

孙庆元
肖士珣

罗绍凯

常广石
战永杰

主编
主审

高等专科学校教学用书

理论力学简明教程

天津教育出版社

理论力学简明教程

孙庆元 罗绍凯 常广石 主编
肖士珣 战永杰 主审

天津教育出版社

内 容 提 要

本书是根据1989年国家教委师范教育司颁发的高等师专物理专业《理论力学》教学大纲，由全国部分师专和教育学院的教师共同编写而成。内容包括静力学、质点力学、非惯性系质点力学、质点系力学、刚体力学和分析力学初步共六章。

该书主要特点是针对高等师专物理专业的需要，联系中学物理教学实际，突出师范性和物理学思想方法。另外，还进行了一些教材改革尝试，如静力学单列一章，非惯性系力学放在质点系力学之前，对抽象概念采用直接定义法。无疑对教与学以及学生将来从事教学工作是很有意义的。

此书可作为高等师专和教育学院物理专业的理论力学教材，也可作为高等工业专科相近专业的教学参考书。

理 论 力 学 简 明 教 程

孙庆元 罗绍凯 常广石 主编

天津教育出版社出版

(天津市湖北路27号)

泰安师专印刷厂印刷

850×1168毫米 32开 7.9印张 198千字

1990年2月第1版 1990年2月第1次印刷

印数1-6500

ISBN7-5309-0910-2/O·7

定价 3.80元

序

目前,我国急需不同风格和特色的高等学校教材,而师专系统的理论力学教材更为奇缺。孙庆元、罗绍凯、常广石等同志总结了多年的教学经验,编写了这本《理论力学简明教程》,内容符合一九八九年国家教委师范教育司颁发的师专物理专业的理论力学教学大纲。

在本书出版的时候,我们愿意向读者介绍和推荐这本教材。

本书的主要特点是针对高等师专物理专业的需要,紧密联系中学物理教学实际,注重阐述基本概念的物理实质和基本规律的物理意义,强调其应用条件和范围,突出了物理学思想方法,这对学生将来从事物理教学工作无疑是很有意义的。

本书在内容编选和体系的安排上也有一定的特点。如静力学独立一章,把非惯性系质点力学放在质点系力学之前,突出质心坐标系和实验室坐标系的叙述,对难懂的抽象概念由实际引入采用直接定义法,对解题作了指导性的叙述等。这些教材改革的尝试,对于教材更新,特别是师专教材建设是有积极作用的。因此,本书在众多的同类教材中仍可占有一席之地。

编写一本好教材不是一件容易的事,需要反复实践,多次修订,希望作者继续努力,为高师物理教材的建设做出更大的贡献。

肖士珣 战永杰

1990年1月于东北师大

前 言

《理论力学简明教程》是根据1989年国家教委师范教育司颁发的师专物理专业教学大纲中的《理论力学》教学大纲，由全国部分师专和教育学院的教师共同编写而成。内容包括静力学、质点力学、非惯性系质点力学、质点系力学、刚体力学和分析力学初步共六章，作为师专和教育学院物理专业的《理论力学》教材。授课60学时。

本书突出的特点是体现师范性和专科程度，注重实用，内容简明，概念、定律叙述严谨，尽量简化数学推导，大量例题与内容配合，给应用知识解决问题提供了范例。思考题和习题数量适当，难度适宜，且与内容配合紧密。

本书针对师专培养中学物理师资的需要，注意到师专学生的高等数学知识基础，总结了 we 长期进行《理论力学》课的教学经验，与同类教材相比，还做了以下教材改革尝试。

第一，加强与中学物理相应内容的联系。在同类理科教材中，刚体静力学作为特例包含在“刚体力学”一章中，内容较少。在中学物理中刚体静力学占有相当大的比重，为此把静力学单独成章，列在章首，增加部分内容，为学生将来从事教学打下良好的基础。针对中学物理中难理解的概念和力学现象，在教材中加强理论阐述，起到深化和居高临下的作用。例如讲到转动参照系中的惯性力时，与离心力加以区别，较详细地阐明了惯性力的实质，深化了对惯性的认识。

第二，合理的调整了章次，同类教材都把“非惯性系质点力学”一章放在质点系力学和刚体力学之后，我们认为放在“质点力学”

(在惯性系中)之后较为合理.它与质点力学都是研究质点运动问题的,同属质点力学,这不仅保持了质点力学的连续性和完整性,而且使学生较早地接受相对运动和非惯性系问题的处理方法,突出了运动合成与分解的物理思想.在本章中引用了定轴转动参照系和定点转动参照系的概念,其结论直接应用于后续的质点系、二体问题、平面运动、定点转动等,给教与学都带来了方便.

第三,解决概念抽象和解题两大难点.在《理论力学》中有些概念抽象是一大难点,本书对一些不易接受的概念和定义尽量从实例引出,既容易接受,又不失其科学性.例如在定点转动中本体极面与空间极面从实例引出;欧拉角从陀螺的运动分析入手给以实感,再给出直观图象的直接定义法,避开了同类教材的三次转动定义法,较好地解决了这一难点.解题是《理论力学》的另一大难点,采取了先介绍解题步骤和注意事项,接着用例题示范的方法,在例题解中着重分析物理现象和根据题给条件应遵守的规律,并注意一题多解,为学生自解习题提供了正确的思路和方法.

第四,突出与前、后续课程的衔接.《理论力学》的前续课程是《力学》,在《力学》中已讲清的概念和定律,本书不再重述,直接运用.有些定律作为特例指明,有些作为应用实例加以深化.例如在§3.4中例4和习题3.10、3.11导出了平动非惯性系中的流体力学方程,深化了《力学》中的流体力学方程.

本书的后续课是《近代物理学》.有的应用实例,如 α 粒子散射、拉摩进动、实验室坐标系和质心坐标系等,是《近代物理学》的必要知识.特别是分析力学是经典物理向近代物理过度的桥梁的叙述,把本书摆到正确的位置上,不仅给学生知识连续,还为学生学习后续课程奠定了知识基础.

参加本书编写的有(按姓氏笔划):方建会(张掖师专)、刘保良(新疆奎屯兵团教育学院)、孙庆元(泰安师专)、汪

云（上饶师专）、陈刚（荆州教育学院）、李成永（南阳师专）、李仰理（淮阴教育学院）、李铁（万县师专）、杜尚之（丽水师专）、范家卓（成都师专）、杨晞（铜仁师专）、杨殿中（山东煤炭教育学院）、罗绍凯（商丘师专）、郝建增（安阳师专）、常广石（辽宁教育学院）、郭玉栋（济南师专）、郭启连（泰安师专）、郭茂政（黄冈教育学院）、贾剑辉（邯郸师专）、谢汴（开封师专）、谭世复（湖州师专）。主编（按姓氏笔划）孙庆元、罗绍凯、常广石统定全书。

书稿经东北师范大学肖士珣教授和战永杰副教授（国家教委高校理科教材编审委员）主审，并提出了许多宝贵意见，还为本书写了《序》，我们表示衷心的感谢。

限于编者水平，书中难免有缺点和不妥之处，恳请读者指正，以便今后修订。

编者

1989年11月

目 录

绪论	1
第一章 静力学	
§ 1.1 力系的简化	4
§ 1.2 平行力系的中心 重心	10
§ 1.3 几何约束 受力分析	15
§ 1.4 平面力系的平衡方程	19
§ 1.5 空间力系的平衡方程	28
思考题 习题	29
第二章 质点力学	
§ 2.1 质点运动状态的描述	33
§ 2.2 自由质点的运动微分方程	42
§ 2.3 非自由质点的运动微分方程	49
§ 2.4 质点的动量定理和角动量定理	54
§ 2.5 质点的动能定理	59
§ 2.6 有心力	65
§ 2.7 比耐公式的应用	69
思考题 习题	75
第三章 非惯性系质点力学	
§ 3.1 质点在平动非惯性系中的速度和加速度	80
§ 3.2 转动参照系	85
§ 3.3 质点相对于转动参照系运动时的速度和加速度	89
§ 3.4 非惯性系动力学	95
§ 3.5 地球自转的影响	102
思考题 习题	110

第四章 质点系力学

§ 4.1 质心运动定理	115
§ 4.2 质点系的动量定理	120
§ 4.3 质点系的角动量定理	124
§ 4.4 质点系的动能定理	130
§ 4.5 两体问题	133
§ 4.6 变质量物体的运动	136
思考题 习题	141

第五章 刚体力学

§ 5.1 自由刚体的运动微分方程	144
§ 5.2 刚体平面运动的运动学	147
§ 5.3 刚体平面运动的动力学方程	157
§ 5.4 刚体定点转动的运动学	164
§ 5.5 刚体定点转动的角动量和动能	170
§ 5.6 欧拉方程	180
§ 5.7 迴转仪和拉摩进动	186
思考题 习题	191

第六章 分析力学初步

§ 6.1 约束与广义坐标	198
§ 6.2 虚位移原理	202
§ 6.3 基本形式的拉格朗日方程	208
§ 6.4 有势力系的拉格朗日方程	217
* § 6.5 哈密顿正则方程 哈密顿原理	225
* § 6.6 矢量力学与分析力学〔阅读〕	236
思考题 习题	240

主要参考书目

绪 论

一、理论力学的研究对象

理论力学与力学一样，是研究物体机械运动普遍遵循的基本规律的一门学科，它们统称经典力学或古典力学。理论力学与力学的区别在于力学理论层次不同，力学仅研究简单力学现象，且内容比较广泛，属于普通物理范围；理论力学则利用矢量分析和数学分析作为数学工具，研究有限多自由度的力学体系的运动问题，属于理论物理范围。随着力学理论的发展，无限多自由度的力学体系，不再列入理论力学内容，已独立成为一门学科，叫做连续介质力学。它又有两大分支，即弹性力学和流体力学。

按照表述力学基本规律的方法不同，理论力学有矢量力学和分析力学两套并列的理论体系。矢量力学（本书第一到第五章）是从物体之间的相互作用出发，借助于矢量分析这一数学工具，运用形象思维方法，通过牛顿定律揭示物体受力与其运动状态变化之间的因果联系，来确定物体的运动规律。这种方法形象、直观，易于处理简单的力学问题。矢量力学又常称为牛顿力学。分析力学（本书第六章）是在牛顿力学的基础上发展起来的，它借助于数学分析这一工具，运用抽象思维方法，研究力学体系整体位形的变化。矢量力学仅能解决经典力学问题，而分析力学由于从各种运动形态通用的物理量——能量——出发，它的应用远超出经典力学范围，也适用非力学体系。

二、经典力学的时、空观念

机械运动是指物体在空间随时间发生的位移，因此空间、时间、参照系是经典力学的基本概念。这些概念是客观存在的反映。

在经典力学里，按人们的日常经验给出的空间、时间和物质三者的定义是互不相关的。在这种绝对时空观中，时间的测量在所有参照系中都是相同的，即时间是绝对的；空间在所有参照系中也是相同的，即空间也是绝对的，处处均匀且各向同性，是欧几里德空间。它们都与物质运动及参照系无关。在物体运动速度和参照系之间的相对速度远小于光速的情况下，上述绝对时空观念是符合客观事实的。因此在经典力学中无需提出更精确的空间和时间观念。应当指出，在爱因斯坦相对论中需要更精确的空间和时间观念以更符合客观实在，它是辩证唯物主义时空观的自然科学基础，这将在近代物理学中予以介绍。

三、经典力学的适用范围

与其它自然科学一样，经典力学也有它的近似性质和适用范围。人们早在生产实践中，凭借直观感觉而形成了某些力学概念，如运动、速度、力等，直观感觉只能观察线度相当大的物体，如日月星辰、地面上的运动物体等，而这些物体的运动速度比光速又小得多，经典力学正是总结这类物体运动的规律而建立起来的。总起来说，经典力学只能适用于运动速度远小于光速而线度远大于原子的宏观物体^①的运动，因此经典力学属于宏观力学的范畴。

当物体速度可以与光速相比拟时，经典力学的计算结果与客观实在严重偏离，因此经典力学不再适用，应该用相对论力学（在近代物理学中介绍）来描写。经典力学是相对论力学在速度远小于光速情况下的极好近似。

当考虑微规粒子在微观空间范围内的运动规律时，经典力学

^①严格说来，经典力学的适用范围应由海森伯测不准关系来确定，并不在于物体的大小。微观粒子在宏观空间范围内低速运动时，仍遵守经典力学规律。比如，示波管中的电子运动仍可用经典力学进行精确计算。

也不再适用。由于微观粒子的波动行为^②不可忽略，若用经典力学的坐标和动量概念描述微观粒子运动，则必存在两者不能同时确定的关系，甚至连微观粒子的运动“轨道”概念也失去了意义。由此可见，不能把适用于宏观物体的某些概念准确地应用于微观粒子。关于微观粒子的行为与运动规律，应该用量子力学（在近代物理学中介绍）来描述。

四、理论力学与其他学科的关系

理论力学与其他学科的关系是十分密切的。例如，理论力学的发展为物理学其他分支的发展提供了许多必备的知识和处理问题的科学方法。它是天文学、气象学、水文学等的理论基础。也是工程技术的基础。理论力学与数学相互促发展的关系尤为突出，这在力学和数学发展史上，例证很多，这里不再一一列举。

今天，力学科学面临许多全新的课题。例如，火箭、宇宙航行等先进科学技术的迅速发展，对力学提出了许多新的课题，推动了现代力学的发展；近代高速电子计算机的发展，使过去极难解决的问题，已经成为普通问题，一门新的力学分支——计算力学——正在崛起；随着等离子体运动和热核反应研究的发展，电磁流体力学已经成长起来；象“生物力学”这样边缘科学也正在兴起。力学虽然是一门较早发展起来的学科，仍然具有很强的生命力，还有待于发展。

由此可见，理论力学是一门主要的基础学科，学习它的基本内容和研究方法，不仅对我国实现四个现代化有极其重要的作用而且对学好其他学科也是必需的。

^②实际上，任何微观粒子和宏观物体的波动行为总是存在的，不过，对于线度远大于原子的质点或宏观物体来说，其波动行为的效应甚微，可以不必考虑。

第一章 静力学

静力学是研究平衡问题的。物体相对于惯性参照系处于静止或作匀速直线运动的状态，称为平衡。它是机械运动的一种特殊形式。在通常情况下，把地球看成近似程度很好的惯性参照系。

静力学所研究的物体主要是刚体，因此不考虑物体的形变问题。本章主要研究力系的简化、物体的受力分析和力系的平衡条件，同时讨论平行力系的中心、重心及静力学在工程技术中的实际应用。

§1.1 力系的简化

一、力系

力是物体间的相互作用，其作用效果取决于力的大小、方向和作用点，即力的三要素。力是矢量，力 \mathbf{F} 在笛卡儿直角坐标系 $Oxyz$ 中可由坐标轴上的三个分量 F_x 、 F_y 、 F_z 来表示。设 \mathbf{i} 、 \mathbf{j} 、 \mathbf{k} 分别为 x 、 y 、 z 轴上的单位矢量，则

$$\mathbf{F} = F_x \mathbf{i} + F_y \mathbf{j} + F_z \mathbf{k}. \quad (1.1)$$

其大小

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}.$$

力 \mathbf{F} 的方向可由方向余弦

$$\cos(\mathbf{F}, \mathbf{i}) = \frac{F_x}{F}, \quad \cos(\mathbf{F}, \mathbf{j}) = \frac{F_y}{F}, \quad \cos(\mathbf{F}, \mathbf{k}) = \frac{F_z}{F} \quad (1.2)$$

表示。

力 \mathbf{F} 的作用点 A ，可由坐标原点 O 至 A 点的位矢 $\mathbf{r} = \mathbf{OA}$ 确定，

即

$$\mathbf{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k}. \quad (1.3)$$

作用于刚体上的一组力，称为力系。若两个力系对同一刚体作用效果相同，则称这两个力系为等效力系。若作用于刚体上的力系与一个力等效，则称这个力为该力系的合力。例如，质点受共点力一定有合力，其作用点就是该质点。 n 个共点力组成力系的合力为

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \cdots + \mathbf{F}_n = \sum_{i=1}^n \mathbf{F}_i. \quad (1.4)$$

在直角坐标系中，合力 \mathbf{F} 在坐标轴上的分量

$$F_x = \sum_{i=1}^n F_{ix}, \quad F_y = \sum_{i=1}^n F_{iy}, \quad F_z = \sum_{i=1}^n F_{iz}. \quad (1.5)$$

合力 \mathbf{F} 还可以连续使用平行四边形法则或矢量多边形求得，如图 1.1(a)或(b)、(c)所示。

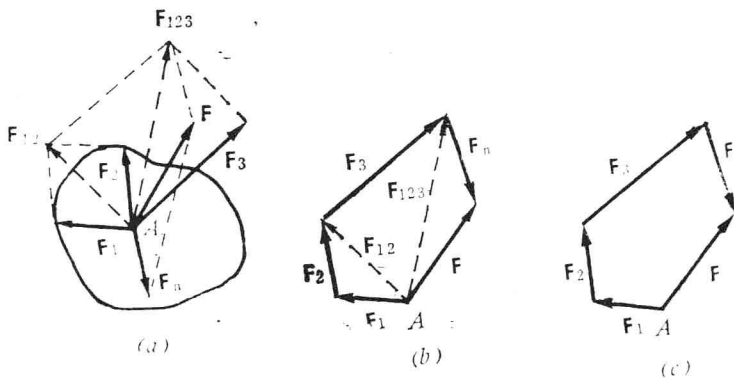


图 1.1

如果刚体在力系作用下处于平衡状态，该力系称为平衡力系。平衡力系对刚体不产生任何效果，因此平衡力系与零等效。最简单的平衡力系是等大、共线、反向的两个力，这两个力叫平

衡力。显然，刚体上加上或减去一个平衡力系，不会改变原来力系对该刚体的作用效果。

二、力的可传性原理

如图1.2所示，力 F 作用于刚体上的 A 点，在 F 作用线上的一点 B 沿作用线加上一对平衡力 F_1 和 F' ，且 $F_1=F$ ，这样，并不改变原力 F 对该刚体的作用效果。在这新力系中，原力 F 和作用于 B 点的 F' 成一平衡力系，若去掉这两个力，剩下作用在 B 点的力 F_1 显然与原力 F 等效。由此得到力的可传性原理：作用在刚体上力的作用点可以沿其作用线移到该刚体上任一点，而不改变它对该刚体的作用效果。可见，对刚体来说，力是滑移矢量，力的作用点在作用线上的位置已不再是决定其作用效果的要素之一。

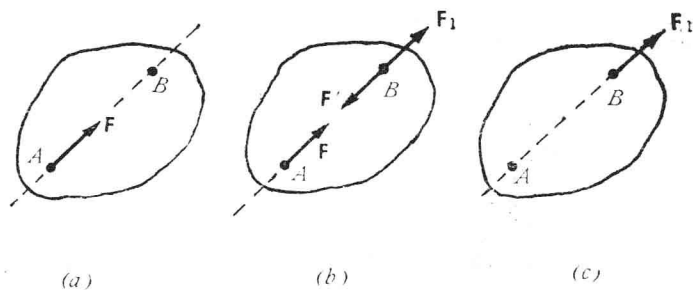


图 1.2

三、力的平移定理

作用在刚体上的力，如果在刚体上平行移动，则它对刚体的作用效果，一般来说要改变。下面讨论力在刚体上平移时，保持平移前后对刚体的作用效果不变所遵循的定理。

图1.3(a)所示力 F 作用于刚体上 A 点，今欲将力 F 平移到刚体上任一点 O ，为此，在 O 点上加上与 F 的作用线平行的一对平衡力 F_1 与 F' ，且 $F_1=F$ ，如图(b)所示。容易看出 F 和 F' 是

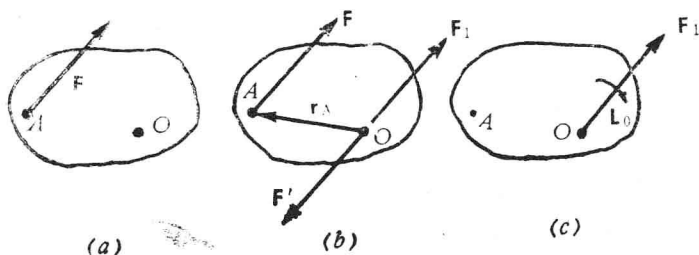


图 1.3

一对等值、反向但不在同一直线上的力，称为力偶。力偶只能使刚体产生转动效应。通常用力偶中的原力 F 对点 O 的矩作为量度力偶对刚体作用的物理量，称为力偶矩，用 $L(F, F')$ 或 L_O 表示，即

$$L_O = r_A \times F, \quad (1.6)$$

式中 r_A 为 A 点对 O 点的位矢。力偶矩是矢量，其大小

$$L_O = r_A F \sin(\angle r_A, F) = Fd,$$

式中 d 为 O 点到 F 作用线的距离；其方向垂直于 r_A 与 F 决定的平面，指向由 r_A 沿小于 180° 角转向 F 右螺旋前进的方向。习惯上把 L_O 的起点画在 O 点，但这没有作用点的意思。于是作用在 A 点的力可以用作用在 O 点的力 F_1 和一个附加力偶矩 L_O 来代替，其中力 F_1 的大小和方向与原力 F 相同，如图 (c) 所示。

由上述分析可以得出结论：作用在刚体上的力 F ，若平行移动到刚体上任一点 O ，则必须附加一个力偶，其力偶矩等于原力 F 对 O 点的矩。这个结论称为力的平移定理，它是力系简化的依据。从以上可以看出，平移力的大小和方向与 O 点的位置无关，而力偶矩的大小和方向却与 O 点的位置有关。

四、力系的简化

设有一力系作用在刚体上，今将该力系向 O 点简化，如图 1.4(a) 所示。根据力的平移定理，将力系中各力平移到 O ，并附

加各自的力偶矩，这样原力系等效于作用在 O 点的一个共点力系和一个附加力偶系，如图1.4(b)。作用在 O 点的力系可以合为一个单力 R ，称为原力系的主矢。由于平移后各力的大小和方向都不改变，所以

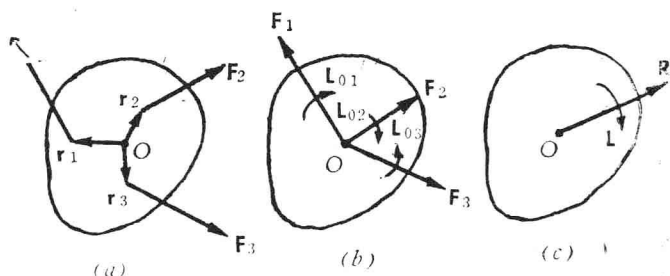


图 1.4

$$R = F_1 + F_2 + F_3 + \dots = \sum_i F_i. \quad (1.7)$$

对于附加力偶系，设各个附加力偶的力偶矩分别为 L_{01} 、 L_{02} 、 L_{03} …，则合力偶矩 L 为

$$L = L_{01} + L_{02} + L_{03} + \dots = \sum_i L_{0i}, \quad (1.8)$$

称为原力系对 O 点的主矩。即作用在刚体上的力系可以简化成一个作用于 O 点的主矢 R 和一个对 O 点的主矩 L ，如图1.4(c)所示。 O 点称为简化中心。如果简化中心改变，由(1.7)式和(1.6)式可知，主矢不变，而主矩一般要改变。

应当指出，主矢与合力是两个不同的概念。主矢不包含作用点的因素，只有大小和方向两个要素；而合力除了指明大小和方向外，还必须指明作用点才有意义。例如，若 O 点在共点力系的共作用点上，其主矢即是合力，在这种情况下作用效果相同；若 O 点不在共点力系的共作用点上，仍有主矢但不是合力，其主矢的大小和方向与合力相同， O 点就不是作用点，两者作用