

319

高等学校试用教材

理论力学简明教程

肖士珣 编

人民教育出版社

52.1
290

高等学校试用教材

理论力学简明教程

肖士珣 编

人民教育出版社

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,附有习题150多个,可供80学时左右教学之用。

本书可作为师范院校理科或综合大学理科试用教材。

276453

高等学校试用教材

理论力学简明教程

肖士珣 编

*

人民教育出版社出版

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 787×1092 1/32 印张 10 字数 240,000

1979年2月第1版 1979年6月第1次印刷

印数 00,001—90,000

书号 13012·0284 定价 0.73 元

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 80 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、§ 6-6 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。

本书的初稿由编者写于 1966 年，江乃纯和赵振业两同志参加了部分的编写。1978 年春，编者又根据目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发展。

在改编期间，得到了不少同志的鼓励和支持。周启煌同志对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，为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

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	12
§ 1-5 力	15
§ 1-6 牛顿运动定律	19
§ 1-7 力的独立作用原理	23
§ 1-8 经典力学的相对性原理	26
第二章 质点力学	30
§ 2-1 自由质点的运动微分方程	30
§ 2-2 质点的一维运动	34
§ 2-3 质点在重力场中抛射运动	45
§ 2-4 带电粒子在恒定的均匀磁场中运动	49
§ 2-5 阻尼强迫振动	52
§ 2-6 质点的约束运动	57
§ 2-7 功 动能定理 势能 机械能守恒定律	65
§ 2-8 质点在有心力场中的运动	77
第三章 质点系力学	89
§ 3-1 动量定理 动量守恒定律	89

100091

§ 3-2	角动量定理 角动量守恒定律	96
§ 3-3	动能定理 机械能守恒定律	102
§ 3-4	二体问题	106
§ 3-5	弹性碰撞	109
§ 3-6	粒子散射 卢瑟福公式	117
§ 3-7	变质量物体的运动	123
第四章	刚体力学	129
§ 4-1	自由刚体的运动微分方程	129
§ 4-2	空间力系的简化 刚体的平衡	131
§ 4-3	刚体绕定轴转动	140
§ 4-4	刚体的平面运动	148
§ 4-5	刚体定点转动的运动分析	157
§ 4-6	刚体定点转动的角动量和动能	163
§ 4-7	回转仪的近似理论和应用	171
§ 4-8	欧勒方程	175
§ 4-9	带电粒子系在磁场中的进动	184
*§ 4-10	自旋抛体的运动	186
第五章	相对运动	191
§ 5-1	质点在平面转动参考系中速度与加速度	191
§ 5-2	相对运动的动力学方程 惯性力	197
§ 5-3	考虑地球自转的落体运动	200
§ 5-4	佛科摆	204
§ 5-5	相对平衡	207
第六章	分析力学	213
§ 6-1	约束 广义坐标 虚位移 理想约束	213
§ 6-2	虚功原理(虚位移原理)	218
§ 6-3	拉格朗日方程	221
§ 6-4	小振动	235

§ 6-5 正则方程	243
§ 6-6 哈密顿原理	249
§ 6-7 泊松括号	260
§ 6-8 正则变换	264
§ 6-9 哈密顿-雅可毕方程	269
习题	278

绪 论

1. 力学是一门精确的科学

世界是物质的。一切物质都是在不断地变化和运动着。

力学是研究物质的机械运动规律的科学。它是物理学的一部分,在科学发展史中,它是物理科学发展的先驱。它来源于人类长期生产活动并反作用于生产实践。它运用严谨的科学方法,即通过大量的观察和实验两个感性认识阶段,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分析数学密切结合起来,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,它开创了表达因果性物理定律所必须的工具即数学物理方法。所以力学的主要特点有三:定量的因果律、科学的预见性和严密的数学方程式化,从而成为一门精确的科学。

2. 力学的研究对象和分类

前面已经说过,力学是研究物质机械运动规律的科学。所谓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。但是从天体到有生命物体的复杂的高级运动中也常伴随着机械运动,例如动物的心脏跳动、血液的粘滞性流动等也属于机械运动。

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,逐渐了解到了机械运动的某些规律,利用归纳和演绎的科学方法,系统化以为以牛顿运动定律和万有引力定律为基础的经典力学体系(或牛顿力学体系)。

100091

经典力学(以后简称为力学)可分为三个组成部分:运动学、动力学和静力学。运动学是描述物体的各种可能运动的形式和特点。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给定的“力”的作用下所发生的运动。静力学是研究作用于物体上任意力系对固定的参考系保持静止的问题。

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科学如化学流体力学,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,一个是侧重于基础理论的探讨即理论力学,另一个是侧重于解决工程技术的实际问题即应用力学。二者相辅相成,都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。经典力学仅是宏观物体低速率运动的描述,它具有两方面的局限性。

第一,在狭义相对论中,光速 $c(c=2.997925 \times 10^8$ 米/秒)是粒子速度(能量传递速度)的上限,它提供了经典力学和相对论力学的判据。粗略地说,如果物体运动的速度接近于光速时,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 $h(h=6.62559 \times 10^{-34}$ 焦·秒),如果一个体系具有与 h 相比拟的作用量(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 大得很多的作用量时,就可以用经典力学处理。这就是说,经典力学对于微观粒子,除了某些特殊情况外,一般均不适用。

总之,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,培养分析力学问题的能力,为学习后继课程、钻研实际力学问题、进行科学研究打下初步基础,以便将来更好地为我国实现社会主义四个现代化贡献力量。

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（和万有引力定律），它们表达了物体机械运动的因果性关系。爱因斯坦曾经指出“为了给予他的体系以数学的形式，牛顿首先发现微分的概念，并用微分方程的形式表达他的运动定律”^①。这些定量的定律，既总结过去，又预言未来。

经典力学体系从本质上看是建立在四个“独立”的基本概念上，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、时间和力。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、时间和力的“绝对化”^②，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其周围环境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（粒子）^③。诚

① 谈镇生，力学和它的发展，〈力学学报〉3，（1978），242。

② 在哲学上是属于形而上学的。这种错误观点在物理学发展中起过阻碍作用。

③ 牛顿本人所说的“质点”是原子和其他“自然建筑的砖块，即粒子（Particle）”。当然现代粒子用意已经改变了。

然,我们都是在质点的世界中生活,例如电子、原子、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。例如原子或原子核在轰击不太厉害的情况下,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都必须加以考虑,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,能使物体在环境外力作用下不发生变形(形状和体积不变)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、磁荷和相互作用等。那么,一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,电荷是一重要的特性量。一般物体是由大量的原子组成,正常状态下表现为中性,所以在力学中,只要考察它的质量和大小两个特性量。

电子的质量约为 10^{-30} 千克,精确的量值为 9.1×10^{-31} 千克。如果把它看成球形,线度约在 10^{-15} 米。

简单分子由少数原子构成。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。

行星与恒星的距离是以光年计,1光年= 9.46×10^{15} 米。离太

阳最近的星是 4 光年, 约为 3.7×10^{13} 公里。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, 但星与星距离很远, 所以在宇宙空间中物质分布的密度却很小, 约为 10^{-20} 千克/米³。因此, 在星际空间中观察星球运动轨道时, 就可以把星球视为质点。

综上所述, 在力学中常常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抽象的、合理的模型叫做质点。在分析物体平动(没有转动)动力学问题时, 可以把物体看成质点。但在分析子弹所受的空气阻力和考察它的来复线运动问题时, 子弹体积虽小, 但必须考虑其大小和形状。总之, 能否把物体看成质点, 完全取决于力学问题的本身。

§ 1-2 参考系 空间与时间

力学所研究的运动是物体的机械运动, 即质点(物体)的空间位置随时间的变化。研究这种运动首先遇到的问题是: (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

在确定质点的位置时, 必须首先指明, 位置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。例如, 为了描述在行驶中的电车里某人的位置, 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

在经典力学建立时, 即十七世纪末到十八世纪初, 依据当时的

实验资料 and 人们对自然界的认识程度，认为空间距离和时间间隔是“绝对不变的”，即与参考系的选取和质点运动速度 v 无关。

依牛顿的看法，认为“绝对空间的自然性是与任何外界无关，永远保持相似和不动”。这种空间似乎是能用“长度不变”的米尺一个接一个地联接起来构成稳定的三维空间点阵，许多质点在其中运动，但它们与此空间没有任何相互作用。在此空间中所进行的长度测量与欧几里得几何学定理相符合，所以这种空间是纯数学性的欧几里得空间。

对于时间，在牛顿看来也是“绝对的”，他说“确实是绝对的数学时间，从它的本性看，等同地流逝着，与外界无关……”。200多年来，人们曾经接受这种朴素的绝对时空观。

事实上，把空间与时间相割裂以及把它们和物质运动相分离的看法是不妥的，因为不能设想，存在于空间中的物质运动完全脱离时间（不论多么短，也不能为零）；同样也不能设想存在于有限时间间隔中的物质，在空间中不占有位置。

十九世纪后期到二十世纪初，随着生产技术和科学实验手段的发展，相继发现了原子可以分割，放射性元素能够转化，高能高速粒子蜕变等新现象和新问题都和经典物理理论相抵触。追本溯源，迫使人们必须从根本上抛弃经典力学的绝对时空观。1905年，爱因斯坦分析了新的实验事实，提出了相对论时空观，建立与物质运动密切联系的四维时空结构，完成了狭义相对论和处理接近光速的（ $c = 3 \times 10^8$ 米/秒）高能粒子运动的新的力学体系——相对论力学。

我们在地面上日常遇到的物体运动大多数是低速的。例如，火车速度约为 20—30 米/秒；子弹速度约为 4×10^2 米/秒；第一宇宙速度也不过 8×10^3 米/秒，和光速相比低 10^5 数量级。用经典力学处理这类（ $v \ll c$ ）物体运动，由于计算所产生的误差最多也不过

10^{-6} , 显然可以忽略不计。

由此可见, 经典力学的“绝对时空”的形而上学观点必须彻底抛弃, 但用这种简单的时空结构处理远小于光速的质点运动还是可行的。

§ 1-3 运动方程 速度 加速度

为了观察质点的运动, 首先要选取参考系。参考系一经选定, 就要在此参考系上固定一空间(三维的)坐标系, 用以确定质点相对于选定参考系的位置。坐标系的种类很多, 如笛卡儿坐标系、球坐标系、平面极坐标系等等。对于一个具体问题, 选取哪种坐标系都行, 但是人们总愿意选取适合于本问题性质的最简单的坐标系。

1. 运动方程

设一质点在空间中运动。以物体 π 为参考系, 在 π 上取 O 为原点, 竖立固定的笛卡儿坐标系 $Oxyz$ (图 1-1), 则质点在时刻 t 对点 O 的相对位置(距离和方向) M 可由位置矢径 $r = OM$ 来描述, 或用它在笛卡儿坐标系的分量表示

$$r = xi + yj + zk \quad (1-1)$$

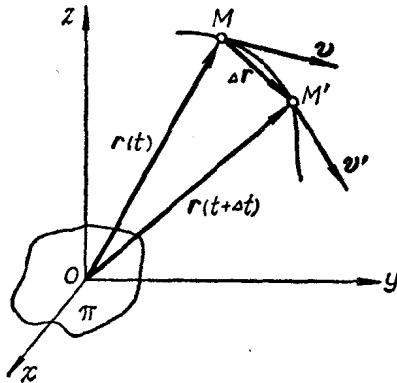


图 1-1

这里的 i, j, k 是沿坐标轴的单位矢量。

在运动过程中, 质点的位置矢径 r 随时间变化, r 矢端在空间的轨迹就是质点的运动轨道 (如信号弹所曳的尾光)。 r 与时间 t 的一一对应关系, 可归结为一确定的 t 的单值连续函数形式

$$r = r(t) \quad (1-2)$$

或

$$\left. \begin{aligned} x &= x(t) \\ y &= y(t) \\ z &= z(t) \end{aligned} \right\} \quad (1-2')$$

这个函数完全取决于质点的运动规律, 故式(1-2)称为质点的运动方程, 它是描写质点运动规律的方程。从运动方程组中消去时间参数 t , 就得到只有坐标关系的几何方程, 它表征质点的运动轨迹, 称为轨道方程。例如, 某一质点的运动方程是 $x = a \cos \omega t$ 和 $y = b \sin \omega t$, 则其轨道方程是 $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$, 轨迹是一椭圆。

2. 速度

为了描述质点在有限时间内的位置变化, 必须引入位移的概念。设质点在 t 时刻通过点 M , 在 $(t + \Delta t)$ 时刻通过点 M' , 则矢量

$$\overline{MM'} = \Delta r = r(t + \Delta t) - r(t) \quad (1-3)$$

叫做质点在 Δt 时间内的位移, 其方向是由起点 M 指向终点 M' , 其量值等于弦长 $\overline{MM'}$ 。

通过位移 Δr 和它所对应的时间间隔 Δt , 可以反映出质点位置变化的特征。量 $\frac{\Delta r}{\Delta t} = v^*$ 叫做质点在 Δt 内的平均速度, 它表征质点在 Δt 内, 平均说来, 位置变化的快慢和方向。当 Δt 愈小, 点 M' 愈趋近于点 M , v^* 愈能反映质点通过点 M 的实际位置变化情况。令 $\Delta t \rightarrow 0$, 得

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{r(t + \Delta t) - r(t)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta r}{\Delta t} = \frac{dr}{dt} = \dot{r}(t) \quad (1-4)$$