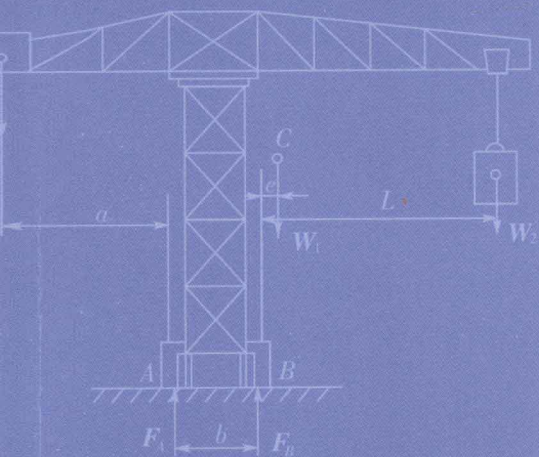




高等院校“十二五”规划教材

工程力学

主 编 谢帮华 杨国喜
主 审 扶名福 李相麟



GONGCHEN
LIXUE

 南京大学出版社



高等院校“十二五”规划教材

工程力学

主 编	谢帮华	杨国喜	
副主编	龚良贵	贾巧燕	章宝华
	舒开鸥	冷超群	
参 编	邹时华	李云生	李 红
主 审	扶名福	李相麟	



南京大学出版社

内容简介

本书是普通高等院校“十二五”规划教材。全书共分 4 部分 18 章,按整合优化方式编写,把原理论力学、材料力学的内容加以精选、融合与贯通,分为静力学、材料力学、运动学和动力学 4 个模块。该教材既保留了原理论力学和材料力学的理论严谨、逻辑清晰、由浅入深、宜于教学的风格和体系,又根据当前教育改革的要求,强化应用性的教学内容,重点在于培养学生分析问题和解决问题的能力,以适合 21 世纪教学需要。

本书既可作为普通高等院校工科类相关专业的力学教材和指导书,也可作为其他层次教学用书和广大工程技术人员的自学用书,还可为备考从业和执业资格考试人员提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程力学 / 谢帮华,杨国喜主编. —南京:南京
大学出版社,2012.8

高等院校“十二五”规划教材
ISBN 978-7-305-10437-4

I. ①工… II. ①谢… ②杨… 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 (2012) 第 189901 号

出版发行 南京大学出版社
社 址 南京市汉口路 22 号 邮编 210093
网 址 <http://www.NjupCo.com>
出版人 左 健

丛 书 名 高等院校“十二五”规划教材
书 名 工程力学
主 编 谢帮华 杨国喜
责任编辑 惠 雪 吴 华 编辑热线 025-83596997

照 排 江苏南大印刷厂
印 刷 江苏凤凰数码印务有限公司
开 本 787×1092 1/16 印张 23.5 字数 584 千
版 次 2012 年 8 月第 1 版 2012 年 8 月第 1 次印刷
ISBN 978-7-305-10437-4
定 价 45.00 元

发行热线 025-83594756
电子邮件 Press@NjupCo.com
Sales@NjupCo.com(市场部)

* 版权所有,侵权必究

* 凡购买南大版图书,如有印装质量问题,请与所购
图书销售部门联系调换

前 言

本书是为适应普通高等教育教学发展需要而编写的。适用于高等院校工科各专业,也可作为高职高专,以及成人教育的教学用书和广大工程技术人员的自学用书。本教材建议采用 90~140 学时,部分章节可根据专业差异进行取舍。

本教材在编写过程中,力求突出以下特点:

(1) 在体系编排上,改变了原“理论力学”和“材料力学”两门课程自成体系的格局,将两门课程整合优化成 4 个部分 18 章,而且每章的知识结构也作了适当调整。第一部分“静力学”,突出刚体平衡时的力学特征;第二部分“材料力学”,突出变形体平衡时的力学特征;第三部分“运动学”,突出刚体运动形态;第四部分“动力学”,突出刚体运动时的力学特征。通过调整,突出了“知识和能力”这条主线,减少重叠,以符合工程设计思路要求,便于读者接受。

(2) 在内容安排上,注意处理好本课程与前修课程和后续课程间的衔接;处理好内部相关内容间的关系;精选经典内容,渗透现代力学思想,重在讲清概念,减少理论推导;加强工程意识和工程方法的训练。

(3) 为便于学生学习、复习巩固知识点,本教材在各章后面均配有本章要点、思考题和习题,并在书末附有习题参考答案,方便参考学习。

本书由谢帮华、杨国喜任主编,龚良贵、贾巧燕、章宝华、舒开鸥、冷超群任副主编。具体分工如下:第 5 章、第 8 章、第 13 章、第 14 章、第 16 章由谢帮华编写;绪论由杨国喜编写;第 6 章、第 10 章、第 11 章、第 12 章由贾巧燕编写;第 1 章、第 2 章、第 3 章、第 17 章、第 18 章由龚良贵编写;第 4 章、第 7 章、第 15 章由章宝华编写;第 9 章由舒开鸥编写;附录 A 由冷超群编写;邹时华、李云生、李红参与了部分章节的编写。本书由谢帮华统稿。

南昌大学扶名福教授(博导)、李相麟教授(硕导)审阅了全书并提出了许多宝贵的意见和建议,南昌大学科学技术学院力学教研室为本书的编写提供了大量的资料,同时得到了南昌大学、南昌大学科学技术学院、九江学院、南昌工程学院、南昌理工学院等院校领导及老师的大力支持,在此一并表示感谢!

在本书的编写过程中,参考和引用了国内外同类教材和相关的资料,在此谨向原书作者表示衷心感谢。由于编者水平有限,本书难免存在不足和疏漏之处,恳请各位专家、同仁和广大读者批评指正。

为方便“教”与“学”,本教材配有课件,如有需要,联系邮箱:39131325@qq.com。

编 者

2012 年 5 月

主要符号

$\boldsymbol{a}, \boldsymbol{a}_a$	加速度, 绝对加速度
$\boldsymbol{a}_e, \boldsymbol{a}_r$	牵连加速度, 相对加速度
$\boldsymbol{a}_r, \boldsymbol{a}_n$	切向加速度, 法向加速度
A	面积、自由振动振幅
b	宽度
C	质心、重心
d	力偶臂、直径、距离
E	机械能、弹性模量
f, f_s	频率、动摩擦因数, 静摩擦因数
$\boldsymbol{F}$	力、载荷
$\boldsymbol{F}_I$	惯性力
$\boldsymbol{F}_N, \boldsymbol{F}_S$	法向约束力、轴力, 剪力
$\boldsymbol{F}_{cr}$	临界载荷
$\boldsymbol{F}_R$	合力
$\boldsymbol{F}_T$	拉力
$\boldsymbol{g}$	重力加速度
G	切变模量
h	高度
I	冲量
I_P	极惯性矩
I_y, I_z	截面对 y, z 轴惯性矩
J	转动惯量
k	弹簧刚度系数
K	应力集中系数
l, L	长度、跨度
L_O	质点系对 O 轴的动量矩
m	质量
M_O	力系对点 O 的主矩
$M_O(\boldsymbol{F})$	力 $\boldsymbol{F}$ 对点 O 之矩
M	外力偶矩、弯矩
n	转速

p	动量
P	功率
q	分布载荷
r, R	半径
t	摄氏温度、时间
T	周期、动能
v	速度
v_a, v_e, v_r	绝对速度, 牵连速度, 相对速度
V	势能、体积
V_ϵ	应变能
W	重量、功
W_P	扭转截面系数
W_z	弯曲截面系数
α	角加速度、线膨胀系数
β	角
θ	梁横截面的转角
φ, φ_m	相对扭转角, 摩擦角
γ	切应变
Δ	变形、位移
δ	厚度、伸长率
ϵ	线应变
ϵ_e, ϵ_P	弹性应变, 塑性应变
λ	柔度、长细比、频率比
ω	角速度
ω_0	固有圆频率
μ	长度系数、泊松比
ρ	密度、曲率半径
σ	正应力
σ_b	抗拉(压)强度
σ_{bs}	挤压应力
σ_{cr}	临界应力
σ_e, σ_P	弹性极限, 比例极限
σ_t, σ_c	拉应力, 压应力
$\sigma_{0.2}$	条件屈服应力
σ_s, σ_u	屈服点, 极限应力
τ	切应力
$[\sigma], [\tau]$	许用应力, 许用切应力

目 录

绪论	1
----	---

第一部分 静力学

第 1 章 静力学公理和物体的受力分析	4
1.1 静力学基本概念	4
1.2 静力学公理	4
1.3 约束和约束反力	6
1.4 物体的受力分析	10
【本章要点】	13
【思考题】	14
【习题】	14
第 2 章 平面力系	16
2.1 平面汇交力系	16
2.2 力对点之矩	21
2.3 平面力偶系	22
2.4 平面任意力系	26
2.5 物体系统的平衡	33
2.6 平面简单桁架的内力计算	34
2.7 考虑摩擦的平衡问题	37
【本章要点】	44
【思考题】	45
【习题】	47
* 第 3 章 空间力系	53
3.1 空间汇交力系	53
3.2 力对点的矩和力对轴的矩	55

3.3 空间力偶系·····	58
3.4 空间任意力系·····	59
3.5 重心·····	63
【本章要点】·····	67
【思考题】·····	68
【习题】·····	68

第二部分 材料力学

第4章 材料力学的基本概念·····	72
4.1 材料力学的任务·····	72
4.2 变形固体的基本假设·····	72
4.3 杆件变形的基本形式·····	73
4.4 弹性杆件的内力与应力·····	75
4.5 位移与应变·····	77
【本章要点】·····	79
【思考题】·····	79
【习题】·····	79
第5章 轴向拉伸与压缩·····	81
5.1 轴向拉伸、压缩的概念和实例·····	81
5.2 轴向拉伸、压缩时杆件的内力·····	81
5.3 轴向拉伸、压缩时杆件的应力·····	83
5.4 轴向拉伸、压缩时材料的力学性能·····	85
5.5 轴向拉伸、压缩时的强度计算·····	89
5.6 轴向拉伸、压缩时的变形及应变能·····	92
5.7 应力集中的概念·····	97
【本章要点】·····	97
【思考题】·····	98
【习题】·····	99
第6章 剪切与扭转·····	102
6.1 剪切与扭转的概念和实例·····	102
6.2 剪切和挤压的实用计算·····	103
6.3 外力偶矩的计算、扭矩和扭矩图·····	106

6.4 纯剪切	109
6.5 圆轴扭转时的应力和强度计算	111
6.6 圆轴扭转时的变形和刚度计算	115
* 6.7 非圆截面杆扭转的概念	119
【本章要点】.....	121
【思考题】.....	121
【习题】.....	122
 第7章 截面的几何性质.....	124
7.1 静矩和形心	124
7.2 惯性矩、惯性积和惯性半径.....	126
7.3 平行移轴公式	127
7.4 主轴与主惯性矩的概念	130
【本章要点】.....	130
【思考题】.....	131
【习题】.....	131
 第8章 弯曲.....	133
8.1 弯曲的概念和实例	133
8.2 平面弯曲时梁的内力	135
8.3 剪力方程与弯矩方程、剪力图与弯矩图.....	138
8.4 载荷集度、剪力和弯矩间的关系.....	140
8.5 弯曲正应力和强度计算	145
8.6 弯曲切应力和强度计算	151
8.7 梁的挠曲线近似微分方程	155
8.8 用积分法求弯曲变形	157
8.9 用叠加法求弯曲变形	161
8.10 提高梁抗弯性能的措施.....	161
* 8.11 梁内的弯曲应变能.....	166
【本章要点】.....	167
【思考题】.....	168
【习题】.....	168
 * 第9章 静不定问题	173
9.1 静不定问题的概念和实例	173

9.2 轴向拉伸、压缩静不定问题·····	173
9.3 扭转静不定问题·····	176
9.4 弯曲静不定问题·····	177
【本章要点】·····	178
【思考题】·····	178
【习题】·····	178
第 10 章 应力状态和强度理论 ·····	180
10.1 应力状态的概念和实例·····	180
10.2 用解析法分析二向应力状态·····	182
10.3 用图解法分析二向应力状态·····	186
10.4 三向应力状态和广义胡克定律·····	189
10.5 强度理论的基本概念·····	192
10.6 四种常用的强度理论·····	193
【本章要点】·····	196
【思考题】·····	197
【习题】·····	197
第 11 章 组合变形 ·····	200
11.1 组合变形的概念和实例·····	200
11.2 拉伸(压缩)与弯曲的组合·····	201
* 11.3 截面核心·····	203
11.4 扭转与弯曲的组合·····	204
11.5 两相互垂直平面内的弯曲·····	206
【本章要点】·····	208
【思考题】·····	209
【习题】·····	209
第 12 章 压杆稳定 ·····	211
12.1 压杆稳定的概念和实例·····	211
12.2 细长压杆的临界力和欧拉公式·····	212
12.3 压杆的临界应力及临界应力总图·····	215
12.4 压杆的稳定计算·····	219
12.5 提高压杆稳定性的措施·····	223
【本章要点】·····	224

【思考题】	224
【习题】	224
第 13 章 动载荷	227
13.1 动载荷的概念和实例	227
13.2 动静法的应用	227
13.3 杆件受冲击时的应力和变形	231
13.4 冲击韧性	236
【本章要点】	237
【思考题】	237
【习题】	238
第三部分 运动学	
第 14 章 点的运动学和刚体的基本运动	242
14.1 点的运动学	242
14.2 刚体的平行移动	251
14.3 刚体的定轴转动	253
【本章要点】	258
【思考题】	258
【习题】	259
第 15 章 点的合成运动	263
15.1 点的合成运动基本概念	263
15.2 点的速度合成定理	264
15.3 点的加速度合成定理	267
【本章要点】	271
【思考题】	272
【习题】	272
第 16 章 刚体的平面运动	276
16.1 刚体平面运动的概念和运动分解	276
16.2 平面图形内各点的速度计算	278
16.3 平面图形内各点的加速度计算	285
16.4 运动学综合应用举例	288

【本章要点】	292
【思考题】	292
【习题】	293

第四部分 动力学

第 17 章 质点动力学	298
17.1 动力学的基本定律	298
17.2 质点动力学微分方程	299
【本章要点】	302
【思考题】	303
【习题】	303
第 18 章 动力学普遍定理	305
18.1 动量定理	305
18.2 动量矩定理	311
18.3 动能定理	318
18.4 动力学普遍定理的综合应用	330
【本章要点】	333
【思考题】	334
【习题】	334
附录 A 型钢表	339
习题答案	354
参考文献	363

绪 论

工程力学是一门理论性较强的技术基础课,是诸多力学课程的基础,并在工程技术领域中有着广泛的应用。

一、工程力学的任务

机械设备或工程结构都是由若干构件组成。当机械设备或工程结构传递运动或承受载荷时,各个构件都要受到力的作用。为了保证构件既能安全可靠工作,又符合经济要求,首先必须确定作用在各个构件上有哪些力,以及它们的大小和方向;其次,还必须为构件选用合适的材料,确定合理的截面形状和尺寸。这些都是工程力学所要解决的问题。

工程力学涉及众多的力学分支学科,本课程只是其中最基础的一部分,主要研究物体的机械运动和杆件弹性变形的一般规律。工程力学是高等工科院校的一门理论性较强的技术基础课程,可为后续课程的学习和解决工程实际问题提供力学的基本理论和方法。

机械运动是指物体在空间的位置随时间而发生的改变。机械运动是物质各种运动(如发热、发光、电磁现象、化学过程等)中最基本以及人们在生产和生活中最常见的一种运动形式。

变形是指在外力作用下物体形状和尺寸的改变。物体的变形按其性质可分为两种:一种是弹性变形,它是随外力的解除而消失的变形;另一种是塑性变形,或称残余变形,它是在外力解除后而不能消失的变形。杆件是指一个方向(长度方向)尺寸远大于其他两个方向(宽度和厚度方向)尺寸的构件。本课程主要研究杆件的弹性变形问题。

本课程所研究的内容以牛顿定律为基础,属经典力学范畴,适用于速度远低于光速的宏观物体的运动。随着近代物理学的发展,发现经典力学的研究范围存在许多局限性。但在一般工程技术中的力学问题,所研究的对象都属宏观、低速范畴,故经典力学的准确性还是肯定的。

工程力学课程的任务概括起来可分为以下两类:

1. 研究物体的机械运动与所受力之间的关系。这里包括力的一般性质、力系的简化及物体在力系的作用下平衡规律的研究;物体运动几何性质的描述;物体运动状态改变与其所受力之间的关系。上述内容便于掌握物体机械运动的基本规律和研究方法。

2. 研究物体变形与所受力之间的关系。研究物体在外力作用下变形和破坏的规律,为解决构件强度、刚度和稳定性问题提供了基本理论和计算方法。

二、工程力学的研究方法

由观察和实验可知,在外力作用下,任何物质均会变形。工程力学的研究方法是实验观察——建立模型——理论分析——实验(实践)验证。这是自然科学研究问题的一般方法。

本课程研究的物体,大多是各种工程结构物及其构件。这些结构物和构件形状大小各异,组成也很复杂。因此,在研究它们的运动和变形时,必须根据问题的性质,抓住主要方面,略去次要因素,合理简化,抽象为力学模型。

在研究物体的平衡规律时,由于物体变形量很小或变形因素对问题的研究影响很小,因此可忽略物体的变形而将其抽象为“刚体”。在研究物体机械运动的几何性质和运动状态改变与受力之间关系时,因为物体的运动范围远大于物体本身的大小,所以可将物体抽象为一个“质点”或者由质点组成的“质点系”。但在研究物体的变形与受力之间关系时,则不能再将物体视为刚体,而应看成可变形固体。

建立模型后,可运用数学方法进行分析计算。这种解决工程力学问题的方法称为理论方法。然而,许多工程实际问题仅靠理论方法还不能有效解决,但通过实验的方法可得到满意的结果。另外,在解决构件的承载能力问题时,需要通过实验测定材料的力学性质。可见,实验方法也是解决工程力学问题的一个必不可少的方法。

随着计算机技术的迅速发展,计算机分析方法在工程力学领域中已得到日益广泛的应用,并促进工程力学研究方法的更新。这将使工程力学在解决日常生活、环境、交通和国防等工程问题中发挥更大的作用。

三、工程力学的地位和作用

工程力学既是基础学科,又可直接面向工程应用。这门课程讲述力学的基础理论和基本知识,以及处理工程力学问题的基本方法,为后续课程的学习和解决工程实际问题提供力学知识基础。

学习工程力学不仅要深刻理解力学的基本概念和基本定律,而且还要牢固掌握由此而导出的解决工程力学问题的定理和公式,同时也要注意培养处理工程力学问题的能力。

第一部分 静力学

静力学是研究在力系作用下物体平衡条件的一般规律的科学。

在静力学中,将研究以下 3 个方面问题:

1. 物体的受力分析。分析物体受到哪些力的作用,以及每个力的作用位置 and 方向。

2. 力系的等效与简化。将作用在物体上的一个力系,用另一个与其等效的力系来代替,这两个力系互为等效力系。如果用一个简单力系等效地替换一个复杂力系,则称为力系的简化。如果某力系与一个力等效,则此力称为该力系的合力,而力系中各力称为此力系的分力。

3. 力系的平衡条件。研究作用在平衡状态物体上的各种力系所需满足的条件,使物体处于平衡状态的力系,称为平衡力系。

力系的平衡条件在工程中有着十分重要的意义,是设计工程结构和机械零件时静力计算的基础。因此,静力学在工程中有着最广泛的应用。

第 1 章 静力学公理和物体的受力分析

本章主要阐述静力学基本概念、静力学公理,介绍工程中常见的约束和约束反力,以及物体的受力分析。静力学公理是静力学理论的基础,而物体的受力分析是力学中重要的基本技能。

1.1 静力学基本概念

1. 力的概念。力是指物体间的相互机械作用,这种作用使物体的机械运动状态发生变化或形状发生变化,前者称为运动效应(又称外效应),后者称为形变效应(又称内效应)。力对物体的效应取决于力的 3 个要素大小、方向和作用点,因此,力应以矢量表示,在本书中用黑色字体 F 表示力矢量。在工程力学中采用国际单位制(SI),力的单位是牛顿,用 N 表示,或千牛顿,用 kN 表示。

2. 力系的概念。力系是指同时作用在物体上的一群力。作用线在同一平面内的力系,称为平面力系;作用线不在同一平面内的力系,称为空间力系;作用线汇交于一点的力系,称为汇交力系;作用线相互平行的力系,称为平行力系;作用线既不汇交于一点,又不相互平行的力系,称为任意力系,又称为一般力系。

3. 刚体的概念。刚体是指在力的作用下,其内部任意两点之间的距离始终保持不变的物体,这是一个理想化的力学模型。事实上,任何物体受力后或多或少都会发生变形,因此,实际上并不存在绝对的刚体。但是,对那些在运动中变形极小,或者虽有变形但不影响其整体运动的物体,可以忽略变形,这对问题的研究结果不仅没有显著影响,而且可使问题得以简化,这时该物体可抽象为刚体。

4. 平衡的概念。平衡是指物体相对于惯性参考系处于静止或做匀速直线运动的状态。平衡是机械运动的特殊形式。在工程实际中,通常把固连于地球的参考系作为惯性参考系,用此参考系来研究物体相对于地球的平衡问题,所得结果能够很好地与实际情况相符合。

1.2 静力学公理

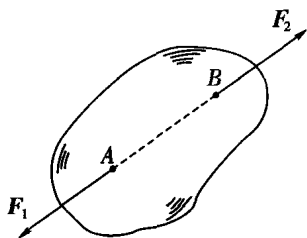
公理是人们在生活和生产实践中长期积累的经验总结,又经过实践反复检验,被确认是符合客观实际的最普遍、最一般的规律。

公理 1: 二力平衡条件

作用在刚体上的两个力,使刚体保持平衡的必要与充分条件是:这两个力的大小相等,方向相反,且在同一直线上,如图 1-1 所示。即

$$F_1 = -F_2$$

(1-1) 图 1-1 二力平衡条件



这个公理揭示了作用于物体上的最简单的力系平衡时所必须满足的条件。对刚体来说,这个条件既是必要的,又是充分的;但对于变形体,它只是平衡的必要条件,而不是充分条件。例如,软绳受两个等值、反向、共线的拉力作用可以平衡,而受两个等值、反向、共线的压力作用就不能平衡。

工程上,把只受两个力作用而处于平衡的物体,称为二力构件(又称二力杆)。根据二力平衡条件可知,二力构件不论形状如何,其所受的两个力作用线必沿这两个力作用点的连线。这一性质在对物体进行受力分析时极为有用。

公理 2: 加减平衡力系原理

在作用于刚体上的已知力系中加上或减去任意的平衡力系,并不改变原力系对刚体的作用。

这个公理是研究力系等效替换的重要理论依据。但必须注意,此公理也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

作用在物体上同一点的两个力,可以合成为一个合力。合力的作用点也在该点,合力的大小和方向由这两个力为边构成的平行四边形的对角线确定,如图 1-2(a)所示。或者说,合力矢等于这两个力矢的几何和,即

$$\mathbf{F}_R = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 \quad (1-2)$$

力的平行四边形也可演变成为力三角形,由它能更简便地确定合力的大小和方向,如图 1-2(b)、1-2(c)所示,而合力作用点仍在汇交点 A。

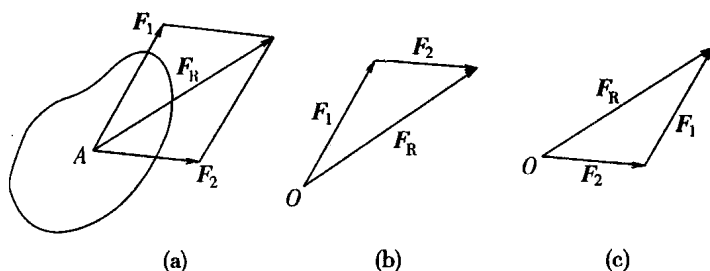


图 1-2 力的平行四边形法则

该公理表明了最简单力系的简化规律,它是复杂力系简化的基础。

由上述公理可以导出两个重要推论:

推论 1: 力的可传性

作用在刚体上某点的力,可以沿着它的作用线移到刚体内任意一点,并不改变该力对刚体的作用。

如图 1-3(a)所示的刚体,在 A 点受力 $\mathbf{F}$ 作用,若在力 $\mathbf{F}$ 的作用线上任意一点 B 加上一平衡力系 $\mathbf{F}_1$ 、 $\mathbf{F}_2$,且使 $\mathbf{F} = \mathbf{F}_2 = -\mathbf{F}_1$ (图 1-3(b)),则 $\mathbf{F}$ 与 $\mathbf{F}_1$ 又构成一平衡力系,将此力系去掉后,可得到作用于 B 点的力 $\mathbf{F}_2$ (图 1-3(c))。于是,原作用于 A 点的力 $\mathbf{F}$ 可以沿其作用线移到 B 点。

根据力的可传性可知,力对刚体的效应与力的作用点无关。因此,对于刚体来说,力的三要素是力的大小、方向和作用线。在这种情况下,力矢可沿其作用线任意滑动,成为滑动矢量。