



高等院校工程力学基础教材

胡宇达 主 编

工程力学 I

# 理论力学 简明教程



科学出版社

高等院校工程力学基础教材

工程力学 I

---

# 理论力学简明教程

胡宇达 主 编

田振国 余 为 刘 峰 副主编

杜国君 主 审

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书根据教育部“高等工业院校理论力学课程教学基本要求”编写。全书内容共分三篇，即静力学、运动学和动力学。书中附有一定数量的习题及参考答案，以便读者学习。

本书可作为高等院校工科专业理论力学课程（中、少学时）的教学用书，也可供其他专业选用或有关工程技术人员参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

---

理论力学简明教程/胡宇达主编. —北京: 科学出版社, 2011. 5  
高等院校工程力学基础教材. 工程力学. 1  
ISBN 978-7-03-030867-2

I. ①理… II. ①胡… 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 (2011) 第 072819 号

---

责任编辑: 王晶晶 芦 瑶/责任校对: 柏连海  
责任印制: 吕春珉/封面设计: 耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2011年5月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2011年5月第一次印刷 印张: 11 1/2

印数: 1—3 000 字数: 221 760

定价: 23.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换<路通>)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62137026 (BA08)

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

## 前 言

本书结合多年的教学实践，在内容及编排上，注重由浅入深、循序渐进的原则，力求结构严谨、重点突出、简明易学。书中编入了一定数量的例题和习题，供读者学习选用，以便于巩固对基本内容的理解，加强基本方法的训练。

参加本书编写的有：余为（第1章、第2章），刘峰（第3章、第4章），田振国（第5章、第6章），胡宇达（第7章、第8章、第9章），肖俊华（习题答案）。边宇虹、王平、王美芬等参与了本书内容的讨论和教学实践工作。全书由胡宇达教授担任主编并统稿，杜国君教授担任主审。本书在编写过程中，参考了一些其他院校编写的优秀教材，在此一并表示感谢。对于书中可能存在的缺点和不足之处，诚望读者批评指正。

# 目 录

前言

绪论 ..... 1

## 第一篇 静 力 学

第 1 章 静力学公理和物体的受力分析 ..... 5

1.1 静力学的基本概念 ..... 5

1.2 静力学公理 ..... 6

1.3 约束和约束力 ..... 7

1.4 受力分析与受力图 ..... 11

习题 ..... 13

第 2 章 平面力系 ..... 16

2.1 平面汇交力系的合成与平衡 ..... 16

2.2 平面力偶理论 ..... 21

2.3 平面任意力系的简化 ..... 25

2.4 平面任意力系的平衡方程·物体系的平衡 ..... 29

2.5 考虑摩擦时物体的平衡问题 ..... 34

习题 ..... 37

第 3 章 空间力系 ..... 45

3.1 空间汇交力系 ..... 45

3.2 力矩和空间力偶 ..... 48

3.3 空间任意力系的简化 ..... 53

3.4 空间任意力系的平衡方程 ..... 57

习题 ..... 61

## 第二篇 运 动 学

第 4 章 点的运动学和刚体的简单运动 ..... 67

4.1 确定点运动的矢量法和直角坐标法 ..... 67

4.2	确定点运动的自然法	72
4.3	刚体的平行移动	77
4.4	刚体的定轴转动	78
	习题	82
<b>第5章</b>	<b>点的合成运动</b>	<b>86</b>
5.1	合成运动的基本概念	86
5.2	点的速度合成定理	88
5.3	牵连运动是平动时点的加速度合成定理	91
	习题	95
<b>第6章</b>	<b>刚体的平面运动</b>	<b>99</b>
6.1	刚体平面运动的概述和运动分解	99
6.2	确定平面图形内各点速度的基点法	101
6.3	确定平面图形内各点速度的瞬心法	105
6.4	确定平面图形内各点加速度的基点法	109
	习题	114
<b>第三篇 动力学</b>		
<b>第7章</b>	<b>动力学基本定律与动量定理</b>	<b>121</b>
7.1	动力学的基本定律	121
7.2	质点的运动微分方程	122
7.3	动量与冲量	126
7.4	动量定理	128
7.5	质心运动定理	130
	习题	133
<b>第8章</b>	<b>动量矩定理</b>	<b>136</b>
8.1	动量矩	136
8.2	动量矩定理	137
8.3	刚体绕定轴的转动微分方程	140
8.4	刚体对轴的转动惯量	143
	习题	146

---

<b>第 9 章 动能定理</b> .....	150
9.1 力的功 .....	150
9.2 动能 .....	153
9.3 动能定理 .....	155
9.4 机械能守恒定律 .....	159
9.5 动力学普遍定理的综合应用 .....	162
习题 .....	164
<b>习题答案</b> .....	169
<b>主要参考文献</b> .....	176

## 绪 论

**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**，就是物体在空间的相对位置随时间的变动。它是宇宙间所有物质运动最简单、也是最常见的基本运动形态。其他各种运动形态，如热运动、电磁运动、化学反应乃至生命过程，都比机械运动形态更复杂、更高级，而且通常都包含有机械运动的成分，物体进行机械运动时，必须服从某些一般性的基本规律。对这些一般规律进行研究，成为理论力学的研究对象。由于平衡是物体机械运动的特殊形式，所以，理论力学也研究物体的平衡规律。但是必须指出，运动是物质的固有属性，一切平衡都只是相对的和暂时的。

理论力学研究的内容是以伽利略和牛顿所建立的基本定律为基础的，属于古典力学的范畴。近代物理学的进一步发展，指出了古典力学的局限性：它不适用于速度接近光速的物体的运动，也不适用于微观粒子的运动。但是，对于速度远远小于光速的宏观物体的运动，应用理论力学所得的结论，已为人类长期的生产实践所证实，并具有足够的精确度。因此，它在日常生活和工程实际中，仍然具有非常广泛和十分重要的实用意义。

理论力学的内容通常分为静力学、运动学和动力学三个部分。

**静力学**——研究物体的平衡规律，同时也研究力的一般性质及其简化方法。

**运动学**——研究物体机械运动的纯几何性质，而不涉及物体运动及其变化的物理原因。

**动力学**——研究物体运动及其变化与作用力之间的关系。

力学是自然科学中最古老的学科之一，它产生和发展的过程，就是人类对于机械运动认识深化的过程，而这是通过长期的生产实践和科学实验所形成的。从生产和生活的实践出发，通过观察和实验，经过科学的抽象，建立简化的力学模型；然后经过分析、综合和归纳，建立最基本的公理或定律；再运用数学演绎和逻辑推理，进一步得到各种形式的定理和结论，建立起系统的理论体系；最后，再通过实践去检验理论的正确性，并在更高的水平上进一步指导实践。这就是理论力学的科学的研究方法。

理论力学是一门理论性较强的技术基础课。学习理论力学的目的，在于掌握物体机械运动的客观规律，以便运用这些规律去分析和解决工程实际和生活中提



出的力学问题；另一方面，也是为学习一系列工程专业的后继课程，如材料力学、结构力学、机械原理、机械设计以及其他许多专业课程，提供重要的理论基础。此外，通过对理论力学的学习，也有助于培养辩证唯物主义世界观，提高正确分析问题与解决问题的能力。

# 第一篇 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。**

平衡是物体机械运动的一种特殊形式。在一般的工程实际问题中，物体相对地球处于静止或匀速直线运动的状态称为平衡。在静力学中，将具体研究物体受力分析的基本方法、力系的简化方法以及物体受力系作用时的平衡条件。这些知识不仅在研究物体的平衡状态时要用到，也会在研究物体的运动状态发生变化时用到。



# 第 1 章 静力学公理和物体的受力分析

静力学公理是静力学理论的基础，对物体进行受力分析则是理论力学中的重要基本技能。本章将介绍静力学的基本概念、静力学公理及对物体进行受力分析的基本方法。

## 1.1 静力学的基本概念

### 1.1.1 刚体

**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。这一特征又表现为在任何情况下，物体的大小和形状都保持不变。这是把实际物体经过抽象后，所得到的理想力学模型。实践表明，任何物体在力的作用下总会产生或多或少的变形。在一般的工程问题中，绝大多数的机械零件和结构构件，在正常工作范围内的变形通常都是非常微小的，若忽略这些微小的变形，对研究物体的平衡问题影响很小，却使得问题的处理大为简化。在这样的前提下，就可以把实际物体抽象为刚体来研究。

### 1.1.2 力

力是物体间相互的机械作用，这种作用的结果，使得物体的机械运动状态发生改变。力的概念是人们在长期的生活和生产劳动中，从感性到理性而逐步形成的。当人们在推、拉、提、掷物体时，从肌肉的紧张收缩中，感觉到对物体施加了“力”，其结果使得物体的运动状态发生了改变。

实践表明，力对物体的作用效果，决定于以下三个要素：

- 1) 力的大小；
- 2) 力的方向；
- 3) 力的作用点。

因此，力是矢量。

本书中用黑体字母  $\boldsymbol{F}$  来表示力矢量，其对应的白体字母  $F$  则表示力的大小。在国际单位制中，力的单位是牛顿，记为 N。在工程单位制中，力的单位是千克力，记为 kgf， $1\text{kgf} \approx 9.8\text{N}$ 。

作用在物体上的一群力，称为力系。若力系中各个力共同作用的效果是使得物体处于平衡状态，则该力系称为平衡力系。若两个不同的力系分别作用于同一

个物体而效果却相同，则这两个力系互为等效力系。如果一个力与一个力系等效，则此力称为该力系的合力，该力系中的各个力称为此合力的分力。研究力系的等效替换不仅是为了分析静力学问题，同时也为研究动力学问题提供基础。

## 1.2 静力学公理

人们从长期的生活和生产实践中，对力的基本性质进行了总结和概括，得出了符合客观实际的普遍规律，称为静力学公理。它们是静力学的理论基础。

**公理一（二力平衡条件）** 作用在刚体上的两个力，使刚体处于平衡的充分和必要条件是：这两个力的大小相等、方向相反且作用在同一条直线上。

**公理二（加减平衡力系原理）** 在作用于刚体的已知力系中，加上或减去任意的平衡力系，不改变原力系对刚体的作用效果。

**推论 1（力的可传性原理）** 作用在刚体上某点的力，可沿其作用线移动到刚体内的任意一点，而不改变该力对刚体的作用效果。

**证明** 设力  $F$  作用在刚体上的  $A$  点，如图 1.1 (a) 所示。在其作用线上任取一点  $B$ ，在  $B$  点加上一对等值、反向、共线的平衡力  $F_1$ 、 $F_2$ ，并使  $F_1 = -F_2 = F$ ，如图 1.1 (b) 所示。由于  $F$  与  $F_2$  组成一个平衡力系，因此可除去，如图 1.1 (c) 所示。即力  $F_1$  与力  $F$  等效。

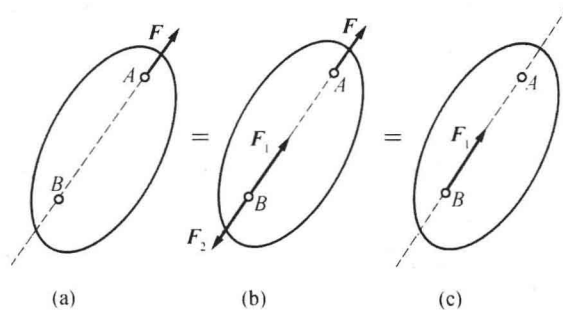


图 1.1

于是可知，作用在刚体上的力矢量可以沿着作用线在刚体内任意滑动，这种矢量称为滑动矢量。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。

**公理三（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。合力也作用在该点上，合力的大小和方向由这两个力为边所构成的平行四边形的对角线确定。或者说，合力矢等于两分力矢的几何和。

如图 1.2 所示，若以  $F$  表示分力  $F_1$  和  $F_2$  的合力，则有

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 \quad (1.1)$$

**推论 2 (三力平衡汇交定理)** 刚体受三个力作用而处于平衡时, 若已知其中两个力的作用线相交于一点, 则第三个力的作用线必通过此交点, 且此三个力在同一个平面内。

**证明** 设有不平行的三个力  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ , 分别作用在刚体上的 A、B、C 三点 (图 1.3)。已知刚体处于平衡, 且  $F_1$  与  $F_2$  两个力的作用线相交于 O 点。根据力的可传性原理, 可将力  $F_1$ 、 $F_2$  移至交点 O, 并由公理三求得其合力  $F_{12}$ 。因刚体处于平衡, 故力  $F_{12}$  与  $F_3$  为一对平衡力。由公理一知,  $F_3$  与  $F_{12}$  必然共线。于是, 力  $F_3$  的作用线必定在力  $F_1$  与  $F_2$  所构成的平面上, 并通过交点 O。

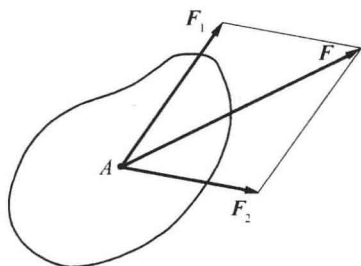


图 1.2

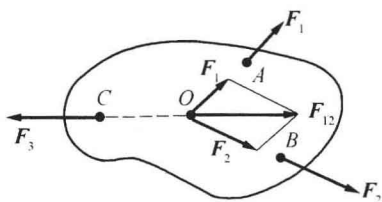


图 1.3

**公理四 (作用与反作用定律)** 两物体间相互作用的力总是同时存在, 它们大小相等、方向相反、作用线沿同一条直线且分别作用在两个相互作用的物体上。

**公理五 (刚化原理)** 变形体在某个力系作用下处于平衡, 若将此变形体刚化为刚体, 其平衡状态保持不变。

这个公理给出了将刚体的平衡理论应用到变形体的条件: 若变形体处于平衡状态, 则作用于其上的力系一定满足刚体的平衡条件, 即刚体的平衡条件对于变形体来说是必要条件。反过来, 满足了刚体的平衡条件, 变形体却不一定平衡。

### 1.3 约束和约束力

可以在空间自由运动而不受任何限制的物体称为**自由体**。例如, 空中的飞机, 飞行中的子弹、火箭等。工程实际中的大多数物体, 由于受到周围其他物体的限制而不能作任意的运动, 这样的物体称为**非自由体**。例如, 悬挂在钢索上的重物、安装在轴承中的电动机转子、在钢轨上行驶的火车, 都是非自由体。限制非自由体运动的周围物体称为**约束**。如上述的钢索对于重物、轴承对于转子、钢轨对于火车, 都是约束。

约束对于非自由体运动的限制，是通过力的作用来实现的。这种作用力称为**约束力**。除约束力外，物体所受的其他作用力，如重力、风力、切削力，它们往往是预先给定的或可以独立测定的，称为**主动力**。而约束力则无法预先独立确定，它必须根据约束的具体性质、主动力和物体的运动状态等来确定，属于被动力。约束力的作用点在物体间的相互接触处，约束力的方向总是与约束所能阻碍的运动方向相反。

下面介绍几种工程中常见的约束类型，并分析其约束力的特点。

### 1.3.1 光滑接触面约束

若两物体的接触表面之间可忽略摩擦视为理想光滑时，即属于这类约束。例如，机床中的导轨、润滑得很好的支承面，啮合齿轮的齿面。这类约束的特点是，

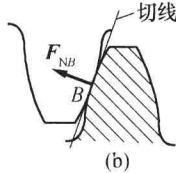
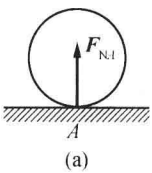


图 1.4

不论接触表面的形状如何，被约束的物体可以沿接触点的公切线方向自由滑动，也可以沿接触点的公法线方向脱离接触，但不能沿公法线方向压入接触面。因此光滑接触面约束的约束力必沿接触点的公法线方向而指向被约束的物体，如图 1.4 所示。

### 1.3.2 柔性体约束

属于这类约束的有绳索、链条、皮带等。当忽略其刚性，视为绝对柔软时，它们只能承受拉力而不能承受压力和抵抗弯曲。故只有当柔性体被拉直时才能起约束作用。因此，柔性体的约束力只能是拉力，方向沿着被拉直的柔性体而背离被约束的物体，如图 1.5 所示。

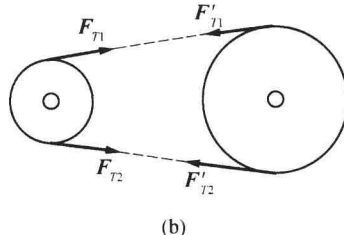
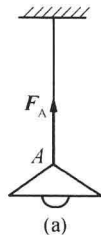


图 1.5

### 1.3.3 光滑圆柱形铰链约束

这类约束通常由一个圆柱形销钉插入构件的圆柱形孔而形成，如图 1.6 (a) 所示。略去摩擦，则实际上是两光滑圆柱面相接触。按照光滑接触面约束力的特

点, 销钉作用在构件上的力应沿圆柱面接触点  $A$  的公法线而指向构件。因此, 光滑圆柱形铰链的约束力沿接触点与轴心的连线而垂直于圆柱轴线。由于接触点  $A$  的位置仅仅从约束的构造本身无法预先确定, 因此在受力分析中, 通常用通过轴心  $O$  的两个正交分力来表示, 如图 1.6 (b) 所示, 图 1.6 (c) 为其简图。光滑圆柱形铰链约束只能限制物体沿径向的相对移动, 而不能限制物体绕铰链中心的相对转动。

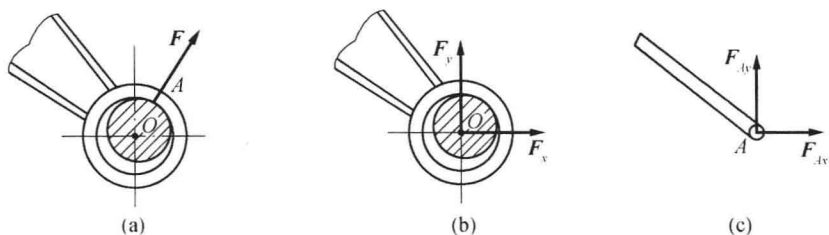


图 1.6

当用圆柱形销钉连接两个构件时, 则形成**中间铰**, 如图 1.7 所示。

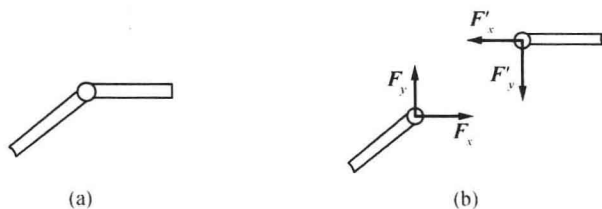


图 1.7

机器中常见的**向心轴承**, 也属于圆柱形铰链约束。只是这时轴承是约束, 而轴则是被约束的物体, 图 1.8 为其简图及其约束力。

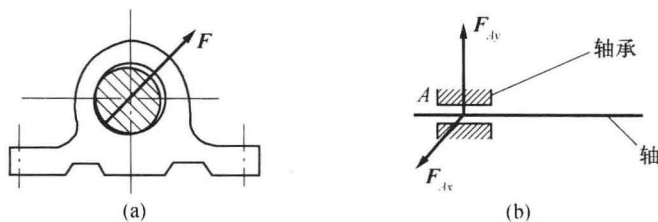


图 1.8

工程中常见的**固定铰链支座**和**滚动铰链支座**也属于光滑圆柱形铰链约束。所谓支座是把结构物支持在支承面上的装置。用光滑圆柱销钉把结构物与底座连



接，再把底座固定在支承面上，则构成固定铰链支座，其简图如图 1.9 (a) 所示。如果在支座和支承面之间装有辊轴，就构成滚动铰链支座，其简图如图 1.9 (b) 所示。由于有了辊轴，这种支座不能限制结构物沿支承面的切向运动，而只能限制垂直于支承面方向的运动。因此，滚动铰链支座的约束力必垂直于支承面。



图 1.9

### 1.3.4 其他约束

#### 1. 球铰链

工程实际中，常用到如图 1.10 (a) 所示的球铰链约束。它是通过球和球壳将两个构件连接在一起，但各构件可以绕球心作任意的相对转动。若构件的接触面光滑，则约束力必通过球心，但方向不能预先确定，一般可以用空间的三个正交的分力来表示，如图 1.10 (b) 所示。

#### 2. 止推轴承

止推轴承除了能限制轴的径向位移之外，还能限制轴沿轴向的位移。因此，它的约束力一般用空间的三个正交分力来表示，如图 1.11 所示。

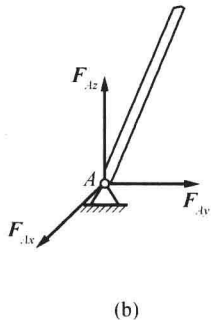
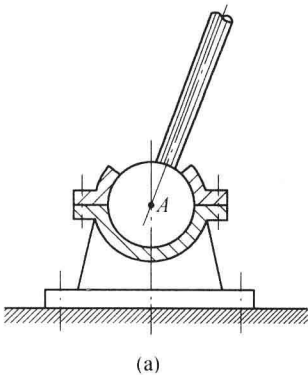


图 1.10

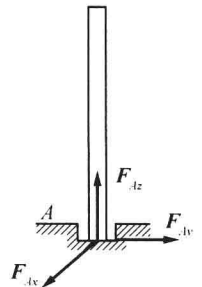


图 1.11