

普通高等职业教育规划教材

工程力学

吴建生 主编



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等职业教育规划教材

工 程 力 学

主 编 吴建生

副主编 邵永堂 吉 梅 卢其宜

参 编 卢小平 谢同炎 吴跃芳

于苏明 胡 芳

主 审 张秉荣 陈志椿



机械工业出版社

本书是根据教育部提出的高职高专工程力学的教学基本要求和近几年来高职高专教育发展的实际需求,本着优化、适用、适度的原则编写的。本书在内容的选排上,既充分吸取高职教育力学课程改革的成果,又渗透了作者长期教学积累的经验与体会。

本书按静力学、材料力学、运动力学三篇编排。本书强化了工程力学中的主要基本理论,从提出问题、分析问题和解决问题的体系作了比较详尽的论述,同时简化公式推导,并引入大量工程实例,着力体现“高等性”与“职业性”的高职教育特色,有利于提高学生认识问题和解决问题的能力。

本书可作为高等职业院校、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的职业技术学院机械类专业教材,也可供多学时的近机械专业选用。

图书在版编目(CIP)数据

工程力学/吴建生主编. —北京:机械工业出版社, 2003.1

普通高等职业教育规划教材

ISBN 7-111-11308-X

I. 工… II. 吴… III. 工程力学—高等学校:技术学校—教材
IV. TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 097547 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:季顺利 冷 彬 版式设计:张世琴 责任校对:刘志文

封面设计:姚 毅 责任印制:闫 焱

北京第二外国语学院印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2003 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷

1000mm×1400mm B5·8.875 印张·343 千字

0 001—5 000 册

定价:19.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010) 68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是根据 2001 年 10 月在北京召开的“全国高等职业教育力学教学研讨和教材建设研讨会”的精神与教育部《高职高专机械类专业力学课程教学基本要求》编写的。

本着突出高等职业教育的特色为原则,本书的编写以简明为宗旨,在教材的内容方面作了精心的选择与编排,略去了繁琐的推导过程与没有实用价值的内容,注重实用性和教学的可操作性,在加强基础理论的同时,注意密切联系工程实际以培养学生分析问题和解决问题的能力。本书可作为高等职业教育院校机械类与近机械类各专业工程力学课程的试用教材,也可供工程技术人员参考。

参加本书编写的有浙江交通职业技术学院邵永堂、常州机电职业技术学院吉梅、江西机电职业技术学院卢其宜、上海机电工业职业大学卢小平、南京化工职业技术学院谢同炎、浙江纺织职业技术学院吴跃芳、南京交通职业技术学院于苏明、常州工程职业技术学院胡芳、无锡职业技术学院吴建生。吴建生任主编,邵永堂、吉梅和卢其宜任副主编。

本书由张秉荣教授及陈志椿高级工程师主审。二位专家认真细致地审阅了全书,提出了许多宝贵意见,在此谨致以深切的谢意。

本书采用我国法定计量单位。有关量、单位及符号均执行国家标准的一系列新规定。为方便读者学习,本书各章节均编有思考题及习题,并附有部分习题答案。

由于编者水平有限,书中出现谬误与疏漏在所难免,热诚希望读者批评指出。

编 者
2002 年 9 月

目 录

前言

绪论	1
----------	---

第一篇 静 力 学

引言	3	第三节 物体系统的平衡 静定与 静不定的概念	37
第一章 静力学的基本概念	5	第四节 考虑摩擦时的平衡问题	41
第一节 力的概念	5	思考题	48
第二节 力对点之矩	9	习题	50
第三节 力偶	11	第三章 空间力系和重心	59
第四节 力的平移定理	13	第一节 力在空间直角坐标轴上的 投影	59
第五节 约束与约束力	15	第二节 力对轴之矩	60
第六节 受力图与受力分析	18	第三节 空间力系的平衡方程	61
思考题	22	第四节 轮轴类零件平衡问题的平 面解法	64
习题	23	第五节 重心	65
第二章 平面力系	27	思考题	72
第一节 平面任意力系的简化	27	习题	73
第二节 平面任意力系的平衡方程 及其应用	30		

第二篇 材 料 力 学

引言	79	胡克定律	87
第四章 轴向拉伸与压缩	83	第五节 材料在拉伸与压缩时的力 学性能	90
第一节 轴向拉伸与压缩的概念	83	第六节 轴向拉伸与压缩时杆件的 强度计算	96
第二节 轴向拉伸与压缩时横截面 上的内力——轴力	84	第七节 应力集中的概念	100
第三节 轴向拉伸与压缩时横截面 上的应力	85	第八节 拉伸、压缩静不定问题简 介	101
第四节 轴向拉伸与压缩时的变形		思考题	103
		习题	104

第五章 剪切 107

第一节 剪切与挤压的概念 107

第二节 剪切与挤压的实用计算 108

第三节 剪切胡克定律 112

思考题 113

习题 113

第六章 圆轴的扭转 116

第一节 圆轴扭转的概念 116

第二节 圆轴扭转时横截面上的内力 117

第三节 圆轴扭转时的应力与变形 120

第四节 圆轴扭转时的强度和刚度计算 122

思考题 124

习题 125

第七章 直梁的弯曲 128

第一节 直梁弯曲的概念 128

第二节 梁弯曲时横截面上的内力——剪力与弯矩 130

第三节 剪力、弯矩方程与剪力、弯矩图 133

第四节 梁弯曲时横截面上的正应力 137

第五节 梁弯曲时的强度计算 140

第六节 提高梁抗弯强度的措施 143

第七节 梁的变形 146

思考题 151

习题 151

第八章 组合变形的强度计算 157

第一节 拉伸（压缩）与弯曲组合变形的强度计算 157

第二节 弯曲与扭转组合变形的强度计算 159

思考题 163

习题 164

第九章 压杆稳定 166

第一节 压杆稳定的概念 166

第二节 细长压杆的临界载荷 167

第三节 欧拉公式的适用范围与经验公式 168

第四节 压杆的稳定性设计 172

第五节 提高压杆稳定性的措施 173

思考题 174

习题 175

第十章 动载荷与交变应力 178

第一节 动载荷 178

第二节 交变应力 184

思考题 186

习题 187

第三篇 运动力学

引言 189

习题 213

第十一章 运动学 191

第一节 点的运动学 191

第二节 刚体运动学 201

第三节 刚体的平面运动 208

思考题 212

第十二章 动力学 219

第一节 质点动力学 219

第二节 刚体动力学 225

第三节 动静法 231

思考题 234

习题	235	附录	260
第十三章 动能定理	240	附录 A 型钢规格表	260
第一节 功和功率	240	附录 B 习题参考答案	270
第二节 动能定理	247	参考文献	276
思考题	255		
习题	255		

绪 论

一、工程力学研究的内容与对象

工程力学包括静力学、材料力学与运动力学三个部分。

平衡是工程中机械运动的特殊形式，在工程力学中首先要研究物体受力后的平衡条件以及它在工程中的应用，这是静力学研究的主要内容。

材料力学研究的主要内容是：研究构件在外力作用下的变形、受力和破坏的规律，为合理设计构件提供有关强度、刚度和稳定性分析的基本理论和方法。

运动力学主要研究质点的运动和刚体的基本运动，以及在这些运动中，受力物体的运动与作用力之间的关系。

工程力学研究的对象往往比较复杂，在实际问题中，常需要抓住一些带本质的主要因素，略去次要因素，从而抽象成力学模型作为研究对象。当物体的运动范围比它本身的尺寸要大得多时，我们可把物体当作只有一定质量而其形状和大小均可忽略不计的一个质点。物体在力的作用下还要变形，如果这种变形在所研究的问题中可以不考虑或暂不考虑，则可把它当作不变形的物体——刚体。质点和刚体是两种最基本的力学模型。当变形不能忽略时，就要将物体作为变形体来处理。一般来说，任何物体都可以看作是由许多质点组成的，这种质点的集合称为质点系。因此，工程力学研究的主要对象为质点、刚体、质点系和变形体。

二、工程力学在工程技术中的地位

工程力学是一门与工程技术联系极为密切的技术基础学科，它是工程技术的重要理论基础之一。工程力学的定律、定理与结论广泛应用于各种工程技术之中，机械、交通、纺织、轻工、化工、石油科学等都要用到工程力学的知识。

由于改革开放，经济开发区成为重要的新的经济增长点，同时，世界上各种最新的技术也可能短期内在中国出现。另外，为增强市场竞争力，企业的产品周期在缩短。因此，企业职工特别是高层次的应用型人才与操作型人才接受继续教育乃至终生教育的趋势非常明显。所以，作为技术基础学科的工程力学在知识经济时代中有着十分重要的地位。

三、学习工程力学的基本要求及方法

工程力学来源于实践。因此，进行现场观察和实验是认识力学规律的重要的环节。学习本课程时，要求大量地观察实际生活中的力学现象，并学会用力学基本知识去解释这些现象。要利用我们原有的直接经验与感性认识对所学的理论进行对照、检验、分析。对于正在学习工程力学课程的学生来讲，应掌握下面的学

习方法：

1) 工程力学系统性较强，各部分有较紧密的联系，学习中要循序渐进，及时解决不清楚的问题，以免在以后的学习中失去信心。

2) 要注意深入体会和理解基本概念、基本理论和基本方法，不能满足于背公式、记结论。要注意分析问题的思路和解决问题的方法。要善于思考、善于发现问题并利用工程力学的知识积极地去解决问题。

3) 课前应预习，做到听课时有所重点。课后应及时复习，加深对新学教学内容的理解。在复习理解的基础上，再做一定量的练习。练习是运用基本理论解决实际问题的基本训练，要在理解概念与掌握公式的基础上进行。

综上所述，作为未来的工程技术人员，不仅要学好工程力学的科学内容，还要掌握好工程力学的研究方法。只有这样，才能在建设具有中国特色的社会主义的过程中，作出较大的贡献。

第一篇 静 力 学

引 言

工程静力学研究的是刚体在力系作用下的平衡规律。它包括确定研究对象、进行受力分析、简化力系、建立平衡条件及求解未知量等内容。

所谓刚体，就是在力的作用下其大小和形状都不变的物体。刚体是一种抽象的力学模型，在实际中并不存在。所谓平衡是指物体相对于地面保持静止或作匀速直线运动。“平衡”是物体各种运动状态中的特殊情形，是相对的。力系是指作用在物体上的一群力，一般记作 $(F_1, F_2, \dots, F_n)$ 。如果力系可使物体处于平衡状态，则称该力系为平衡力系；若两力系分别对同一物体的作用效应相同，则二者互称为等效力系；若力系与一力等效，此力则称为该力系的合力。所谓力系的简化就是用简单的力系等效替代复杂的力系。

原书空白

第一章 静力学的基本概念

第一节 力的概念

一、力的定义

力的概念来自于实践，人们在劳动或日常生活中推、拉、提、举物体时，肌肉有紧张之感，逐渐产生了对力的感性认识，大量的感性认识经过科学的抽象，并加以概括，形成了力的概念。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，即引起物体机械运动状态的变化或使物体产生变形，前者称为力的外效应或运动效应，是本书第一篇静力学和第三篇运动力学研究的内容；后者称为力的内效应或变形效应，属于本书第二篇材料力学的研究范围。

力的作用离不开物体，因此谈到力时，必须指明相互作用的两个物体，并且要根据研究对象的不同来明确受力体和施力体。

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。当这三个要素中有任何一个改变时，力的作用效应也将改变。

为了表示力的大小，必须确定力的单位。本书采用国际单位制（SI），以“牛顿”作为力的单位，记作“N”；有时也以“千牛顿”作为单位，记作“kN”。

二、力的表示法

力是一种有大小和方向的量，又满足平行四边形计算法则，所以力是矢量（简称力矢）。如图 1-1 所示，力常用一带箭头的线段表示，线段长度 AB 按一定比例表示力的大小；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；与线段重合的直线称为力的作用线。本书中，矢量用黑体字母表示，如 $\mathbf{F}$ ；力的大小是标量，用一般字母表示，如 F 。

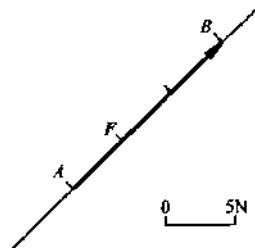


图 1-1

若力矢 $\mathbf{F}$ 在平面 Oxy 中，则其矢量表达式为

$$\mathbf{F} = F_x + F_y = F_x \mathbf{i} + F_y \mathbf{j} \quad (1-1)$$

式中， F_x 、 F_y 分别表示力 $\mathbf{F}$ 沿平面直角坐标轴 x 、 y 方向上的两个分力； F_x 、 F_y 分别表示力 $\mathbf{F}$ 在坐标轴 x 、 y 上的投影； $\mathbf{i}$ 、 $\mathbf{j}$ 分别为坐标轴 x 、 y 上的单位矢量。

力 F 在坐标轴上的投影方法为：过力矢 F 两端分别向坐标轴引垂线得垂足 a 、 b 和 a' 、 b' ，如图 1-2 所示，线段 ab 、 $a'b'$ 分别为力 F 在 x 轴和 y 轴上的投影大小。投影的正负号则规定为：由起点 a 到终点 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 轴上的投影分别为

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

若已知力的矢量表达式 (1-1)，则力 F 的大小及方向夹角为

$$\begin{aligned} F &= \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \\ \tan \alpha &= \left| \frac{F_y}{F_x} \right| \end{aligned} \quad (1-3)$$

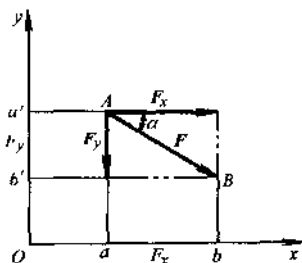


图 1-2

三、力的性质

人们经过长期的生活和生产实践的积累，建立了力的概念，并由此总结出了几条力的基本性质，因其正确性已被实践反复证明，为大家所公认，所以也称为静力学公理。

性质 1（二力平衡公理）

刚体上仅受两力作用而平衡的必要与充分条件是：此两力必须等值、反向、共线，即 $F_1 = -F_2$ ，如图 1-3 所示。这一性质揭示了作用于刚体上最简单的力系平衡时所必须满足的条件。工程上常将只受两个力作用而平衡的构件称为二力构件。根据性质 1，二力构件上的两力必沿两力作用点的连线，且等值、反向。

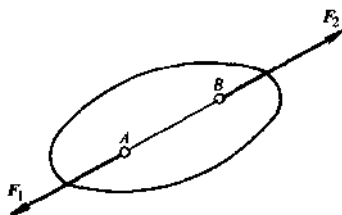


图 1-3

性质 2（加减平衡力系原理）

在已知力系上，加上或减去任一平衡力系，并不改变原力系对刚体的作用效应。

推论 1（力的可传性） 作用在刚体上的某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，如图 1-4a 所示，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 $F_2 = -F_1 = F$ ，如图 1-4b 所示。根据性质 2，将 F 、 F_1 所组成的平衡力系去掉，刚体上仅剩下 F_2 ，且 $F_2 = F$ ，如图 1-4c 所示，由此得证。

力的可传性说明，对刚体而言，力是滑移矢量，它可沿其作用线滑移至刚体

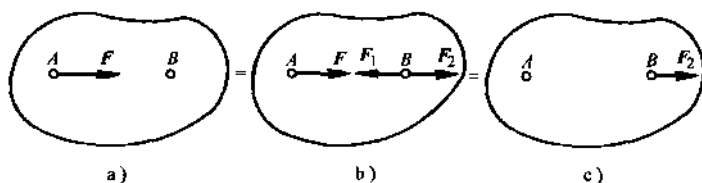


图 1-4

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。

性质 3 (力的平行四边形法则)

作用于物体上同一点的两个力,可以合成为一个合力。合力的作用点仍在原作用点,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。

该公理说明,力矢可按平行四边形法则进行合成与分解,如图 1-5 所示,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),根据性质 3 和式 (1-4) 可将此力系合成为一个合力 F_R , 且有

$$F_R = F_1 + F_2 + \dots + F_n = \sum F \quad (1-6)$$

可见,平面汇交力系的合力等于力系中各分力的矢量和。

根据式 (1-5) 可得

$$\begin{aligned} F_{Rx} &= F_{1x} + F_{2x} + \dots + F_{nx} = \sum F_x \\ F_{Ry} &= F_{1y} + F_{2y} + \dots + F_{ny} = \sum F_y \end{aligned} \quad (1-7)$$

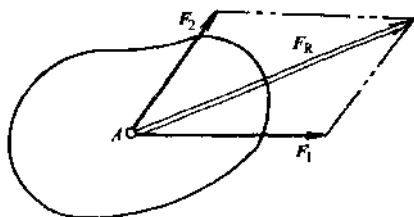


图 1-5

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轴上投影的代数和。

在工程中常利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突出。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 分解为沿齿轮分度圆圆周切线方向的分力 F_t 和指向轴心的压力 F_r , 如图 1-6 所示。 F_t 称为圆周力或切向力, 作用是推动齿轮绕轴转动; F_r 称为径向力, 该力对支承齿轮的轴有影响。

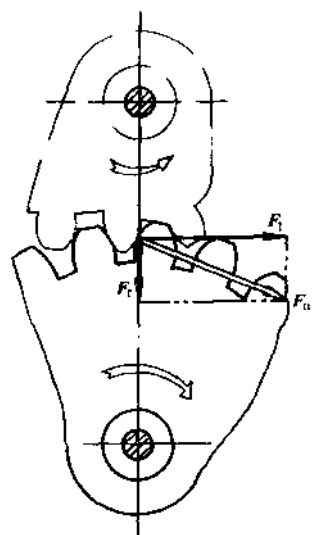


图 1-6

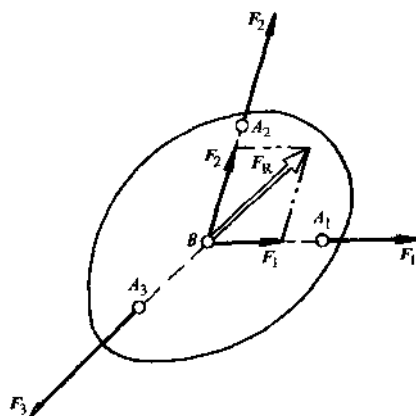


图 1-7

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 三点受共面且平衡的三力 F_1, F_2, F_3 作用, 如图 1-7 所示, 根据力的可传性将 F_1, F_2 移到其作用线交点 B , 并根据性质 3 将其合成为 F_R , 则刚体上仅有 F_3 和 F_R 作用。根据性质 1, F_3 和 F_R 必在同一直线上, 所以 F_3 一定通过 B 点, 于是得证 F_1, F_2, F_3 均通过点 B 。

此定理说明了不平行的三力平衡的必要条件, 当两个力的作用线相交时, 可以用来确定第三个力的作用线的方位。

性质 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。

第二节 力对点之矩

一、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中心点 O 转动。由经验可知，力的这种转动作用不仅与力的大小、方向有关，还与转动中心至力的作用线的垂直距离 d 有关。因此，将 Fd 的乘积定义为力使物体对点 O 产生转动效应的度量，称为力 F 对点 O 之矩，简称力矩，用 $M_O(F)$ 表示，即

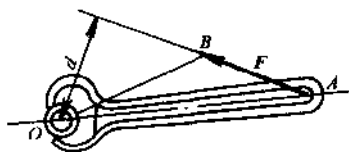


图 1-8

$$M_O(F) = \pm Fd \quad (1-8)$$

式中， O 点称为力矩中心，简称矩心； d 称为力臂；乘积 Fd 称为力矩的大小；符号“ $\pm$ ”表示力矩的转向，规定在平面问题中，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为代数量。

力矩的单位常用 $\text{N}\cdot\text{m}$ 或 $\text{kN}\cdot\text{m}$ 。

应当注意：一般来说，同一个力对不同点产生的力矩是不同的，因此不指明矩心而求力矩是无任何意义的。在表示力矩时，必须标明矩心。

二、力矩的性质

从力矩的定义式 (1-8) 可知，力矩有以下几个性质：

1) 力 F 对 O 点之矩不仅取决于 F 的大小，同时还与矩心的位置即力臂 d 有关。

2) 力 F 对于任一点之矩，不因该力的作用点沿其作用线移动而改变。

3) 力的大小等于零或力的作用线通过矩心时，力矩等于零。

显然，互成平衡的两个力对于同一点之矩的代数和等于零。

三、合力矩定理

若力 F_R 是平面汇交力系 ($F_1, F_2, \dots, F_n$) 的合力，由于力 F_R 与力系等效，则合力对任一点 O 之矩等于力系中各分力对同一点之矩的代数和，即

$$M_O(F_R) = M_O(F_1) + M_O(F_2) + \dots + M_O(F_n) = \sum M_O(F) \quad (1-9)$$

式 (1-9) 称为合力矩定理。

当力矩的力臂不易确定时，常将力分解为若干分力（通常是正交分解），然后应用合力矩定理计算力矩。

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点 O 之矩。

解 图示三种情况下，虽然力的大小、作用点和矩心均相同，但力的作用线各异，致使力臂均不相同，因而三种情况下，力对 O 点之矩不同。根据式 (1-8) 可求出力对点 O 之矩分别为：

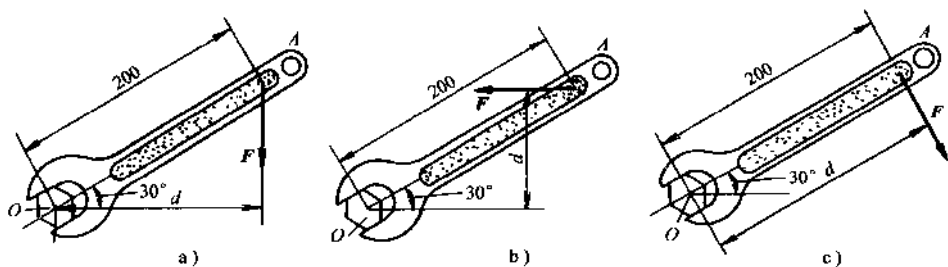


图 1-9

1) 图 1-9a 中

$$M_O(F) = -Fd = -200\text{N} \times 200\text{mm} \times 10^{-3} \times \cos 30^\circ = -34.64\text{N} \cdot \text{m}$$

2) 图 1-9b 中

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

3) 图 1-9c 中

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

由计算结果看出，第三种情况（力臂最大）下力矩值为最大，这与我们的实践体会是一致的。

例 1-2 作用于齿轮上的啮合力 $F_n = 1000\text{N}$ ，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） $\alpha = 20^\circ$ ，如图 1-10a 所示。求啮合力 F_n 对轮心点 O 之矩。

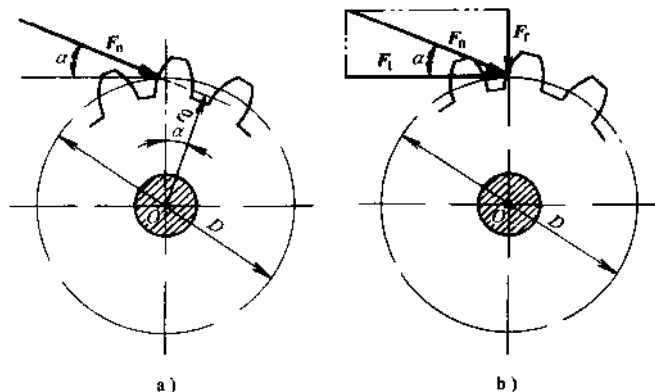


图 1-10