

高等学校规划教材

理论力学

苏荣华 刘 杰 张智慧 主编

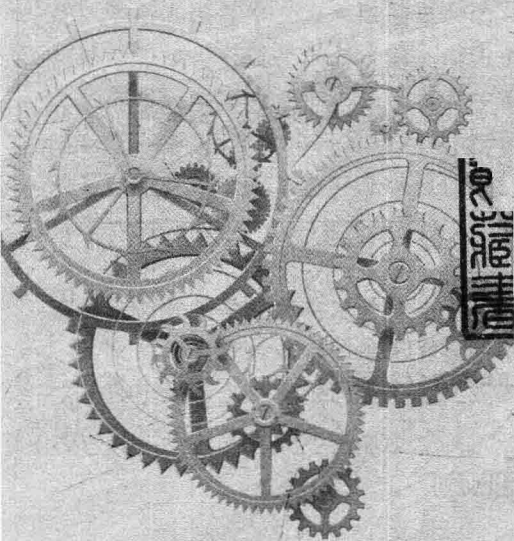


東北大學出版社
Northeastern University Press

高等学校规划教材

理论力学

苏荣华 刘 杰 张智慧 主编



东北大学出版社

· 沈 阳 ·

© 苏荣华 刘 杰 张智慧 2018

图书在版编目 (CIP) 数据

理论力学 / 苏荣华, 刘杰, 张智慧主编. — 沈阳 :
东北大学出版社, 2018. 7

ISBN 978 - 7 - 5517 - 1959 - 9

I. ①理… II. ①苏…②刘…③张… III. ①理论力
学 IV. ①O31

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 173193 号

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路三号巷 11 号

邮编: 110819

电话: 024 - 83687331 (市场部) 83680267 (社务部)

传真: 024 - 83680180 (市场部) 83680265 (社务部)

网址: <http://www.neupress.com>

E-mail: neuph@neupress.com

印 刷 者: 沈阳市第二市政建设工程公司印刷厂

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 170mm × 240mm

印 张: 21.25

字 数: 417 千字

出版时间: 2018 年 7 月第 1 版

印刷时间: 2018 年 7 月第 1 次印刷

责任编辑: 张德喜

责任校对: 东 山

封面设计: 潘正一

ISBN 978 - 7 - 5517 - 1959 - 9

定 价: 48.00 元

前 言

本书根据教育部力学基础教学指导委员会制定的《理论力学课程教学基本要求》进行编写，主要用作我国普遍高等院校理工类专业公共平台课及专业基础课的教材，也适用于高职高专、成人高校相应专业学生的自学和函授，同时可供有关工程技术人员学习参考。

本教材适宜教学学时数为48~64学时。

本书在编写中，力求做到逻辑清晰、表述清楚，由浅入深，增强可读性；同时确保理论严谨、概念清晰、论述合理、易教易学。

本书的编写由辽宁工程技术大学理论与应用力学教研室教师完成，具体分工如下：第1、4章由孙维吉编写；第2、13章由高菲编写；第3章由代树红编写；第5、6、7章由刘杰编写；第8章由苏荣华编写；第9、12章由张华宾编写；绪论和第10、11章由张智慧编写。全书由苏荣华、刘杰、张智慧统稿。

本书编写过程中，借鉴了哈尔滨工业大学、清华大学、西北工业大学、青岛科技大学等学校所编写的理论力学教材中的宝贵经验，在此表示感谢。

宋维源教授对本书的编写提出了很多有益的建议，在此深表感谢。

由于编者水平有限，不妥之处或错误在所难免，恳请广大读者提出宝贵意见，以便不断改进和完善。

编 者

2018年5月

目 录

0 绪 论	1
0.1 理论力学的研究内容	1
0.2 学习理论力学的任务	2
0.3 理论力学的研究方法	2
0.4 理论力学在工科各专业中的地位 and 作用	3

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 静力学公理	5
1.2 约束和约束力	7
1.2.1 光滑接触面约束	8
1.2.2 柔索约束	8
1.2.3 光滑铰链约束	8
1.2.4 链杆约束	11
1.2.5 其他约束	11
1.3 物体的受力分析和受力图	13
本章小结	18
思考题	18
习 题	19
第2章 平面力系	22
2.1 平面汇交力系	22
2.1.1 平面汇交力系合成的几何法	22
2.1.2 平面汇交力系平衡的几何法	24
2.1.3 平面汇交力系合成与平衡的解析法	25

2.2 平面力偶系	29
2.2.1 力对点之矩(力矩)	29
2.2.2 合力矩定理	30
2.2.3 力偶	31
2.2.4 平面力偶系的合成和平衡	34
2.3 平面任意力系的简化	35
2.3.1 力线平移定理	35
2.3.2 平面任意力系向一点简化·主矢和主矩	36
2.3.3 平面任意力系简化结果的分析与合力矩定理	38
2.4 平面任意力系的平衡条件和平衡方程	40
2.4.1 二矩式的平衡方程	40
2.4.2 三矩式的平衡方程	41
2.5 物体系统的平衡·静定和静不定问题	43
2.5.1 静定与静不定问题	43
2.5.2 物体系统的平衡	44
2.6 平面桁架的内力计算	48
2.6.1 节点法	49
2.6.2 截面法	51
2.6.3 特殊杆件的内力判断	52
本章小结	52
思考题	55
习题	56

第3章 空间力系 65

3.1 空间汇交力系	65
3.1.1 力在直角坐标轴上的投影	65
3.1.2 空间汇交力系的合成与平衡	66
3.2 力对点的矩和力对轴的矩	68
3.2.1 力对点的矩以矢量表示——力矩矢	68
3.2.2 力对轴的矩	69
3.2.3 力对点的矩与力对通过该点的轴的矩间关系	71
3.3 空间力偶系	72
3.3.1 力偶矩以矢量表示——力偶矩矢	72
3.3.2 空间力偶等效定理	72

3.3.3 空间力偶系的合成与平衡条件	73
3.4 空间任意力系的简化	75
3.4.1 空间任意力系向一点的简化	75
3.4.2 空间任意力系的简化结果分析	78
3.5 空间任意力系的平衡条件和平衡方程	80
3.5.1 平衡条件和平衡方程	80
3.5.2 约束及其类型	81
3.6 物体的重心	83
3.6.1 平行力系中心	84
3.6.2 物体重心的确定方法	85
本章小结	88
思考题	89
习 题	90
第4章 摩 擦	96
4.1 滑动摩擦	96
4.1.1 静摩擦力和静滑动摩擦定律	96
4.1.2 动摩擦力	98
4.2 摩擦角和自锁现象	98
4.2.1 全约束力与摩擦角	98
4.2.2 自锁现象	99
4.2.3 摩擦角应用举例	100
4.3 考虑摩擦时物体的平衡问题	101
4.4 滚动摩阻的概念	109
本章小结	112
思考题	113
习 题	114

第二篇 运动学

第5章 点的运动学	121
5.1 矢量法	121
5.1.1 点的运动方程·轨迹	121

5.1.2 点的速度	121
5.1.3 点的加速度	122
5.2 直角坐标法	122
5.2.1 点的运动方程·轨迹	122
5.2.2 点的速度	123
5.2.3 点的加速度	123
5.3 自然法	127
5.3.1 弧坐标·运动方程	127
5.3.2 自然轴系	128
5.3.3 点的速度	128
5.3.4 点的加速度	130
本章小结	134
思考题	135
习 题	137
第6章 刚体的基本运动	140
6.1 刚体的平行移动	140
6.2 刚体的定轴转动	141
6.3 定轴转动刚体内各点的速度和加速度	143
6.4 角速度和角加速度的矢量表示	146
本章小结	148
思考题	149
习 题	149
习 题	149
第7章 点的合成运动	152
7.1 基本概念	152
7.1.1 一点·二系·三运动	153
7.1.2 运动之间的关系	153
7.2 点的速度合成定理	155
7.3 点的加速度合成定理	160
7.3.1 牵连运动为平动时的加速度合成定理	160
7.3.2 牵连运动为定轴转动时的加速度合成定理	164
本章小结	167

思考题	167
习 题	168
第 8 章 刚体的平面运动	174
8.1 刚体平面运动概述	174
8.2 平面运动的分解与刚体的平面运动方程	175
8.3 平面图形内各点的速度	176
8.3.1 基点法	177
8.3.2 速度投影定理	178
8.3.3 速度瞬心法	180
8.4 平面图形内各点的加速度	184
本章小结	191
思考题	192
习 题	194

第三篇 动力学

第 9 章 质点动力学基础	202
9.1 动力学基本定律	202
9.1.1 牛顿运动定律	202
9.1.2 惯性参考系	203
9.2 质点的运动微分方程	203
9.2.1 质点运动微分方程	203
9.2.2 质点动力学两类基本问题	204
9.2.3 质点动力学问题的一般解题步骤	205
本章小结	209
思考题	210
习 题	210
第 10 章 动量定理	212
10.1 质点系的质心、内力与外力	212
10.1.1 质点系的质心	212
10.1.2 质点系的内力与外力	213

10.2 动量与冲量	214
10.2.1 动 量	214
10.2.2 冲 量	216
10.3 动量定理	216
10.3.1 质点的动量定理	216
10.3.2 质点系的动量定理	217
10.4 质心运动定理	219
10.4.1 质心运动定理	219
10.4.2 质心运动守恒定律	221
本章小结	223
思考题	224
习 题	225
第 11 章 动量矩定理	229
11.1 质点和质点系的动量矩	229
11.1.1 质点的动量矩	229
11.1.2 质点系的动量矩	229
11.2 动量矩定理	230
11.2.1 质点的动量矩定理	231
11.2.2 质点系的动量矩定理	231
11.2.3 动量矩守恒定律	235
11.3 刚体绕定轴的转动微分方程	236
11.4 刚体对轴的转动惯量	238
11.4.1 简单形状物体的转动惯量计算	239
11.4.2 回转半径(或惯性半径)	240
11.4.3 平行轴定理	240
11.5 刚体平面运动微分方程	245
本章小结	248
思考题	249
习 题	251
第 12 章 动能定理	256
12.1 力的功	256
12.1.1 常力的功	256

12.1.2 变力的功	256
12.1.3 常见力的功	257
12.2 质点和质点系的动能	262
12.2.1 质点和质点系的动能	262
12.2.2 刚体的动能	262
12.3 动能定理	267
12.3.1 质点及质点系的动能定理	267
12.3.2 功率及功率方程	268
* 12.4 势力场·机械能守恒定律	273
12.4.1 势力场	273
12.4.2 势能	273
12.4.3 机械能守恒定律	274
12.5 动力学普遍定理的综合应用	275
本章小结	283
思考题	284
习 题	285
第 13 章 达朗贝尔原理	293
13.1 惯性力·质点的达朗贝尔原理	293
13.1.1 惯性力	293
13.1.2 质点的达朗贝尔原理	294
13.2 质点系的达朗贝尔原理	296
13.3 刚体惯性力系的简化	297
13.3.1 刚体作平动	298
13.3.2 刚体作定轴转动	298
13.3.3 刚体作平面运动	300
13.4 绕定轴转动刚体的轴承动约束力	303
本章小结	306
思考题	307
习 题	308
习题参考答案	314
参考文献	325

0 绪 论

0.1 理论力学的研究内容

理论力学是一门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。机械运动是物质运动最简单、最基本的形式。平衡是机械运动的特殊情况。

理论力学研究的内容是远小于光速的宏观物体的机械运动。它以伽利略和牛顿总结的基本定律为基础,属于古典力学的范畴。古典力学的规律不适用于接近光速的宏观物体的运动,也不适用于微观粒子的运动(前者可用相对论力学,而后者可用量子力学来研究),这说明古典力学有其局限性。但是,在一般工程技术问题中所研究的物体,都是运动速度远小于光速的宏观物体,因此,用古典力学来解决,不仅方便,而且能够保证足够的精确性,所以,古典力学至今仍有很大的实用意义。理论力学起源于物理学的一个分支,但它的内容已大大超过了物理学的内容。理论力学不仅建立了与力学有关的各种基本概念和理论,而且要求能运用理论知识对从实际问题中抽象出来的力学模型进行分析和计算。所谓力学模型就是对自然界和工程中的复杂的研究对象的合理简化。

研究物体机械运动的普遍规律有两种基本方法,从而形成理论力学的两大体系:一是用矢量的方法研究物体机械运动的普遍规律,称为矢量力学,其中的许多力学概念,例如速度、加速度、角速度、角加速度、力和力矩等都是以矢量形式表示的,矢量力学的代表人物是牛顿;二是用数学分析的方法进行研究,称为分析力学,其主要特点是引进标量形式的广义坐标、能量和功,采用纯粹的分析的方法,摆脱以矢量为特征的几何方法,分析力学的代表人物是拉格朗日和哈密顿。本书以矢量研究方法为主,也会有一部分分析力学的内容。

理论力学的理论既抽象而又紧密结合实际,研究的问题涉及面广,系统性、逻辑性强。理论力学的内容由静力学、运动学和动力学三部分组成。静力学研究力系的简化以及物体在力系作用下的平衡规律;运动学从几何学的观点研究物体的运动;动力学则研究物体的运动与作用于物体的力之间的关系。

0.2 学习理论力学的任务

与一切科学相同,对力学基本规律的研究源于对实际现象的观察和归纳。在生产活动中,人类很早就开始积累经验并逐渐形成初步的力学知识。理论力学是一门理论性很强的技术基础课。在日常生活和工程技术问题中,广泛存在着机械运动。值得一提的是我国的墨翟(墨子)在《墨经》中已经对力和重心的概念作了最早的记载。关于力,《墨经》记载为“力,刑之所以奋也”。掌握机械运动的客观规律,就能够理解机械运动现象,把这些规律应用到生产实践中去,为祖国建设服务。

在土木、水利、机械的许多工程实际问题中,都可以直接应用理论力学的基本理论去解决,如土木、水利工程中的平衡问题,传动机械的运动分析,机器和机械设计中的振动问题等。至于一些比较复杂的工程实际问题,则需要用书本中的理论和其他专门的知识共同解决。在许多尖端科学技术问题中,如人造地球卫星和载人航天器的发射、运行等,更包含了许多动力学问题。理论力学的知识,是研究、解决这些复杂问题的不可缺少的基础。

理论力学研究力学中最普遍、最基本的规律,是学习一系列后续课程的基础。很多工程类其他专业的课程,如材料力学、结构力学、流体力学、振动理论、机械原理等课程,都要用到理论力学的知识。

0.3 理论力学的研究方法

理论力学的研究方法遵循辩证唯物主义认识论的实践、认识、再实践的循环发展过程。

进行现场观察和实验是认识力学规律的重要实践性环节。将实践过程中所得结果,利用抽象化的方法,加以分析、归纳、综合,可得到一些最普遍的公理或定律,再通过严格的数学推演,可得到运用于工程的力学公式。由基本概念和基本定律导出的理论力学定理和公式,必须熟练地掌握。演算一定数量的习题,把学到的理论知识不断地运用到实践中去,是巩固和加深理解所学知识的重要方法和手段。

自然界与各种工程中涉及机械运动的物体有时是很复杂的,理论力学研究其机械运动时,必须忽略一些次要因素的影响,对其进行合理的简化,抽象出

不同的力学模型。在建立力学模型的基础上,从基本定律出发,用数学演绎和逻辑推理的方法,得出正确的具有理论意义和实践价值的定理和结论,在更高的水平上指导实践,从而推动生产的发展。

数学方法在理论力学的发展中起重要的作用。由于计算机的飞速发展和广泛应用,除传统的力学研究方法(理论方法和实验方法)外,又增加了一种新的研究方法,即计算机分析方法。对于一些较为复杂的力学问题,人们可以借助计算机推导那些难以导出的公式,利用计算机整理数据、绘制实验曲线、显示图形等。如钱学森先生所言,“可以展望,力学加电子计算机将成为工程新设计的主要手段”。

0.4 理论力学在工科各专业中的地位和作用

“理论力学”是工科各类专业的重要技术基础课,对于建筑工程、桥梁、航天、机械、汽车等专业尤为重要。它为建筑和各类机械的设计、专业设备及机器的机械运动分析和强度计算提供必要的理论基础。

一些日常生活中的现象和工程技术问题,可直接运用理论力学的基本知识去分析研究。比较复杂的问题,则需要用理论力学知识结合其他专业知识进行研究。所以学好理论力学知识,可为解决工程实际问题打下基础。

第一篇 静力学

引言

静力学是研究物体在力系作用下平衡规律的科学。

在静力学中所研究的物体都认为是刚体。**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。

力，是物体间相互的机械作用，这种作用会使物体的机械运动状态发生变化。

研究表明，力对物体的作用效果决定于三个要素：力的大小、方向和作用点。力一般以矢量形式表示，本书中黑体字母 $\boldsymbol{F}$ 表示力矢量，而普通字母 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。

平衡，是指物体相对于惯性参考系（如地面）处于静止或保持匀速直线运动的状态。

静力学中，主要研究以下 3 个问题：

1. 物体的受力分析

分析某个物体共受几个力，以及每个力的大小、方向和作用位置。

2. 力系的等效替换（或简化）

如果将作用在物体上的一个力系可以用一个与它等效的力系来替换，这两个力系互为等效力系。如果用一个简单力系等效替换一个复杂力系，称为力系的简化。如果一个力与某力系等效，则称此力为该力系的合力，而该力系的各力称为此合力的分力。

3. 建立各种力系的平衡条件

力系的平衡条件是指物体处于平衡状态时，作用于其上的力系必须满足的条件。满足平衡条件的力系称为**平衡力系**。

力系的平衡条件在工程中有着十分重要的意义，是设计结构、构件和机械零件时静力计算的基础。因此，静力学在工程中有着广泛的应用。

第1章 静力学公理和物体的受力分析

本章将阐述静力学公理及推论。介绍静力学中的几个基本概念，分析工程中几种常见的约束类型及约束力，进一步对物体进行受力分析。

1.1 静力学公理

公理是人们在生活和生产实践中长期积累的经验总结，又经过实践反复检验，被确认是符合客观实际的最普通、最一般的规律。

公理1 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。合力的作用点也在该点，合力的大小和方向，由这两个力为邻边构成的平行四边形的对角线确定，如图1-1 (a)所示。或者说，合力矢等于这两个力矢的几何和，即

$$\mathbf{R} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2$$

也可另作一力三角形，求两汇交合力的大小和方向（即合力矢），如图1-1(b)、(c)所示。这个公理是复杂力系简化的基础。

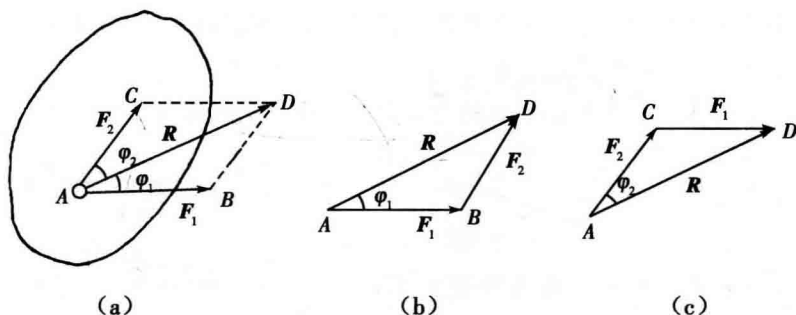


图 1-1

公理2 二力平衡公理

作用在一个刚体上的两个力（如 $\mathbf{F}_1$ 与 $\mathbf{F}_2$ ），使刚体保持平衡的必要和充分条件是：这两个力的大小相等，方向相反，且作用线在同一直线上。简记为：等值、反向、共线、共体。

这个公理表明了作用于刚体上最简单力系平衡时所必需满足的条件。

公理3 加减平衡力系原理

在作用于刚体上的任意已知力系上增加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。

这个公理是研究力系等效替换的重要依据。

推论1 力的可传性

作用于刚体上某点的力，可以沿着它的作用线移到刚体内任意一点，并不改变该力对刚体的作用。

证明：在刚体上的点 A 作用力 F ，如图 1-2 (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 $F = F_2 = -F_1$ ，如图 1-2 (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 1-2 (c)，即原来的力 F 沿其作用线移到了点 B 。

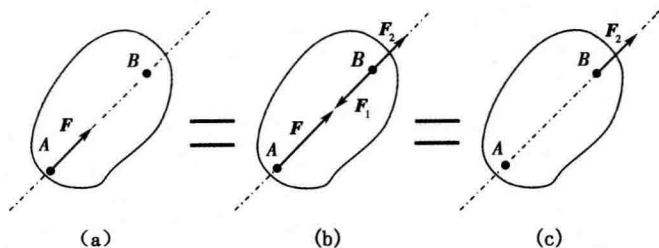


图 1-2

由上可知，对于刚体来说，力的作用点已不是力作用效果的要素，它已被作用线所代替。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。

推论2 三力平衡汇交定理

作用于刚体上三个互相平衡的力，若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。

证明：如图 1-3 所示，在刚体的 A , B , C 三点上，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 F_3 应与 F_{12} 平衡。由于两个力平衡必需共线，所以力 F_3 必定与力 F_1 和 F_2 共面，且通过 F_1 和 F_2 的交点 O 。于是定理得证。

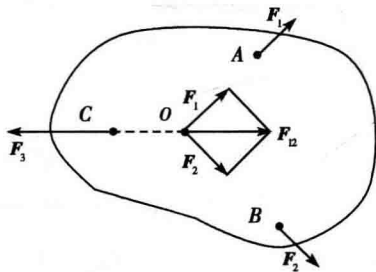


图 1-3