

普通高等教育“十三五”规划教材

理论力学

Theoretical Mechanics

李军强 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十三五”规划教材

理论力学

主编 李军强

参编 张光伟 张瑞萍
陈满国 马建青

机械工业出版社

本书是根据教育部高等学校非力学专业力学基础课程教学指导分委员会制定的《理论力学课程教学基本要求》，在大量研读国内外同类教材的基础上，总结长期的教学经验和体会，结合当前的教学改革实际情况而编写的。

本书从力学素质教育的要求出发，注重基本概念和分析能力，不追求烦琐的理论推导与数学分析。在各章中精选了大量典型的工程实例和生活实例，适当增加例题数量和具有一定难度的例题，便于学生掌握理论力学的基本概念、基本理论和基本方法。

全书除绪论外共3篇14章。第1篇为静力学内容包括静力学公理与物体受力分析、平面汇交力系与平面力偶系、平面任意力系、空间力系、静力学专题。第2篇为运动学内容包括点的运动学、刚体基本运动、点的合成运动、刚体平面运动。第3篇为动力学，内容包括质点动力学基本方程、动量定理、动量矩定理、动能定理、动力学专题。静力学专题和动力学专题两章内容可以根据专业需要和学时数的多少来选学。每章开篇有本章提要，每章后有本章小结，章末配有精选习题。书末附有部分习题答案。

本书可以作为高等学校工科各专业理论力学课程的教学用书，适用于中、少学时（60~80学时），少学时可根据需要取舍，也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

理论力学 / 李军强主编. —北京：机械工业出版社，2016.7
普通高等教育“十三五”规划教材
ISBN 978-7-111-54259-9

I. ①理… II. ①李… III. ①理论力学-高等学校-教材 IV. ①O31

中国版本图书馆CIP数据核字（2016）第185412号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号 邮政编码100037）

策划编辑：姜 凤 责任编辑：姜 凤 李 乐

责任校对：肖 琳 封面设计：张 静

责任印制：李 洋

北京振兴源印务有限公司印刷

2016年8月第1版·第1次印刷

169mm×239mm·20.25印张·440千字

标准书号：ISBN 978-7-111-54259-9

定价：36.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线：010-88379833

机工官网：www.cmpbook.com

读者购书热线：010-88379649

机工官博：weibo.com/cmp1952

教育服务网：www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网：www.golden-book.com

前 言

理论力学是现代工程技术的基础，是高等理工科院校中普遍开设的一门重要的技术基础课，并在许多工程技术领域中有着广泛的应用，是很多后续相关专业课程的基础。编者在广泛研读国内外同类教材的基础上，结合自身多年的教学经验和体会编写了本书。

本书是按照教育部制定的理论力学课程教学基本要求编写而成的。为了更好地适应高等教育的普及化、高校的扩招和生源质量的变化，以及新一轮培养计划中该门课程学时数的减少，本书在精选优化教学内容的同时，紧紧围绕培养学生的力学基本素养，培养学生的自学能力和分析问题、解决问题的能力来组织教材结构，同时精选和优化教学内容。在文字叙述方面，力求概念明确，条理清楚，简明扼要，精选例题和习题。

本书具有下面几个具体特点：

(1) 调整结构体系，教材模块化：根据学时减少实际，为了突出基本理论，将平面简单桁架的内力计算、考虑摩擦时物体的平衡问题和平行力系中心与物体重心三部分内容从传统教材的体系中抽离出来构成单独一章——静力学专题。将达朗伯原理、虚位移原理和拉格朗日方程三部分内容从传统教材的体系中抽离出来构成单独一章——动力学专题。这两章专题内容可以根据专业需要和学时数的多少来选学，或者指导学生自学。

(2) 内容精简，语言简练：本书的使用对象基本为教学—研究型大学和教学型大学的学生，注重基本概念的阐述和分析过程的简单清晰，而不追求冗长的理论推导和烦琐的数学运算。力求语言通俗易懂、思路明确、条理清楚，便于自学。在具体叙述中，采用由浅入深、由简单到复杂、由特殊到一般循序渐进的次序，便于学生理解和掌握。

(3) 开章有提要，章末有小结：每章开始都有本章提要，便于学生对本章有一个初步的大概了解，明确本章主要内容和要求。为方便学生自学、归纳、总结和复习，每章后均设有本章小结，列出本章的主要知识点、本章分析思路和相关结论以及有关解题规律和技巧。每章的习题答案附在书后，便于查阅对照。

(4) 增加讨论和思考内容：在理论叙述和例题分析中，在容易混淆和容易出错的地方，增加相关的讨论内容，或者留给学生思考的内容。

(5) 增加例题数量和难度：针对理论力学听课易懂题难做、考试挂科一大

片的实际状况,适当增加例题数量和具有一定难度的例题,部分例题做到一题多解,开阔学生思路,培养分析能力。

(6) 例题叙述步骤化:针对学生文字表达能力欠佳、解题过程叙述不清的现状,例题解题过程的文字叙述标明第一、第二、第三等步骤顺序,强化训练;使学生在解题过程中做到思路明确,条理清楚。

本书由李军强教授任主编,负责全书的结构设计、组织编写和最后统稿。参加具体编写工作的有李军强(绪论、第4章、第8章、第9章、第11章、第13章)、陈满国(第1章、第2章、第3章)、张瑞萍(第5章、第7章)、马建青(第6章、第10章、第12章)、张光伟(第14章)。

本书承蒙陕西科技大学张功学教授审核,为本书的编写提出了许多宝贵建议,在此深表感谢。

本书的出版得到了机械工业出版社的大力支持与帮助,在编写过程中借鉴、引用了许多已出版的同类教材中的资料、图标、例题和习题,汲取了许多宝贵经验。谨此一并表示衷心的感谢。

本书编写人员长期担任理论力学的教学工作,书中融合了多年的教学经验与体会。但由于水平有限,书中难免存在不妥之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

目 录

前言

绪论	1
0.1 理论力学的研究对象与任务	1
0.2 理论力学的研究内容	2
0.3 理论力学的学习目的	2
0.4 理论力学的学习方法	3

第1篇 静力学

第1章 静力学公理与物体受力分析	7
1.1 力的概念与静力学公理	7
1.2 约束与约束力	10
1.3 物体受力分析与受力图	14
本章小结	18
习题	19
第2章 平面汇交力系与平面力偶系	21
2.1 平面汇交力系合成与平衡的几何法	21
2.2 平面汇交力系合成与平衡的解析法	24
2.3 平面力系中力对点的矩	28
2.4 平面力偶理论	31
本章小结	35
习题	36
第3章 平面任意力系	40
3.1 力的平移定理	40
3.2 平面任意力系的简化	41
3.3 平面任意力系的平衡	46
3.4 物体系统的平衡·静定与超静定问题	51
本章小结	57
习题	59
第4章 空间力系	64
4.1 空间汇交力系	64
4.2 力对点的矩与力对轴的矩	67
4.3 空间力偶系	70

4.4 空间任意力系的简化	73
4.5 空间任意力系的平衡	76
本章小结	81
习题	83
第5章 静力学专题	87
5.1 平面简单桁架内力计算	87
5.2 考虑摩擦时物体的平衡问题	91
5.3 平行力系中心与物体重心	103
本章小结	111
习题	112

第2篇 运动学

第6章 点的运动学	119
6.1 以固定点为基准的描述方法——直角坐标法	119
6.2 以点的轨迹曲线为基准的描述方法——自然坐标法	123
本章小结	130
习题	131
第7章 刚体基本运动	134
7.1 刚体平行移动	134
7.2 刚体定轴转动	135
本章小结	142
习题	143
第8章 点的合成运动	146
8.1 基本概念	146
8.2 点的速度合成	149
8.3 点的加速度合成	153
本章小结	160
习题	161
第9章 刚体平面运动	167
9.1 刚体平面运动概述	167
9.2 平面图形上点的速度分析——基点法与投影法	171
9.3 平面图形上点的速度分析——瞬时速度中心法	175
9.4 平面图形上点的加速度分析	179
9.5 刚体绕平行轴转动的合成	183
本章小结	186
习题	186

第3篇 动力学

第10章 质点动力学基本方程	194
-----------------------------	-----

10.1 动力学基本概念	194
10.2 动力学基本定律	194
10.3 质点运动微分方程	196
10.4 质点动力学两类基本问题	197
本章小结	202
习题	202
第 11 章 动量定理	205
11.1 动量与冲量	205
11.2 动量定理	208
11.3 质心运动定理	212
本章小结	218
习题	219
第 12 章 动量矩定理	222
12.1 转动惯量	222
12.2 动量矩	227
12.3 动量矩定理	230
12.4 相对质心的动量矩定理	233
12.5 刚体平面运动微分方程	234
本章小结	238
习题	239
第 13 章 动能定理	245
13.1 力的功	246
13.2 动能	251
13.3 动能定理	253
13.4 势能·机械能守恒定律	257
13.5 动力学普遍定理综合应用	262
本章小结	265
习题	266
第 14 章 动力学专题	272
14.1 达朗伯原理	272
14.2 虚位移原理	281
14.3 拉格朗日方程	289
本章小结	297
习题	298
部分习题参考答案	302
参考文献	313

绪 论

0.1 理论力学的研究对象与任务

1. 理论力学的研究对象

理论力学是研究物体机械运动一般规律的科学。所谓机械运动是指物体在空间的位置随时间的变化。例如：天体的运行，车辆、船只的行驶，各种机器的运转，空气、河水的流动等。现代哲学指出，物质是运动的，世界上万事万物都处在运动之中。古希腊有位哲学家说过一句名言，“人不能两次踏入同一条河流”，形象地阐明了这一含义深刻的哲理。河水在不停地流动，当人第二次踏入这条河时，接触的已不是原来的水流，而是上游来的新水流。客观事物就像河水一样处于不停的运动之中。在自然世界中，物质运动的形式多种多样，不仅仅有物体空间位置变化的物理运动，而且还有化学的、生物的高级运动。在这些众多的运动形式中，机械运动是自然界和工程中最常见、最简单的一种基本运动。研究机械运动具有非常重要的意义，它的研究成果可以直接服务于生活、生产的各个领域，而且在其他更为高级和复杂的运动中，往往也会伴随着机械运动。所以，理论力学的概念、规律和方法在一定程度上也被应用于自然科学的其他领域中，对它们的发展起到了积极的作用。

理论力学属于以牛顿基本定律为基础的古典力学范畴。古典力学成功地把来自经验的物理理论，系统地表达成数学抽象的简明形式（定律），从而在一定程度上奠定了自然科学的理论基础，这些定律就是理论力学课程的科学根据。尽管在 20 世纪初，由于物理学的重大发展，产生了相对论力学和量子力学，证明古典力学的定律不适用于物体运动速度接近于光速的情况，也不适用于微观粒子的运动。但在一般工程实际问题中，即使是一些尖端技术如火箭、宇宙航行等，我们研究的也还是宏观物体的低速（与光速比较）运动，所以其力学问题仍以古典力学的定律为主要依据。因此古典力学至今仍然具有很大的实用价值，而且还在不断发展之中。

2. 理论力学的任务

已经学过的物理课程是研究机械运动的基础，它的力学部分主要是建立描述机械运动的物理概念；总结、推导从不同侧面揭示机械运动基本规律的物理定律、定理，借助于质点等力学模型，建立了表征机械运动的基本力学概念；奠定了研究机械运动的理论基础；而且完成了质点的力学分析、运动分析和动力学分析的任务。

在自然世界和工程技术问题中，能被视为质点的运动体，相对来说毕竟很少，大量存在的是由若干质点构成的质点系、物体和物体系统的运动。物理学的理论知识，不能够直接解决这些运动。所以，全方位地系统分析研究任意质点系和物体系统的机械运动

(包括平衡), 是理论力学的基本任务。理论力学课程的教学目标, 不是简单地加深和扩展物理课程的内容, 而是要针对任意质点系的一般机械运动 (包括平衡), 给出一个系统的、全方位的分析研究方法; 给出满足工程实际问题力学分析计算所需要的、求解任意质点系和物体系统一般机械运动的封闭性理论体系和力学方程。

0.2 理论力学的研究内容

理论力学的基本内容, 主要分为静力学、运动学和动力学三个部分。

1. 静力学

研究物体的受力分析、力系的简化方法及物体平衡时作用力之间的关系, 重点是利用平衡条件和平衡方程分析求解约束力。

2. 运动学

仅仅从几何角度分析研究运动物体的几何性质 (如轨迹、速度和加速度等), 而不考虑作用在物体上的力。

3. 动力学

研究作用在物体上的力与运动变化之间的关系。静力学中所涉及的静止和平衡是运动的特殊形态。因此, 也可以认为静力学是动力学的一种特殊情形。但由于工程技术的需要, 静力学已积累了丰富的内容, 成为理论力学相对独立的组成部分。

0.3 理论力学的学习目的

理论力学是一门理论性较强的技术基础课, 通过学习理论力学, 可以实现下面几个目的。

1. 为解决工程实际问题打下理论基础

机械运动是自然界和工程实际中最常见、最简单的一种运动, 理论力学对现代自然科学和工程技术有着非常重要的作用。掌握了物体机械运动的规律, 就可以直接解决一些工程实际问题, 理论力学和有关其他专业知识联合起来就可以解决很多比较复杂的工程实际问题。因此, 学习理论力学是为解决工程实际问题打下一定的理论基础。

2. 为后续课程学习打下理论基础

理论力学研究力学中最普遍、最基本的规律, 是现代工程技术的基础, 它是大学很多工程专业的一门重要的专业基础课。很多工程专业的课程, 例如材料力学、机械原理、机械设计、结构力学、弹塑性力学、流体力学、飞行力学、振动理论、断裂力学以及许多专业课程等, 都要以理论力学为基础, 所以理论力学是学习一系列后续课程的重要基础。另外, 随着现代科学技术的发展, 力学与其他学科相互渗透, 形成了许多边缘学科, 它们也都是以理论力学为基础的。可见学习理论力学, 也有助于学习其他的基础理论, 掌握新的科学技术。

3. 培养学生科学的分析方法

理论力学的分析和研究方法具有一定的代表性,与其他学科的研究方法有不少相同之处。充分理解和掌握理论力学的研究方法,不仅可以深入地掌握这门学科,而且有助于培养学生对工程实际问题抽象、简化和正确地进行分析的能力,有助于学习其他科学技术理论,有助于培养正确的分析问题和解决问题的能力,为今后解决生产实际问题,从事科学研究工作打下良好的基础。

0.4 理论力学的学习方法

理论力学理论性强,应用灵活多变,要学好理论力学,需要注意下面几个方面。

1. 正确处理理论力学与物理中力学部分的关系

与物理学相比,理论力学的基本概念深化了,基本理论系统了,基本方法实用了,研究对象复杂了。因此,同样的定理,用理论力学方法可以解决物理中的力学问题,但反之未必。

2. 联系工程实际,培养工程素养

对大多数工科学生而言,理论力学是从纯数理学科过渡到专业课程的桥梁,从理论力学课程开始,就会逐步引进灌输有关工程名词、概念、术语。注重从工程实际中抽象出力学问题,应用理论力学知识对提炼出的力学问题进行数学描述,并求解相应的数学问题,逐步培养分析和解决问题的能力。

3. 上课认真听讲,做好笔记

理论力学系统性强,各部分联系紧密、环环相扣。前面内容没有认真学好,势必影响后面有关内容的听课效果。所以一定要坚持按时认真上课,不能缺席,对欠缺、遗漏的内容,一定要及时补上。要正确处理上课听讲和做好笔记之间的关系,不能本末倒置。上课以听讲为主,笔记为辅,笔记主要记录课本上没有的内容,例如,老师补充的内容、老师的总结、注意事项等。

4. 课后复习,常做小结

课后时间,一定要及时认真复习有关内容,对有关概念、理论、例题认真思考,融会贯通,常做小结。

5. 认真思考,独立完成习题作业

为了正确理解和应用理论力学的基本理论,必须认真思考,独立完成习题作业。首先,动笔前先分析题目,理清头绪,规划好解题思路和基本过程。其次,解题过程一定要思路明确,条理清楚,语言精练,书写规范,数值计算结果要有适当的有效数字。再次,理论力学习题的特点是一题多解,对于同一个习题,尽量选用几种不同的方法进行求解,并比较差异。

第 1 篇 静 力 学

静力学是研究物体在力系作用下平衡条件的科学。

静力学的几个基本概念

力系：作用在物体上的一组力。

平衡：物体相对于惯性参考系（在工程中习惯上将地面作为惯性参考系）保持静止或做匀速直线运动。例如，房屋结构、桥梁、做匀速直线飞行的飞机等，都处于平衡状态，平衡是物体运动的一种特殊形式。

平衡力系：如果一个力系作用在物体上使得物体处于平衡状态，则该力系称为平衡力系。

等效力系：分别作用在同一个物体上而效应相同的两个力系称为等效力系。等效的两个力系可以相互代替，称为力系的等效替换。

合力：如果一个力系与一个力等效，则该力就称为这个力系的合力，而力系中的各力，则称为该合力的分力。

力系的简化：用一个简单的力系等效替换一个复杂的力系称为力系的简化。

刚体：刚体是指在力的作用下形状和尺寸保持不变（即内部任意两点之间的距离保持不变）的物体。显然，这是一个理想化的力学模型，因为实际物体在力的作用下都会产生不同程度的变形。通常情况下，工程中的机械零件和结构在力的作用下产生的变形是很微小的，甚至只有用专门的仪器才能测量出来。这种微小变形对研究物体的机械运动不起主要作用，影响极小，可以略去不计，从而使问题的研究得以简化。静力学研究的物体只限于刚体，所以又称刚体静力学，它是研究变形体力学的基础。

静力学的主要任务

静力学主要研究以下三个方面的问题：

物体的受力分析

分析物体受哪些力的作用，以及每个力的作用位置 and 方向。物体的受力分析不仅是静力学的基本问题，也是整个理论力学的一个基本问题。

力系的简化

力系的简化就是用一个简单的力系等效地替换一个复杂的力系，从而抓住不同力系的共同本质，明确力系对物体作用的总效果。力系简化是分析力系平衡条件的一种简捷

方法，其应用绝不仅限于静力学，在动力学中同样得到重要应用。

力系的平衡条件及其应用

研究物体平衡时作用在物体上的各种力系所应满足的条件并应用其解决工程实际问题，这是静力学的核心问题。

静力学不但在工程技术中有着广泛的应用，而且是许多后续课程的基础。

第1章 静力学公理与物体受力分析

本章提要

主要内容：本章介绍力的概念、静力学公理、工程中常见的几种约束类型及其约束力的特点等内容，重点是物体受力和画受力图。

教学要求：通过学习，了解力的概念，正确理解静力学公理；熟悉工程中常见的几种约束类型并能够正确判断其约束力特点；掌握物体的受力分析方法，能够熟练画出物体受力图。

1.1 力的概念与静力学公理

1.1.1 力的概念

1. 力的定义

力是物体之间相互的机械作用。物体之间的机械作用，大致可分为两类，一类是接触作用，例如：机车牵引车厢的拉力，物体之间的挤压力等。另一类是“场”作用，例如：地球引力场对物体的引力，电场对电荷的引力或斥力等。尽管各种物体之间相互作用力的来源和性质不同，但在力学中将撇开力的物理本质，只研究各种力的共同表现，即力对物体产生的效应。在国际单位制（SI）中，力的单位是“牛[顿]”（N），有时也用“千牛[顿]”（kN）。

2. 力的作用效应

力对物体产生的效应一般可分为两个方面：一是物体运动状态发生改变，称为力的外效应或运动效应；另一个是物体形状或尺寸发生改变，称为力的内效应或变形效应。理论力学中把物体都视为刚体，因而只研究力的外效应，即研究力使刚体的移动或转动状态发生改变的效应。

3. 力的三要素

实践表明，力对物体的作用效应决定于力的大小、方向和作用点这三个要素。力可以用一个有向线段表示，称为力矢量。线段的长度表示力的大小，线段的指向表示力的方向，线段的端点表示力的作用点，所以力是一个定位矢量。

4. 力的分布形式

力的作用点表示力在物体上作用的位置。一般情况下，这个作用位置并不是一个点，往往是物体的某一部分表面或空间。例如风压力、重力等，这种分布作用的力称为分布力。如果力是在空间分布的，就称为体积力，例如重力等；如果力是沿表面分布

的,就称为面积力,例如接触力等;如果力是沿一条线分布的,就称为线分布力。分布力的强弱称为荷载集度,用字母 q 表示,它是单位体积(或单位面积或单位长度)上的作用力。如果力的作用面积相对物体的尺寸来说很小,可以忽略,就可以简化为作用在一点上的集中力。因此力的作用点是力的作用位置的抽象化。

1.1.2 力系及其分类

力系就是作用在物体上的一组力。按照力系中各力的作用线位置不同可以将力系分为各种不同的类型,如图 1-1 所示。各力作用线在同一平面内,则称为平面力系;作用线不在同一平面内,则称为空间力系。若作用线汇交于一点,则称为汇交力系,若作用线互相平行,则称为平行力系,否则称为任意力系。

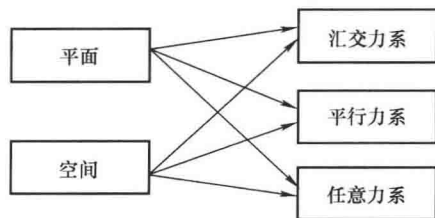


图 1-1 力系的分类

1.1.3 静力学公理

下面要介绍的有关力的几个基本性质,是从大量实践中概括和总结出来的,是符合客观实际的普遍规律,称为静力学公理。

公理 1 力的平行四边形法则

作用在物体上同一个点的两个力,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邻边所构成的平行四边形的对角线确定(如图 1-2a 所示)。或者说,合力矢量等于两个分力矢量的矢量和。

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

由图 1-2b、c 可以看出,求合力时,也可只做出力三角形,又称力的三角形法则。

这个公理给出了最简单力系的简化规律,也是复杂力系简化的基础。同时,它也给出了一个力分解为两个力的依据。该公理对刚体和变形体都适用。

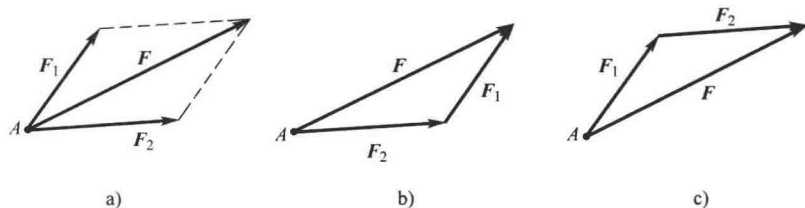


图 1-2 力的平行四边形法则

公理 2 二力平衡条件

刚体在两个力作用下保持平衡的必要和充分条件是:这两个力大小相等、方向相反,且在同一条直线上(如图 1-3 所示)。即 $\mathbf{F}_1 = -\mathbf{F}_2$ 。

这个公理表明了作用在刚体上两个力构成的最简单的力系平衡时所必须满足的条件。这个条件对于刚体来说是既必要又充分,但对于变形体来说则仅是必要条件而非充

分条件。例如绳子只能承受拉力，而不能承受压力。

工程上经常遇到只受两个力作用而平衡的构件，称为二力构件或二力杆，根据公理2，不管构件形状如何，这两个力必定沿着其作用点的连线。

公理3 加减平衡力系原理

在已知力系上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效果。或者说，如果两个力系只相差一个或几个平衡力系，则它们对刚体的作用效果相同，可以等效替换。

该公理是研究力系等效变换的依据。因为加减平衡力系会影响物体的变形，所以该公理只适用于刚体。

根据上述公理可以得出下面两个推论。

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动到刚体内任意一点，而不改变该力对刚体的作用效果。

证明：假设力 F 作用在刚体上的 A 点，如图1-4a所示。根据加减平衡力系原理，可以在力的作用线上任意一点 B 加上两个相互平衡的力 F_1 和 F_2 ，使 $F_2 = F = -F_1$ ，如图1-4b所示。由于力 F 和 F_1 也是一对平衡力，根据加减平衡力系原理，去掉 F 和 F_1 ，这样只剩下一个力 F_2 ，如图1-4c所示。即相当于原来作用在 A 点的力 F 沿作用线移动到了 B 点。

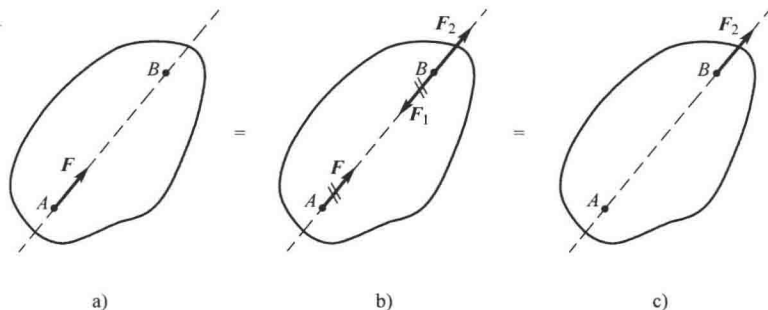


图1-4 力的可传性

因此对于刚体来说，力的作用点已不是决定力作用效应的要素，而代之为力的作用线。所以作用在刚体上的力的三要素是：力的大小、方向和作用线。作用在刚体上的力可以沿着作用线移动，这种矢量称为滑移矢量。

推论2 三力平衡汇交定理

作用在刚体上三个相互平衡的力，如果其中两个力的作用线汇交于一点，则此三力必在同一平面内，且第三个力的作用线通过汇交点。

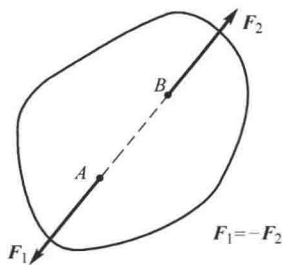


图1-3 二力平衡