滑面约束，如图 1-1-9 (b) 所示。

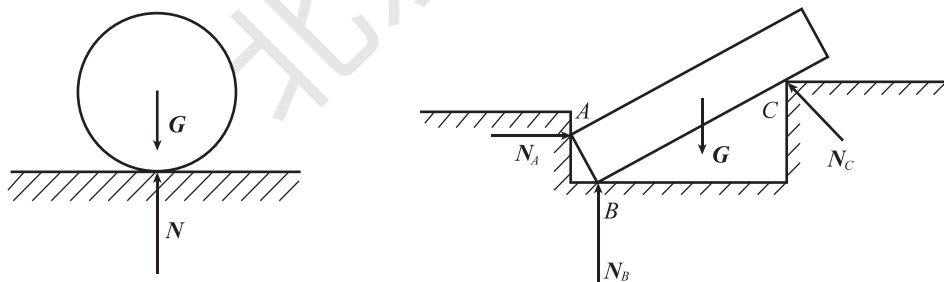


图 1-1-8 光滑面约束



图 1-1-9 光滑面约束实例

### (3) 光滑圆柱铰链约束

两个带有圆孔的物体，用圆柱形销钉连接所形成的可动连接，称为铰链。由铰链构成的约束称为铰链约束，这类约束只能限制构件沿垂直于销钉轴线方向的相对位移，不能限制它们的转动。如图 1-1-10 所示，物体 A 和 B 的运动受到销钉 C 的限制，只能转动不能移动。

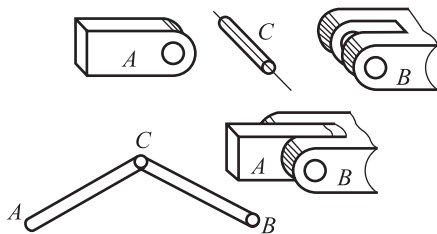


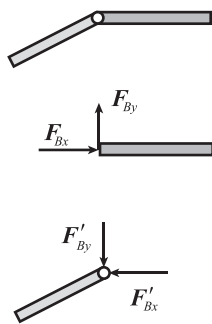
图 1-1-10 光滑铰链约束

如果销钉与零件之间接触面的摩擦很小，可忽略不计，则称之为光滑铰链。

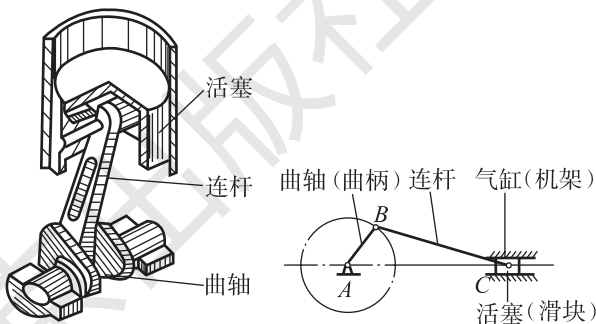
根据被连接物体的形状、位置及作用，光滑铰链又分为以下几种：

#### ① 中间铰链

当构成铰链约束的两构件均为活动构件时，这种约束称为中间铰链约束，如图 1-1-11 (a) 所示。这种约束用来连接两个可以相对转动但不能移动的构件，例如，在图 1-1-11 (b) 中，曲柄连杆机构中曲柄与连杆、连杆与活塞的连接就是中间铰链。



(a) 中间铰链约束



(b) 内燃机的曲柄连杆机构

图 1-1-11 中间铰链

#### ② 固定铰链支座

当构成铰链约束的两个构件中有一个固定为支座，则这种约束称为固定铰链支座或者固定支座，如图 1-1-12 所示。



#### ③ 活动铰链支座

在铰链支座的底部安装辊轴，可以使支座沿固定支承面移动，称为活动铰链支座。这种约束只能限制构件离开和趋向支承面的运动，不能限制构件绕销轴轴线转动和沿固定支承面移动，如图 1-1-13 所示。

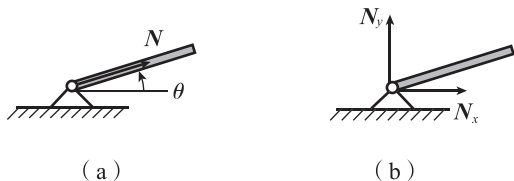


图 1-1-12 固定铰链支座

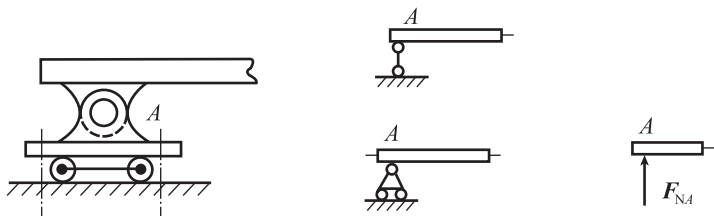


图 1-1-13 活动铰链支座

## 2. 物体的受力分析与受力图

在解决工程实际问题中，经常需要对物体进行受力分析，即研究物体受到的力，并分析这些力对物体的作用情况。

在进行实际工程分析中，常常会遇到几个物体或者几个构件相互联系的情况，故首先需要明确要对哪一个物体进行受力分析，即需要明确研究对象。为了分析研究对象的受力情况，往往把该研究对象从物体系统中分离出来，被分离出来的研究对象称为分离体。在分离体上画出周围物体对它的全部作用力（包括主动力和约束反力），这样的图形称为物体的受力分析图。

画出物体的受力分析图是解决静力学问题的基础，其具体步骤如下：

- (1) 确定研究对象，画出分离体。
- (2) 在分离体上画出全部已知的主动力。
- (3) 在分离体上解除约束处画出相应的约束反力。

**例 1** 如图 1-1-14 (a) 所示，锅炉汽包的重力为  $G$ ，安置在焊接转轮上，试画出汽包的受力图。

**解：**取汽包为研究对象，单独画出其简图。

**画主动力：**汽包的重力为  $G$ ，方向竖直向下。

**画约束反力：**转轮可看作汽包的光滑面约束，约束反力  $N_A$ 、 $N_B$  沿接触中心的公法线方向，均指向  $O$  点，如图 1-1-14 (b) 所示。

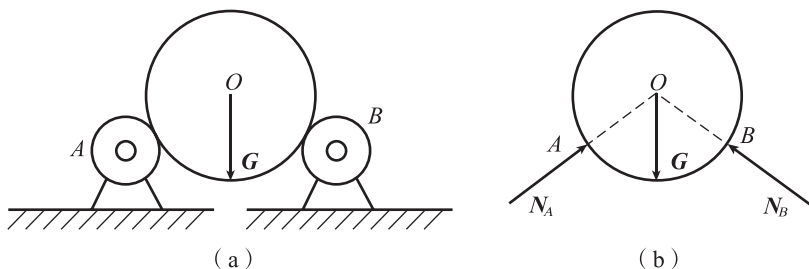


图 1-1-14 锅炉汽包受力图

**例 2** 如图 1-1-15 (a) 所示，设墙面和地面是光滑的，杆  $AB$  的重力为  $G$ ，由水平绳索  $ED$  拉住，试画出  $AB$  的受力图。

**解：**取杆  $AB$  为研究对象，单独画出其简图。

**画主动力：** $AB$  的重力为  $G$ ，方向竖直向下。



画约束反力：墙面和地面可看作是光滑面约束，约束反力  $N_A$ 、 $N_B$  沿接触点的公法线方向，分别过  $A$ 、 $B$  两点，指向研究对象； $ED$  是柔性约束，约束反力  $T_D$  沿绳索中心线方向，背离研究对象。 $AB$  杆受力图如图 1-1-15 (b) 所示。

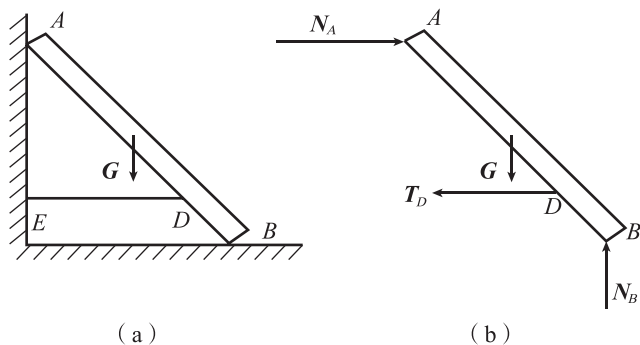


图 1-1-15  $AB$  杆受力图

### 三、力矩与力偶

#### 1. 力矩

人用扳手拧螺母，会感到加在扳手上的力越大，或者力的作用线离转动中心越远，就越容易转动螺母，如图 1-1-16 所示。



平面汇交力系

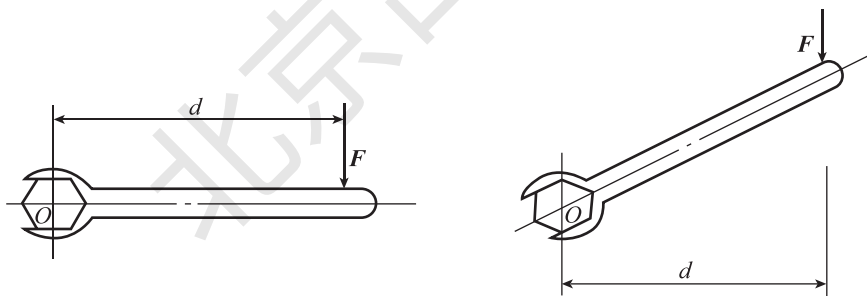


图 1-1-16 力对  $O$  点之矩

力  $F$  使刚体绕某点  $O$  转动的效应，不仅与力  $F$  的大小成正比，而且与  $O$  点到力作用线的垂直距离  $d$  成正比。乘积  $F \times d$  加上正负号，称为力  $F$  对  $O$  点的矩，简称力矩。规定力使刚体绕矩心逆时针方向转动，力矩为正，反之为负。

$$M_O(F) = \pm F \times d \quad (1-1-2)$$

图 1-1-16 中  $O$  点称为力矩中心，简称矩心；矩心  $O$  到力  $F$  作用线的垂直距离  $d$  称为力臂。

力  $F$  使物体绕  $O$  点转动的效果，可完全由下列两个要素决定：

- (1) 力的大小与力臂的乘积。
- (2) 力使物体绕  $O$  点转动的方向。

当力的大小等于零,或者力的作用线通过力矩中心,即力臂等于零时,力矩为零,这时力矩不能使物体绕  $O$  点转动。如果物体上有若干个力,当这些力对力矩中心的力矩代数和等于零,即原来静止的物体,就不会绕力矩中心转动。

## 2. 力偶与力偶矩

作用在同一个物体上的两个力,如果大小相等、方向相反、作用线互相平行但不重合,则把这样的两个力作为一个整体,称为力偶。力偶对物体产生的是纯转动效应。例如用双手转动汽车方向盘、用手指旋开水龙头等,均是常见的力偶实例。力偶中两力作用线所决定的平面称为力偶作用面,两力作用线之间的距离  $d$  称为力偶臂,如图 1-1-17 所示。

实践证明,力偶对物体的作用效果,与力  $F$  的大小成正比,又与力偶臂  $d$  的长度成正比。在力学中,用  $F$  与  $d$  的乘积再冠以相应的正负号,作为力偶在其作用面内使物体产生转动效应的度量,称为力偶矩,记作  $m(F, F')$  或  $M$ 。

$$M = m(F, F') = \pm Fd \quad (1-1-3)$$

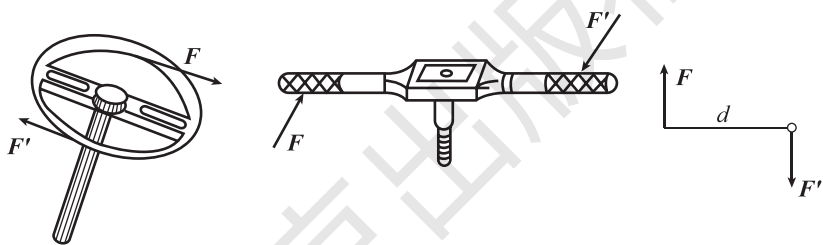


图 1-1-17 力偶

式中,“ $\pm$ ”表示力偶的转向,规定逆时针转动为正,反之为负。力偶矩的单位与力矩的单位相同,力偶的表示方法如图 1-1-18 所示。

力偶是两个具有特殊关系的力的组合,虽然力偶中的每个力仍具有一般力的性质,但作为一个整体考虑它们对刚体的作用时,则出现了与单个力不同的性质。力偶具有如下特性:

(1) 力偶既没有合力,本身又不平衡,是一个基本的力学量。

(2) 力偶对于作用面内任一点之矩与矩心位置无关,恒等于力偶矩,因此,力偶对物体的转动效应用力偶矩度量,在平面问题中它是个代数量。

在图 1-1-18 中,在力偶  $(F, F')$  的作用面内任取  $O$  点为矩心,设  $O$  点与  $F'$  的距离为  $x$ ,则力偶对  $O$  点的矩为

$$M_O(F, F') = M_O(F) + M_O(F') = F(x + d) - F'x = Fd \quad (1-1-4)$$

此结果表明,力偶对物体的转动效应只与力偶矩的大小和转向有关,与矩心位置无关。

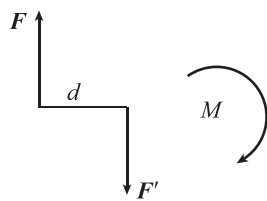


图 1-1-18 力偶的表示方法

(3) 作用在同一平面内的两个力偶, 若其力偶矩大小相等、转向相同, 则这两个力偶等效。

由上述力偶的性质可知, 只要保持力偶矩的大小和转向不变, 平面力偶可以在其作用面内任意移动, 且可以同时改变力偶中力的大小和力偶臂的长短, 而不改变其作用效应。力偶可以用带箭头的弧线表示, 如图 1-1-19 所示。

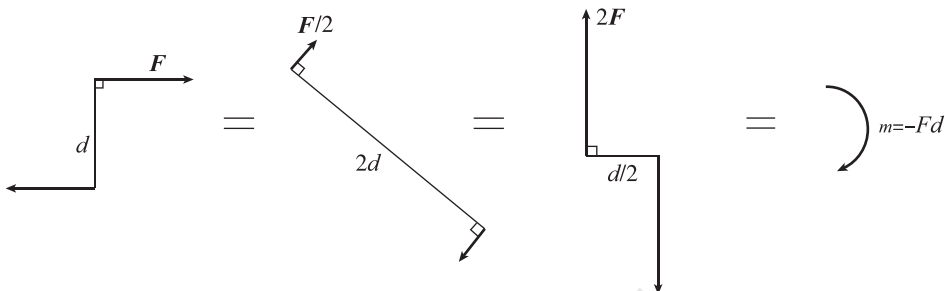


图 1-1-19 平面力偶的等效处理

## 学习任务二 构件承载能力分析



### 相关知识

工程中构件的几何形状多种多样, 但归纳起来大致可分为杆件、板件和箱体类零件几类。其中, 杆件是指某一方向尺寸远大于其余方向尺寸的构件。如汽车传动轴、发动机中的连杆等。当杆件受力形式不同时, 发生的变形也各异, 其基本形式可归纳为以下四种, 即轴向拉伸或压缩、剪切与挤压、扭转、弯曲。在图 1-2-1 所示的支架中, 杆  $AB$  受拉, 杆  $BC$  受压。在图 1-2-2 中, 钢板受力  $F$ 、 $F'$  作用而发生剪切变形。如图 1-2-3 所示, 传动轴受一对作用面与轴线垂直的力偶作用后, 发生扭转变形。在图 1-2-4 中, 吊车横梁受一对力偶作用后发生弯曲变形。

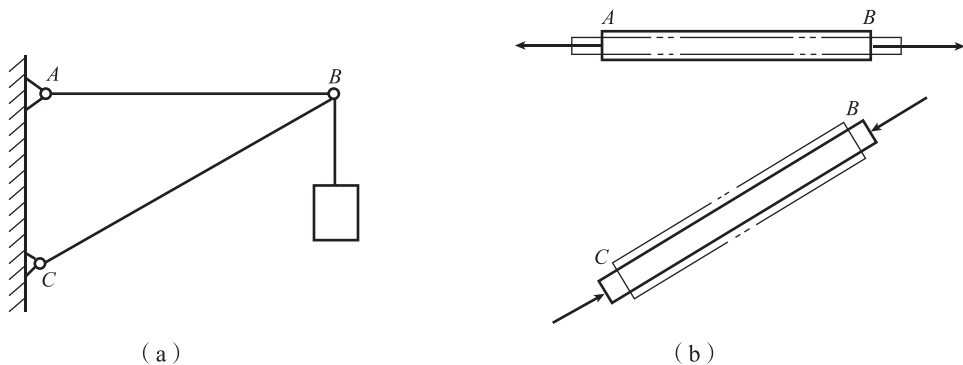


图 1-2-1 拉伸与压缩

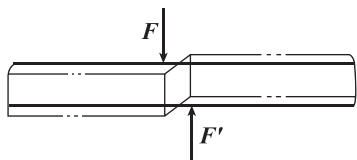


图 1-2-2 剪切



图 1-2-3 扭转



图 1-2-4 弯曲

### 一、轴向拉伸与压缩

在汽车当中有许多承受拉伸或者压缩的杆件，例如发动机气缸体与气缸盖的连接螺栓、汽车发动机两杆等。这类构件的受力特点是作用在杆件两端的外力大小相等，方向相反，且作用线与杆的轴线重合。其变形特点是沿轴线方向伸长或者缩短。这种变形形式称为轴向拉伸或压缩，而这类杆件称为拉杆或压杆。

#### 1. 轴向拉压杆的内力

作用在整个构件上的载荷和约束反力统称为外力。在外力的作用下，会引起物体内部各个质点之间的相对位置以及相互作用力发生改变，表现出来就是构件发生了变形。构件内部质点之间相互作用力（固有内力）的改变量称为附加内力，简称内力。内力随外力的大小而变化，当内力达到某一极限值时，构件即发生破坏。

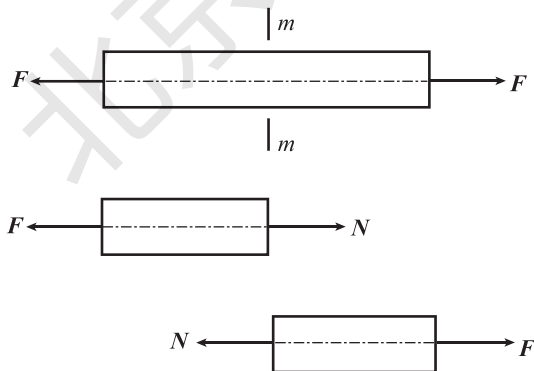


图 1-2-5 截面法求内力

构件内力的显示和确定采用截面法。为了显示轴向拉伸或压缩杆件的内力，以横截面  $m-m$  将一拉杆切为左、右两段，如图 1-2-5 所示。在分离的横截面上，即有使杆件产生轴向变形的内力分量——轴力  $N$ 。以左段为研究对象，列平衡方程  $\sum F_x = 0$ ，即得轴力  $N = F$ 。

$N$  的作用线与杆的轴线一致，方向如图 1-2-5 所示。由于在截开截面处，左右两侧截面上的内力互为作用力和反作用力，因此大小相等、方向相反。为使左右两侧截

面上的内力具有相同的正负号,必须规定轴力的正负。轴力的正负由杆的变形确定。当轴力的方向与横截面的外法线方向一致时,杆件受拉伸长,其轴力为正;反之,杆件受压缩短,其轴力为负。通常未知轴力按正向假设,由计算结果确定实际指向。

## 2. 拉压杆的强度计算

两根材料相同、截面积不同的杆,在相同拉力作用下,杆内的轴向力相同,然而随着拉力的增大,细杆先被拉断。这说明仅凭轴向力并不能完全判断杆件的强度是否足够,杆件破坏的判断依据是内力在横截面上的分布密集程度,即内力分布集度。若内力在截面上均匀分布,则单位面积上的内力称为应力,用 $\sigma$ 表示。但是这仍不足以判断构件是否安全可靠,因为构件的强度与其材料的性能有关系。

根据学习单元二中低碳钢拉伸曲线可知,当材料的应力达到屈服点 $\sigma_s$ 时,材料出现明显的塑性变形;当应力达到抗拉强度 $\sigma_b$ 时,会导致材料断裂。显然,这两种情况是不允许出现的。所以,构件工作时,其工作应力 $\sigma$ 必须小于 $\sigma_b$ 或者 $\sigma_s$ ,这两种应力统称为极限应力,用 $\sigma_0$ 表示。在实际应用当中,选抗拉强度还是屈服点作为极限应力,由材料的类型决定。对于塑性材料,一般 $\sigma_b > \sigma_s$ ,因此 $\sigma_0 = \sigma_s$ ;对于脆性材料,则无 $\sigma_s$ ,因此 $\sigma_0 = \sigma_b$ 。

在理想情况下,为了保证构件能安全可靠地工作而又能充分利用材料的强度潜能,最好使所设计构件的工作应力 $\sigma$ 小于且接近于极限应力 $\sigma_0$ ,但实际上很难做到这点。因为在设计构件时,作用在构件上的载荷难以估计,应力计算不完全准确,有一定近似性,同时材料也不像假设的那样完全均匀,另外还要考虑构件磨损和各个构件重要程度的差异等因素。所以必须使构件留有一定的安全储备,对材料的极限应力打个折扣,使构件工作应力的最大允许值等于材料极限应力的若干分之一,这个允许值称为许用应力,用符号 $[\sigma]$ 表示,即:

$$[\sigma] = \frac{\sigma_0}{n}$$

式中, $n$ 为大于1的系数,称为安全系数,用以表示构件安全储备的程度或强度的富余程度,因此得到不同材料的许用应力为:

$$\text{塑性材料 } [\sigma] = \frac{\sigma_s}{n_s}$$

$$\text{脆性材料 } [\sigma] = \frac{\sigma_b}{n_b}$$

式中,安全系数 $n_s$ 、 $n_b$ 在常温和一般条件下的取值范围分别为 $n_s = 1.4 \sim 1.8$ , $n_b = 2.0 \sim 3.5$ 。特殊情况下的 $n_s$ 、 $n_b$ 可以查阅有关资料手册。

## 3. 拉压杆的强度条件

为使杆件在工作中安全可靠(即强度足够),必须使其所受的最大工作正应力 $\sigma_{\max}$ 小于或等于其在拉伸(压缩)时的许用正应力 $[\sigma]$ ,即

$$\sigma_{\max} = \frac{F_N}{A} \leq [\sigma] \quad (1-2-1)$$

式(1-2-1)称为拉(压)杆件的强度条件,是对拉(压)杆件进行强度分析和计算的依据。杆件中最大工作应力所在的截面称为危险截面。式中 $F_N$ 和 $A$ 分别为危险截面的轴力和截面面积。等截面直杆的危险截面位于轴力最大处;而变截面杆的危险截面,必须综合轴力和截面面积两方面来确定。

上述强度条件,可以解决三种类型的强度计算问题。

(1) 若已知杆件尺寸、所受载荷和材料的许用应力,则由式(1-2-1)校核杆件是否满足强度要求,即

$$\sigma_{\max} \leq [\sigma] \quad (1-2-2)$$

(2) 设计截面尺寸

若已知杆件所受的载荷和材料的许用应力,则由式(1-2-1)得

$$A \geq \frac{F_N}{[\sigma]} \quad (1-2-3)$$

由此先确定出面积,再根据截面形状得到相应的尺寸。

(3) 确定许可载荷

若已知杆件尺寸和材料的许用应力,则由式(1-2-1)得

$$F_{N\max} \leq [\sigma]A \quad (1-2-4)$$

由上式算出杆件所能承受的最大轴力,从而确定杆件的许用载荷 $[F]$ 。

## 二、剪切与挤压

### 1. 剪切

(1) 剪切的定义

工程结构中的许多连接件,如铆钉、螺栓、键、销等,受力后产生的主要变形为剪切,剪切是杆件的基本变形形式之一。剪切原理如图1-2-6所示。

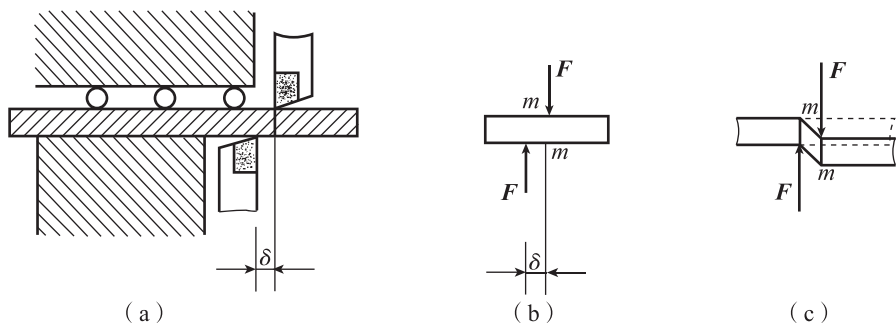


图 1-2-6 剪切原理

只有一个剪切面的剪切称为单剪。有两个剪切面的剪切称为双剪,如图1-2-7中螺栓所受的剪切。剪切面上的内力仍然由截面法求得,它也是分布内力的合力,称为剪力,用



剪切与挤压

$F_s$  表示, 如图 1-2-8 (c) 所示。剪切面上分布内力的集度即为切应力  $\tau$ , 如图 1-2-8 (d) 所示。

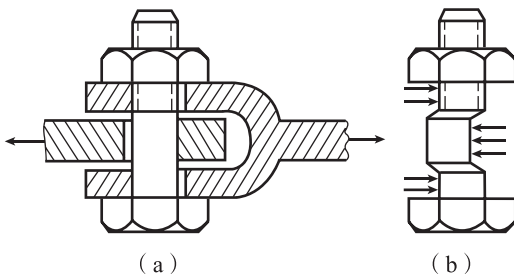


图 1-2-7 双剪切

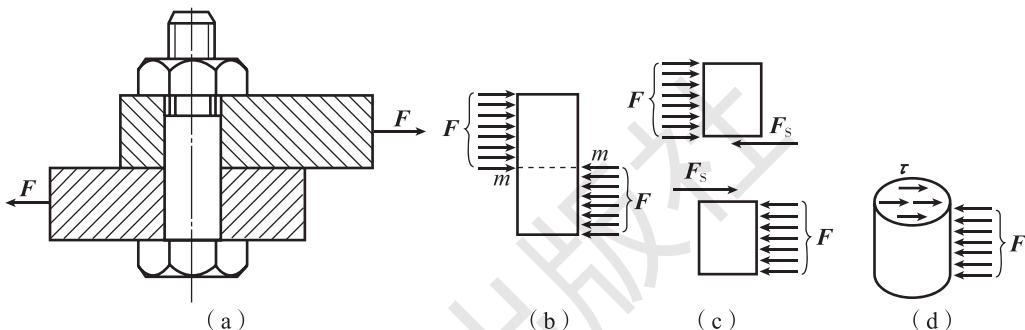


图 1-2-8 切应力

## (2) 剪切的实用计算

切应力在剪切面上分布的情况比较复杂, 为便于计算, 工程中通常采用实用计算, 即根据构件的实际破坏情况, 作出粗略的、简单的、但基本符合实际情况的假设, 作为强度计算的依据。在这种实用计算中, 假设剪切应力在剪切面内是均匀分布的 (图 1-2-7), 按此假设计算出的切应力实质上是截面上的平均应力, 称为名义切应力, 即

$$\tau = \frac{F_s}{A_s} \quad (1-2-5)$$

材料的极限切应力  $\tau_u$  是用试验方法得到的。将此极限切应力除以适当的安全因数, 即得材料的许用切应力

$$[\tau] = \frac{\tau_u}{n} \quad (1-2-6)$$

由此建立剪切强度条件

$$\tau = \frac{F_s}{A_s} \leq [\tau] \quad (1-2-7)$$

剪切破坏的条件为

$$F_b \geq \tau_b A_s \quad (1-2-8)$$



式中:  $F_b$ ——破坏时横截面上的剪力;

$\tau_b$ ——材料的剪切强度极限。

剪切强度条件同样可解决三类问题: 校核强度、设计截面尺寸和确定许用载荷。

## 2. 挤压

### (1) 挤压的概念

铆钉等连接件在外力的作用下发生剪切变形的同时, 在连接件和被连接件接触面上互相压紧, 产生局部压陷变形, 以致压溃破坏, 这种现象称为挤压, 如图 1-2-9 (a) 所示。接触面上的压力称为挤压力, 用  $F_{bs}$  表示。由挤压力引起的接触面上的表面压强, 习惯上称为挤压应力, 用  $\sigma_{bs}$  表示。

### (2) 挤压的实用计算

当接触面为平面时, 挤压面就是实际接触面; 对于圆柱状连接件, 接触面为半圆柱面, 挤压面面积  $A_{bs}$ 。取为实际接触面的正投影面, 即其直径面面积  $A_{bs} = td$  [图 1-2-9 (c)], 因此有

$$\sigma_{bs} = \frac{F_{bs}}{A_{bs}} \quad (1-2-9)$$

也可通过试验得到材料的极限挤压应力, 除以适当的安全系数  $n$ , 即得材料的许用挤压应力

$$[\sigma_{bs}] = \frac{\sigma_u}{n} \quad (1-2-10)$$

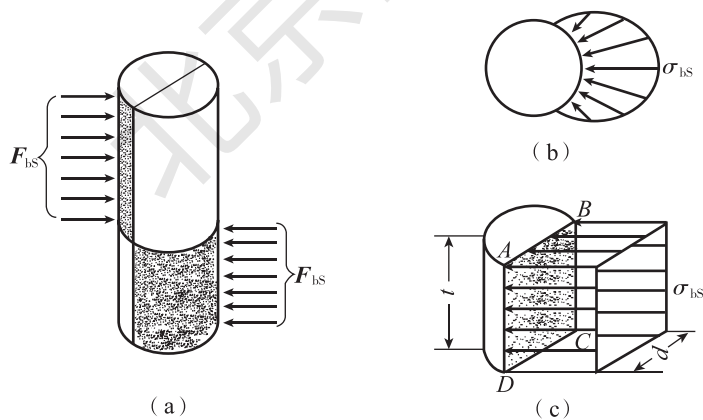


图 1-2-9 挤压计算

由此建立挤压强度条件

$$\sigma_{bs} = \frac{F_{bs}}{A_{bs}} \leq [\sigma_{bs}] \quad (1-2-11)$$

挤压应力是连接件和被连接件之间的相互作用。当两者材料不同时, 应对其中许用挤压应力较低的材料进行挤压强度校核。工程实践证明, 挤压的实用计算能满足工

程实际的要求。工程中常用材料的许用挤压应力，可以从机械设计手册中查到。

### 三、扭转

#### 1. 扭转的概念

扭转是杆件的基本变形之一。扭转变形是指杆件在若干截面内受到转向不同的外力偶作用，使杆件的轴线变成螺旋线形状的一种变形形式，如图 1-2-10 所示。

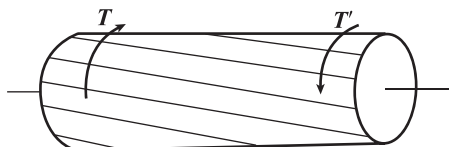


图 1-2-10 扭转变形

#### 2. 外力偶矩、扭矩和扭矩图

##### (1) 外力偶矩

在分析轴扭转时的强度、刚度条件之前，首先要分析轴的受力情况。在工程实际中，作用在轴上的外力偶矩  $T$  往往不是直接给出来的，而是要通过已知轴所传递的功率  $P$  和轴的转速  $n$  求出。它们之间的关系为：

$$T = \frac{9550P}{n} \quad (1-2-12)$$

式中： $T$ ——轴所受的外力偶矩（ $\text{N} \cdot \text{m}$ ）；

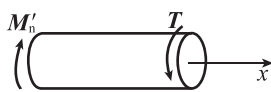
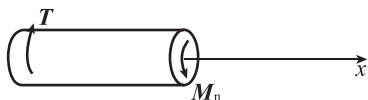
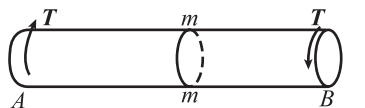
$P$ ——轴所传递的功率（ $\text{kW}$ ）；

$n$ ——轴的转速（ $\text{r/min}$ ）。

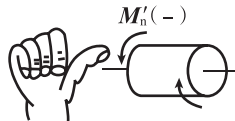
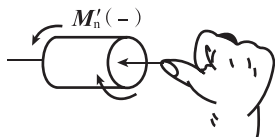
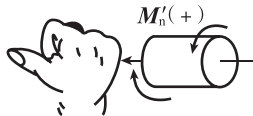
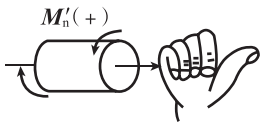
从式（1-2-12）可以看出，轴所承受的力偶矩与传递的功率成正比，与轴的转速成反比。当轴所传递的功率相同时，则高速轴所受外力偶矩较小，低速轴所受外力偶矩较大。因此，在同一传动系统中，低速轴的轴径要大于高速轴轴径。

##### (2) 扭矩

当已知作用在轴上的所有外力偶矩后，即可用“截面法”计算圆轴扭转时各横截面上的内力。如图 1-2-11（a）所示  $AB$  轴，在其两端垂直于杆轴线的平面内，作用有一对反向力偶。



（a）扭矩计算



（b）扭矩的正负号

图 1-2-11 扭矩计算与方向

杆件处于平衡状态。为了求出轴的内力，用一假想截面  $m-m$  将轴一分为二，先研究左段的平衡，其上受一外力偶矩  $T$  作用，要使左段平衡， $m-m$  截面上必有一力偶矩  $M_n$  与外力偶矩  $T$  相平衡，即截面上的内力是一力偶矩。

根据平衡条件得

$$\sum M = 0, \text{ 即 } M_n - T = 0$$

$$M_n = T$$

$M_n$  是轴在扭转时截面上的内力偶矩，称为扭矩。如果研究右段的平衡，会得到同一截面上大小相等、方向相反的扭矩  $M_n'$ ，实际上两者是作用力与反作用力的关系。

扭矩的正负号规定如下：用右手螺旋定则判断，右手四指绕向表示扭矩绕轴线方向，则大拇指指向与截面外法线方向一致时，扭矩为正，反之扭矩为负，如图 1-2-11 (b) 所示。同一截面的扭矩符号是一致的，如上例中， $M_n$ 、 $M_n'$  均为正。一般未知扭矩画其正方向。

### (3) 扭矩图

当轴上作用有两个以上外力偶时，则轴上各段扭矩  $M_n$  的大小和方向有所不同。为了形象地表达轴上各截面扭矩大小和符号的变化情况，可用扭矩图来表示。

轴上任一截面的扭矩等于该截面以左或以右轴段上各外力偶矩的代数和。



圆轴扭转变形和  
强度、刚度计算