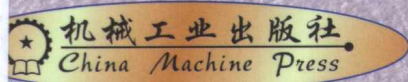


普通高等教育规划教材

理论力学

(中学时)

贾启芬 刘习军 主编



高中物理竞赛教程(第2版)

理论力学

(中学3时)

黄伯荣 编 陈永年 主编

普通高等教育规划教材

理 论 力 学

(中 学 时)

主编 贾启芬 刘习军
参编 曹树谦 丁 千 吴志强
主审 张琪昌



机 械 工 业 出 版 社

本书是天津大学国家工科基础力学“教学基地”的研究成果之一。

全书共三篇,分别讲述刚体静力学、运动学和动力学的基本原理和实际应用。书中贯穿牛顿力学和分析力学两条主线,重点介绍最具有理论力学课程特点的基本内容。以不同层次和角度论述了基本概念、基本公式和基本方法。

本书采用模块式结构,内容丰富,通俗易懂,由浅入深,以务实、应用为根本。可用于工科高等院校各专业及高职、高专各专业的理论力学中学时课程使用,同时也供工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

理论力学/贾启芬,刘习军主编. —北京:机械工业出版社, 2002.7

普通高等教育规划教材

ISBN 7-111-10505-2

I. 理… II. ①贾…②刘… III. 理论力学-高等教育-教材 IV. 031

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第044720号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:季顺利 版式设计:冉晓华 责任校对:张莉娟

封面设计:姚毅 责任印制:闫焱

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2002年8月第1版·第1次印刷

1000mm×1400mm B5·10.625印张·414千字

0 001—5 000册

定价:23.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010) 68993821、68326677-2527

封面防伪标均为盗版

前 言

本教材是作者在近几年教学改革研究、实践的基础上,结合天津大学理论力学教研室几代人教学经验编写而成。本教材适合于中学时的《理论力学》课程,以面向 21 世纪高等教育改革的要求为主要目标。本书的显著特点是:

1. 教材理顺了将理论力学作为一门技术基础课所应涵盖的主要内容及在培养学生能力方面的地位和作用。内容包含静、运、动三个部分。理论力学所涉及的力学规律一方面具有相对的稳定性;另一方面现代力学的研究又以前所未有的方式将经典力学规律与计算机分析相结合,以解决现代工程问题,也使经典力学内容的重要程度发生了变化。因此,教材强化了静力学、运动学和动力学过程分析的程式化教学模型的建立。

2. 为突出培养学生面对工程正确建立模型的能力及正确处理力学模型以得到力学性态的能力。教材中增加了大量从工程实际中简化而来的习题及在自然界和日常生活中的问题,充分发挥力学课程对培养这种能力所具有的得天独厚的条件,特别是要求学生自己选择研究对象并列写微分方程的习题比比皆是,这种解题方法是对学生习惯于运用公式求解方法的一个飞跃,迈上一个新台阶。

3. 反映近代科学技术和工程实际的发展,发挥实验在课程教学中不可替代的地位和作用。适应 21 世纪的发展以及力学与其他学科交叉综合的特点,增加综合型、设计型和探索型实验内容。

4. 本教材适用于中学时理论力学课程类型,是为高等工业学校各类学生编写的教材。符合各专业对理论力学课程标准大纲。它既广泛联系工程实际,又适应高等工科应用类专业的教育,是教学活动、学科知识和学习经验的综合反映,在课程内容的取舍和构造方式上,具有针对性、应用性和综合性。

本教材分为三篇,共 14 章。第 1~4 章介绍了刚体静力学的主要理论应用;第 5~7 章重点讨论了运动学基础和点的合成运动、刚体的平面运动,为动力学的研究打下基础;第 8~14 章分别对牛顿定律、普遍定理以及分析力学基础进行了论述。一般工科院校中学时类型的理论力学课程,使用本教材可以讲授全部内容;少学时的理论力学课程可选用本教材的部分内容。

本教材由天津大学理论力学教研室教师编写,其具体分工是:曹树谦负责第 1、2 两章的编写,吴志强负责第 3、4 两章的编写,贾启芬负责第 5、6、7、9 四章的编写,刘习军负责第 10~13 四章的编写,丁千负责第 8、14 两章的编写。总体框架、前言、绪论和全书的统稿由贾启芬和刘习军负责。

天津大学理论力学教研室的张琪昌、叶敏参与了课程体系和内容的讨论。张琪昌教授担任本教材的主审。张文德同志对有关实验内容提出建议，郎作贵同志参加了文字、图表的编辑工作。在此谨向他们致以衷心的感谢。本教材在编写过程中，参考了国内外一些优秀教材，并选用了其中的部分例题和习题，在此也向这些教材的编者一并致谢。

限于水平，有错误和不妥之处，望读者不吝指正。

编 者

2002 年 3 月于天津大学

主要符号表

符号	量的名称	符号	量的名称
a	加速度	g	重力加速度
a_s	绝对加速度	S	冲量
a_c	牵连加速度	S_x, S_y, S_z	冲量在 x, y, z 轴上的投影
a_r	相对加速度		
a_C	科里奥利加速度(科氏加速度)	I	转动惯量
a_τ	切向加速度	k	弹簧刚度系数
a_n	法向加速度	L_O	质点系对点 O 动量矩
a_{BA}^τ	点 B 相对于基点 A 的切向加速度	L_x, L_y, L_z	质点系对 x, y, z 轴的动量矩
a_{BA}^n	点 B 相对于基点 A 的法向加速度	m	质量
a_r	径向加速度	m_{eq}	等效质量
a_φ	横向加速度	M_O	力系对点 O 的主矩
A	面积	$M_O(F)$	力 F 对点 O 之矩
c	粘阻系数	M	力偶矩
C	质心, 重心	M_x, M_y, M_z	力系对 x, y, z 轴的主矩
d	力偶臂, 直径, 距离	M_f	滚动阻力偶
e	恢复因数, 偏心距	n	转速
E	机械能, 弹性模量	P	功率
f	频率, 静摩擦因数	K	动量
f'	动摩擦因数	q	分布载荷
F	力	$q_1, q_2, \dots, q_N$	广义坐标
F_T	柔性约束力	$F_{Q1}, F_{Q2}, \dots, F_{QN}$	广义力
F_N	法向约束力	R, r	半径
F_R	主矢, 合力, 阻尼力		
$F_{Ax} F_{Ay}$	A 处的约束力分量	r	位置矢量(位矢)
F_I	达朗贝尔惯性力(惯性力)	s	路程, 弧长, 弧坐标
F_{Ic}	牵连惯性力	t	时间
F_{Ic}	科里奥利力(科氏力)	T	周期, 动能
		T_d	衰减振动周期
		ΔE	能量损失
		v	速度
		v_a, v_c, v_r	绝对速度, 牵连速度, 相对速度

符号	量的名称	符号	量的名称
v_r, v_φ	径向速度, 横向速度	ρ	曲率半径, 回转半径, 密度
v_{BA}	平面图形上点 B 相对基 点 A 的速度	ζ	阻尼比
V	势能, 体积	λ	频率比
W	功	ω	角速度, 角频率
W	重量	ω_0	固有频率
ε	角加速度	$\omega_x, \omega_y, \omega_z$	角速度沿 x, y, z 轴的分 量
δ	滚动摩阻因数		

目 录

前言

绪 论	1
-----------	---

第一篇 静 力 学

引 言	5
-----------	---

第 1 章 静力学基础	7
-------------------	---

1.1 力与力的投影	7
1.2 力矩与力偶	10
1.3 约束与约束力	14
1.4 物体的受力分析和受力图	20
习 题	24

第 2 章 力系的简化	29
-------------------	----

2.1 汇交力系	29
2.2 力偶系	30
2.3 任意力系	31
2.4 平行力系与重心	40
习 题	45

第 3 章 力系的平衡	48
-------------------	----

3.1 平面力系的平衡	48
3.2 静定问题与超静定问题	53
3.3 物系平衡问题的应用	54
3.4 空间力系的平衡	59
习 题	62

第 4 章 静力学应用问题	70
---------------------	----

4.1 平面静定桁架	70
4.2 摩 擦	75
4.3 考虑滑动摩擦的平衡问题	81
习 题	84

第二篇 运 动 学

引 言	89
第 5 章 点的一般运动和刚体的基本运动	91
5.1 点的运动的表示法	91
5.2 刚体的基本运动	102
5.3 定轴轮系的传动比	108
5.4 以矢量表示刚体的角速度和角加速度 以矢积表示点的速度和加速度	110
习 题	112
第 6 章 点的合成运动	117
6.1 点的绝对运动、相对运动和牵连运动	117
6.2 点的速度合成定理	118
6.3 牵连运动为平移时点的加速度合成定理	122
6.4 牵连运动为转动时点的加速度合成定理	124
习 题	128
第 7 章 刚体的平面运动	135
7.1 刚体平面运动的运动方程	135
7.2 求平面图形内各点速度的基点法	138
7.3 求平面图形内各点速度的瞬心法	140
7.4 平面图形内各点的加速度	146
习 题	151

第三篇 动 力 学

引 言	157
第 8 章 动力学基础	159
8.1 牛顿定律	159
8.2 质点的运动微分方程	161
8.3 质点动力学的两类基本问题	161
8.4 质点的相对运动微分方程	164
8.5 质点系的基本惯性特征	169
习 题	175
第 9 章 动能定理	179
9.1 力的功	179

9.2 质点的动能定理	183
9.3 质点系和刚体的动能	184
9.4 质点系的动能定理	186
9.5 功率 功率方程	191
9.6 势力场 势能 机械能守恒定律	193
习 题	195
第 10 章 动量定理	201
10.1 动 量	201
10.2 力的冲量	202
10.3 动量定理	203
10.4 质心运动定理	208
习 题	215
第 11 章 动量矩定理	222
11.1 动量矩定理	222
11.2 刚体绕定轴转动的微分方程	225
11.3 质点系相对于质心的动量矩定理	231
11.4 刚体平面运动微分方程	232
11.5 普通定理的综合应用	235
习 题	242
第 12 章 达朗贝尔原理	251
12.1 达朗贝尔原理	251
12.2 刚体惯性力系的简化	255
12.3 定轴转动刚体的轴承动约束力	261
12.4 静平衡和动平衡简介	264
习 题	267
第 13 章 虚位移原理及动力学普遍方程	275
13.1 虚位移的基本概念	275
13.2 虚位移 虚功	278
13.3 虚位移原理及应用	283
13.4 动力学普遍方程	291
习 题	292
第 14 章 振 动	300
14.1 单自由度系统的自由振动	300

14.2 计算固有频率的能量法	306
14.3 单自由度系统的衰减振动	308
14.4 单自由度系统的受迫振动	312
习 题	317
附录	323
附录 A 典型的约束和约束力	323
附录 B 常见材料的滑动摩擦因数	324
附录 C 简单均质刚体的转动惯量与惯性积	325
附录 D 常用物理量的单位和量纲	329
参考文献	330

绪 论

理论力学是研究物体机械运动一般规律的科学。机械运动是指物体的空间位置随时间的变化。具体地说,其任务是:

- (1) 研究描述物体机械运动的方法。
- (2) 产生机械运动的物理因素。
- (3) 物体作机械运动的条件。

运动是物质的固有属性,包括宇宙中发生的一切变化和过程。机械运动是物质运动的最简单的形式,也是人们随时都可见到的一种运动形式。固体的运动和变形、流体的流动均属机械运动。理论力学属于经典力学的范畴,所研究的内容是速度远小于光速($30 \times 10^7 \text{ m/s}$)的宏观物体的运动,就是说,理论力学的理论,不适用于原子、电子等微观粒子的运动,也不适用接近光速运动的物体。经典力学的应用范围是有局限性的。但是,在工程技术中所遇到的物体都是宏观物体,其速度远低于光速,所以有关的力学问题都可应用经典力学的理论来解决。

在日常生活和工程技术中,处处可以看到机械运动。学习理论力学,懂得机械运动的规律,就能够理解周围许多机械运动现象,例如,公路和铁路在转弯处,为什么外侧要比内侧高?直升飞机的尾部为什么要安装一个小螺旋桨?发射人造地球卫星至少需要多大速度?卫星怎样围绕地球运动?等等。这些问题都可由理论力学的原理得到解答。

但是,学习理论力学的主要目的,当然不在于解释日常所见的机械运动现象,而在于掌握并应用机械运动的规律,更好地服务于工程实际。因为,从土建、水利工程的结构物的设计和施工,机械的制造和运转,直到人造卫星、宇宙飞船的发射和运行,都有着大量的力学问题。尽管这些问题并不是单靠理论力学知识就能解决,但在解决这些问题时,理论力学的知识却是不可缺少的。

理论力学中关于机械运动规律的基本理论又是别的许多学科(如材料力学、结构力学、弹性力学、流体力学、振动理论、机械原理等)的基础,学习理论力学,也是为学习这一系列学科作好准备。

理论力学研究内容主要包括:

- (1) **静力学**: 主要研究受力物体平衡时作用力应满足的条件。
- (2) **运动学**: 从几何的角度来研究物体运动的变化规律。
- (3) **动力学**: 研究受力物体的运动与作用力之间的关系。

在形成理论力学的概念和系统理论的过程中,抽象化和数学演绎这两种方法起着重要的作用。客观事物总是复杂多样的。在我们占有大量来自实践的材料之后,必须根据研究的问题的性质,抓住主要的、起决定作用的因素,撇开次要的、偶然的因素,深入事物的本质,了解其内部联系。这就是力学中普遍采用的抽象化方法。例如,当物体运动的范围远远大于其本身的大小,或它的形状对其运动的影响可以忽略不计,那么可将该物体简化为有质量而无几何尺寸的点,这种力学模型称为**质点**。例如在研究天体或卫星在空间的运动轨道时,可将它们定义为质点。如果物体的运动与其尺寸有关,则可将物体定义为由多个质点组成的系统,称这类力学模型为**质点系**。如果在研究物体的运动时,物体的变形可忽略不计,那么该物体力学模型为一种特殊的质点系,即物体内任意两点的距离保持不变,称这类质点系为**刚体**。多个刚体组成的系统称为**刚体系**。例如在对大量的机械、车辆等对象进行运动分析时,当构成工程对象各部件的变形对其运动性态影响可不予考虑时,各部件的力学模型可定义为刚体,整个对象为刚体系。质点、质点系、刚体与刚体系通称为**离散系统**,它是理论力学的研究对象。

理论力学是一门技术基础课,对多数工科专业的学生来说,理论力学又是从纯数学学科过渡到专业学科过程中要学习的与工程技术有关的第一门力学课程。本课程的**显著特点**:

(1) 理论系统完整,数学演绎严密,逻辑性强。这个特点的形成与学科的发展历史密切相关。力学是古老的学科,如我们所知,伊萨克·牛顿于1666年发现万有引力定律,并在总结前人的研究成果基础上,提出动力学的基本定律,奠定了动力学的理论基础。微积分出现后,力学的研究方法很快地完善起来。许多著名的科学家集数学与力学的研究于一身,数学与力学学科蓬勃发展齐头并进,很难将这二个学科区分开。在这个时期,约翰·伯努利于1696年解析性地研究受重力的质点在各种不同曲线上运动时开创了变分法,并于1717年精确表述了力学基本原理——虚位移原理;欧拉建立了刚体运动微分方程;达朗贝尔建立了著名的达朗贝尔原理;拉格朗日发表了用严格数学分析方法处理力学问题的《分析力学》一书等,这些科学家的建树,创立了有逻辑结构、完美的力学体系,使力学成为严密的理论科学;由对实际现象的综合、观测和归纳,得到经过实践检验为正确的理论的研究方法,转变为以牛顿定律为基础,利用数学演绎得出结论并受实践检验的研究方法,形成了与数学学科具有相同的特点。

这里应着重指出,在以基本定律为基础进行数学演绎的研究方法的同时,应重视实验研究。在力学发展的过程中,开卜勒、伽利略通过大量的观测和实验,总结出关于行星运转、落体及抛射体等物理现象的理论(一般称为现象性理论)。这表明在牛顿以前,观测和实验为经典力学的建立起到不可磨灭的作用。同样,牛

顿定律成为人们普遍接受的基本定律,不是在其提出之日,而是在数次重大的天文观测中,它都经得住考验之时。其中的一次是在1864年,即牛顿发表《自然哲学的数学原理》的177年之后,法国科学家勒威耶根据牛顿定律的计算,提出在天王星之外还有海王星的预言。通过天文观测,果然发现了这颗新的行星,而且其位置的日心经度的观察值与理论值之间只差 $0^{\circ}52'$!这也就在实践中检验了牛顿定律的正确性。随着科技水平的提高,实验仪器和技术的日益完善,实验成了力学研究中的重要方法,它可以对各种自然条件进行精密的控制,对某些现象和因素进行独立的研究,从而摆脱许多偶然因素的干扰。

(2) 理论密切联系工程实际,培养学生工程概念,是大学本科中第一门联系工程实际的理论课程。从力学的发展历史看,理论力学原是数学物理中的一个分支,由于它的一些原理和理论在自然科学和工程技术中有着广泛的应用,使它逐步发展成为一个独立的学科。可以说,理论力学起源于工程技术,并和它一起发展。事实上,力学在理论上的每一重大进展都具有工程背景。18世纪由于航海事业的发展,提出了关于船舶的摇摆运动规律问题,推动了刚体定点运动的研究,欧拉建立了刚体定点运动微分方程,形成了以牛顿—欧拉方程为代表的矢量方法。其后,随着机器生产的迅速发展,将自由度较多的受约束系统动力学的研究提到日程上来,《分析力学》应运而生,产生了以拉格朗日方程为代表的数学分析方法。20世纪50年代以后,由于现代科学技术的发展,出现了多个刚体组成的且作大位移运动的机械系统,如航天器、机器人等。与此同时,也出现了计算速度高的数字计算机,在这种背景下产生了力学新分支——多刚体系统动力学。总之,力学与生产实践密切结合,随着生产的发展而发展。显然,探索力学的内在规律也是力学发展的动力。

从另一角度看,一般的机器与机械或者是传递、转换某种运动,或者是实现某种特定的运动,他们都是物体或物体系统机械运动的具体体现,因此,理论力学的习题,绝大多数都是从工程实际中简化而来的,或者习题本身就是一个简单的工程实际问题。在自然界以至人类的日常生活中,物体的机械运动到处可见,这是在技术理论课程中少见的。

需要指出的是,除了工业部门的工程外,还有一些非工业工程也都与力学密切相关,体育工程就是一例,棒球在球棒击打前后,其速度大小和方向都发生了变化,如果已知这种变化即可确定棒球受力;反之,如果已知击球前棒球的速度,根据被击后球的速度,就可确定球棒对球所需施加的力。赛车结构为什么前细后粗,为什么车轮也是前小后大?这些都是力学的基础知识广义工程的概念。

(3) 建立力学模型和描述其数学物理方程的研究方法是理论力学课程的第三个特点,也是大学本科中,第一门需要学生自己选择研究对象,并对其进行合理

的简化，然后建立描述研究对象力学特征的数学方程。自然界和工程技术中的实际问题是复杂多样的，动力学课程阐述的内容都依据问题的性质和所要求的精度，略去次要的和偶然的因素，进行合理地简化，经过受力分析和运动分析，列写运动微分方程来描述它。建立模型和建立数学方程是科技和工程技术人才必备的本领，是业务素质的重要组成部分。本课程对培养这种能力创造了得天独厚的条件，特别要求学生自己选择研究对象并列写运动微分方程的习题比比皆是，这种解题方法是对学生习惯于运用公式求解方法的一个飞跃，迈上一个新台阶。

第一篇 静 力 学

引 言

静力学是研究物体受力及平衡一般规律的科学。所谓**物体的平衡**，是指物体相对某一惯性参考系保持静止或匀速直线平移的运动状态。今后，如不特别说明，均以固结在地球表面的参考系作为惯性参考系。

理论力学的研究对象是从实际中抽象出来的理想化模型。静力学研究的基本对象是刚体。所谓**刚体**，是指在力的作用下，其内部任意两点之间的距离永远保持不变的物体。事实上，在受力状态下不变形的物体是不存在的。不过，当物体的变形很小，在所研究的问题中把它忽略不计，并不会对问题的性质带来本质的影响时，就可以近似看作刚体。刚体是在一定条件下研究物体受力和运动规律时的一种科学抽象，这种抽象不仅使问题大大简化，也能得到足够精确的结果。几个刚体通过一定联系组成的系统称为**刚体系**，又称**物体系统**或**物系**。静力学中所说的物体或物系均指刚体或刚体系，所以静力学也称为**刚体静力学**。

静力学研究以下三个基本问题：

1. **物体的受力分析** 根据物体受到约束情况，对物体所受外力进行分析，并以受力图的形式反映出来，称为**物体的受力分析**。事实上，物体的受力分析不仅是静力学的基本问题，也是整个理论力学的一个基本问题。

2. **力系的简化** 作用于物体上的一群力称为**力系**。如果两个力系对物体的作用效果相同，称此二力系为**等效力系**。用一力系去等效代替另一力系，称为**力系的等效替换**。

力系的简化是以最简单的力系与原来较复杂的力系进行等效替换，由此分析原力系的作用效果。

如果一个力系可以简化为一个力，则称此力为原力系的**合力**，原力系中各力为合力的**分力**。将力系简化为一个力的过程称为**力系的合成**，反之称为**力的分解**。

3. **力系的平衡条件及其应用** 根据力系简化的结果可以导出力系的平衡条件。当物体处于平衡时，其所受的力系称为**平衡力系**。此时，力系中的力应满足一定的关系，这种关系称为**力系的平衡条件**。表示这种平衡条件的数学方程式称为**力系的平衡方程**。平衡方程揭示了作用于物体上的力的关系。通过求解这些方