



21世纪高等院校规划教材

张伯奋 郑 菲◎主编

LILUN LIXUE

理论力学



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)



21世纪高等院校规划教材

LILUN LIXUE

理论力学

主 编 张伯奋 郑 菲

副主编 王振玉 程精涛

西南交通大学出版社

• 成 都 •

图书在版编目 (C I P) 数据

理论力学 / 张伯奋, 郑菲主编. —成都: 西南交通大学出版社, 2013.1

21 世纪高等院校规划教材
ISBN 978-7-5643-1746-1

I. ①理… II. ①张… ②郑… III. ①理论力学—高等学校—教材 IV. ①031

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 101248 号

21 世纪高等院校规划教材

理论力学

主编 张伯奋 郑 菲

责任编辑	杨 勇
封面设计	墨创文化
出版发行	西南交通大学出版社 (成都二环路北一段 111 号)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮政编码	610031
网 址	http://press.swjtu.edu.cn
印 刷	四川川印印刷有限公司
成品尺寸	185 mm×260 mm
印 张	19.125
字 数	475 千字
版 次	2013 年 1 月第 1 版
印 次	2013 年 1 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-1746-1
定 价	39.80 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

· 新版前言 ·

本书根据“高等学校工科理论力学课程教学基本要求”组织编写，依照培养“应用型”技术人才的目标，按照少学时的要求精选教学内容进行修订和编撰，以供教学使用。

本书的编写意在加强基本理论及应用，让学生能更好地掌握理论力学的基本理论并能正确应用这些理论去解决工程实际中的力学问题，因此编写从改变传统教材入手，以“应用”为主线来组织教学，在基本理论的论述上力求做到清晰、简练，避免烦琐的理论推导和叙述，重点放在方法的应用上，结合后续课程的内容，在分析、计算上表现其特点，以提高学生的实际应用水平。在静力学体系上，结合多种机械结构的力学分析，在应用方法上进行详尽的叙述、分析，而对“运动学”和“动力学”部分，也以“应用”为主线，避免过多的理论分析和论述，重在原理和方法。由于课时有限，本书未编入动力学普遍方程和拉格朗日方程及机械振动基础，但保留了机械工程时有应用的碰撞基本理论及其应用。

本书从2009年进入教学实践，经过这几年的课堂教学并听取了相关院校及本院部分教师和读者意见，为了更好地适应教育的发展和学生学习，适应21世纪工科力学课程教学改革的要求，按照精选教学内容，控制教学学时数，重视学生的自主学习能力，提高学生解决工程实际问题的能力和创新能力的培养，本版对全书教学内容进行了适当的修订以便能更好地满足教学的需要和具有自身的特点。

本书共分为10章。第1章介绍静力学的基本知识，将力、力的投影、力矩、力偶矩、物体的受力分析、静力学公理等基本理论集中起来以便加深理解并能在分析计算上得到一定的训练，以便为学习静力学和动力学打下基础。

第2章和第3章为静力学部分，从平面一般力系到空间任意力系，分析了力系的简化、合成和平衡，在平衡方程的应用中，结合具体的机械结构，仔细地进行力学分析和计算方法分析，为实际应用打下扎实的基础。

第4章至第6章为运动学，以“应用”为主线，研究机构运动的分解和合成，分析点和刚体的运动、合成方法，为具体应用打好基础。

第 7 章至第 10 章为动力学部分，介绍了动力学的基本定律、基本方程及动力学普遍定理和解决动力学问题的途径和方法，也介绍了机械工程中时有应用的碰撞理论和动能的计算方法，为机械设计提供理论依据。

为便于学习、复习和巩固所学的知识，掌握要点及计算方法，教材对重要概念、定理、结论均加上花纹线，在各章末附有小结并选编了足够数量的习题且附有答案。

本书由张伯奋、郑菲任主编，王振玉、程精涛任副主编。具体编写分工为：张伯奋（前言，绪论，第 3、4 章）；郑菲（第 1、10 章）；王振玉（第 2、5、6 章）；程精涛（第 7、8、9 章）。郑菲统稿。

本书在编写过程中得到周光万同志的大力支持和帮助，谨此表示衷心的感谢。同时感谢本书所列参考文献的各位作者。本书虽经此次修订，但由于编者水平有限，书中难免存在缺点和疏漏之处，恳请读者批评指正，使本书能够不断提高和改进。

编 者

2012 年 10 月

本书主要符号

$\boldsymbol{F}$	力	t	时间
$\boldsymbol{F}_R$	合力	k	弹簧刚度系数
$\boldsymbol{F}'_R$	主矢	ω	角速度
M_O	主矩	ω_a	绝对角速度
x, y, z	直角坐标系	ω_r	相对角速度
O	参考坐标系原点	ω_e	牵连角速度
$\boldsymbol{i}$	x 轴单位矢量	$\boldsymbol{v}$	速度
$\boldsymbol{j}$	y 轴单位矢量	$\boldsymbol{v}_a$	绝对速度
$\boldsymbol{k}$	z 轴单位矢量	$\boldsymbol{v}_r$	相对速度
$\boldsymbol{M}$	力偶矩	$\boldsymbol{v}_e$	牵连速度
M_z	对 z 轴的矩	$\boldsymbol{v}_C$	质心速度
$M_O(\boldsymbol{F})$	力对点 O 的矩	V	势能；体积
$\boldsymbol{F}_N$	法向约束力	$\boldsymbol{a}$	加速度
$\boldsymbol{g}$	重力加速度	$\boldsymbol{a}_n$	法向加速度
h	高度	$\boldsymbol{a}_t$	切向加速度
m	质量	$\boldsymbol{a}_a$	绝对加速度
P	重量，功率	$\boldsymbol{a}_r$	相对加速度
n	质点数目	$\boldsymbol{a}_e$	牵连加速度
A	面积	$\boldsymbol{a}_C$	科氏加速度
η	效率	e	恢复系数
q	载荷集度	α	角加速度
ρ	密度；曲率半径	$\boldsymbol{p}$	动量
f_s	静摩擦因数	$\boldsymbol{L}_O$	刚体对点 O 的动量矩
f	动摩擦因数	$\boldsymbol{L}_C$	刚体对质心的动量矩
$\boldsymbol{F}_S$	静滑动摩擦力	$\boldsymbol{I}$	冲量
φ_f	摩擦角	T	动能；时间
δ	滚动摩阻系数	W	力的功
r	半径	$\boldsymbol{F}_I$	惯性力
$\boldsymbol{r}$	矢径	$\boldsymbol{F}_{Ie}$	牵连惯性力
$\boldsymbol{r}_O$	点 O 的矢量	$\boldsymbol{F}_{IC}$	科氏惯性力
$\boldsymbol{r}_C$	质心矢径	J_z	刚体对 z 轴的转动惯量
R	半径	δ	变分符号
s	弧坐标	J_C	刚体对质心的转动惯量

目 录

绪 论	1
-----------	---

静 力 学

第 1 章 静力学基本知识与物体的受力分析	4
1.1 静力学的基本知识	4
1.2 静力学公理	5
1.3 力在坐标轴上的投影	8
1.4 力对点之矩	11
1.5 平面力偶	16
1.6 空间力偶	17
1.7 约束和约束力	19
1.8 物体的受力分析和受力图	25
本章小结	30
习 题	32
第 2 章 力系的简化与合成	35
2.1 平面汇交力系合成与平衡的几何法	35
2.2 平面汇交力系合成与平衡的解析法	37
2.3 平面力偶系的合成	39
2.4 空间力偶系的合成	40
2.5 平面任意力系的简化	42
2.6 力系简化结果	43
2.7 空间力系向一点简化, 主矢和主矩	45
2.8 平行力系的中心, 重心	49
本章小结	55
习 题	57

第 3 章 力系的平衡 60

3.1 平面任意力系的平衡条件和平衡方程 60

3.2 静定和超静定问题 69

3.3 空间任意力系的平衡方程 71

3.4 平面力偶系的平衡条件 77

3.5 空间力偶系的平衡条件 79

3.6 平面桁架的内力计算 80

3.7 考虑摩擦时的平衡问题 83

本章小结 95

习 题 97

运 动 学

第 4 章 点的运动及刚体的简单运动 109

4.1 矢径法确定点的运动 · 速度 · 加速度 109

4.2 用直角坐标法研究点的运动 110

4.3 用自然法研究点的运动 115

4.4 刚体的简单运动 121

4.5 轮系的传动比 126

4.6 以矢量表示角速度和角加速度 · 以矢积表示点的速度和加速度 · 128

本章小结 130

习 题 132

第 5 章 点的合成运动 137

5.1 概 述 137

5.2 点的速度合成定理 140

5.3 点的加速度合成定理 145

本章小结 154

习 题 155

第 6 章 刚体的平面运动 159

6.1 刚体的平面运动及其分解 159

6.2 求平面图形内各点速度的基点法 162

6.3 求平面图形内各点速度的瞬心法 166

6.4 平面图形内各点的加速度——基点法 170

本章小结 173

习 题 175

动力学

第 7 章 质点运动微分方程	182
7.1 概 述	182
7.2 动力学基本定律	183
7.3 质点运动微分方程	184
7.4 质点动力学的两类基本问题	186
本章小结	189
习 题	190
第 8 章 动量与动量矩定理	194
8.1 动 量	194
8.2 冲 量	195
8.3 动量定理	196
8.4 质心运动定理	200
8.5 动量矩定理	205
8.6 绕定轴转动刚体对转轴的动量矩	211
8.7 质点系相对于质心的动量矩定理	223
8.8 碰 撞	225
本章小结	232
习 题	235
第 9 章 动能定理	247
9.1 力的功	247
9.2 质点和质点系的动能	252
9.3 动能定理	254
本章小结	263
习 题	264
第 10 章 达朗贝尔原理及虚位移原理	271
10.1 惯性力、质点的达朗贝尔原理	271
10.2 质点系的达朗贝尔原理	273
10.3 约束、虚位移、虚功	275
本章小结	283
习 题	284
习题答案	287
参考文献	296

绪 论

1. 理论力学的研究对象和内容

理论力学是研究物体机械运动一般规律的科学。是一门基础科学，是一切力学的基础，是很多工程技术（机械、房筑、车辆、航天、航空等）的基础，同时也在这些工程中有具体的直接的应用，是机械工程专业学生必备的基础知识。

自然界中所有的物质都处于不断地运动之中，其运动形式是多种多样的。例如物体在空间的位移、变形、发热、电磁现象以及人类思维等，而在这些运动形态中，机械运动是最简单、最普遍的一种。所谓机械运动就是物体在空间的位置随时间变化的运动形态，如机器的运转、车辆的行驶、河水的流动、飞机火箭的运动等都属于机械运动，因此研究机械运动不仅揭示自然界各种机械运动的规律，也是研究物质其他运动形式的基础。

理论力学研究速度远小于光速的宏观的机械运动，属于古典力学的范畴。它以伽利略和牛顿所总结的基本定律为基础，在 15 至 17 世纪逐步形成体系并不断完善和发展。

本课程的内容包括以下三个部分。

静力学：研究物体受力平衡时作用力所应满足的条件及物体受力分析方法、力系的简化等。

运动学：研究物体运动的几何性质（如轨迹、速度和加速度等）。

动力学：研究物体运动与作用力之间的关系。

2. 理论力学的研究方法

理论力学的形成与发展是在人类对自然界的长期观察、实践及生产实际进行分析、综合、归纳、总结的过程中逐步形成和发展的。

观察与实践是理论力学发展的基础，抽象和数学演绎两种方法。将工程实际问题抽象为力学模型，然后以已有的力学理论为依据，运用数学方法进行演绎求得解决，然后又将所得结果运用到实践中去检验其正确性。如此循环往复，使认识不断深化，理论不断发展，这就是理论力学发展的道路。

3. 学习理论力学的目的

理论力学是一门理论性较强的技术基础课，是机械专业的学生必须掌握的基础理论。

机械专业必须熟知机械运动的规律，正确理解机械运动而且还能用理论力学的基本理论去解决某些工程实际问题，也可以结合其他专业知识去解决比较复杂的工程问题。因而，学好理论力学将为解决工程实际问题打下良好的基础。

理论力学是研究力学中最普遍、最基本的规律，也是机械专业后续课程如材料力学、机械设计基础、金属切削原理及刀具、金属切削机床等课程的理论基础。

学习理论力学，一方面要学习到基本概念、基本理论以及解决问题的基本方法，为学习后续课程打好力学基础；另一方面，要通过学习，培养和锻炼对实际问题进行科学抽象建立力学模型并应用理论力学方法加以解决的能力。

4. 理论力学的学习方法

作为一门技术基础课，学习理论力学务必达到以下要求：及时复习，准确理解和认识基本概念的来源、含义和用途；熟悉基本定理和公式，注意应用的条件和范围；学会和掌握进行力学分析和解决问题的方法；各部分内容和分析问题的方法上的区别和联系。对理论力学基本概念的理解和理论应用能力是通过大量的习题逐步加深和提高的。因此，必须认真做一定量的习题以加深理解和提高能力。

静力学



静力学是研究物体在力系作用下的平衡条件的科学。

在静力学中，我们主要学习自然界中各种力的共同性质，研究力系的合成、简化及平衡的必要充分条件等。从应用的角度看，必须熟练掌握对物体的受力分析及应用平衡方程进行受力计算。

第1章 静力学基本知识与物体的受力分析

本章将阐述作为静力学理论的几个公理，并阐述在研究静力学时首先遇到的几个基本概念，最后介绍工程中常见的约束和约束力的分析及物体的受力图。

1.1 静力学的基本知识

1.1.1 力的概念

力的概念是人们在生产实践中逐步形成的。力是物体之间相互的机械作用。其结果是使物体的运动状态发生变化，同时还能使物体产生变形。物体相互间的机械作用形式是多种多样的，可归纳为两类：一是物体间直接接触作用，如弹力、摩擦力等；一是通过场的相互作用，如万有引力、静电引力等。

实践表明，力对物体的作用效果与力的大小、方向和作用点相关，它们称为力的三要素。因此，力是矢量。本书中用黑体字母 $\boldsymbol{F}$ 表示力矢量，而用普通字母 F 表示力的大小。在国际单位制中，力的单位是 N 或 kN。

力系是指作用于物体上的一群力。两个不同的力系，如果它们对同一物体的作用效应完全相同，则这两个力系是等效的，它们互称为等效力系。

1.1.2 刚 体

实际物体受力时，其内部各点间的相对距离都要发生改变，这种改变称为位移。各点位移累加的结果，使物体的形状和尺寸改变，这种改变称为变形。物体变形很小时，变形对物体的运动和平衡的影响甚微，因而在研究力的作用效应时可以忽略不计，这时的物体便可抽象为刚体。

刚体是指物体在力的作用下，其内部任意两点之间的距离始终保持不变的物体。事实上，任何物体在力的作用下都会产生或多或少的变形，因此绝对的刚体并不存在，刚体只是一个理想化的力学模型。

静力学研究的物体只限于刚体，或由若干物体组成的刚体系统。也就是说，静力学研究刚体或刚体系统的平衡问题，所以也称为刚体静力学。

1.1.3 平 衡

平衡是指物体相对于惯性参考系保持静止或作匀速直线平动的状态。在一般工程技术问题中，平衡常常都是指相对于地球表面而言的。例如静止于地面上的房屋、桥梁、水坝等建筑物，在直线轨迹上作匀速运动的列车等，都是处于平衡状态的。平衡是物体机械运动的特殊情况。一切平衡都是相对的、有条件的和暂时的，而运动是绝对的。

1.1.4 静力学研究的两个基本问题

静力学可归结为主要研究两个基本问题：

1. 作用在刚体上的力系的简化（或合成）

用一个比原力系简单的力系等效地替换一个复杂力系的过程，称为**力系的简化**。如果一个力就可以等效地代替原力系，则此力称为原力系的**合力**，而原力系中的诸力称为该力的**分力**。对力系进行简化有利于揭示力系对刚体的作用效应，研究力系的简化既有利于导出力系的平衡条件，又为动力学奠定了必要的基础。

2. 力系的平衡条件及应用

作用于物体的力系使物体处于平衡状态所应满足的条件称为**平衡条件**。研究物体的受力分析、力系的平衡条件，并应用这些平衡条件解决工程技术问题，是静力学的主要内容。

静力学在工程技术中有着广泛的应用，是设计结构、构件和机械零件时静力计算的基础，同时也是学习许多后续课程的基础。

1.2 静力学公理

公理是人们在长期的生活和生产实践过程中总结出来的，又经过实践反复的检验，被确认是符合客观实际的最普遍、最一般的规律。公理无需证明。

1.2.1 公理一 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。合力的作用点仍在该点，合力的大小和方向，可以由这两个力为边所构成的平行四边形的对角线确定（如图 1-1（a）所示），或者说合力矢等于两个分力矢的矢量和，即：

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

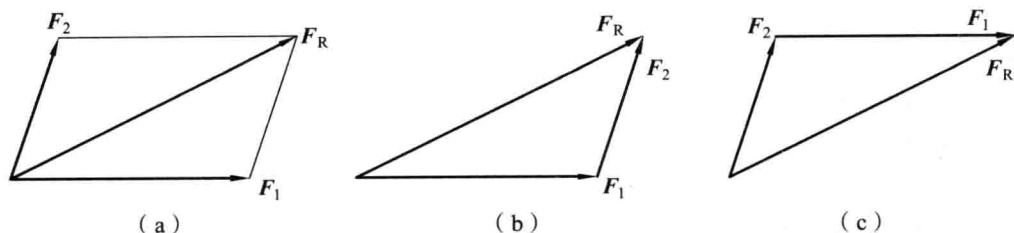


图 1-1

为了简便，作图时可直接将其中一力矢平移到另一力矢的末端，连接首尾两点即可求得合力矢 F_R （如图 1-1 (b)、(c) 所示）。这个三角形称为力三角形，这样的作图方法称为力的三角形法则。

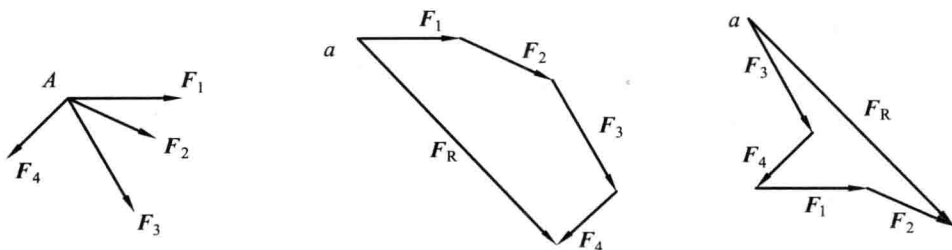


图 1-2

同样，对于多个力的合成问题，可演变为力多边形，即从点 a 开始，将各分力矢量依次首尾相连，从起始点 a 到该力多边形终点的矢量即为合力（如图 1-2 所示）。

力的平行四边形法则是力系简化的基础，同时，它也是力分解的法则。根据这一法则可将一个力分解为作用于同一点的两个分力。

1.2.2 公理二 二力平衡条件

作用于刚体上的两个力（如 F_1 和 F_2 ），使刚体平衡的必要和充分条件是：这两个力大小相等，方向相反，且作用在同一条直线上（图 1-3）。

该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，是推证力系平衡条件的基础。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。

仅在两点受力作用并处于平衡的构件称为二力构件，简称为二力体。二力体所受的二力必沿此二力作用点的连线，且等值、反向。如果二力构件是一根直杆，则称为二力杆。

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 1-4 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。

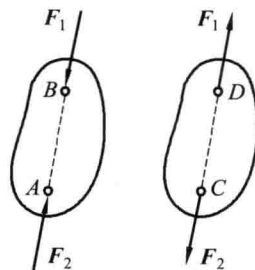


图 1-3

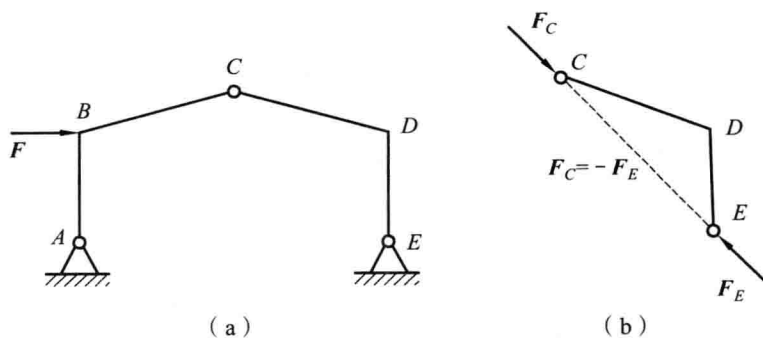


图 1-4

1.2.3 公理三 加减平衡力系原理

在已知力系上，加上或者减去任意一个平衡力系，不改变原力系对刚体的作用。

该公理是研究力系等效替换的重要依据。但应指出，对变形体而言只是必要条件，而非充分条件。

根据上述公理可以导出下列推理。

1. 力的可传递性

作用于刚体上的力，可沿其作用线任意移动，而不会改变它对刚体的作用效应。

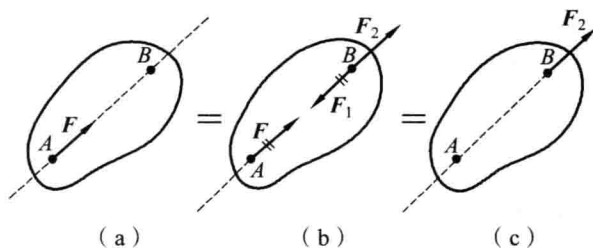


图 1-5

证明：在刚体上的点 A 作用力 F ，如图 1-5 (a) 所示。根据加减平衡力系原理，可在力的作用线上任取一点 B ，并加上两个相互平衡的力 F_1 和 F_2 ，使 $F = -F_1 = F_2$ ，如图 1-5 (b) 所示。由于力 F 和 F_1 也是一个平衡力系，故可除去；这样只剩下一个力 F_2 ，如图 1-5 (c) 所示，即原来的力 F 沿其作用线移到了点 B 。

由此可见，对于刚体来说，力的作用点已不是决定力的作用效应的要素，它已为作用线所代替。因此，作用于刚体上的力的三要素是：力的大小、方向和作用线。作用于刚体上的力可以沿着作用线移动，这种矢量称为滑动矢量。

2. 三力平衡汇交定理

作用于刚体上三个相互平衡的力，若其中两个力交于一点，则第三个力必过汇交点，且三力共面，它们组成的力三角形自行封闭。

证明：如图 1-6 所示，在刚体的三点 A, B, C 上，分别作用三个相互平衡的力 F_1, F_2, F_3 。根据力的可传性，将力 F_1 和 F_2 移到汇交点 O ，然后根据力的平行四边形法则，得合力 F_{12} 。则力 F_3 应与 F_{12} 平衡。由于两个力平衡必须共线，所以力 F_3 必定与力 F_1 和 F_2 共面，且其作用线通过力 F_1 与 F_2 的交点 O 。于是定理得证。

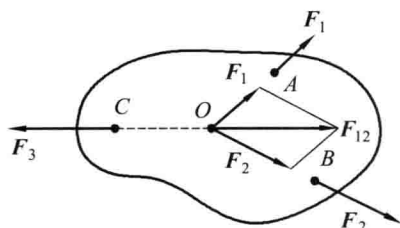


图 1-6

1.2.4 公理四 作用与反作用定律

作用力和反作用力总是同时存在，两力的大小相等，方向相反，沿同一直线，分别作用在两个相互作用的物体上。作用力与反作用力分别用 F, F' 表示，则：

$$F = -F'$$

此公理概括了物体间相互作用的关系，表明作用力和反作用力总是成对出现的。由于作用力与反作用力分别作用在两个物体上，因此，不能视做平衡力系。

作用与反作用定律，对于刚体和变形体都是同样适用的。

1.2.5 公理五 刚化原理

变形体在某力系作用下处于平衡，则将此变形体刚化为刚体，其平衡状态保持不变。

这个公理指出，刚体的平衡条件，对于变形体的平衡也是必要的。因此可将刚体的平衡条件应用到变形体的平衡问题中去，从而扩大刚体静力学的应用范围。



图 1-7

必须指出，刚化为刚体的平衡条件，只是变形体的必要条件，而非充分条件。例如图 1-7 所示，绳索在等值、反向、共线的两个拉力作用下处于平衡。如将绳索刚化为刚体，其平衡状态保持不变，若绳索在两个等值、反向、共线的压力的作用下并不能平衡，此时绳索就不能刚化为刚体。

静力学全部理论都可以由上述五个公理推证而得到，这既能保证理论体系的完整和严密性，又可以培养读者的逻辑思维能力。

1.3 力在坐标轴上的投影

在理论力学的计算中，常常需要计算力以及其他各种矢量（如力矩、力偶矩、速度、加