

L
I
X
U
E

力学

(上册)

漆	安	慎
杜	婵	英

北京师大教材科

这本教材是为高等师范院校物理系编写的，也可以作为在职中学物理教师进修的参考书。它是自1977年以来北京师范大学物理系、天文系、无线电专业及图书馆专业本科生试用教材。根据1977年召开的高等学校理科教材会议上讨论的《力学大纲》和1980年举行的高等学校理科物理教材编审委员会扩大会议上讨论的《高等师范院校力学教学大纲（供物理专业试用）》，并且总结了几年来使用这本教材的经验，我们对这本教材曾作过三次修改和补充。

在教材的编写中，我们力求作到有明确的针对性；重视科学性、系统性；有较宽的适应性。

本教材针对我校学生毕业后要当中学物理教师——青少年学习物理学的启蒙者——的需要，我们对基本概念、基本规律的引出都较详细地叙述其物理背景，使抽象的概念能有清晰的物理图象。并且运用物理概念及规律去深入地剖析客观发生的物理过程，以求使学生对概念和规律的理解较为透彻。另外，我们还力图使学生注意物理思想的学习，在教材中通过“质点”、“刚体”等概念的建立，强调“理想模型”在物理学中的地位。有意识地通过分析实例、解题等环节引导学生自觉掌握运用“抓住起主导作用的因素”这个研究物理学的基本方法。为了开扩眼界，教材中还适量编入了接触现代科学技术的内容，并且还编写了二力杆件、弹簧形变分以适应中学物理教学的需

要。全书内例题的解答力图给学生以示范，培养他们准确地运用概念规律分析问题的能力，提高他们条理清晰的文字表达能力。本教材还针对学生在学习这门课时的一些带有普遍性的问题，总结了教学中积累的经验，选取“支撑面的压力和重力”、“斜面上物体受力”、“向心力”、“摩擦力作的功”及“伯努利方程的实质”等几个问题进行有正误对比、有想想交流的讨论，不仅是给出正确答案，更重要的是希望在初学者的学习方法及思维方法上有指导作用。

本教材以牛顿运动定律为基本出发点，所有的概念规律都统一在一个完整的体系中，每个概念、规律在这个体系中占有一个确定的环节，因此因果关系、适用范围、成立条件等都明瞭清晰。理论体系思路鲜明，推理有较强的逻辑性。对于力学中一些最基本的概念，往往因司空见惯而实际上模糊不清，如时刻、时间间隔、计时起点、位置坐标、位移、路程、初始条件等等，我们都源源本本讲起，给出明确定义，从课程一开始就训练学生建立物理概念要准确、严格。我们也注意阐述一些数学工具(如矢量)的物理基础。

由于目前各地中学教学水平不尽一致，我们希望教材能适应程度不同的学生使用，包括自学的读者使用，因此编写中注意和中学教学内容的衔接。对基本概念和规律的来龙去脉叙述得比较细致，使大家有统一的起步点。而各部分内容的落脚点不低于或略高于过去普通物理力学水平。教师可根据学生的情况，对各部分内容详讲、略讲或不讲，由学生自学。本教材对高等数学的使用具有较大的灵活性。正文中不用微积分(特别是前三章)，而是把微积分的运用放在相应物理内容的后面，以小字印出。这样学过微积分的，就可以把这种数学工具和物理内容结合起来，没学微积分的可越过小

字阅读，也成体系。

我系孙岳、霍立林、孙志铭老师及力学教研室的其它老师审阅、使用了本教材，并进行多次讨论，提出很多宝贵建议。我们还得到李平付教授的帮助、指正。1979年喀兴林教授曾使用此教材讲授力学课，对本教材的修改、补充和提高给予了很大关心和具体的指导。使用本教材的兄弟单位的师生们也给过热情指教。在此我们一并表示热诚的感谢。

由于水平和教学经验的不足，教材中定有不少错误和缺点，诚恳地希望得到大家的指正。

北京师范大学物理系 漆安慎
杜婵英

1981. 4.

前 言

物体与物体之间或物体各部分之间相对位置的变动，叫做机械运动。力学就是研究机械运动的，即研究机械运动怎样描述，运动中服从怎样的规律等等。

力学也是最早发展的科学之一。人们最初从生产实践中逐步认识了机械运动。因为农业生产的需要，使用了杠杆、斜面、滑轮等简单机械。在运输上使用了车子，随着航运发展，开始了造船。这些生产的发展，使人们对机械运动有了初步的、感性的认识。这种认识还只是片断的经验，还没有上升到理性的阶段。在中世纪的漫长岁月中，由于封建制的生产关系束缚和神学的统治使生产发展十分缓慢，因此力学和其他科学部门一样，几乎处于停滞状态。十五世纪以后，欧洲开始了文艺复兴时期，随着资本主义生产关系的发展，商业、手工业、航海和军事工业的兴起，从而使力学进入了一个空前未有的发展阶段。在15—18世纪内，力学得到了迅速的发展，并建立了完整的系统理论。

在此期间内，意大利人芬奇研究了力的平衡，引入了力矩的概念；芬兰物理学家史蒂芬从研究斜面问题，得出力的分解和合成定律；在动力学方面，哥白尼提出了日心说，引起了宇宙观大革命；德国科学家开普勒根据哥白尼的学说以及天文观察资料建立起行星运动三定律，为牛顿万有引力定律打下了基础；意大利科学家伽里略研究落体运动的规律，引出了加速度的概念等等。直到十七世纪，英国物理学家兼数学家牛顿总结以前无数科学家的成就，发表了著名的牛顿运动三定律和万有引力定律，建立了经典力学的基础。力学促

进了数学的发展，牛顿还和莱布尼兹一起创立了微积分，利用微积分这种数学方法，使力学和数学都取得了辉煌的成就。此后由欧勒和拉格朗日等人进一步将力学沿着数学分析的方向前进，成为一门严密而完整的数理科学。

可以说，三百年前力学为自然科学打开了局面，提供了至今大家公认的科学工作方法：对自然现象深入的观察；现象是有多个因素的，选择单个因素进行实验；综合、分析实验结果，建立恰当的理想模型（突出实际对象的主要特征，忽略次要方面），应用数学工具得到理论上的结果。这些理论结果，又受到实践的检验，校正和丰富了理论。近三百年力学又补充进了新的重要内容，如建立了连续介质力学等，特别是随着现代科学技术的发展，实现宇宙航行，这都是和超音速流体力学及材料的力学特征的研究密不可分的。此外，生物力学、地质力学、电磁流体力学等也蓬勃兴起。力学是一门古老而有生命力的学科。

近五十年量子论和相对论的建立，解决了经典力学所不能解决的微观粒子和接近光速运动的问题，这是在物理学中很高的成就。而且也正是在新理论中，证明了经典力学是它们的一种极限情况。新理论给出了经典力学的适用范围：宏观物体（比原子大很多）、低速运动（ $\ll$ 光速）。确定了经典力学就是新理论的一部分。现代人造星体、宇宙飞船的运行计算还是严格的以经典力学为依据。认为量子论和相对论的创立就是完全否定了经典力学的看法是错误的。

我们要学习的是经典力学中的基本概念和规律，它们是经典力学中最基本的内容。值得提出的是，这些概念、规律和研究问题的方法也为物理学其它部门如电磁学、光学等所应用，因而也可以说它们是学习物理学的基础。

我国有悠久历史，远在四千多年前就会制作耕作器械，建车船、造房屋。墨翟(公元468—382)对力学理论有研究，对力和运动下了适当的定义。之后我国劳动人民和古代科学家在生产斗争中创造了很多应用力学原理制成的工具。秦代水利学家李冰父子领导人民修成了都江堰；汉代科学家张衡制造了地震仪；三国时代马钧创造了指南车和利用惯性原理的离心抛石机；在宋代出现了世界上第一支利用火药爆炸反推力而制成的火箭。由于封建社会生产关系的束缚，我国力学的发展主要是在应用方面而没有能总结出完善的理论，致使我国对经典力学的创立未能作出应有的贡献。

今天，祖国要实现四个现代化，中华民族应对人类作出应有的贡献。力学像其它学科一样，将在四个现代化中大大发挥其威力。

目 录

第一章 质点运动学	(1)
§ 1-1 参照系	(1)
§ 1-2 测量长度和时间的标准	(2)
§ 1-3 质点	(4)
§ 1-4 直线运动的运动规律·位移和路程	(6)
§ 1-5 直线运动的瞬时速度	(11)
§ 1-6 直线运动的位移和速度的关系	(18)
§ 1-7 直线运动的瞬时加速度	(24)
§ 1-8 匀变速直线运动	(29)
§ 1-9 自由落体运动	(37)
§ 1-10 质点平面运动的基本概念	(42)
§ 1-11 质点平面运动的速度和加速度	(46)
§ 1-12 相对运动	(49)
§ 1-13 抛体运动	(56)
§ 1-14 圆周运动	(65)
§ 1-15 一般曲线运动	(72)
第二章 牛顿运动定律	(88)
§ 2-1 牛顿第一定律	(88)
§ 2-2 牛顿第二定律	(91)
§ 2-3 牛顿第三定律	(98)
§ 2-4 力学单位制	(100)
§ 2-5 力学中常见的力	(106)
§ 2-6 质点的平衡	(117)

§ 2-7	牛顿定律在直线运动的应用	(121)
§ 2-8	牛顿定律用于曲线运动	(131)
§ 2-9	力学的相对性原理	(140)
§ 2-10	直线加速参照系中的惯性力	(147)
§ 2-11	惯性离心力	(151)
§ 2-12	克里奥利力	(156)
§ 2-13	牛顿定律的适用范围	(162)
第三章	功和机械能	(180)
§ 3-1	功和功率	(181)
§ 3-2	质点的动能定理	(193)
§ 3-3	位能	(198)
§ 3-4	质点的功能原理和机械能守恒定律	(212)
§ 3-5	质点组的功能原理和机械能守恒定律	(222)
§ 3-6	能量的转换和守恒定律	(225)
第四章	动量与碰撞问题	(241)
§ 4-1	动量定理	(241)
§ 4-2	动量守恒定律	(256)
§ 4-3	火箭的运动 (选读)	(270)
§ 4-4	球的对心碰撞	(276)
§ 4-5	球的非对心碰撞 (选读)	(289)
第五章	万有引力	(301)
§ 5-1	开普勒定律	(301)
§ 5-2	万有引力定律	(304)
§ 5-3	引力位能	(313)
§ 5-4	宇宙速度	(317)
§ 5-5	关于人造地球卫星	(321)
§ 5-6	广义的相对性原理 (选读)	(326)

第一章 质点运动学

§ 1-1 参 照 系

在我们生活的物质世界中，一切物体都处于运动中。车辆行船固然在动，貌似静止的房屋桥梁也随地球一起运动，地球不但自转，还围绕太阳公转。其实，太阳也并不是静止的，天文上的观测证明，相对于就近的恒星说来，太阳系正在朝着武仙星座运动，每秒钟走二十公里；此外，太阳又是银河系中的成员，而银河系也是在旋转着的……。再把我们的注意力从广袤的宇宙转向组成各种物质的分子或原子，例如，在清澈的水中滴入一滴红墨水，则全部水都要变红，又例如，不管容器多么大，里面的气体总能够去充满它，这些众所周知的现象表明分子或原子也是在不停地运动；关于更小的粒子：中子、质子……等的研究表明，它们也无时无刻不在运动。所以，运动是普遍的，绝对的。

在“运动是绝对的”这一前提下，每个物体的运动情况如何，又具有相对性。举例来说，火车已经起动了，站在车厢里的人认为放在车厢里的物体没有动；站在站台上的人认为它在动。为什么说法不同？因为车厢里的人选择车厢为标准，站台上的人以地面为标准。一个物体相对于不同的标准具有不同的运动状况，这就叫做机械运动的相对性。

所以，我们谈到某个物体是静止的时候，总是相对于另外一个物体来说的：房屋、桥梁相对于地球而静止，车厢中的旅客相对于车厢而静止，……。也就是说，静止是相对的。

由于机械运动具有相对性，为了确切地说明一个物体的位置和运动，就必须选择其它物体做标准。

为描述运动选作标准的一个不变形的或几个无相对运动的物体叫做参照系。

究竟选择哪个物体作为参照系，看分析解决问题方便不方便来决定。象地球上各种物体运动的问题，绝大多数场合以地面，房屋等作为参照系比较方便。

§ 1-2 测量长度与时间的标准

物体的运动是在一定的时间内发生的，而物体位置移动了多少又常用距离或长度去衡量。要说明时间和长度，就需要规定时间与长度的单位。

我们已经非常习惯于用秒、分、小时为单位去测量时间，用厘米、米、千米去测量长度。但是，大家是否考虑过，我们用来量长度的米尺是否准确？我们用来测时间的钟表是否准确？准确不准确以什么为标准？法定的标准是什么？

生产实践和科学实验都非常需要有一整套测量长度、时间以及其它基本量的单位标准。特别是近代科学技术的发展更加要求这些单位标准具有很高的精确度。下面谈测量长度和时间的标准问题。

（一）测量长度的标准

十八世纪末，法国规定通过巴黎的子午线从北极到赤道距离的千万分之一为一米。到十九世纪末，一些国家在巴黎开会公认米为通用的长度单位，并按上面标准制成铂铱合金米原器，作为“米”的标准。铂铱合金强度高，温度和化学的稳定性都比较好，保证米原器有较高的精确度。米原器保存在巴黎国际度量衡局。后来，随着测量精度的提高，发现

通过巴黎子午线自北极至赤道的距离不是准确地等于 1 千万米，于是便径直以米原器为标准，规定 0.00℃ 时米原器端部细线间的距离为一米。然而，这样就违背了原来以自然数作为米标准的意图，用实物基准代替了自然常数。此外，又考虑到自然界中很多物体的物理性质会发生变化，以子午线为基础定义的米标准也会变，与此相比，微观原子的某些性质却可以合理地假定它不随时间变化，于是便试图用自然界中原子基准定义米单位。1960 年第 11 届国际计量大会正式规定“国际单位制”，又重新定义了米单位：米等于氪-86 原子的 $2p_{10}$ 和 $5d_5$ 能级之间跃迁所对应的辐射在真空中的 1,650,763.73 个波长的长度。

根据米规定的一些其它的长度单位见表 1·2-2。

表 1·2-1

长度 (米)	名 称	国 际 代 号
10^3	千米	<i>km</i>
10^0	米	<i>m</i>
10^{-2}	厘米	<i>cm</i>
10^{-3}	毫米	<i>mm</i>
10^{-6}	微米	μm
10^{-9}	纳米	<i>nm</i>

(二) 测量时间的标准

计量时间用秒为基本单位。较早的时候，国际上统一用 1900 年回归年的 $1/31, 556, 925.9747$ 为 1 秒。这里的回归年是指地球连续两次通过春分点所需的时间。当前则认为最精密的时间标准亦应为原子标准。在 1967 年国际计量大会上，已正式确定用“铯原子秒”代替原的“天文秒”来定义

时间的秒单位：1秒是和铯-133原子基态的两个超精细能级跃迁对应的辐射的9,192,631,770个周期所持续的时间。

根据秒规定的一些其它的时间单位见表1·2-2。

表 1·2-2

时间 (秒)	名 称	国 际 代 号
3600	小时	<i>h</i>
60	分	<i>min</i>
1	秒	<i>s</i>
10^{-3}	毫秒	<i>ms</i>
10^{-6}	微秒	μs
10^{-9}	纳秒	<i>ns</i>

§ 1-3 质 点

一辆卡车开出了100千米,假如有人说,因为车长6米,要说明汽车的位置,必须讲清楚,它的前端已达到100千米零6米,后端达到100千米,大家一定认为没有必要。因为车长和走出的距离相比太小,可以忽略不计,只要说,它已经开出100千米,就够了。这样,在说明汽车位置的时候,实际上已经把它当作一个“点”来看待。

再举个例子,譬如发射出的炮弹,要问它飞了多高,打了多远,回答这个问题,也没有必要区别弹头弹尾的位置有什么不同,仍然可以把它当作“点”来看待。

还有,因为地球到太阳的平均距离是14,950万千米,而地球的平均直径是12,740千米,前者约为后者的一万多倍,所以,在我们研究地球的公转时,地球上各点的运动情况基本上可看作是一样的,也就是说,可以不考虑地球的形状和

大小而看作是一个点。

上面一些简单的例子告诉我们：虽然任何物体都有一定的大小和形状，但是对于讨论某些问题时，确实可以把它当作点来看。既然当作点，当然，大小和形状都不起作用。根据这个道理，在力学中提出一个叫做“质点”的概念。所谓质点就是从实际中抽象出来的一种力学研究对象，它是具有质量而无形状大小的几何点。质点是理想模型，是科学的抽象。实际的质点是不存在的。一个物体在这个问题中可以当作质点，在另一个问题中，就不一定能当作质点。譬如，如果我们不是说明汽车跑出多远，而是研究它内部的机器怎样工作，显然，就不能再把它当作质点了。炮弹在飞行的过程中还不停地旋转，假若要研究它的旋转，炮弹的形状、大小起很关键的作用，因而也不能再把它当作质点。在讨论地球自转的问题上，同样不能把地球当作质点。一般说来，在所研究的问题中，可以不考虑与物体转动有关的问题，不涉及物体内部各部分的相对运动，就可以当作质点*。

在一定条件下，恒星、行星、车辆、行船、分子、原子以至质子、中子等微观粒子都可以当作质点并应用质点力学讨论它们的运动，因此，在力学中，质点力学具有广泛的适用对象。

这一节，我们首次提出了理想模型的问题。实际上全部物理学的原理、定律都是对于理想模型的刻划。这是因为客观事物是很复杂的，就拿一个物体来说，它有位置、形状、颜色、温度，内部物质结构等等性质。在研究某一方面的问题时，只有保留其主要性质，忽略次要性质——建立理想模

* 待我们学到第六章时，对这句话将会有更深刻的具体的认识。

型，才能找到规律。也只有建立不同的理想模型，找到事物各方面的规律，才能认识复杂的事物。可以说离开了理想模型，物理学寸步难行。许多有成就的物理学家，往往是善于提出新的理想模型的人。

理想模型是由真实物体抽象出来的，但它并不脱离实际。物理学中保留下来的理想模型都是经得住实践检验的，与实际相符的。应该说一切科学的抽象都更深刻、更正确、更完全地反映着自然。

质点是物理学中最基本的理想模型之一。在本课中还要建立刚体、理想流体等理想模型。掌握了质点的运动规律，就能推导出质点组（刚体就是一个特殊的质点组）的运动规律，所以关于质点运动规律的理论，是力学中最基本的理论。

§ 1-4 直线运动的运动规律·位移和路程

（一）关于“时间间隔”或“时间的增量”

质点的运动就是随着时间的推移，质点位置的变动。为了更好地讲清楚运动，先谈一下“时间间隔”或“时间的增量”。

举个例子，从早晨 6 点到 8 点 30 分，6 点或 8 点 30 分常称瞬时或时刻，而中间的 2 小时 30 分就叫做时间间隔或时间的增量。6 点叫做起始时刻，用 t_1 表示。8 点 30 分叫做终止时刻，用 t_2 表示。用符号“ Δt ”表示时间间隔或时间增量，那末

$$\Delta t = t_2 - t_1 = 8.5 - 6 = 2.5 [\text{小时}]$$

这就是说：时间间隔或时间增量等于终止时刻减去起始时刻。

时间从过去到未来都是无限的，为了用具体数字说明时间，必须事先选择某一时刻作为计时起点；此外，还需要规

定量度时间的单位(如秒、分、小时)。方才的6点、8点30分实际上是以夜间12点(0点)作为计时起点的。在讨论力学的时候,我们也可以选择其它时刻作为计时起点。例如,以清晨6点作为计时起点,以小时作为单位,那末清晨6点便可以用 $t_1 = 0$ 表示,当天上午8点半可以用 $t_2 = 2.5$ 表示,时间间隔或时间增量为

$$\Delta t = t_2 - t_1 = 2.5 - 0 = 2.5[\text{小时}]$$

若以清晨7点作为计时起点,那么,清晨6点用 $t_1 = -1$ 表示,8点30分用 $t_2 = 1.5$ 表示,时间增量

$$\begin{aligned}\Delta t &= t_2 - t_1 = 1.5 - (-1) = 1.5 + 1 = \\ &= 2.5[\text{小时}]\end{aligned}$$

今后计时起点的选择要看计算方便不方便来定,计时起点不一定就是物体开始运动的时刻。

(二) 质点沿直线运动的位置坐标

为了说明质点的运动,先要说明质点的位置。

我们在参照系上建立一定的坐标系,并用坐标来说明质点的位置。

质点相对于参照系沿某条直线运动,就在这条直线上选择某一点O,叫做“原点”,再沿着这条直线任选一个方向作为正方向,在图1·4-1中用空心矢号表示。然后把这个“有向直线”按一定单位截成许多相等的部分,例如每一小段代表

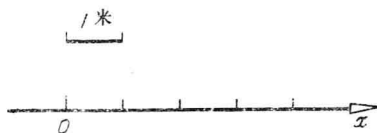


图 1·4-1

1 米。这样，就形成了最简单的坐标系，把它记作 Ox 。

图 1·4-2 表示若质点在原点右边 2.5 米，便可以用

$$x = 2.5$$

表示质点位置， $x = 2.5$ 叫做质点的位置坐标。若质点在原点左边 2 米，则质点位置坐标为

$$x = -2$$



图 1·4-2

质点的位置坐标也称作质点的坐标。

需要指出的是，坐标原点不一定是质点运动的出发点，坐标轴的正方向也不一定是质点运动的方向。我们可以根据讨论问题方便与否任意选择坐标原点的位置和坐标轴的方向。

(三) 质点沿直线的运动规律

所谓质点的运动就是随着时间的推移，质点位置的变化。如任意给定某时刻，均能指出某质点的位置坐标，就算对该质点的运动状态有了清楚的了解。因此，我们可以用质点位置坐标 x 作为时间 t 的函数

$$x = x(t)$$

来描述质点的运动。质点沿直线运动时，其位置坐标与时间的函数关系叫做质点沿直线的运动规律。

我们可以用不同的方法表示运动规律。首先，可以用解析式表示，例如 $x = 2t + 3$ 表示一种运动， $x = 4 - t^2$ 表示另一种运动……。还可以利用“表格”列出一些时刻质点的位置来表示运动规律，一张火车时刻表就是这样的表格，它