



全国高职高专教育“十一五”规划教材

工 程 力 学 系 列

工程力学

(第二版) (少学时)

张定华 主 编

Engineering



高等教育出版社

中国力学学会 中国工程力学学会 中国工程力学学会

工程力学

第二版

王勖 主编

中国工程力学学会 中国力学学会

中国工程力学学会 中国力学学会

全国高职高专教育“十一五”规划教材

工程力学系列

工 程 力 学

Gongcheng Lixue

第二版

(少学时)

张定华 主编



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容提要

本书是教育部高职高专规划教材，依据教育部最新制定的“高职高专教育近机械类专业力学课程教学基本要求”编写而成。

本书注重力学基本概念、基本原理、基本方法的理解和掌握，注重理论在工程实践中的应用，以利于培养学生分析问题、解决问题的能力。全书除绪论外共三篇十五章。第一篇静力学部分包括：静力学的基本概念、平面力系、空间力系。第二篇材料力学部分包括：轴向拉伸与压缩、剪切与挤压的实用计算、圆轴扭转、平面弯曲内力、平面弯曲梁的强度与刚度计算、应力状态与强度理论、组合变形时杆件的强度计算。第三篇运动学与动力学部分包括：质点的运动、刚体的平移与绕定轴转动、点的合成运动、刚体的平面运动、动能定理。每章均有小结、思考题和习题。

本书可作为高等职业学校、高等专科学校、成人高校及本科院校的二级职业技术学院和民办高校近机械类专业力学课程的教材，也可供相关的工程技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

工程力学：少学时 / 张定华主编. —2 版. —北京：高等教育出版社，2010.3

ISBN 978 - 7 - 04 - 028881 - 0

I. ①工… II. ①张… III. ①工程力学 - 高等学校：技术学校 - 教材 IV. ①TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2010）第 021343 号

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京奥鑫印刷厂

开 本 787×1092 1/16
印 张 16.25
字 数 400 000

购书热线 010 - 58581118
咨询电话 400 - 810 - 0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2000 年 8 月第 1 版
2010 年 3 月第 2 版
印 次 2010 年 8 月第 2 次印刷
定 价 23.80 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究
物料号 28881 - 00

第 二 版 序

自本书第一版出版以来,我国高等教育进一步发展,社会对高职高专学校培养技术应用性专门人才的需求进一步扩大。随着教学改革的深入,各高职高专学校对少学时工程力学课程提出了更高的要求。在听取了各方面的反馈意见后,特修订本书。

本书继续保留了第一版的框架结构,便于各校根据专业要求进行整合,以适应少于 70 学时教学需要。对工程力学基本概念、基础理论的叙述更简明扼要;对处理工程问题的基本方法的介绍也按“必需够用为度”的原则,简洁易懂;对例题和习题做了一定的调整,对插图作了较大幅度的更新,以适应当前高职高专学生的状况。

本书第二版由陈位官审阅,提出了宝贵的修改意见,深表谢意。

因编者水平所限,本书难免还有疏漏之处,敬请广大读者不吝赐教。

编 者

2009 年 12 月

第一版序

本书是教育部高职高专规划教材,依据教育部最新制定的“高职高专教育近机械类专业力学课程教学基本要求”编写而成,适合作为高职高专近机械类专业 70 学时左右的工程力学课程的教学用书。

在本书的编写过程中,充分汲取了高等工业专科学校、地方职业大学和高等职业技术学院几年来的教学改革经验,力求体现高职高专培养技术应用性专门人才的特色,在理论阐述上着重讲清基本的力学概念,简化理论推导,强化应用,加强与工程实际的联系。每章后有小结、思考题、习题,适应高职高专生源多样化的教学需要。

参加本书编写的有:北京电力高等专科学校祝瑛(第 1、2、3 章),沙洲职业工学院陈在铁(第 4、5、6、10 章)、张定华(第 7、8、9 章),南京交通高等专科学校章剑青(第 11、12、13、14、15 章)。全书由张定华任主编,章剑青任副主编。

本书由南京机械高等专科学校张秉荣教授、河北工程技术高等专科学校沈养中教授担任主审,他们提出了不少宝贵的意见,特向他们表示衷心的感谢。

限于编者水平,且编写时间仓促,书中缺点和错误难免,殷切希望读者提出批评意见。

编 者

2000 年 2 月

目 录

绪论	1
----------	---

第一篇 静力学

第1章 静力学的基本概念	5	§ 2.3 静定与超静定问题 物系的平衡	37
§ 1.1 力的概念	5	§ 2.4 考虑摩擦时的平衡问题	42
§ 1.2 平面上力对点之矩	8	小结	47
§ 1.3 力偶	10	思考题	48
§ 1.4 力的平移定理	12	习题	49
§ 1.5 约束与约束力	13	第3章 空间力系	56
§ 1.6 受力图	17	§ 3.1 力在空间直角坐标轴上的投影	56
小结	20	§ 3.2 力对轴之矩	59
思考题	21	§ 3.3 空间力系的平衡方程及其应用	61
习题	23	§ 3.4 重心	67
第2章 平面力系	26	小结	73
§ 2.1 平面任意力系的简化	26	思考题	73
§ 2.2 平面力系的平衡方程及其应用	29	习题	74

第二篇 材料力学

第4章 轴向拉伸与压缩	79	第6章 圆轴扭转	105
§ 4.1 轴向拉伸与压缩的概念与实例	79	§ 6.1 圆轴扭转的概念与实例 扭矩 与扭矩图	105
§ 4.2 截面法、轴力与轴力图	79	§ 6.2 圆轴扭转时的应力与强度计算	107
§ 4.3 横截面上的应力	81	§ 6.3 圆轴扭转时的变形与刚度计算	111
§ 4.4 轴向拉压杆的变形 胡克定律	83	小结	113
§ 4.5 材料在轴向拉压时的力学性能	85	思考题	114
§ 4.6 轴向拉压杆的强度计算	89	习题	115
§ 4.7 拉压超静定问题简介	91	第7章 平面弯曲内力	116
§ 4.8 压杆稳定的概念	93	§ 7.1 平面弯曲的概念与实例	116
小结	93	§ 7.2 平面弯曲内力——剪力与弯矩	117
思考题	94	§ 7.3 剪力图与弯矩图	120
习题	94	§ 7.4 弯矩、剪力和载荷集度间的关系	123
第5章 剪切与挤压的实用计算	98	小结	127
§ 5.1 剪切与挤压的概念与实例	98	思考题	127
§ 5.2 剪切与挤压的实用计算	99	习题	128
小结	102	第8章 平面弯曲梁的强度与刚度计算	131
思考题	102	§ 8.1 纯弯曲时梁的正应力	131
习题	103		

§ 8.2 常用截面二次矩 平行移轴公式	134	§ 9.4 强度理论	162
§ 8.3 弯曲正应力强度计算	136	小结	166
§ 8.4 弯曲切应力简介	139	思考题	167
§ 8.5 梁的弯曲变形概述	141	习题	167
§ 8.6 用叠加法求梁的变形	142	第 10 章 组合变形时杆件的强度计算	170
§ 8.7 提高梁的强度和刚度的措施	147	§ 10.1 组合变形的概念与实例	170
小结	149	§ 10.2 弯曲与拉伸(压缩)组合变形的 强度计算	171
思考题	149	§ 10.3 弯曲与扭转组合变形的强度计算	173
习题	150	小结	175
第 9 章 应力状态与强度理论	155	思考题	176
§ 9.1 轴向拉压杆斜截面上的应力	155	习题	176
§ 9.2 应力状态的概念	156		
§ 9.3 应力状态分析简介	157		
第三篇 运动学与动力学			
第 11 章 质点的运动	181	第 13 章 点的合成运动	211
§ 11.1 用矢量法表示点的位置、速度和加 速度	181	§ 13.1 点的合成运动的基本概念	211
§ 11.2 用直角坐标法表示点的速度和加 速度	182	§ 13.2 点的速度合成定理	212
§ 11.3 用自然坐标法表示点的速度和加 速度	184	小结	214
§ 11.4 质点动力学基本方程	189	思考题	214
§ 11.5 动静法	191	习题	215
小结	193	第 14 章 刚体的平面运动	217
思考题	194	§ 14.1 刚体平面运动的基本概念	217
习题	195	§ 14.2 平面运动刚体内各点的速度分析	218
第 12 章 刚体的平移与绕定轴转动	197	小结	222
§ 12.1 刚体的平移	197	思考题	223
§ 12.2 质心运动定理	198	习题	223
§ 12.3 刚体绕定轴转动	200	第 15 章 动能定理	226
§ 12.4 刚体定轴转动微分方程	204	§ 15.1 功和功率	226
小结	207	§ 15.2 质点和刚体的动能	229
思考题	207	§ 15.3 动能定理	230
习题	208	小结	233
		思考题	234
		习题	234
附录 型钢规格表	237		
习题答案	246		
参考文献	253		

绪 论

工程力学是一门研究物体机械运动一般规律和有关工程构件强度、刚度、稳定性理论的科学,它包括静力学、材料力学、运动学与动力学的有关内容。

物体在空间的位置随时间的变化称为机械运动。它是人们在日常生活和生产实践中最常见的一种运动形式。本书第一篇静力学研究物体机械运动的特殊情况——物体处于平衡状态的问题,包括如何将工程实际中比较复杂的力系加以简化和物体平衡的条件。静力学是学习材料力学、运动学与动力学的基础。

工程上,机械设备都是由构件组成的,构件工作时要承受载荷。为了使构件在载荷作用下正常工作而不被破坏,也不发生过度的变形,要求构件具有一定的强度和刚度。第二篇材料力学研究构件的强度、刚度问题,在既安全又经济的条件下,为合理设计和使用材料提供理论依据,并简要介绍压杆稳定的概念。

物体作机械运动,既有描述物体运动的问题(如运动方程、速度、加速度等),又有物体运动变化与其作用力关系的问题。这是第三篇运动学与动力学研究的内容。

观察、实验是认识力学规律的重要实践环节,抓住主要因素,忽略次要因素的抽象化过程尤为重要。体现在工程力学中就是将研究对象转化为力学模型,通过数学演绎导出力学计算公式。例如,在研究物体的运动和平衡规律时,将物体视为刚体;在运动学和动力学中,有时将物体抽象为点、质点;在材料力学中,将杆、轴、梁等构件都视为变形固体,并对材料和变形都作出了假设等。

对近机械类专业,如轻工专业、化工专业、纺织专业等,工程力学是一门技术基础课程。它在基础课程和专业课程之间起桥梁作用,为专业设备的机械运动分析和强度分析提供必要的理论基础。

高等职业技术教育培养的是应用性技术人才。学习工程力学,应在理解工程力学的基本概念和基本理论的基础上,学会应用已学的定理和公式去解决工程问题,所以演算一定数量的习题是巩固和加深理解所学知识的重要途径。

第一篇 静 力 学

第 1 章 静力学的基本概念

静力学研究刚体在力系作用下的平衡规律。它包括对研究对象进行受力分析、简化力系、建立平衡条件求解未知量等内容。刚体是指在力的作用下不变形的物体。工程中,平衡是指物体相对于地球处于静止状态或作匀速直线运动,是物体机械运动中的特殊状态。力系是指作用于被研究物体上的一组力。如果力系可使物体处于平衡状态,则称该力系为平衡力系;如果两力系分别作用于同一物体而效应相同,则二者互为等效力系;如果力系与一力等效,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。

§ 1.1 力的概念

1.1.1 力的定义

在中学物理中,已提到力是物体之间的相互机械作用。这种作用对物体产生两种效应:引起物体机械运动状态的变化和使物体产生变形。前者称为力的外效应或运动效应,是第一篇静力学与第三篇运动学和动力学研究的内容;后者称为力的内效应或变形效应,属于第二篇材料力学的研究范围。

1.1.2 力的三要素

实践证明,力对物体的作用效应取决于力的大小、方向和作用点,这三个因素称为力的三要素。三要素中任何一个改变时,一般力的作用效应也将改变。

1.1.3 力的表示方法

力是矢量。图示时,常用一带箭头的线段表示(图 1.1)。线段长度 AB 按一定的比例尺表示力的大小;线段的方位和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。线段所沿的直线称为力的作用线。本书中,矢量用黑体字母表示,如 $\boldsymbol{F}$ 。力的大小是标量,用一般字母表示,如 F 。

力 $\boldsymbol{F}$ 在平面直角坐标系 Oxy 中的矢量表达式为

$$\boldsymbol{F} = F_x \boldsymbol{i} + F_y \boldsymbol{j} = F_x \boldsymbol{i} + F_y \boldsymbol{j} \quad (1.1)$$

式中, F_x, F_y 分别表示力 $\boldsymbol{F}$ 沿坐标轴 x, y 方向的两个分量; F_x, F_y 分别表示力 $\boldsymbol{F}$ 在坐标轴 x, y 上的投影; $\boldsymbol{i}, \boldsymbol{j}$ 分别为坐标轴 x, y 上的单位矢量。

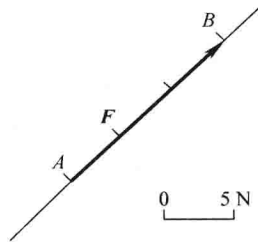


图 1.1

力 $\boldsymbol{F}$ 在坐标轴上的投影为:过力矢 $\boldsymbol{F}$ 两端向坐标轴引垂线(图 1.2)得垂足 a, b 和 a', b' , 线段 $ab, a'b'$ 分别为力 $\boldsymbol{F}$ 在 x 轴和 y 轴上投影的大小。投影的正负号规定为:由垂足 a 到垂足 b (或

由 a' 到 b') 的指向与坐标轴正向相同时为正, 反之为负。图 1.2 中力 F 在 x 轴和 y 轴的投影分别为

$$\left. \begin{aligned} F_x &= F \cos \alpha \\ F_y &= -F \sin \alpha \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

可见, 力的投影是代数数量。

若已知力的矢量表达式 (1.1), 则力 F 的大小及方向为

$$\left. \begin{aligned} F &= \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \\ \tan \alpha &= \left| \frac{F_y}{F_x} \right| \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

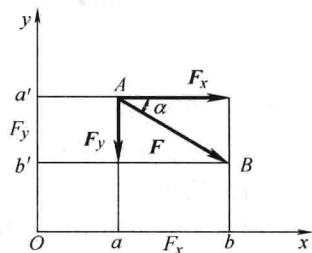


图 1.2

1.1.4 力的单位

在我国法定计量单位中, 力的单位为牛顿, 符号为 N。

1.1.5 静力学公理

人们经过长期的生活和实践积累, 总结出了几条力的基本性质, 因正确性已被实践反复证明, 为大家所公认, 所以也称静力学公理。

公理 1: 二力平衡公理

刚体上仅受二力作用而平衡的必要与充分条件是: 此二力必须等值、反向、共线, 即 $F_1 = -F_2$ (图 1.3)。

这一性质揭示了作用于刚体上最简单的力系平衡时必须满足的条件。

工程上常遇到只受两个力作用而平衡的构件, 称为二力构件。根据公理 1, 二力构件上的两个力必沿两个力作用点的连线, 且等值、反向。

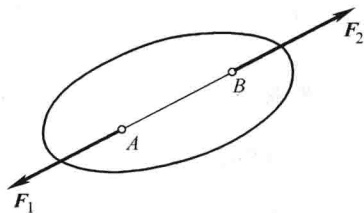


图 1.3

公理 2: 加减平衡力系公理

对于作用在刚体上的任何一个力系, 可以增加或去掉任一平衡力系, 而不改变原力系对于刚体的作用效应。

推论 1: 力的可传性原理 刚体上的力可沿其作用线移动到该刚体上任一点而不改变此力对刚体的作用效应。

证明: 设力 F 作用于刚体上的 A 点 (图 1.4a), 在其作用线上任取一点 B , 并在 B 点处添加一对平衡力 F_1 和 F_2 , 使 F, F_1, F_2 共线, 且 $F_2 = -F_1 = F$ (图 1.4b)。根据公理 2, 将 F, F_1 所组成的平衡力系去掉, 刚体上只剩下 F_2 , 且 $F_2 = F$ (图 1.4c)。

力的可传性原理说明, 对刚体而言, 力是滑动矢量, 它可沿其作用线滑移至刚体上的任一位置。需要指出的是, 此原理只适用于刚体而不适用于变形体。

公理 3: 力的平行四边形法则

作用于物体上同一点的两个力的合力也作用于该点, 且合力的大小和方向可用这两个力为邻边所作的平行四边形的对角线来确定。

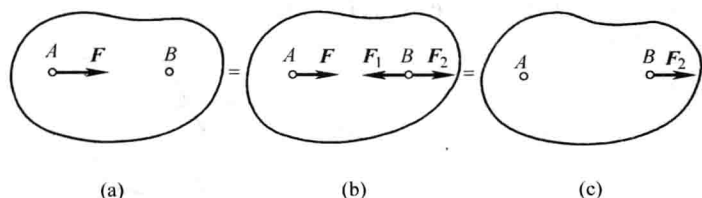


图 1.4

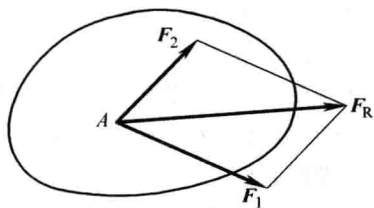


图 1.5

该公理说明,力矢量可按平行四边形法则进行合成与分解(图 1.5),合力矢量 F_R 与分力矢量 F_1, F_2 间的关系符合矢量运算法则

$$F_R = F_1 + F_2 \quad (1.4)$$

即合力等于两分力的矢量和。

在平面直角坐标系中,由式(1.1)和式(1.4)可得

$$\begin{aligned} F_R &= F_{Rx} + F_{Ry} = F_{Rx}i + F_{Ry}j \\ F_1 + F_2 &= (F_{1x}i + F_{1y}j) + (F_{2x}i + F_{2y}j) \\ &= (F_{1x} + F_{2x})i + (F_{1y} + F_{2y})j \end{aligned}$$

所以

$$F_{Rx} = F_{1x} + F_{2x}, \quad F_{Ry} = F_{1y} + F_{2y} \quad (1.5)$$

由此可推广到 n 个力作用的情况。设一刚体上受力系 $F_1, F_2, \dots, F_n$ 作用,力系中各力的作用线共面且汇交于同一点(称为平面汇交力系),根据公理 3 和式(1.4)可将此力系合成为一个合力 F_R ,且有

$$F_R = F_1 + F_2 + \dots + F_n = \sum F_i \quad (1.6)$$

可见,平面汇交力系的合力等于力系各分力的矢量和。

根据式(1.5)可得

$$\left. \begin{aligned} F_{Rx} &= F_{1x} + F_{2x} + \dots + F_{nx} = \sum F_x \\ F_{Ry} &= F_{1y} + F_{2y} + \dots + F_{ny} = \sum F_y \end{aligned} \right\} \quad (1.7)$$

式(1.7)称为合力投影定理,即力系的合力在某轴上的投影等于力系中各分力在同一轴上投影的代数和。

在工程中常应用平行四边形法则将一力沿两个规定方向分解,使力的作用效应更加明显。例如,在进行直齿圆柱齿轮的受力分析时,常将齿面的法向正压力 F_n 分解为沿齿轮节圆圆周切线方向的分力 F_t 和指向轴心的压力 F_r (图 1.6)。 F_t 称为圆周力或切向力,其作用是推动齿轮绕轴转动; F_r 称为径向力,其作用是使齿面啮合。

推论 2:三力平衡汇交定理 刚体受三个共面但互不平行的力作用而平衡时,三力必汇交于一点。

证明: 设刚体上 A_1, A_2, A_3 三点受共面但互不平行的三力 F_1, F_2, F_3 作用而平衡(图 1.7),根据力的可传性原理将 F_1, F_2 移至其作用线交点 B ,并根据公理 3 将其合成为 F_R ,则刚体上仅有 F_3 和 F_R 作用。根据公理 1, F_3 和

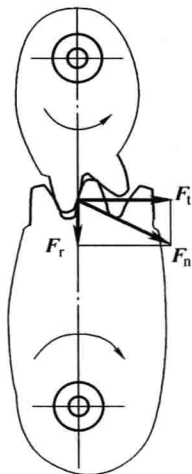


图 1.6

F_R 必在同一直线上,所以 F_3 一定通过 B 点,于是得证三力 F_1, F_2, F_3 均通过 B 点。

该推论说明了不平行的三力平衡的必要条件。当刚体受三力作用平衡,而其中两力的作用线相交,此时可用三力平衡汇交定理来确定第三个力的作用线的方位。

公理 4: 作用与反作用定律

两物体间相互作用的力总是同时存在,并且两个力等值、反向、共线,分别作用于两个物体。这两个力互为作用与反作用的关系。

此定律即牛顿第三定律,它概括了自然界中物体间相互作用的关系,表明一切力总是成对出现的,揭示了力的存在形式和力在物体间的传递方式。

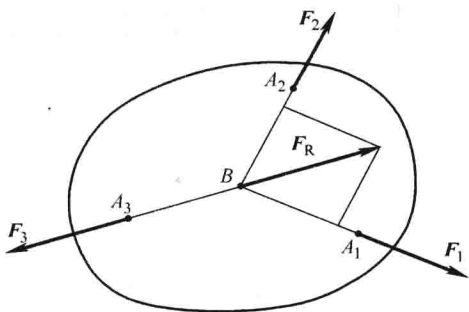


图 1.7

§ 1.2 平面上力对点之矩

1.2.1 力矩的概念

如图 1.8 所示,用扳手转动螺母时,作用于扳手 A 点的力 F 可使扳手与螺母一起绕螺母中心 O 点转动(力 F 的作用线在扳手平面内)。经验表明,力的这种转动作用不仅与力的大小、方向有关,还与转动中心 O 至力的作用线的垂直距离 d 有关。因此,平面上的力 F 使物体绕 O 点产生的转动效应可用力矩 $M_O(F)$ 来度量:

$$M_O(F) = \pm Fd \quad (1.8)$$

式中,下标 O 称为矩心; d 称为力臂;乘积 Fd 是力矩的大小;符号“ $\pm$ ”表示力矩的转向,在平面问题中,一般规定逆时针转向的力矩取正号,顺时针转向的力矩取负号,故平面上力对点之矩是代数量。显然,同一个力对不同点的力矩一般是不同的,因此表示力矩时必须标明矩心。

力矩的单位为 $N \cdot m$ 或 $kN \cdot m$ 。

从力矩的定义式(1.8)可知:

1) 当力 F 沿其作用线移动时,对矩心 O 点的力矩 $M_O(F)$ 保持不变;

2) 当力 F 的作用线通过矩心 O 点时,力矩为零;反之,当力矩为零时,力 F (不为零)的作用线必过矩心 O 点。

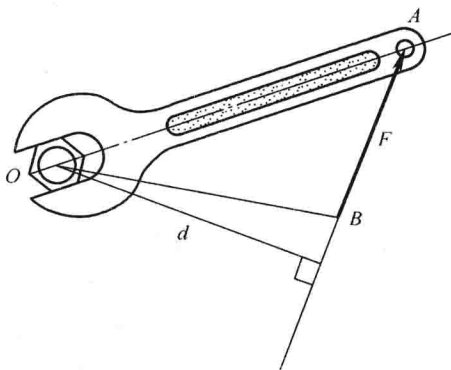


图 1.8

1.2.2 合力矩定理

由于合力与一力系等效,因此在平面问题中,合力对任一点之矩等于该力系中各分力对同一点之矩的代数和,即

$$M_o(\mathbf{F}_R) = M_o(\mathbf{F}_1) + M_o(\mathbf{F}_2) + \cdots + M_o(\mathbf{F}_n) = \sum M_o(\mathbf{F}) \quad (1.9)$$

式(1.9)称为合力矩定理。

当不易计算力矩的臂时,常用合力矩定理来计算力矩。

例 1.1 如图 1.9 所示,数值相同的三个力按不同方式分别施加在同一扳手的 A 端。若 $F = 200 \text{ N}$,试求三种情况下力对 O 点之矩。

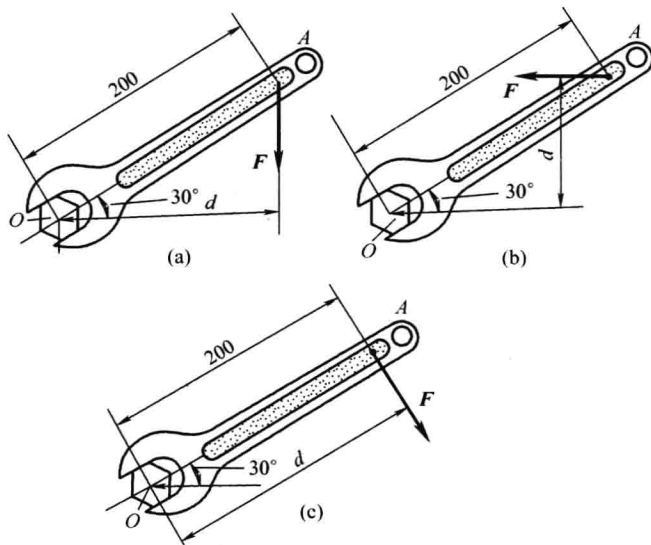


图 1.9

解 图示三种情况下,因力臂大小易于确定,可根据力矩的定义式(1.8)直接计算。

图 1.9a 中

$$\begin{aligned} M_o(\mathbf{F}) &= -Fd = -200 \text{ N} \times 200 \times 10^{-3} \text{ m} \times \cos 30^\circ \\ &= -34.64 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

图 1.9b 中

$$M_o(\mathbf{F}) = Fd = 200 \text{ N} \times 200 \times 10^{-3} \text{ m} \times \sin 30^\circ = 20.00 \text{ N} \cdot \text{m}$$

图 1.9c 中

$$M_o(\mathbf{F}) = -Fd = -200 \text{ N} \times 200 \times 10^{-3} \text{ m} = -40.00 \text{ N} \cdot \text{m}$$

例 1.2 作用于齿轮的啮合力 $F_n = 1\,000 \text{ N}$, 齿轮节圆直径 $D = 160 \text{ mm}$, 压力角(啮合力与齿轮节圆切线间的夹角) $\alpha = 20^\circ$ (图 1.10a)。求啮合力 F_n 对轮心 O 点之矩。

解 解法一 用力矩定义式(1.8)计算

$$\begin{aligned} M_o(\mathbf{F}_n) &= -F_n r_o = -F_n \frac{D}{2} \cos \alpha = -1\,000 \text{ N} \times \\ &\quad \frac{160 \times 10^{-3} \text{ m}}{2} \times \cos 20^\circ = -75.2 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

解法二 用合力矩定理式(1.9)计算

如图 1.10b 所示,将啮合力 F_n 在齿轮啮合点处分解为圆周力 F_t 和径向力 F_r , 则 $F_t =$