

高等院校工程力学基础教材

李慧剑 杜国君 主 编
胡宇达 边宇虹 王 平 副主编

Theoretical Mechanics

理论力学



科学出版社
www.sciencep.com

高等院校工程力学基础教材

理 论 力 学

李慧剑 杜国君 主 编
胡宇达 边宇虹 王 平 副主编

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,主要内容包括:静力学、运动学、动力学普遍定理、达朗贝尔原理、分析力学基础等。书中附有一定数量的思考题、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的教学用书,也可供其他专业选用或相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

理论力学/李慧剑,杜国君主编. —北京:科学出版社,2009

(高等院校工程力学基础教材)

ISBN 978-7-03-023995-2

I. 理… II. ①李…②杜… III. 理论力学—高等学校—教材 IV. O31

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 017581 号

责任编辑:童安齐 王晶晶

/ 责任校对:刘彦妮

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>

信洁彩色印装有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009年6月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2009年6月第一次印刷 印张:24 3/4

印数:1—3000

字数:499 000

定价:36.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62135763-8205(HF02)

版权所有,侵权必究

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

前 言

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”，并结合多年教学实践编写。本书适用于高等工科院校机械、土建、交通等专业“理论力学”课程的教学，并可供其他专业选用或相关工程技术人员参考。

本书在内容及编排上，注重由浅入深、循序渐进的原则，力求结构严谨、重点突出，注意对基本概念与基本理论的正确阐述。书中编入了一定数量的例题、习题和思考题，供读者学习选用，以便于巩固对基本内容的理解，加强对基本方法的训练。本书在编写过程中，参考了一些其他院校编写的相关教材，在此向这些作者表示感谢。

参加本书编写的作者有：李慧剑（第6章、第10章），杜国君（第4章、第5章），胡宇达（第11章、第12章、第13章），边宇虹（第14章、第15章、第16章），王平（第1章、第2章、第3章），田振国（第7章、第8章、第9章），余为（习题解答）。本书由李慧剑教授和杜国君教授担任主编，胡宇达教授、边宇虹教授和王平副教授担任副主编。

对于书中可能存在的缺点和错误，诚望读者批评指正。

编 者

2009年4月

目 录

前言

绪论	1
----------	---

第一篇 静 力 学

第 1 章 静力学公理与物体的受力分析	5
1.1 静力学的基本概念	5
1.2 静力学公理	6
1.3 约束与约束反力	9
1.4 受力分析与受力图	11
思考题	13
习题	14
第 2 章 平面汇交力系和平面力偶系	18
2.1 平面汇交力系合成与平衡的几何法	18
2.2 平面汇交力系合成与平衡的解析法	22
2.3 平面力偶理论	27
2.4 平面力偶系的合成和平衡方程	32
思考题	34
习题	36
第 3 章 平面任意力系	41
3.1 力的平移定理	41
3.2 平面任意力系向一点的简化	42
3.3 平面任意力系的平衡方程	46
3.4 静定与静不定的概念·物体系统的平衡	51
3.5 平面简单桁架的内力计算	56
思考题	60
习题	63

第4章 空间力系	73
4.1 空间汇交力系	73
4.2 空间力偶理论	79
4.3 力对轴之矩与力对点之矩	82
4.4 空间任意力系的简化	85
4.5 空间任意力系的平衡方程	89
4.6 重心	98
思考题	106
习题	107
第5章 摩擦	114
5.1 滑动摩擦和滚动摩阻	114
5.2 摩擦角和自锁现象	118
5.3 考虑摩擦时物体的平衡问题	120
思考题	126
习题	127

第二篇 运 动 学

第6章 点的运动学	135
6.1 确定点运动位置的基本方法	135
6.2 点的速度与加速度的矢量表示	137
6.3 点的速度与加速度的直角坐标表示	138
6.4 点的速度与加速度的弧坐标表示	141
6.5 确定点运动的其他方法	146
思考题	150
习题	151
第7章 刚体的简单运动	155
7.1 刚体的平行移动	155
7.2 刚体绕定轴转动	157
7.3 转动刚体上各点的速度和加速度	158
7.4 轮系的传动比	162
思考题	164
习题	165

第 8 章 点的合成运动	169
8.1 点的合成运动的几个基本概念	169
8.2 点的速度合成定理	172
8.3 牵连运动平动时点的加速度合成定理	175
8.4 牵连运动转动时点的加速度合成定理	179
思考题	185
习题	187
第 9 章 刚体的平面运动	195
9.1 刚体平面运动的概述和运动分解	195
9.2 确定平面图形内各点速度的基点法	198
9.3 确定平面图形内各点速度的瞬心法	202
9.4 基点法求解平面图形内各点的加速度	205
9.5 运动学综合应用举例	208
思考题	212
习题	215
 第三篇 动 力 学 	
第 10 章 质点动力学的基本方程	227
10.1 动力学的基本定律	227
10.2 质点的运动微分方程	228
10.3 质点动力学的两类基本问题	229
思考题	233
习题	234
第 11 章 动量定理	237
11.1 动量与冲量	237
11.2 动量定理	240
11.3 质心运动定理	244
思考题	247
习题	248
第 12 章 动量矩定理	252
12.1 质点和质点系的动量矩	252
12.2 动量矩定理	253

12.3	刚体绕定轴的转动微分方程	257
12.4	刚体对轴的转动惯量	260
12.5	质点系相对于质心的动量矩定理	267
12.6	刚体的平面运动微分方程	269
	思考题	272
	习题	273
第 13 章	动能定理	280
13.1	力的功	280
13.2	质点和质点系的动能	283
13.3	动能定理	285
13.4	势力场 · 势能 · 机械能守恒定律	290
13.5	功率 · 功率方程 · 机械效率	294
13.6	动力学普遍定理的综合应用	296
	思考题	300
	习题	301
	综合问题习题	307
第 14 章	达朗贝尔原理	312
14.1	达朗贝尔原理与惯性力	312
14.2	质点系的达朗贝尔原理	314
14.3	刚体惯性力系的简化	315
14.4	定轴转动刚体的轴承动反力 · 静平衡与动平衡概念	320
	思考题	321
	习题	322
第 15 章	分析静力学	326
15.1	刚体静力学与分析静力学比较	326
15.2	分析力学的基本概念	327
15.3	虚位移原理及其应用	332
15.4	用广义坐标表示的质点系平衡条件	337
15.5	质点系在势力场中的平衡条件	339
	思考题	342
	习题	342

第 16 章 分析动力学基础	346
16.1 引言	346
16.2 达朗贝尔-拉格朗日原理	347
16.3 拉格朗日方程	350
思考题	359
习题	359
习题答案	364
主要参考文献	383

绪 论

理论力学是研究物体机械运动一般规律的一门学科。

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的最简单、也是最常见的基本运动形态。自然界中的其他各种运动形态，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。由于物体平衡是物体机械运动的特殊形式，因此，理论力学也研究物体的平衡规律。但是必须指出，运动是物质的存在形式与固有属性，一切平衡都只是相对的和暂时的。

力学是自然科学中最古老的学科之一，它的产生和发展的过程，是人类对于机械运动认识深化的过程，是通过长期的生产实践和科学实验形成的一门科学。

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，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。

理论力学研究的内容是以伽利略和牛顿所建立的基本定律为基础，属于古典力学的范畴。近代物理学的进一步发展，指出了古典力学存在着局限性：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、解决实际工程和生活中提出的力学问题；另一方面，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、机械零件以及其他力学课程和专业课程，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。

为了便于研究，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其受力之间的关系。

第一篇 静 力 学

静力学研究物体受力作用时处于平衡状态的规律。

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，物体相对于地球处于静止或匀速直线运动的状态就称为平衡状态。在静力学中，将具体研究物体受力分析的基本方法、物体受力作用时的平衡条件以及力系的简化方法。这些知识不仅在研究物体的平衡状态时要用到，而且研究物体的运动状态发生变化时也要用到。

第 1 章 静力学公理与物体的受力分析

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，以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 刚体的概念

刚体，就是在任何情况下，其大小和形状都永远保持不变的物体。这一特征又表现为物体内任意两点间的距离始终是保持不变的。这是一个把实际物体经过抽象后所得到的理想模型。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。例如，一般机器中的轴，其正常工作时允许的最大挠度，通常都控制在两端轴承间距的万分之五以内（如 1m 长的轴，其最大挠度不超过 0.5mm），允许的最大扭转角为每米不超过 $0.5^{\circ} \sim 1^{\circ}$ 。这些微小的变形对所研究物体的平衡问题影响很小。这时若略去变形，对问题的最终结果并无多大影响，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化为刚体进行研究。这种抽象方法，就是抓住了事物主要矛盾的科学的抽象。

应该强调的是，把实际物体抽象化为刚体时，必须进行抽象的条件和使用的范围。一旦当变形这一因素成为所研究问题的主要因素时，即使变形很小，也不能把实际物体作为刚体来处理，而只能视为变形物体。

1.1.2 力的概念

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。通过进一步的观察和分析，发现这种情形还可以推广到其他无论是有生命还是无生命的物体中去，任何物体与物体之间都存在这样的相互作用。于是，撇开力的来源等非本质的因素，经过概括、抽象而形成了力的科学概念：**力是物体相互之间的机械作用，这种作用的结果，使得物体的机械运动状态发生了变化（包括变形）。**

需要注意的是，物体间的相互作用可以有完全不同的性质，如热的、电磁

的、化学的作用等等，而“力”只是指物体间的机械作用，即那种只改变物体机械运动状态的作用。

力使物体的整体运动状态发生变化的作用效应称为力的外效应，而力使物体产生变形的效应称为力的内效应。在理论力学中，只研究力的外效应。

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

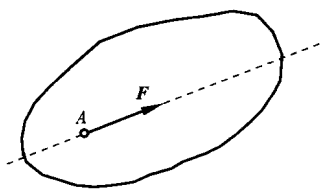


图 1.1

的方向；③力的作用点。力的三个要素可以用一个有向线段来表示：线段的长短按一定比例表示力的大小；线段的方向表示力的方向；线段的起点（或终点）表示力的作用点（图 1.1）。力是矢量。（本书中用黑体字母 F 来表示矢量，其对应的白体字母 F 则表示矢量的大小）。

为了度量力的大小，必须确定力的单位。在国际单位制中，力的单位是牛顿，记为 N 。在过去沿用的工程单位制中，力的单位是公斤力，记为 kgf 。两者的换算关系为

$$1\text{kgf} \approx 9.8\text{N}$$

与力矢量相重合的直线，称为力的作用线。作用在同一物体上的群力，称为力系。如果力系中各个力共同作用的效果是使得物体处于平衡状态，则这种力系称为平衡力系。如果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。如果一个力系与一个力等效，则此力就称为该力系的合力，而力系中的各个力，也分别成为此合力的分力。

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（二力平衡公理） 作用在刚体上的两个力，使刚体处于平衡的必要与充分条件是，这两个力的大小相等、方向相反且沿同一直线作用。

公理一揭示了作用在刚体上最简单的力系的平衡条件。必须注意，这里说的是刚体的平衡，对于非刚体来说，上述条件只是必要条件而不是充分条件。例如，软绳两端受等值、反向、共线的拉力作用时可处于平衡，但若受到等值、反向、共线的压力时，就不能平衡了。

工程上常遇到简化后只受两力作用而处于平衡的构件，称为二力构件（图 1.2）。根据公理一，这两个力的作用线必与两力作用点的连线重合。

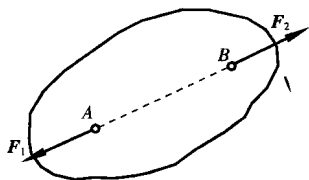


图 1.2

公理二(加减平衡力系公理) 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。

这个公理为研究力系的等效替换与力系的简化提供了重要的理论依据。

推论(力在刚体上的可传性原理) 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 1.3 (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 1.3 (b) 所示。由公理二, 这不影响原力 F 对刚体的作用效果。根据公理一, F 与 F_2 也是平衡力系, 因此, 可以将他们减去而不改变作用效果, 如图 1.3 (c) 所示。于是, 力 F_1 与力 F 等效。这就证明了力在刚体上的可传性。

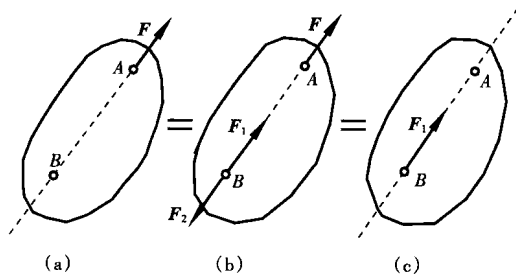


图 1.3

由此可知, 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, 这种矢量就称为滑动矢量。

必须指出, 证明力的可传性时应用了公理一和公理二, 因此力的可传性只适用于刚体。

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, 合力的大小和方向可以由以这两个力为边所构成的平行四边形的对角线来表示。

如图 1.4 所示, 若以 F 表示分力 F_1 和 F_2 的合力, 则该法则可以写成如下的矢量表达式

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

即合力矢等于两分力矢的几何和。

这个公理表明了最简单的力系简化规律, 它是较复杂力系简化的基础。同时, 这个公理也给出了将一个力分解为两个分力的依据。

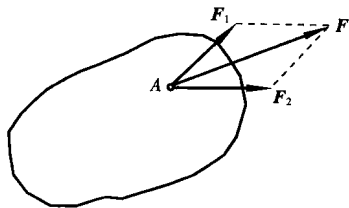


图 1.4

推论(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 1.5）。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。

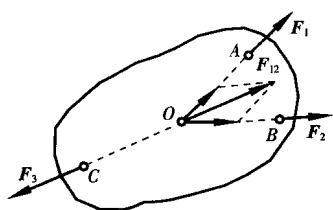


图 1.5

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 。

三力平衡汇交定理给出了不平行的三个力平衡时的必要条件，当刚体受互不平行的三个力作用而处于平衡时，常可利用这个关系来确定未知力的作用线方位。

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的，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不同的物体上。

这个公理表明，两物体间相互作用的作用力与反作用力，总是成对出现的。它们相互对立、相互依存，同时存在、同时消失。这是力学中的一个普遍规律，也是分析物体间受力关系时必须遵循的原则。根据这个公理，我们才能从一个物体的受力分析过渡到相邻物体的受力分析，为研究由多个物体组成的物体系统的问题建立了基础。

必须强调指出，虽然作用力与反作用力两者等值、反向、共线，但它们并非作用在同一物体上，而是分别作用在两个不同的物体上。因此，不能把它们看成是一对平衡力（图 1.6）。

公理三和公理四不仅适用于刚体，也适用于变形体。

公理五(刚化公理) 若变形体在某一个力系作用下处于平衡，则将此变形体看成刚体时，其平衡状态保持不变。

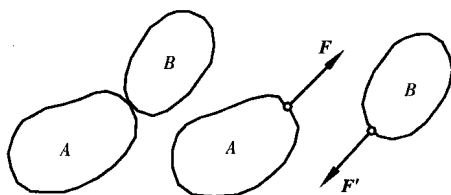


图 1.6

这个公理给出了将刚体的平衡理论

应用到变形体的条件：变形体若处于平衡状态，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也是必要的。反过来，满足了刚体的平衡条件，变形体却不一定是平衡的。关于这一点，前面已就软绳两端受力的情况做过分析。对于变形体的平衡来说，除了应满足刚体的平衡条件外，还必须满足与变形体有关的某些附加条件。

公理五指出，已处于平衡状态的变形体，一般可以将其视为刚体来进行研究。所以这个公理建立了刚体力学与变形体力学之间的联系。