

# 工程力学

(第3版)

● 主编 严丽 孙永红

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

# 工 程 力 学

(第 3 版)

主编 严 丽 孙永红

主审 赵晓明

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

## 内 容 简 介

本书注重力学基本概念、基本方法和基本原理的理解和掌握,注重理论在工程实际中的应用,以利于培养学生分析问题和解决问题的能力。全书共分为两篇 12 章。第一篇静力学部分包括静力学的基本概念、平面力系的合成、平面力系的平衡条件及其应用、轮轴类构件的平衡问题及重心;第二篇材料力学部分包括材料力学概述、轴向拉伸和压缩、剪切和挤压、圆轴的扭转、弯曲、组合变形、压杆稳定性问题、动荷应力与交变应力。每章后都有小结、思考题和习题,并附有部分答案。

本书适合作高等院校近机械类各专业 70 学时左右的工程力学课程的教学用书,也可供成人教育等的机械类及其相关专业技术人员参考。

版权专有 侵权必究

---

### 图书在版编目 (CIP) 数据

工程力学 / 严丽, 孙永红主编. —3 版. —北京: 北京理工大学出版社, 2018. 8

ISBN 978-7-5682-6111-1

I. ①工… II. ①严… ②孙… III. ①工程力学-高等学校-教材 IV. ①TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 189870 号

---

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)  
(010) 82562903 (教材售后服务热线)  
(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 /

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 13

字 数 / 306 千字

版 次 / 2018 年 8 月第 3 版 2018 年 8 月第 1 次印刷

定 价 / 49.00 元

责任编辑 / 张旭莉

文案编辑 / 张旭莉

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李 洋

---

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

# 前 言

本书是为了适应高等教育快速发展的需要，根据教育部对高等教育工程力学课程教学的基本要求、高等技术人才培养目标，以及对高等技术人才素质的要求而编写的。本书适合用作高等院校机械类和近机械类各专业 70 学时左右的工程力学课程的教学用书，也可供成人教育等的机械类及其相关专业技术人员参考。

本书的内容包括静力学和材料力学两部分。编写的目标是力图贯彻高等教育“以应用为目的，以必需、够用为度”的原则，尽力体现高等教育的特色，在理论上着重讲清基本的力学概念，简化理论推导，强化应用作为重点，以满足培养高等应用型、技能型职业技术人才的广泛和迫切的需求。本书每章后有小结、思考题和习题，书中带“\*”号的部分为选学和延伸内容，可根据专业要求和学时情况酌情取舍，以适应生源多样化的教学需求。

参加本书编写的有孙永红（1、2、3、4 章）、严丽（5、6、7、8 章）和王长昕（9、10、11、12 章）。

本书由上海交通大学赵晓明教授担任主审。他提出了不少宝贵的意见，在此向他表示衷心的感谢。

限于编者水平，书中错误与不妥之处在所难免，敬请读者给予批评指正。

编 者

# 目 录

绪论	1
----	---

## 第一篇 静 力 学

<b>第 1 章 静力学基础</b>	7
1.1 静力学公理	7
1.2 力矩与力偶	9
1.3 约束与约束反力	12
1.4 受力分析和受力图	17
小结	21
思考题和习题	22
<b>第 2 章 平面力系的合成</b>	28
2.1 力的投影及平面汇交力系的合成	29
2.2 力的平移定理	30
2.3 平面一般力系向一点简化	32
2.4 平面一般力系的合成	33
小结	35
思考题和习题	36
<b>第 3 章 平面力系的平衡条件及其应用</b>	37
3.1 平面力系的平衡条件	37
3.2 物体系统的平衡问题	42
3.3 考虑摩擦时的平衡问题	46
小结	50
思考题和习题	50
<b>第 4 章 轮轴类构件的平衡问题及重心</b>	56
4.1 轮轴类构件的平衡问题	56
4.2 重心和形心	59
小结	63
思考题和习题	64

## 第二篇 材料力学

第5章 材料力学概述 .....	69
5.1 材料力学的基本任务 .....	69
5.2 变形固体及其基本假设 .....	71
5.3 杆件变形的基本形式 .....	72
小结 .....	72
思考题和习题 .....	73
第6章 轴向拉伸和压缩 .....	74
6.1 轴向拉伸和压缩的概念 .....	74
6.2 截面法、轴力与轴力图 .....	75
6.3 横截面上的应力 .....	76
6.4 金属材料的力学性能 .....	79
6.5 轴向拉压杆的变形 虎克定律 .....	82
6.6 轴向拉(压)杆的强度计算 .....	85
小结 .....	87
思考题和习题 .....	88
第7章 剪切和挤压 .....	91
7.1 剪切和挤压的概念 .....	91
7.2 剪切和挤压的实用计算 .....	92
7.3 剪切虎克定律 .....	96
小结 .....	97
思考题和习题 .....	97
第8章 圆轴的扭转 .....	100
8.1 圆轴扭转的概念 .....	100
8.2 扭矩与扭矩图 .....	101
8.3 圆轴扭转时的应力与强度计算 .....	102
8.4 圆轴扭转时的变形与刚度计算 .....	106
小结 .....	108
思考题和习题 .....	108
第9章 弯曲 .....	112
9.1 弯曲的概念与梁的简化 .....	112
9.2 弯曲梁横截面上的内力——剪力和弯矩 .....	114
9.3 剪力图与弯矩图 .....	116
9.4 纯弯曲时梁横截面上的正应力 .....	121
9.5 弯曲强度计算 .....	125
9.6 梁的弯曲变形 .....	129

9.7 提高梁的强度和刚度的措施 .....	133
小结 .....	135
思考题和习题 .....	136
<b>第 10 章 组合变形</b> .....	<b>140</b>
10.1 概述 .....	140
10.2 拉伸（压缩）与弯曲的组合 .....	141
* 10.3 应力状态和强度理论简介 .....	143
10.4 弯曲与扭转组合变形 .....	148
小结 .....	152
思考题和习题 .....	153
<b>第 11 章 压杆稳定性问题</b> .....	<b>156</b>
11.1 压杆稳定性概念 .....	156
11.2 压杆的临界载荷和临界应力 .....	157
11.3 压杆稳定性计算 .....	161
11.4 提高压杆稳定性的措施 .....	162
小结 .....	164
思考题和习题 .....	164
<b>第 12 章 动荷应力与交变应力</b> .....	<b>167</b>
12.1 动荷应力 .....	167
12.2 交变应力 .....	170
小结 .....	175
思考题和习题 .....	176
<b>习题答案</b> .....	<b>178</b>
<b>附录 型钢规格表</b> .....	<b>182</b>
表 1 热轧等边角钢（GB/T 9787—1988） .....	182
表 2 热轧不等边角钢（GB/T 9788—1988） .....	187
表 3 热轧工字钢（GB/T 706—1988） .....	191
表 4 热轧槽型钢（GB/T 707—1988） .....	193
<b>参考文献</b> .....	<b>195</b>



# 绪 论

---

## 1. 力学及其分类

力学是研究物质机械运动规律的科学。力学按照其所研究的对象分为一般力学、固体力学和流体力学三个分支。

一般力学的研究对象是质点、质点系、刚体和多刚体系统。一般力学研究力及其与运动的关系，属于一般力学范畴的有理论力学（包括静力学、运动学与动力学）、分析力学和振动理论等。

固体力学的研究对象是可变形固体。固体力学研究在外力作用下，可变形固体内部各质点所产生的位移、运动、应力、应变及破坏等的规律，属于固体力学范畴的有材料力学、结构力学、弹性力学和塑性力学等。

流体力学的研究对象是气体和液体，也采用连续介质假设。流体力学研究流体在力的作用下的运动规律等，属于流体力学的有水力学、空气动力学和环境流体力学等。

按研究手段力学还有实验力学和计算力学两个方面的分支。力学在各工程技术领域的应用也形成了诸如飞行力学、船舶结构力学、岩土力学、建筑结构力学和生物力学等各种应用力学分支。

## 2. 工程力学（本教材）的内容

工程力学是将力学原理应用于有实际意义的工程系统的科学。适应少学时教学的需要，本教材只包括了最基础内容的研究：静力学与材料力学。

静力学（第一篇）研究刚体在力系作用下的平衡规律。静力学的主要任务是作出被研究物体的受力图，建立平衡条件求解未知力或简化力系。

材料力学（第二篇）是研究构件承载能力的科学。构件的承载能力包括强度、刚度和稳定性方面的问题。强度是指构件抵抗破坏或塑性变形的能力；刚度是指构件抵抗弹性变形的能力；稳定性是指受压力的细长直杆保持其原有直线平衡状态的能力。材料力学的主要任务是：在保证构件既安全又经济的前提下，为构件选择合适的材料、确定合理的截面形状和



尺寸提供必要的理论基础、计算方法和实验技术。

### 3. 力学发展简史

力学发展史,就是人类从自然现象和生产活动中认识和应用物体机械运动规律的历史。主要分为四个阶段。

(1) 17世纪前,力学的起源。

中国春秋时期(公元前4—前3世纪),墨翟及其弟子的著作《墨经》中,就有关于力的概念、杠杆平衡、重心、浮力、强度和刚度的叙述。古希腊哲学家亚里士多德(公元前384—前322年)的著作也有关于杠杆和运动的见解。为静力学奠定基础的是著名的古希腊科学家阿基米德(公元前287—212年)。

(2) 17—19世纪,经典力学(研究宏观物体的运动规律)的建立和完善,力学各主要分支的建立。

1687年,牛顿的著作《自然哲学的数学原理》出版,给出了运动三定律。牛顿运动定律的建立,开创了经典力学的新时代。这一时期,力学在自然科学领域占据中心地位。最伟大的科学家几乎都集中在这一学科,如伽利略、牛顿、胡克、拉格朗日、欧拉等。由于这些杰出科学家的努力,借助于当时取得的数学进展,使力学取得了十分辉煌的成就。到18世纪末,经典力学的基础(静力学、运动学和动力学)已经建立并得到极大的完善,同时,还开始材料力学、流体力学以及固体和流体的物性研究。19世纪,欧洲各主要国家相继完成了工业革命,大机器工业生产对力学提出了更高的要求。为适应当时土木建筑、机械制造和交通运输的发展,主要是材料力学、结构力学和流体力学得到了发展和完善。建筑、机械中出现的大量强度和刚度问题,由材料力学或结构力学计算。作为探索普遍规律而进行的基础研究,弹性力学也取得了很大的进展。

(3) 1900—1960年,近代力学。

这半个多世纪,力学的主要推动力来自以航空为代表的近代工程技术。1903年莱特兄弟飞行成功。1957年,人造地球卫星发射成功。力学解决了各种飞行器的空气动力学性能问题、推进器动力学问题、飞行稳定性和操纵性问题及结构和材料的强度等问题。这一时期,由古老的材料力学、19世纪发展起来的弹性力学和结构力学、20世纪前期建立理论体系的塑性力学和粘弹性力学融合而成的固体力学发展迅速,建立和开辟了弹性动力学、塑性动力学等新的领域。空气动力学则是流体力学在航空、航天事业推动下的主要发展。在固体力学、流体力学形成力学分支的同时,以质点、质点系、刚体和多刚体系统等具有有限自由度的离散系统为研究对象的一般力学,也在技术进步的促进下继续发展。

(4) 1960年以后,现代力学。

20世纪60年代以来,力学与计算技术和其他自然科学学科广泛结合,进入了现代力学的新时代。计算机的迅速发展,使力学在理论与实验这两种传统研究手段外,增加了第三种手段,即计算力学。生物力学在考虑生物形态和组织的基础上,测定生物材料的力学性能,确定其物理关系,再结合力学基本原理研究解决问题,在定量生理学、心血管系统临床问题和生物医学工程方面取得了不少成就。断裂力学的迅速发展,改变了工程界对强度或安全设计和材料性能评价的传统观点,促进了设计技术的进步。由传统的金属材料、土木石等材料力学行为的研究,扩大到新型复合材料、高分子材料、结构陶瓷、功能材料等力学行为的



研究。

#### 4. 工程力学的研究方法

工程力学研究解决问题的一般方法，可归纳为：

(1) 对研究系统进行抽象简化，建立力学模型，其中包括几何形状、材料性能、载荷及约束等真实情况的理想化和简化。

(2) 将力学原理应用于理想模型，进行分析、推理，得出结论。

(3) 验证结果，若得出的结论不能满意，则需要重新考虑关于系统特性的假设，建立不同的模型，进行分析，以期取得进展。

上述方法中，建立力学模型是最关键的。一个好的力学模型，既能使问题求解简化，又能使结果基本符合实际情况，满足所要求的精度。例如，在处理普通工程构件（如杆、梁、轴等）时，可以先将其理想化为刚体，研究其受力；进一步，将其视为变形体，并假定其变形是弹性（卸载后变形能完全恢复）的，研究构件的弹性变形情况；如果再引入材料的塑性（卸载后变形不能恢复）性态，即可研究其弹—塑性行为。

#### 5. 工程力学的性质与学习方法

工程力学是机械类和近机械类专业中一门理论性较强的技术基础课。许多后继专业课都要以工程力学为基础，如机械设计基础、机械制造工艺与装备、液压与气动等。

在本课程学习中要注意以下几点：

(1) 理解概念。

(2) 掌握方法。

(3) 完成一定量的习题。

(4) 本课程前后内容联系紧密，要跟上教学进度。

(5) 在静力学学习中，尽量不用高中物理中的力学解题方法。

(6) 遇到疑难问题要及时记下，并通过各种方法解决。



# 第一篇

## 静力学

---

力是物体间的相互作用。

相互直接接触的物体,通过接触表面一定有力的相互作用(除非证明其为零),这类力称为表面力,如两物体间的接触压力、容器壁上的液体压力等。表面力一般是分布在一定接触面积上的分布力,若接触面积很小时,可简化为集中力。

非直接接触的物体,也可以有力的相互作用,如物体的重力等。这些力是作用在物体整个体积内的分布力,与其体积和重力有关,故称为体积力。

在本课程的研究中,分析和研究的主要是物体接触表面间的表面力。

力是看不见也不可直接度量的,可以直接观察或度量的是力的作用效果。

使1千克(kg)质量的物体产生1米/秒<sup>2</sup>(m/s<sup>2</sup>)加速度的力,在国际单位制中就定义为1牛顿(N)。力的常用单位为N或kN,1kN=10<sup>3</sup>N。

力是矢量。力不仅有大小,还有方向。力对物体的作用效果,取决于力的大小、方向和作用点,称为力的三要素。

作用于物体上的一组力叫做力系。

静力学研究的是作用在刚体上的力系的简化和力系平衡规律。

所谓刚体,是指受力后形状和大小均不发生改变的物体。绝对刚体实际上是不存在的。在力的作用下,任何物体都会发生变形,只是变形量的大小不同而已。对于变形很小的固体,在暂时不研究物体变形的时候,这一简化模型为作用于物体上力系的研究提供了很大的方便。

所谓平衡,是指物体相对于地面保持静止或做匀速直线运动的状态。

作用于物体上的力系使物体处于平衡所应当满足的条件,称为力系的平衡条件。

在静力学中,所研究的对象(物体或物体系统)被抽象为刚体,故暂不考虑物体的变形。所讨论的状态是平衡状态,所以也不考虑物体运动状态的改变。

因此,静力学研究的基本问题是作用于刚体之力系的平衡问题,包括:

(1) 受力分析:分析研究对象的受力情况,作出受力图。

(2) 力系的简化:求力系的合力,以此判断物体的运动状态。

(3) 力系的平衡条件及应用:对于平衡状态的物体,利用平衡条件解决工程中的各种问题,例如求解未知力。



# 第 1 章

## 静力学基础

### 1.1 静力学公理

静力学公理是人类从反复实践中总结出来的客观规律，是静力学的基础。

#### 1.1.1 公理一（二力平衡公理）

作用于刚体上的两个力使刚体平衡的必要和充分条件是：这两个力大小相等、方向相反，并作用在同一直线上，这称为二力平衡公理，如图 1-1 (a) 所示。

反之，若刚体在且仅在两个力的作用下处于平衡，则此二力必大小相等、方向相反且作用在两受力点的连线上。图 1-1 (b) 中的三铰拱在力  $F$  的作用下处于平衡，曲杆  $AB$ 、 $BC$  两部分各自也是平衡的。若不计杆的自重，则  $BC$  杆是在  $B$ 、 $C$  处受二力作用而处于平衡的，故  $B$ 、 $C$  处的两个力必作用在两受力点  $B$ 、 $C$  的连线上，且大小相等、方向相反，如图 1-1 (c) 所示。这类只在两点受力的无重杆或无重构件，在工程实际中常见，称为二力杆或二力构件。

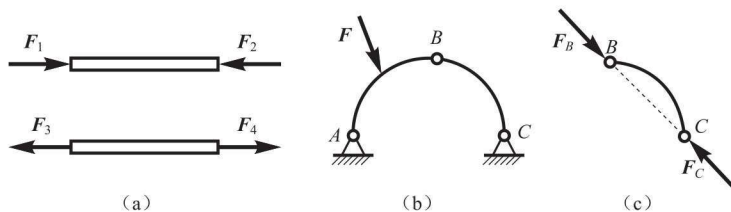


图 1-1 二力构件

(a) 二力平衡；(b) 三铰拱处于平衡；(c) 二力杆平衡

### 1.1.2 公理二 (加减平衡力系公理)

该公理认为：在力系中加上或减去一平衡力系并不改变原力系对刚体的作用效果。

一个力系的作用效果使得刚体处于静止或匀速直线运动状态，则该力系称为平衡力系。由于平衡力系不影响刚体的运动状态，这个公理是显而易见的。由这个公理我们可以得到一个重要的推论：作用在刚体上某点的力，沿其作用线移到刚体内任一点，不会改变它对刚体的作用，这称为力的可传性原理。如图 1-2，力  $F$  由  $A$  沿力线移到  $B$  点，不改变对刚体的作用效果。

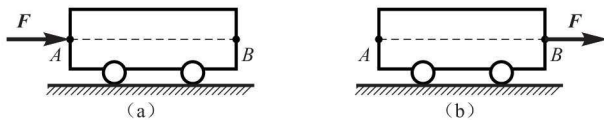


图 1-2 力的可传性

(a) 力在  $A$  点；(b) 力移到  $B$  点

根据力的可传性，力的三要素也可以描述为力的大小、方向和作用线。

需要指出的是，力的可传性仅仅适用于刚体，对于变形体（材料力学将要讨论到）则不再适用。

### 1.1.3 公理三 (力的平行四边形公理)

作用于刚体上同一点的两个力的合力也作用于同一点，其大小和方向由这两个力为边所构成的平行四边形的对角线来表示，如图 1-3 (a) 所示。本公理的矢量表示为

$$\mathbf{F}_R = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 \quad (1-1)$$

利用力的平行四边形公理求合力的方法，可以简化为图 1-3 (b) 所示的力三角形法则，即将二分力首尾相接，则与分力首尾相对的第三边即为所求之合力  $\mathbf{F}_R$ 。

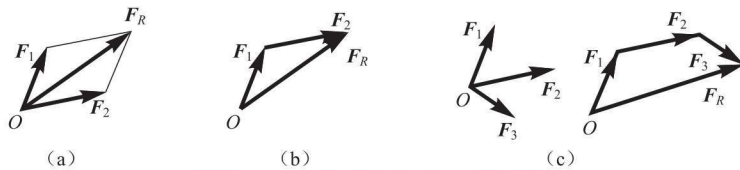


图 1-3 共点力的合成 (几何法)

(a) 平行四边形公理；(b) 力三角形法则；(c) 力多边形法则

求作用于同一点的多个力的合力时，仍然可以利用力三角形法则，将各个力依次首尾相接，则他们的合力依然是始于它们的起点，而终于它们的终点，成为这个“力多边形”的封闭边，如图 1-3 (c) 所示，这种方法称为力多边形法则。

上述求共点力合力的方法，称为几何法。

特别地，如图 1-4 (a)，当  $\mathbf{F}_1$  与  $\mathbf{F}_2$  垂直时，其

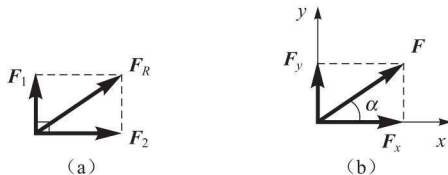


图 1-4 力的正交分解

(a) 合力  $\mathbf{F}_R$ ；(b) 力的正交分解

合力  $F_R$  的大小为

$$F_R = \sqrt{F_1^2 + F_2^2} \quad (1-2)$$

反过来,用该公理也可以把一个力分解为两个互相垂直的分力,称力的正交分解。如图1-4 (b),力  $F$  的两正交分力  $F_x$  与  $F_y$  的大小分别为

$$F_x = F \cos \alpha \quad (1-3)$$

$$F_y = F \sin \alpha$$

式中  $\alpha$ ——力  $F$  与  $x$  轴的夹角。

### 1.1.4 公理四 (作用与反作用公理)

该公理就是牛顿第三定律:两个物体之间的相互作用力总是同时存在,且大小相等、方向相反,沿同一作用线,分别作用在两个物体上。

图1-5 (b)是图1-5 (a)的受力图,其中,  $F_{AB}$  与  $F'_{AB}$  互为反作用力,它们分别作用在  $BA$  杆的  $A$  端和销钉  $A$  上,等值、反向、共线。同理,  $F_{AC}$  与  $F'_{AC}$  也互为反作用力。

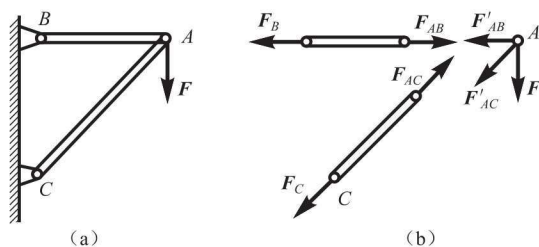


图1-5 作用力与反作用力

(a) 杆件受力  $F$ ; (b) 受力图

需要注意,作用力和反作用力虽然大小相等、方向相反,沿同一条作用线,但它们不是平衡力,因为它们作用在不同的物体上。这与二力平衡公理中的情况不同。二力平衡时的二力是作用在同一个物体上的。例如,图1-5 (b) 中的  $F_B$  与  $F_{AB}$  是二力平衡,  $F_C$  与  $F_{AC}$  也是二力平衡。

## 1.2 力矩与力偶

### 1.2.1 力矩

力对刚体的运动效应包括移动和转动效应。如图1-6所示,加在扳手上的力  $F$  有使螺母绕  $O$  点转动的效果,其转动效果取决于力  $F$  的大小与力臂  $d$  的乘积。力学上把力  $F$  使刚体绕  $O$  点转动的效果用力  $F$  对  $O$  点之矩来度量,简称力矩,用  $m_O(F)$  表示,即

$$m_O(F) = \pm F \cdot d \quad (1-4)$$



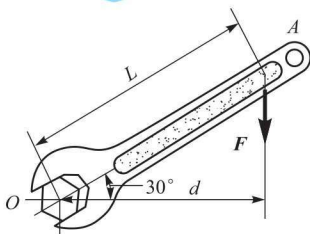


图 1-6 力对点之矩

式中  $m_O(\mathbf{F})$ ——力  $\mathbf{F}$  对  $O$  点的力矩；

$d$ ——为点  $O$  (称为力矩中心或简称矩心) 到力  $\mathbf{F}$  作用线的垂直距离, 称为力臂；

$\pm$ ——表示转动方向, 逆时针转动为正, 顺时针转动为负。

力矩的单位为  $\text{N} \cdot \text{m}$ 、 $\text{N} \cdot \text{mm}$  或  $\text{kN} \cdot \text{m}$ 。

力的作用线通过矩心  $O$  时, 力臂  $d$  等于零, 则力对点  $O$  之

矩为零。

**例 1-1** 图 1-6 中, 若  $F=20 \text{ N}$ , 扳手柄长  $L=200 \text{ mm}$ ,  $\mathbf{F}$  与手柄的夹角为  $60^\circ$ , 求  $\mathbf{F}$  对  $O$  点的力矩。

**解**  $m_O(\mathbf{F}) = -FL \sin 60^\circ = -20 \times 0.2 \times \sqrt{3}/2 = -3.46 \text{ N} \cdot \text{m}$

### 1.2.2 合力矩定理 (证明过程略)

在力矩的计算中, 有时力臂的计算较繁琐, 所以常利用合力矩定理来计算。

合力  $\mathbf{F}_R$  对某点的力矩等于各分力  $\mathbf{F}_i$  对该点力矩的代数和, 这就是合力矩定理, 即

$$m_O(\mathbf{F}_R) = \sum m_O(\mathbf{F}_i) \quad (1-5)$$

在例 1-1 中, 若应用合力矩定理, 则可将  $\mathbf{F}$  分解为沿扳手柄方向的力  $\mathbf{F}_x$  和与扳手柄垂直的力  $\mathbf{F}_y$  (图中未作出), 由式 (1-3) 易知其大小分别为

$$F_x = F \cos 60^\circ$$

$$F_y = F \sin 60^\circ$$

由式 (1-5) 得

$$m_O(\mathbf{F}) = m_O(\mathbf{F}_x) + m_O(\mathbf{F}_y) = 0 + F \sin 60^\circ \cdot L = 3.46 \text{ N} \cdot \text{m}$$

### 1.2.3 力偶

#### 1. 力偶的概念

作用在同一物体上, 大小相等、方向相反、作用线相互平行而不重合的两个力称为力偶。其对刚体有且只有转动效应。例如, 汽车司机用双手转动方向盘, 工人用双手转动丝锥攻丝, 用两个手指转动水龙头, 用两只手拧开瓶盖等 (见图 1-7)。

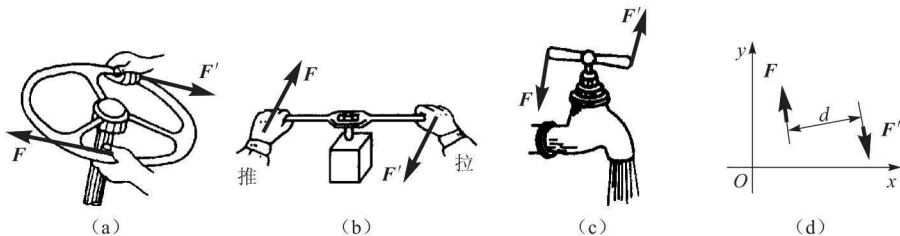


图 1-7 平面力偶

(a) 转动方向盘; (b) 转动丝锥攻丝; (c) 转动水龙头; (d) 力偶的图示