



教育科学“十五”国家规划课题研究成果

工程力学教程

西南交通大学应用力学与工程系 编



高等教育出版社

教育科学“十五”国家规划课题研究成果

工程力学教程

西南交通大学应用力学与工程系 编

高等教育出版社

内容简介

本书是教育科学“十五”国家规划课题研究成果,根据“高等学校工科本科工程力学基本要求”编写而成,涵盖了理论力学和材料力学的主要内容。

本书共 18 章,包括静力学基础、平面汇交力系、力矩与平面力偶系、平面一般力系、重心和形心、内力和内力图、拉伸和压缩、扭转、弯曲、应力状态分析和强度理论、压杆的稳定性、点的运动、刚体的基本运动、点的复合运动、刚体的平面运动、质点的运动微分方程、动力学普遍定理、动静法。本书在讲述某些概念和方法的同时,给出了相关的思考题,供课堂讨论之用。本书具有很强的教学适用性,有助于培养工程应用型人才。

本书可作为高等学校工科本科非机、非土类各专业少学时工程力学课程的教材,也可供高职高专与成人高校师生及有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程力学教程/西南交通大学应用力学与工程系编.

北京:高等教育出版社,2004.7

ISBN 7-04-014484-0

I.工... II.西... III.工程力学-高等学校-教材 IV.TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 054757 号

策划编辑 黄毅 责任编辑 史彦 张玉海 封面设计 刘晓翔
责任绘图 朱静 版式设计 史新薇
责任校对 朱惠芳 责任印制 孔源

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 100011
总 机 010-82028899

购书热线 010-64054588
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所
印 刷 北京铭成印刷有限公司

开 本 787×960 1/16
印 张 25.75
字 数 480 000

版 次 2004 年 7 月第 1 版
印 次 2004 年 7 月第 1 次印刷
定 价 29.50 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

总 序

为了更好地适应当前我国高等教育跨越式发展需要，满足我国高校从精英教育向大众化教育的重大转移阶段中社会对高校应用型人才培养的各类要求，探索和建立我国高等学校应用型本科人才培养体系，全国高等学校教学研究中心(以下简称“教研中心”)在承担全国教育科学“十五”国家规划课题——“21世纪中国高等教育人才培养体系的创新与实践”研究工作的基础上，组织全国100余所培养应用型人才为主的高等院校，进行其子项目课题——“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”的研究与探索，在高等院校应用型人才培养的教学内容、课程体系研究等方面取得了标志性成果，并在高等教育出版社的支持和配合下，推出了一批适应应用型人才培养需要的立体化教材，冠以“教育科学‘十五’国家规划课题研究成果”。

2002年11月，教研中心在南京工程学院组织召开了“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”课题立项研讨会。会议确定由教研中心组织国家级课题立项，为参加立项研究的高等院校搭建高起点的研究平台，整体设计立项研究计划，明确目标。课题立项采用整体规划、分步实施、滚动立项的方式，分期分批启动立项研究计划。为了确保课题立项目标的实现，组建了“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”课题领导小组(亦为高校应用型人才立体化教材建设领导小组)。会后，教研中心组织了首批课题立项申报，有63所高校申报了近450项课题。2003年1月，在黑龙江工程学院进行了项目评审，经过课题领导小组的严格把关，确定了首批9项子课题的牵头学校、主持学校和参加学校。2003年3月至4月，各子课题相继召开了工作会议，交流了各校教学改革的情况和面临的具体问题，确定了项目分工，并全面开始研究工作。计划先集中力量，用两年时间形成一批有关人才培养模式、培养目标、教学内容和课程体系等理论研究成果报告和研究报告基础上同步组织建设的反映应用型人才特色的立体化系列教材。

与过去立项研究不同的是，“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”课题研究在审视、选择、消化与吸收多年来已有应用型人才探索与实践成果基础上，紧密结合经济全球化时代高校应用型人才培养工作的实际需要，努力实践，大胆创新，采取边研究、边探索、边实践的方式，推进高校应用型本科人才培养工作，突出重点目标，并不断取得标志性的阶段成果。

教材建设作为保证和提高教学质量的重要支柱和基础，作为体现教学内容和教学方法的知识载体，在当前培养应用型人才中的作用是显而易见的。探索、建设适应新世纪我国高校应用型人才体系需要的教材体系已成为当前我国高校教学改革和教材建设工作面临的十分重要的任务。目前，教材建设工作存在的问题不容忽视，适用于应用型人才培养的优秀教材还较少，大部分国家级教材对一般院校，尤其是新办本科院校来说，起点较高、难度较大、内容较多，难以适应一般院校的教学需要。因此，在课题研究过程中，各课题组充分吸收已有的优秀教学改革成果，并和教学实际结合起来，认真讨论和研究教学内容和课程体系的改革，组织一批学术水平较高、教学经验较丰富、实践能力较强的教师，编写出一批以公共基础课和专业、技术基础课为主的有特色、适用性强的教材及相应的教学辅导书、电子教案，以满足高等学校应用型人才培养的需要。

我们相信，随着我国高等教育的发展和高校教学改革的不断深入，特别是随着教育部即将启动的“高等学校教学质量和教学改革工程”的实施，具有示范性和适应应用型人才培养的精品课程教材必将进一步促进我国高校教学质量的提高。

全国高等学校教学研究中心

2003年4月

前 言

本教材按 70~90 课内学时编写，适用于大学本科“工程力学”课程安排为中等学时的各专业以及大专院校的专科教学之用，亦可供成人教育及网络教育使用。

本教材涵盖了理论力学和材料力学的主要内容。在内容的安排上，先讲授静力学基本理论、内力和内力图，然后是构件的强度、刚度和稳定性计算，最后讲授运动学和动力学基本理论。

教材中结合理论分析和例题，列有一定数量的思考题，以启发读者深入思考，其中包括初学者易于误会之处以及需要灵活掌握的方法。编者在选择这些问题时力戒呆板，以防学生死记硬背。在教学中，这些思考题也可供课堂讨论使用。

本教材由西南交通大学应用力学与工程系编，奚绍中、邱秉权执笔，葛玉梅参加了编写工作。本教材是在奚绍中、邱秉权主编的《工程力学》(西南交通大学出版社,1987)的基础上改编而成的，曾参加该书编写的有陈均衡(泸州化工专科学校)、李志君、周坤如、万长珠、罗无量、毛文义、张茂修以及奚绍中、邱秉权。

本教材收录了一些工程设计中曾经出现过问题的、与计算简图相关的内容，如简支梁桥的约束条件以及长千斤顶油缸弯曲刚度对临界力的影响等。在强度理论部分还介绍了我国学者俞茂铨于 1961 年提出的“双剪应力屈服准则”。本教材充分吸纳了执笔人过去 40 余年从事工科力学教学和编写多种力学教材的经验，具有很强的教学适用性，并有利于培养工程应用型人才。

本教材承蒙大连理工大学郑芳怀教授审阅，谨此致谢。

由于执笔人能力有限，书中难免存在不足之处，衷心希望读者批评指正。意见请寄：西南交通大学应用力学与工程系(四川省成都市，邮编:610031)。

西南交通大学应用力学与工程系

2004 年 2 月

目 录

第 1 章 静力学基础 /1

§ 1-1 静力学中的基本概念	1
§ 1-2 静力学公理	4
§ 1-3 约束和约束力	8
§ 1-4 研究对象和受力图	15
习题	18

第 2 章 平面汇交力系 /22

§ 2-1 平面汇交力系合成与平衡的几何法	22
§ 2-2 平面汇交力系合成与平衡的解析法	27
习题	34

第 3 章 力矩与平面力偶系 /37

§ 3-1 关于力矩的概念及其计算	37
§ 3-2 关于力偶的概念	40
§ 3-3 平面力偶系的合成与平衡	43
习题	46

第 4 章 平面一般力系 /49

§ 4-1 力线平移定理	50
§ 4-2 平面一般力系向一点简化	51
§ 4-3 分布荷载	55
§ 4-4 平面一般力系的平衡条件	56
§ 4-5 平面平行力系的平衡条件	62
§ 4-6 滑动摩擦	63
习题	66

第 5 章 重心和形心 /70

§ 5-1 重心和形心的坐标公式	70
------------------	----

§ 5-2 确定重心和形心位置的具体方法	72
习题	74
第 6 章 内力和内力图 /76	
§ 6-1 平面桁架的内力	76
§ 6-2 轴力及轴力图	79
§ 6-3 扭矩和扭矩图	81
§ 6-4 剪力和弯矩·剪力图和弯矩图	83
习题	89
第 7 章 拉伸和压缩 /93	
§ 7-1 横截面上的应力	93
§ 7-2 拉压杆的强度计算	97
§ 7-3 斜截面上的应力	100
§ 7-4 拉(压)杆的变形与位移	102
§ 7-5 拉(压)杆内的应变能	106
§ 7-6 低碳钢和铸铁受拉伸和压缩时的力学性能	109
§ 7-7 简单的拉、压超静定问题	115
§ 7-8 拉(压)杆接头的计算	120
习题	123
第 8 章 扭转 /128	
§ 8-1 薄壁圆筒扭转时的应力和变形	128
§ 8-2 圆杆扭转时的应力和变形	130
§ 8-3 强度条件及刚度条件	140
§ 8-4 等直圆杆在扭转时的应变能	144
§ 8-5 矩形截面杆的扭转	147
习题	151
第 9 章 弯曲 /154	
§ 9-1 剪力图和弯矩图的进一步研究	154
§ 9-2 弯曲正应力	157
§ 9-3 求惯性矩的平行移轴公式	166
§ 9-4 弯曲切应力	168

§ 9-5	梁的强度条件	175
§ 9-6	挠度和转角	177
§ 9-7	弯曲应变能	185
§ 9-8	超静定梁	188
	习题	191
第 10 章 应力状态分析和强度理论 /195		
§ 10-1	概述	195
§ 10-2	平面应力状态分析	196
§ 10-3	平面应力状态下的胡克定律	200
§ 10-4	三向应力状态	202
§ 10-5	强度理论及其应用	205
	习题	214
第 11 章 压杆的稳定性 /216		
§ 11-1	关于稳定性的概念	216
§ 11-2	细长中心压杆的临界荷载	218
§ 11-3	欧拉公式的适用范围·临界应力总图	222
§ 11-4	压杆的稳定条件和稳定性校核	224
	习题	227
第 12 章 点的运动 /230		
§ 12-1	运动学的基本内容·参考系	230
§ 12-2	点的运动的矢量表示法	230
§ 12-3	点的运动的直角坐标表示法	232
§ 12-4	点的运动的自然表示法(弧坐标表示法)	237
	习题	242
第 13 章 刚体的基本运动 /245		
§ 13-1	刚体的移动	245
§ 13-2	刚体的定轴转动	246
§ 13-3	转动刚体上点的速度和加速度	250
	习题	254

第 14 章 点的复合运动 /257

§ 14-1 绝对运动、相对运动和牵连运动	257
§ 14-2 点的速度合成定理	259
§ 14-3 牵连运动为移动时点的加速度合成定理	262
习题	264

第 15 章 刚体的平面运动 /269

§ 15-1 刚体平面运动分解为移动和转动	269
§ 15-2 平面图形上点的速度·速度瞬心	271
§ 15-3 平面图形上点的加速度	279
习题	281

第 16 章 质点的运动微分方程 /285

§ 16-1 动力学的基本定律	285
§ 16-2 质点的运动微分方程	287
习题	293

第 17 章 动力学普遍定理 /296

§ 17-1 动量定理	296
§ 17-2 动量矩定理	306
§ 17-3 动能定理	319
§ 17-4 动力学普遍定理的综合应用	333
习题	338

第 18 章 动静法 /344

§ 18-1 关于惯性力的概念	344
§ 18-2 质点的动静法	345
§ 18-3 质点系的动静法	348
§ 18-4 刚体惯性力系的简化	350
习题	357

附录 I 型钢表	361
----------------	-----

附录 II 简单荷载作用下梁的挠度和转角	374
----------------------------	-----

参考文献	378
习题答案	379
索引	389
Synopsis	393
Contents	394
执笔者简介	398

第 1 章 静力学基础

静力学是研究物体在力系作用下平衡规律的科学，主要解决两类问题：一是将作用在物体上的力系进行简化，即用一个简单的力系等效地替换一个复杂的力系，这类问题称为“力系的简化(或力系的合成)问题”；二是建立物体在各种力系作用下的平衡条件，这类问题称为“力系的平衡问题”。

静力学是工程力学的基础，在工程实际中有着广泛的应用。它所研究的两类问题(力系的简化和平衡)，对于研究物体的运动和变形都有十分重要的意义。因为研究物体的运动和变形以及工程结构和机器能否正常工作而不致发生破坏等时，都要知道作用在物体上的各种力(包括未知力)的大小和方向。

力在物体平衡时所表现出来的基本性质，也同样表现于物体作一般运动的情形中。在静力学里关于力的合成、分解与力系简化的研究结果，可以直接应用于动力学。

本章将阐述静力学中的一些基本概念、静力学公理、工程上常见的典型约束和约束力，以及物体的受力分析。

§ 1-1 静力学中的基本概念

一、关于力的概念

力的概念是人们在生活和生产实践中，通过长期的观察和分析而逐步形成的。当人们推动小车时，由于手臂肌肉的紧张和收缩而感受到了力的作用。这种作用不仅存在于人与物体之间，而且广泛地存在于物体与物体之间，例如机车牵引车辆加速前进时或者制动时，机车与车辆之间、车辆与车辆之间都有力的作用。大量事实说明，力是物体(指广义上的物体,其中包括人)之间的相互作用，离开了物体，力就不可能存在。力虽然看不见，但它的作用效应完全可以直接观察，或用仪器测量出来。实际上，人们正是从力的作用效应来认识力本身的。

1. 力的定义

力是物体之间相互的机械作用，这种作用使物体的机械运动状态发生变

化, 以及使物体发生变形。前者称为力的运动效应或外效应; 后者称为力的变形效应或内效应。

2. 力的三要素

力对物体作用的效应, 决定于力的大小、方向(包括方位和指向)和作用点, 这三个因素称为力的三要素。在这三个要素中, 如果改变其中任何一个, 也就改变了力对物体的作用效应。例如沿水平地面推一个木箱(图 1-1), 当推力 F 较小时, 木箱不动, 当推力 F 增大到某一数值时, 木箱开始滑动。如果推力 F 的指向改变了, 变为拉力, 则木箱将沿相反方向滑动。如果推力 F 不作用在 A 点而移到 B 点, 则木箱的运动趋势就不仅是滑动, 而且可能绕 C 点转动(倾覆)。所以要确定一个力, 必须说明它的大小、方向和作用点, 缺一不可。

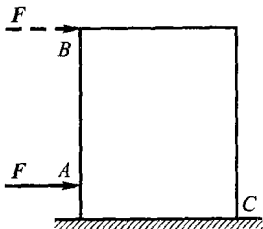


图 1-1

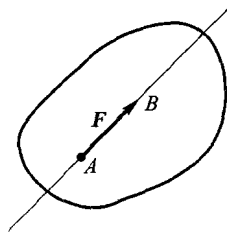


图 1-2

(1) 力是矢量。力是一个既有大小又有方向的量, 力的合成与分解需要运用矢量的运算法则, 因此它是矢量(或称向量)(vector)。

(2) 力的矢量表示。矢量可用一具有方向的线段来表示, 如图 1-2 所示。用线段的长度(按一定的比例尺)表示力的大小, 用线段的方位和箭头指向表示力的方向, 用线段的起点或终点表示力的作用点。通过力的作用点沿力的方向的直线称为力的作用线。本教材中以黑体的字母, 如 \mathbf{F} 、 \mathbf{AB} 等来表示矢量, 白体的字母则代表该矢量的模(大小)。

(3) 力的单位。力的单位是 N(牛顿)或 kN(千牛顿)。

3. 等效力系

(1) 力系(system of forces)。作用在物体上的若干个力总称为力系, 以 $(\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2, \dots, \mathbf{F}_n)$ 表示(图 1-3a)。

(2) 等效力系(equivalent system of forces)。如果作用于物体上的一个力系可用另一个力系来代替, 而不改变原力系对物体作用的外效应, 则这两个力系称为等效力系或互等力系, 以 $(\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2, \dots, \mathbf{F}_n) = (\mathbf{F}'_1, \mathbf{F}'_2, \dots, \mathbf{F}'_m)$ 表示(图 1-3b)。

需要强调的是，这种等效力系只是不改变对于物体作用的外效应，至于内效应，显然将随力的作用位置等的改变而有所不同。

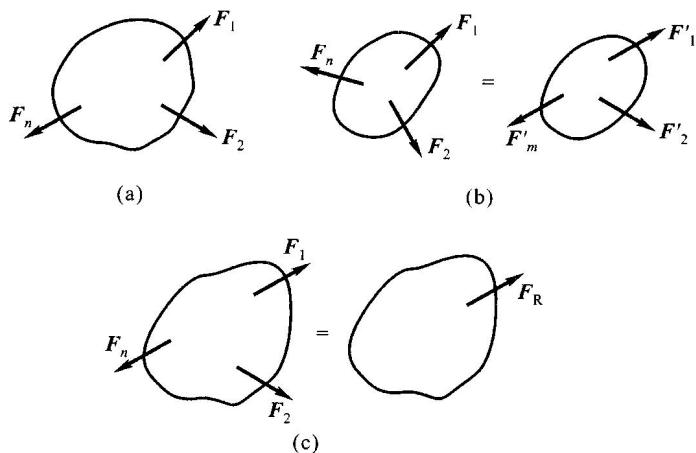


图 1-3

(3) 合力(resultant force)。如果一个力(F_R)与一个力系(F_1, F_2, \dots, F_n)等效，则力 F_R 称为此力系的合力，而力系中的各力则称为合力 F_R 的分力(图 1-3c)。

二、关于刚体的概念

任何物体在力的作用下，或多或少总要产生变形。但是，实际工程中构件的变形通常是非常微小的，在许多情况下，可以忽略不计。例如一根梁，当其受力而弯曲时，由于变形微小，支点之间距离(跨度)的变化量也很小，从而在求支座约束力时可按跨度不变的情况来考虑。

所谓刚体(rigid body)就是指在受力情况下保持其几何形状和尺寸不变的物体，亦即受力后任意两点之间的距离保持不变的物体。显然，这只是一个理想化了的模型，实际上并不存在这样的物体。这种抽象简化的方法，虽然在研究许多问题时是必要的，而且也是许可的，但它是有条件的。以后我们将会看到，在研究物体内部各点之间相互的作用力时，即使变形很小，也必须考虑物体的变形情况，即把物体视为变形体而不能再看作刚体。

三、关于平衡的概念

所谓物体的平衡(equilibrium)，工程上一般是指物体相对于地面保持静止

或作匀速直线运动的状态。

要使物体处于平衡状态，作用于物体上的力系必须满足一定的条件，这些条件称为力系的平衡条件。作用于物体上正好使之保持平衡的力系则称为平衡力系。静力学研究物体的平衡问题，实际上就是研究作用于物体上的力系的平衡条件，并利用这些条件解决具体问题。

§ 1-2 静力学公理

静力学公理(axioms of statics)是人类在长期的生活和生产实践中，经过反复观察和实验总结出来的客观规律，它正确地反映和概括了作用于物体上的力的一些基本性质。静力学的全部理论，即关于力系的简化和平衡条件的理论，都是以这些公理为依据而得出的。

一、公理1 二力平衡公理

作用于刚体上的两个力，使刚体处于平衡状态的必要与充分条件是：这两个力大小相等，指向相反，且作用于同一直线上(简称等值、反向、共线)(图1-4)。

这个公理揭示了作用于物体上的最简单的力系在平衡时所必须满足的条件，它是静力学中最基本的平衡条件。对于刚体来说，这个条件既是必要的又是充分的，但对于非刚体，这个条件是不充分的。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。

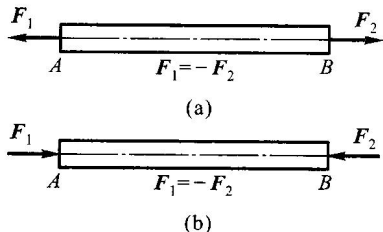


图 1-4

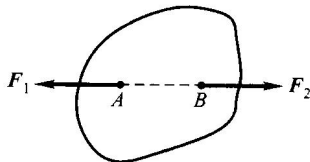


图 1-5

只受两个力作用而处于平衡的物体称为二力体，如图1-5所示。机械及建筑结构中的二力体常常统称为“二力构件”，它们的受力特点是：两个力的方向必在二力的作用点的连线上。如果二力构件是一根直杆，则称为二力杆，或称为链杆。

应用二力体的概念，可以很方便地判定结构中某些构件的受力方向。如图 1-6a 所示三铰刚架，当不计自重时，其 CDE 部分只可能通过铰 C 和铰 E 两点受力，是一个二力构件，故 C 、 E 两点处的作用力必沿 CE 连线的方向(图 1-6b)。

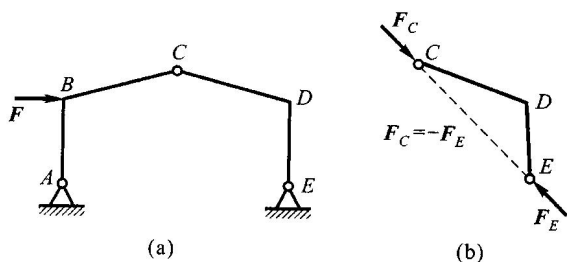


图 1-6

【思考题 1-1】如图 1-6a 所示的三铰刚架，自重不计，其 A 点处的作用力是否在铰 A 和 C 的连线上？

二、公理 2 加减平衡力系公理

在作用于刚体上的已知力系中，加上或减去任一平衡力系，并不改变原力系对刚体的效应。这是因为平衡力系对刚体作用的总效应等于零，它不会改变刚体的平衡或运动的状态。这个公理常被用来简化某一已知力系。

应用这个公理可以导出作用于刚体上的力的如下一个重要性质。

力的可传性原理 作用于刚体上的力，可沿其作用线任意移动而不改变它对刚体的作用效应。例如，

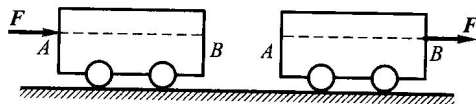


图 1-7

图 1-7 中在车后 A 点加一水平力 F 推车，与在车前 B 点加一水平力 F 拉车，对于车的运动而言，其效果是一样的。

这个原理可以利用上述公理推证如下(图 1-8)：

- (1) 设力 F 作用于刚体上的 A 点(图 1-8a)；
- (2) 在力的作用线上任取一点 B ，并在 B 点加一平衡力系 (F_1, F_2) ，使 $-F_1 = F_2 = F$ (图 1-8b)；由加减平衡力系公理知，这并不影响原力 F 对刚体的作用效应，即力系 $(F, F_1, F_2) = F$ ；

(3) 再从该力系中去掉平衡力系 (F, F_1) ，则剩下的力 F_2 (图 1-8c) 与原力 F 等效。这样就把原来作用在 A 点的力 F 沿其作用线移到了 B 点。

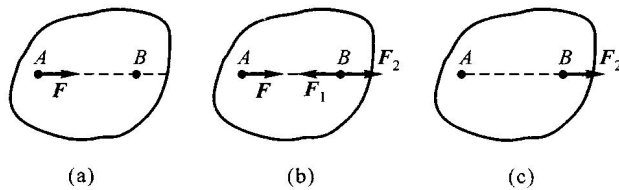


图 1-8

根据力的可传性，力在刚体上的作用点已为它的作用线所代替，所以作用于刚体上的力的三要素又可以说是：力的大小、指向和作用线。这样的力矢量称为滑动矢量。至于作用点一定的力矢量则是定位矢量。

应当指出，加减平衡力系公理以及力的可传性原理，只适用于刚体，即只有在研究刚体的平衡或运动时才是正确的。对于需要考虑变形的物体，加减任何平衡力系，或将力沿其作用线作任何移动，都将改变物体的变形或物体内部的受力情况。例如，图 1-9a 所示的杆 AB，在平衡力系 (F_1, F_2) 作用下产生拉伸变形；如去掉该平衡力系，则杆就没有变形；如根据力的可传性，将这两个力沿作用线分别移到杆的另一端，如图 1-9b 所示，则该杆就要产生压缩变形。

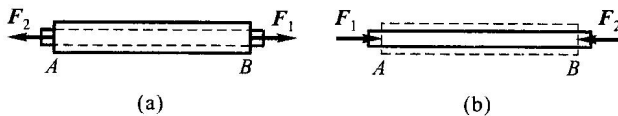


图 1-9

三、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，其合力也作用在该点上，至于合力的大小和方向则由以这两个力为边所构成的平行四边形的对角线来表示(图 1-10a)，而原来的那两个力称为合力的分力。

这种合成力的方法称为矢量加法，而合力矢量就是分力的矢量和(或几何和)。图 1-10 中三个力的关系可用矢量式表示为

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

应该指出，式(1-1)是矢量等式，它与代数等式 $F = F_1 + F_2$ 的意义完全不同，不能混淆。