

高等学校试用教材

# 理论力学简明教程

第二版

肖士珣 编

高等教育出版社

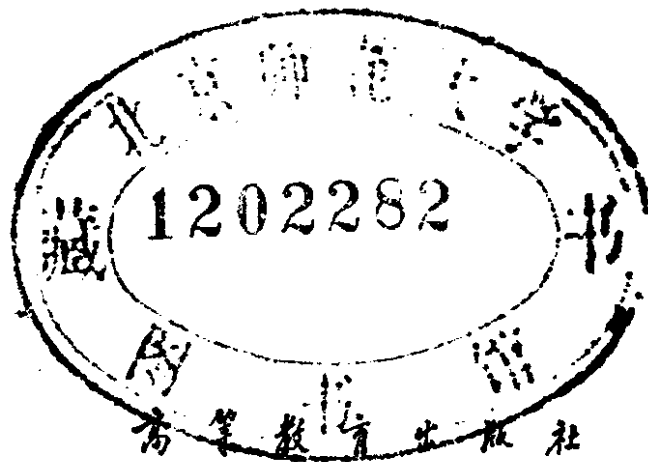
高等学校试用教材

# 理论力学简明教程

(第二版)

711102/18

肖士珣 编



## 内 容 提 要

本书内容包括经典力学基础、质点力学、质点系力学、刚体力学、相对运动和分析力学共六章,另附习题约 250 多个,可供 60 学时左右教学之用。

本书第二版在广泛的教学实践基础上根据读者意见作了较大的增删、补充、修改与订正,更新了部分例题,补充了若干习题,增加了各章小结,适当加强了“分析力学”部分,以求更加适应当前教学的需要。

本书可作为高等师范院校(包括师专)物理专业《理论力学》课程的试用教材,也可作为综合大学及其他高等学校理科有关课程的教学参考书,并可供中学物理教师进修参考。

高等学校试用教材  
**理论力学简明教程**

(第二版)

肖士珣 编

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

人民教育出版社印刷厂印装

开本 850×1168 1/32 印张 13.25 字数 320,000

1979年2月第1版 1983年10月第2版 1984年5月第1次印刷

印数 00,001—18,200

书号 13010·0930 定价 1.55 元

## 第 二 版 序

本书自 1979 年出版后,许多兄弟院校曾采用为教本。三年多来,编者读到了很多来信,从中得到了一定鼓励和支持,同时也收到不少宝贵的意见和建议,鞭策和帮助编者对本书初版进行修订,使之更能适应当前教学的需要。新版根据 1980 年教育部颁布的高等师范院校物理专业《理论力学》教学大纲,参考国内外的一些新教材,在广泛的教学实践基础上,对第一版进行了大幅度的删减、增补、修改和订正。编者希望这次修订既能保留初版的某些特色,又能适当提高基础理论水平。

这次改编的主要方面是:

1. 全部采用国际单位制(SI)。
2. 本着加强基础、精选内容、删繁就简、循序渐进的原则,精简了与现行普通物理力学教材重复的部分,重新改写了许多章节,加强了物理概念的阐述;适当提高了理论力学基础内容的深度;着重分析数学工具与物理实质的联系,在数学推导中避免跳跃过大,又力求简捷扼要;对必要的数学补充或历史材料增加脚注或指明出处;加强前后内容的呼应等等,以提高教材的科学性和系统性。
3. 配合基本内容更新了一些例题。在补充的 100 多道习题中,包括了近期国内外大学生或研究生的若干试题。
4. 各章末增加了小结,对该章内容作简要的概括,以利于学生掌握重点。在第六章小结中还用表格形式,以哈密顿原理为中心对该章作了系统性的概括。各章末附以参考书目,可供学有余力的读者开阔眼界,继续钻研。
5. 适当加强了“分析力学”部分,使其更利于教学,小字材料可

供选用或参阅。还考虑了在使用本书时可采取另一讲授顺序方案:即利用书末所增附录“从牛顿方程推导拉格朗日方程”,把拉格朗日方程(或者 § 6.1—§ 6.4 节中的部分内容)提前到第二章以后讲授,并且鼓励学生同时兼用两种方法(矢量方法及分析方法)去求解此后各章的习题。这样就可能使学生早日接受分析力学的训练,较为熟练地掌握分析力学方法,为后继课程加强准备。这种讲授体系目前已在国内外某些地方取得积极成果。

本书第二版的改编工作,得到了许多同志的热情支持与积极协助。西南师院王佩芸和湖南衡阳师专的曾锡浜等同志对初版提了许多条细致的意见。我系力学教研室张世泽、战永杰、刘云鹏和贾玉江四同志对第二版的草稿进行了多次认真的讨论和研究,张世泽同志自始至终参加了全书新版的修改定稿工作。安徽师大张季达、肖承德、丁光涛三同志审阅了新版全稿,特别是南京大学梁昆森教授抱病进行了复审,孟昭辉、王希禄、宋达同志对全部习题答案进行了复核。他们都先后提出了许多宝贵而中肯的建议,对提高本书的修订质量起了很大作用,特此一并表示衷心的感谢。

限于编者的水平,本版中一定还存在不少缺点和错误,诚恳地希望读者批评指正。

肖士珣

1983年9月于长春

东北师大物理系

## 第 一 版 序

本书包括：经典力学基础、质点力学、质点系力学、刚体力学、相对运动和分析力学等六章，另附习题 150 多个。可供 60 左右学时教学之用。

全书以矢量力学为主，分析力学为辅，其比重为 3:1。学习前应有普通物理的力学、矢量分析和常微分方程的初步知识。全书内容以动力学为核心，把运动学纳入于动力学中，静力学作为动力学的特殊情况。从一维运动到三维运动，从质点到刚体，前后呼应，密切联系，力求条理明晰，由简到繁，循序渐进，务使学生能掌握经典力学的基础理论和基本方法。讲述时把联系物理学本身有关的课题放在重要地位，采用从实际问题引出理论，把各种坐标系分散到各种典型问题中去讲，这样做的目的是力图阐明理论与实践的辩证关系、内容与方法的统一，突出各种运动的特征，便于系统地掌握科学知识。分析力学是很重要的理论和工具，特别要学好 § 6-3、§ 6-5、§ 6-7 三节，才能更广泛地领会经典力学的实质，并为后继理论课打下基础。

本书的初稿，是 1966 年按“少而精”原则由编者和江乃纯、赵振业两同志合写的。当时曾经吉林师大（王琳）、北京师大（喀兴林）、南京大学（周衍柏）、南开大学（严肃）及中山大学、湖南师院等十余所兄弟院校教师集体审稿。1978 年春，编者又根据当前形势对教材的要求，并参考国内外有关资料，对初稿进行了全面的修改。在矢量力学和分析力学两方面都增加了必要的基础理论和较重要的实际材料，更新了一些例题，各章都进行了改编，增选了八十多个习题。总之，本书的内容较初稿有成倍的增加。

在改编期间，得到不少同志的鼓励与支持。湖南师院周启煌同志对于应增加的内容提了很好的建议。1978年9月在济南教材审稿会上，湖南师范学院(主审)、北京师范大学、江苏师范学院、南京师范学院、山东师范学院、青海师范学院、贵阳师范学院、内蒙古师范学院、曲阜师范学院、徐州师范学院、山东师范学院聊城分院等院校的同志都以积极认真的态度，对原稿提出了很多宝贵意见，对提高本书质量起了很大作用。我在此谨向同志们致以衷心的感谢。

由于时间仓促，又限于个人业务水平，谬误自多，甚盼读者不吝批评、指正。

吉林师范大学 肖士珣

1979年1月于长春

# 目 录

第二版序	1
第一版序	3
绪论	1
第一章 经典力学基础	4
§ 1-1 物体的抽象模型——质点和刚体	4
§ 1-2 参考系 空间与时间	6
§ 1-3 运动方程 速度 加速度	8
§ 1-4 平动参考系中的速度合成与加速度合成	13
§ 1-5 力	16
§ 1-6 牛顿运动定律	20
§ 1-7 力的独立作用原理	25
§ 1-8 经典力学的相对性原理	27
第一章小结	30
参考书目	31
第二章 质点力学	33
§ 2-1 自由质点的运动微分方程	33
§ 2-2 质点的一维振动	44
§ 2-3 质点在重力场中的抛射运动	58
§ 2-4 带电粒子在恒定的均匀磁场中运动	63
§ 2-5 质点的约束运动	65
§ 2-6 质点动量定理和角动量定理	75
§ 2-7 功 动能定理 势能 机械能守恒定律	79
§ 2-8 质点在有心力场中的运动	93
* § 2-9 霍曼轨道	105
第二章小结	109
参考书目	112



<b>第三章 质点系力学</b> .....	113
§ 3-1 动量定理 动量守恒定律 .....	113
§ 3-2 角动量定理 角动量守恒定律 .....	118
§ 3-3 动能定理 机械能守恒定律 .....	127
§ 3-4 二体问题 .....	131
§ 3-5 弹性碰撞 .....	133
§ 3-6 粒子散射 卢瑟福公式 .....	144
§ 3-7 变质量物体的运动 .....	151
第三章小结 .....	157
参考书目 .....	159
<b>第四章 刚体力学</b> .....	160
§ 4-1 自由刚体的运动微分方程 .....	160
§ 4-2 空间力系的简化 刚体的平衡 .....	162
§ 4-3 刚体绕定轴转动 .....	172
§ 4-4 刚体的平面运动 .....	179
§ 4-5 刚体定点转动的运动分析 .....	192
§ 4-6 刚体定点转动的角动量和动能 .....	200
§ 4-7 回转仪的近似理论和应用 .....	212
§ 4-8 欧勒方程 .....	216
§ 4-9 拉格朗日陀螺 .....	223
§ 4-10 带电粒子系在磁场中的进动 .....	229
*§ 4-11 自旋抛体的运动 .....	231
第四章小结 .....	236
参考书目 .....	239
<b>第五章 相对运动</b> .....	240
§ 5-1 质点在平面转动参考系中的速度与加速度 .....	240
§ 5-2 相对运动的动力学方程 惯性力 .....	247
§ 5-3 相对平衡 .....	250
§ 5-4 相对于地球的静止和运动 .....	253
§ 5-5 佛科摆 .....	259
*§ 5-6 科氏力对风与海流的影响 .....	262
第五章小结 .....	265

参考书目	267
<b>第六章 分析力学</b>	<b>268</b>
§ 6-1 约束 广义坐标 虚位移 理想约束	269
§ 6-2 虚功原理(虚位移原理)	275
§ 6-3 拉格朗日方程	278
§ 6-4 小振动	293
§ 6-5 正则方程	302
*§ 6-6 罗斯方法	312
§ 6-7 哈密顿原理	314
*§ 6-8 刘维定理	328
*§ 6-9 泊松括号	330
*§ 6-10 正则变换	334
*§ 6-11 哈密顿-雅可毕方程	338
*§ 6-12 从经典力学到波动力学	345
第六章小结	349
参考书目	354
<b>附录 从牛顿方程推导拉格朗日方程</b>	<b>355</b>
<b>习题</b>	<b>358</b>

# 绪 论

## 1. 力学是一门精确的科学

力学是研究物质的机械运动规律的科学。在科学发展史中，它来源于人类长期的生产实践并反作用于生产实践，是物理科学发展的先驱。它运用严谨的科学方法，通过大量的观察和实验把感性认识上升为理性认识，形成了完整的理论体系，并把定量的力学因果律和数学分析密切结合起来，即将完整的力学体系用严密的数学形式表达出来，形成了经典物理学的一大支柱。它创造了表达因果性物理定律所必须的工具，即数学物理方法。由于力学遵循定量的因果律与严密的数学方法，具有科学的预见性和准确性，所以它是一门精确的科学。

## 2. 力学的研究对象和分类

力学所研究的机械运动就是物体的相对位置随时间的变化。这种运动形态和物质的其他运动形态相比是较为简单的，例如火箭的飞行、机器的转动、物体的变形等。在从天体到生物体的复杂运动中，也常伴随着机械运动，例如，星际中各种粒子的碰撞，动物的心脏跳动，血液的粘滞性流动等等。

从远古以来，人们对机械运动的认识主要基于生产劳动、生活实践和科学实验，通过各种变革，不断积累经验，逐渐认识了机械运动的某些现象、概念和规律，利用归纳和演绎的科学方法，系统化为以牛顿运动定律和万有引力定律为基础的经典力学，即牛顿力学。

牛顿力学一般可分为三个组成部分：运动学、动力学和静力学。运动学是描述和分析物体机械运动的各种可能形式及其特点。动力学是研究在任何给定的条件下物体运动所遵循的规律，其中心课题是确定力学系统在已知“力”的作用下所发生的运动(或其逆问题)。静力学是研究物体处于“静止”状态下所遵循的条件，即物体的平衡问题。

力学还可以按所研究的对象来分类。最简单而又最基本的是单个质点的力学，其次是质点系(即质点的集合)力学和刚体(即一种特殊的质点系)力学。另外还有按各种聚集态的特性来分类，如固体力学，弹性和塑性力学，粘滞性流体力学，液体力学和空气动力学等等。除此之外，还有天体力学、断裂力学和一些新兴的边缘学科如化学流体力学、生物力学等分支。力学的分支虽然十分广泛，但总的说来可归为两个主要方面，一类是侧重于探讨基础理论的理论力学，另一类是侧重于解决实际技术问题的应用力学。二者相辅相成，随现代科学技术的发展而相互促进。所以力学既是物理科学的基础，又是技术科学的基础。

### 3. 经典力学的适用范围

大家知道，现有的物理理论都是在一定范围内和特定条件下的相对真理，都有它的局限性。经典力学所描述和研究的仅是宏观物体低速率运动，它具有两方面的局限性：

第一，在狭义相对论中，光在真空中的速度  $c$  ( $c=2.997925 \times 10^8$  米/秒)是粒子速度(能量传递速度)的上限，它可作为区别经典力学和相对论物理学的判据。粗略地说，如果物体运动的速度接近光速时，就不能用经典力学处理。

第二，在量子力学中，也有一个类似  $c$  的判据，即普朗克常数  $h$  ( $h=6.626 \times 10^{-34}$  焦耳·秒)。如果一个体系具有与  $h$  相比拟的

作用量<sup>①</sup>(能量 $\times$ 时间)时,则该体系的运动必须用量子力学处理;如果一个体系具有比 $h$ 大得多的作用量,就可以用经典力学处理。这就是说,除了某些特殊情况外,经典力学对于微观粒子一般均不适用。

学习理论力学要理论联系实际,要掌握机械运动的基本概念、基本规律和处理方法,通过必要的习题作业加强基本计算的训练,培养分析实际力学问题的能力,为学习后继课程、解决实际力学问题、进行科学研究打下初步基础,以便将来更好地为我国社会主义现代化建设事业贡献力量。

---

<sup>①</sup> 作用量的概念详见 §

# 第一章 经典力学基础

经典力学体系的核心是牛顿所总结的运动三定律，它们表达了物体机械运动的因果性关系。牛顿为了给予他的体系以数学的形式，他发明了微积分并有了关于微分方程的概念。这样就可以用微分方程的形式表达他的运动定律。爱因斯坦说过“只有微分定律的形式才能满足近代物理学家对因果性的要求。微分定律的明晰概念是牛顿最伟大的理智成就之一。”<sup>①</sup>

经典力学体系是以三个“独立”的基本概念为基础，即：不受物体运动状态影响或与物体运动无关的所谓“绝对化”质量、空间与时间。因此，经典力学体系具有两个主要特征：(1)遵循严格的因果律；(2)存在质量、空间、时间的“绝对化”，以及它们之间的相互独立性。这两个特征，特别是后者，实际上成为其缺点，暴露出它的狭隘性，规定了它的适用范围，即只适用于宏观物体低速运动的描写。

本章的目的，就是要阐明经典力学的基本概念和基本定律。

## § 1-1 物体的抽象模型——质点和刚体

大家都知道，力学的研究对象是物体，其任务是考察一给定的物体在来自其周围环境的外力作用下的运动变化，并预言它将来的运动情况。因此，首先应当把要考察的物体从它的周围环境分离出来，这就是我们常说的分离体。最特殊的分离体是质点(微粒 *particle*)。诚然，我们都是质点的世界中生活，例如电子、原

---

<sup>①</sup> 许良英、范岱年编译《爱因斯坦文集》第一卷，第 223 页，商务印书馆(1976)。

子、分子、机器零件、车子、地球、太阳、星、星群等等。因此，我们必须对质点有一明晰的概念。试问，怎样的一个分离体才能视之为质点？这个问题，看来似乎很简单，但常常不能直接了当地以“是”或“非”来回答，而必须根据具体情况和条件。例如电子、 $\alpha$ 粒子或原子核在有心力运动情况下，均可视之为质点；行星和恒星相距足够远时，也可以把它们看成质点。但任何一个分离体都有其长度、体积及内部结构，一般情况下这些特性往往必须加以考虑，因此常常不能把物体当做质点，而必须看成质点的集合，即质点系。在质点系中，各质点间存在着内在联系——“相互作用”。如果这些联系足够强，能使物体在外力作用下不发生变形(形状和体积)时，就可以采用另一种理想模型——刚体。

下面，让我们从物体的特性角度，进一步考察质点的意义。任何物体都具有下列几种物理特性：即质量、大小(体积)、形状、内部结构、电荷、磁性和相互作用等。那么，一个质点至少应具备哪些特性物理量？

如果所考察的运动对象是带电的物体，除质量和大小外，电荷也是一个重要的特性量。一般物体在正常状态下表现为中性，所以在力学中，往往着重考察物体的质量及其大小这两个特性量。

电子的静质量为  $9.1096 \times 10^{-31}$  千克，如果把它看成球形，线度约为  $10^{-15}$  米。

简单分子的分子量为原子量的 10—100 倍，直径为几埃(1 埃 =  $10^{-10}$  米)。最大的分子量约为  $10^{-20}$  千克，长为  $10^{-7}$  米。地球表面上物体的质量从 1 毫克到  $10^{12}$  千克。恒星间的距离以光年计，1 光年 =  $9.464 \times 10^{15}$  米。离太阳最近的星是 4 光年，约为  $3.786 \times 10^{16}$  米。人类居住的银河系的直径约为  $10^5$  光年。其中约有  $10^6$ — $10^{11}$  个星，星之间距离很远，所以在宇宙空间中物质分布的密度很小，约为  $10^{-20}$  千克/米<sup>3</sup>，这样，每个星球本身的大小与星

际空间的线度相比是微不足道的。因此，在星际空间中观察星球运动轨道时，所需考虑的只有质量这一主要特性量，这时可以把星体视为一质点。

综上所述，在处理某些力学问题中，有时可以不考虑分离体的大小与形状，这种只具质量而不计其大小和形状的合理的抽象模型叫做质点。在分析物体平动的动力学问题时，可以把物体看成质点。但在分析旋转着的子弹在空气阻力下运动时，子弹体积虽小，却不能不考虑其大小和形状，不能把它当作质点处理。可见，能否把物体看成质点，完全取决于该力学问题的具体情况。

## § 1-2 参考系 空间与时间

研究物体的机械运动，即研究物体(质点)的空间位置随时间的变化，首先遇到的问题是：(1) 如何确定质点的空间位置；(2) 怎样量度时间；(3) 如何描述位置随时间的变化。人们从大量的实践中科学地抽象出下列基本概念。

### 1. 参考系

在确定质点的位置及其变化时，必须首先指明，位置及其变化是相对于哪一个参考物而言的，这个被指定的参考物称为参考系。参考系应包括在被指定参考物上的一个空间坐标系和固定于此坐标系上的时钟。例如，为了描述在行驶中的电车里某人的位置及其变化，可以取电车为参考系，也可以取地球为参考系。再如，描述一宇宙飞行员在载人的卫星中运动时，可以分别以卫星和地球为两个不同的参考系，记载他在各个时刻的位置。显然，这两份记录数据不同。由此可见，同一运动，相对于不同参考系的观察者，其表述是不一样的。

### 2. 经典力学的时空观

在经典力学建立初期，即十七世纪末到十八世纪初，牛顿依据



当时的实验结果和人们对自然界的认识水平，提出了“绝对时空观”。牛顿一方面认为：时间与空间都是可以通过感官来感觉并得以测量的客观存在，就像年、月、日和物体间的距离等等；另一方面，只用这些概念并不能完备地表达他的运动定律，最好是把时、空区分为“绝对的和相对的、真正的和表观的、数学的和通常的”。在他的《自然哲学的数学原理》(1686)中说：“绝对的、真正的和数学的时间自身在流逝着，而且由于其本性而在均匀地、与任何外界事物无关地流逝着，又可名之为延续性；相对的和表观的时间是延续性的一种可感觉的、外部的通过运动来进行的量度”；“绝对的空间就其本性而言，是与外界任何事物无关而永远是相同的和不动的。相对空间是绝对空间的可动部分或者量度。”<sup>①</sup>

从牛顿的上述原话不难看出，他所主张的“绝对时空观”是与客观事物和运动无关的某种假定的“东西”。绝对空间是与物质无关的“空虚”容器，物质在其中运动对此空间不会产生任何影响。在此空间中所进行的长度测量与欧几里得几何学相符合，所以这种空间是纯粹数学性的欧几里得空间。“因此空间和时间被剥夺了的并不是它们的实在性，而是它们的因果的绝对性——即只起影响而不受影响的这种绝对性，牛顿为了用公式表述当时已知的定律，不得不把这种绝对性强加给它们。”<sup>②</sup>正因为经典力学是从这种时-空-物质运动相割裂的基本假设出发，所以“牛顿运动定律只能认为是对低速运动才有效的极限定律。……广义相对论成为场论纲领发展中的最后一步。……广义的惯性定律取代了牛顿运动定律的作用。”<sup>③</sup>

---

① 参阅 H. S. 塞耶：《牛顿自然哲学著作选》(1974)，第 19—20 页，上海人民出版社。

② 《爱因斯坦文集》第一卷，第 228 页，商务印书馆(1976)。

③ 《爱因斯坦文集》第一卷(1976)，第 228 页。