

031/20

801442

前 言

本书是根据中山大学物理系多年使用的自编力学讲义，
1977年全国高校物理教材会议的精神而改编的。内容共
七章：包括质点力学、动量与能量、刚体力学、流体力学、
波动与波、相对论力学等。所需教学时数约60至65节。

编写的指导思想是：（一）力求内容简明。质点力学部份
避免与中学的重复。（二）注意启发性。着重培养物理思维
及分析问题灵活运用能力。（三）便于自学。每章后
附有自学指导。（包括复习提纲；典型例题分析；附有题解
的基本练习；生动有趣的思考题目及难度较大的选做练
习）。并附录了与本教材有关的数学知识，和推荐一些力学
参考资料等。

本书可作为理工科及师范院校的物理教学参考书。亦可
供中专及具有同等文化程度的读者自学用。

由于编者水平所限，不当之处在所难免，恳请批评指
正。

编者 1980年6月

绪 论

机械运动是最简单最基本的物质运动形态。这种运动就是物体之间或物体内部各部分的相互位置变动。力学所研究的就是机械运动的规律。

力学知识在生产实践中有广泛的应用，在工程技术上广泛应用力学定律来解决有关问题。如机器设计和房屋建筑……以至发射火箭，宇宙航行……等。同时、其他物理运动形态，如热现象、电磁现象以至原子运动都包含有机运动。（注意不能归结为机械运动）。因此力学知识也是研究物理学其他运动形态的必要基础。

本教材主要讨论有关经典力学的问题。经典力学是反映宏观物体（不同于量子力学），速度远小于光速（不同于相对论力学）的运动规律。在最后一章略为介绍相对论力学。

目 录

第一章 质点运动的基本规律

§ 1.1 机械运动的描述	(1)
一、运动的绝对性和相对性	(1)
二、参照系和坐标系	(2)
三、长度和时间的计量	(3)
四、质点的模型	(6)
五、质点运动状态的描述	(6)
§ 1.2 直线运动	(9)
一、平均速度和瞬时速度	(9)
二、平均加速度和瞬时加速度	(10)
三、变速运动所走过的距离	(11)
§ 1.3 牛顿运动定律	(14)
一、牛顿第一定律	(14)
二、牛顿第二定律	(15)
三、牛顿第三定律	(18)
§ 1.4 力和质量	(19)
一、力是物体间的相互作用	(20)
二、机械运动中几种常见的力	(20)
三、质量是物质的基本属性	(25)
四、质量和力的计量	(27)
§ 1.5 曲线运动	(33)
一、曲线运动中的速度问题——“以直代曲”	(33)

191/43/12

二、匀速率圆周运动	(34)
三、一般曲线运动的加速度——“以圆代曲”	(37)
四、曲线运动中的作用力	(39)
五、用坐标投影法解曲线运动问题,抛体运动	(40)
§ 1.6 力学相对性原理	(42)
一、惯性参照系	(42)
二、力学相对性原理	(43)
三、惯性力	(44)
§ 1.7 经典物理学的局限性和发展	(48)
一、经典力学的适用范围	(48)
二、批判“绝对时空观”	(49)
附: 第一章 自学指导	(52)

第二章 机械运动中的动量和能量

§ 2.1 动量定理	(71)
一、动量的概念	(71)
二、动量定理	(72)
三、物体系的动量定理	(77)
§ 2.2 动量守恒定律(应用举例)	(79)
§ 2.3 功和动能定理	(83)
一、机械功的概念	(83)
二、功率及其单位	(88)
三、动能定理	(89)
§ 2.4 物体系的势能	(91)
一、保守力和耗散力的功	(91)
二、势能	(94)
三、引力势能	(97)
§ 2.5 机械能守恒定律(应用举例)	(99)
§ 2.6 碰撞问题	(103)
一、完全弹性碰撞	(104)

二、完全非弹性碰撞	(105)
三、非(完全)弹性碰撞	(106)
四、碰撞截面(散射截面)	(108)
五、恩格斯关于动量和动能的意义的论述	(109)
附: 第二章 自学指导	(111)

第三章 刚体运动的基本规律

§ 3.1 刚体的基本运动	(129)
一、关于刚体的概念	(129)
二、刚体的基本运动	(130)
§ 3.2 刚体的转动	(131)
一、角速度和角加速度	(131)
二、匀角加速转动的规律	(131)
三、角速度矢量	(132)
四、刚体上任意一点的速度和加速度	(133)
§ 3.3 刚体的质心运动规律	(134)
一、刚体的运动规律	(134)
二、刚体的质心	(135)
三、刚体的质心运动规律	(137)
§ 3.4 刚体绕固定轴转动的规律	(138)
一、力矩和力偶	(138)
二、刚体绕固定轴转动定律	(140)
三、转动惯量	(143)
四、平行轴定理	(147)
§ 3.5 刚体运动的动能	(148)
一、刚体绕固定轴转动的动能	(148)
二、刚体一般运动的动能	(148)
§ 3.6 动量矩和动量矩守恒定律	(151)
一、动量矩和动量矩定理	(151)

二、动量矩守恒定律	(152)
三、质点在中心力场中的动量矩问题	(154)
§ 3.7 刚体的平面平行运动	(157)
一、刚体平面平行运动的基本方程式	(157)
二、刚体的滚动 (●滚动摩擦)	(157)
三、打击中心	(161)
附: 第三章 自学指导	(163)

第四章 流体力学

§ 4.1 静止流体内的压强和压强	(181)
一、压强、静止流体内的压强	(181)
二、静止流体内两点的压强差	(184)
§ 4.2 理想流体的稳定流动	(185)
一、理想流体的概念	(185)
二、稳定流动、流线和流管	(186)
三、理想流体的连续性方程	(188)
§ 4.3 伯努利方程及其应用	(189)
一、伯努利方程的推导	(189)
二、伯努利方程的应用	(191)
§ 4.4 流体的反作用及其应用	(195)
§ 4.5 粘滞流体的运动	(196)
一、流体的粘滞性	(197)
二、泊肃叶公式和斯托克斯公式	(199)
三、层流和湍流、雷诺耳数	(201)
● § 4.6 空气动力学简介	(204)
一、马格诺斯效应	(204)
二、机翼周围的环流	(205)
三、儒可夫斯基定理	(206)
四、上升力和前阻力	(207)
附: 第四章 自学指导	(209)

第五章 振动与波

§ 5.1 简谐振动	(220)
一、简谐振动的规律	(220)
二、简谐振动的周期、频率与圆频率	(224)
三、简谐振动的固有频率	(225)
四、谐振动的振幅和初位相	(227)
五、简谐振动的振幅矢量图示法	(229)
六、简谐振动的能量	(230)
§ 5.2 阻尼振动和自持振动	(232)
一、阻尼振动	(232)
二、自持振动	(235)
§ 3.5 受迫振动和共振现象	(237)
一、受迫振动	(237)
二、共振现象	(239)
三、受迫振动和外加力的位相关系	(241)
§ 5.4 振动的合成和分解	(243)
一、同方向同频率简谐振动的合成	(243)
二、同方向不同频率简谐振动的合成·拍	(246)
三、垂直方向同频率简谐振动的合成	(248)
四、垂直方向不同频率简谐振动的合成	(251)
五、振动的分解	(253)
§ 5.5 波与波动方程	(255)
一、波·纵波与横波	(255)
二、波的几何描述	(257)
三、波的频率、传播速度和波长	(258)
四、简谐平面波的波动方程	(261)
§ 5.6 波的能量密度和能流密度	(265)
一、波的能量和能量密度	(265)
二、波的能流密度	(269)

三、声强和声强级	(271)
§ 5.7 波的叠加和干涉、驻波	(274)
一、波的叠加原理、干涉	(274)
二、驻波	(275)
§ 5.8 多普勒效应	(279)
附： 第五章 自学指导	(281)

第六章 相对论力学

§ 6.1 伽利略变换,狭义相对论的基本原理	(303)
一、伽利略变换	(303)
二、狭义相对论的基本原理	(305)
§ 6.2 同时性的相对性质	(306)
§ 6.3 时间的相对性	(308)
§ 6.4 长度的相对性	(312)
§ 6.5 罗伦兹变换	(315)
§ 6.6 质量的相对性	(318)
§ 6.7 质量和能量	(323)
§ 6.8 质量和能量另一种推导	(326)
§ 6.9 相对论与牛顿力学	(329)
附： 第六章 自学指导	(331)
附录一、 基本练习题解	(340)
附录二、 量纲和力学单位	(384)
附录三、 某些与力学有关的数值表	(391)
附录四、 力学中的一些矢量问题	(393)
附录五、 与力学有关的微积分初步知识	(400)
附录六、 与振动有关的复数知识	(417)
附录七、 与振动有关的微分方程简介	(421)
附录八、 力学参考书目及资料索引	(425)

第一章 质点运动的基本规律

本章主要讨论以牛顿运动三定律为核心的质点运动的基本规律，包括直线运动和曲线运动的情况，最后指出这些经典规律的局限性。

§1.1 机械运动的描述

一、运动的绝对性和相对性

自然界任何的物质任何时刻都处于运动中，正如恩格斯所指出的：“运动是物质的存在形式，物质的固有属性。”

“无论何时何地，都没有也不可能有没有运动的物质。……没有运动的物质和没有物质的运动是同样不可想象的。因此，运动和物质本身一样是既不能创造也不能毁灭的。”这就是说**物质和运动是不可分离的**，而且运动是不能无中生有也不会无故消失的，从这个意义来说，运动是绝对的。

物质运动有其绝对性的一面，但也有其相对性的一面。所谓运动的相对性，就是在某一特定环境，特定条件下研究运动规律时所具有的特殊性，正如恩格斯所指出的：“单个物体的运动是不存在的——只有在相对的意义下才可以谈运动”，特别是在具体描述机械运动时，必须注意运动的相对性。

机械运动是反映物体间相互位置的变化，它是各种运动

形态中最简单最基本的运动。恩格斯指出：“一切运动都是和某种位置移动相联系的，不论是天体的，地上物体的，分子的、原子的……位置移动。位置移动决不能把有关的运动的性质都包括无遗，但是也不能和运动分开。所以必须研究位置变动。”由此可见机械运动是我们研究各种运动形态的基础。

当我们讨论机械运动的时候，必须注意：**从运动的本质本说是绝对的，但对运动的描述却是相对的。**

二、参照系和坐标系

大家知道，当我们研究某一物体的运动时要相对于某一些选定的参照物体，例如研究汽车的运动，常用街道的房屋或电线杆作参考，观察轮船的航行常用河岸上的树木或物体作参考，**这些作为具体研究运动时所依据的物体，（或物体系）称为参照系。**

参照系的选择对描述具体运动具有重要意义。例如在运动着的船上的人手中拿着一个物体，在同船的人看来是不动的，但岸上的人看到它和船一样在运动，如果船上的人把手松开，同船的人看到物体沿一直线自由落下，而岸上的人却看到物体作平抛运动。为什么对同一现象会观察到不同的结果呢？原因是他们所选的参照系不同，船上的人以船为参照系，岸上的人却以岸为参照系。一般来说，只研究位置变动和时间之间的关系，而不涉及物体间的相互作用时，（这类问题称为运动学问题），参照系可以随便选择，只要看描述的方便就可以了。但是在考虑物体间的相互作用对运动状态变化的影响时（这类问题称为动力学问题），参照系的选择就复杂些，某些动力学规律的具体形式（如牛顿三定律），是

对某种特定的参照系来说的。

为了把物体在各个时刻相对于参照系的位置定量地表示出来，还需要在参照系上选择适当的坐标系，通常多用直角坐标系，例如要描述房子里物体的运动，可以选地板的某一角为坐标原点，墙壁和地板的交线选作为坐标轴，这就构成一个直角坐标系，有时也选用极坐标系，例如研究地球的运动时，可以选太阳作为坐标原点，而坐标轴则指向别的恒星。利用这些坐标系就可以确定物体某一时刻的位置。**坐标系实质上是物体参照系的数学抽象**，所以我们往往只需说明坐标系而无需说明参照系。

三、长度和时间的计量

如上所述，物质运动不能离开时间和空间，因此我们概略介绍物理上关于空间（长度）和时间的计量问题，作为讨论机械运动的基本常识。

（一）长度的计量

任何长度的计量都是通过与某一长度基准比较而进行的。过去长度的国际基准（实物基准）是一根铂铱合金棒，叫做标准米，它保藏在法国巴黎附近的国际度量衡局中，当棒在 0°C 时，刻在棒两端附近金栓上的两线之间的距离叫做一米（ m ），这距离的百分之一叫做一厘米（ cm ）。

历史上，米是由于寻求通过巴黎的子午线上从北极到赤道之间长度的某一适当分数而产生的，这长度的千万之一定义为米。但在这基准最初确定之后，所作的许多精确测量都表明，这基准和它所要表达的值略有差值（大约 0.023% ）。

长度的实物基准很难保证不随时间改变，也很难防止意外（如受战争、地震或其他自然灾害所毁坏），物理学家很

早就预测到，放弃标准米尺杆作为长度的基准，而用某种经过小心选择的单色光的波长来规定米，较为有利。这就使全世界的实验室都很容易采用这个长度基准，利用干涉仪技术以后（这种技术以后在光学部分中再介绍），人们不必再拿待测物体同标准物体（米尺杆）进行比较，就能直接地把尚待测量的物体长度测定出来，这就使长度计量的准确度得到改进。此外还有另一种优越性，如果基准米尺杆真的毁灭了，就无法恢复原状，而利用光源作为长度基准就可以避免这个缺点。

1960年第十一届国际权度大会上，决定用氩—89原子的橙色光波来定义“米”，规定米为这种光的波长的1 650 763, 73 倍，实现了长度的自然基准。氩——86的原子到处可以获得，所发出的橙色光可以在任何实验室中产生。所以这光的波长的确是一个容易得到的基准，又因氩的（对一给定同位素而言）所有原子都完全相似，故氩所发出的光的波长是一定的，而且也不随时间改变，因此国际上就采用这种波长作为长度的自然基准。当然，随着激光技术的发展和长度计量精度要求的进一步提高，今后也可能采用某种激光的波长作为长度的新基准。

（二）时间的计量

时间的计量主要是一个计数的过程，不论何种能够重复的周期现象，都可以用来计量时间；时间计量是某种现象重复多次的计数。在自然界发生的许多重复的现象中，人们一向采用地球绕自己轴线的转动（自转）作为时间的计量基准，并定义1平均太阳秒为平均太阳日 $\frac{1}{86400}$ 。通常所说一个地方的太阳日就是太阳连续两次经过该处子午面的时间

间隔。由于地球公转的轨道是一椭圆，公转的速率常在变化，所以一千年之中太阳日有长有短，平均太阳日就是全年的太阳日所取得的平均值，实际上我们所测量的是同一恒星连续两次通过观察处的子午面所经过的时间，这个时间叫做恒星日，因为我们可以算出恒星日与平均太阳日之间的正确关系，所以平均太阳秒的长短可由观察星体相对于地球的运动而加以确定。

太阳系的各种运动之中，能准确地观察而足以用作时钟的有：地球的自转和公转，月球绕地球的公转，木星和金星绕太阳的公转，木星的4个卫星绕木星的公转。我们发现根据上述所作的九种时钟中，有八种是相互一致的，而不一致的只是根据地球自转所作的时钟。因此，人们由许多观察得出这样一个结论，即地球自转的速率在改变。主要是地球自转在渐渐变慢，变慢率是经一世纪后一天的长短增加0.001秒；在二十世纪中，时间计量上的这一累积可多至几个小时。这就说明了为什么历史上记载的历次日蝕发生差异这一事实。现在我们知道，地球自转变慢的原因是由于潮汐时水与陆地之间的摩擦力。此外还由于地球自转的不规则性。至于地球自转的季节性有规则的变化可以用风的季节性运动来说明，其他变化的原因还不知道，但可能与两极冰山的融化或者地球上其他很大的质量迁移有关。这一切都说明，地球的自转不是一个理想的时钟。

由于人们对微观世界认识的深入发展，以及对微波技术的进一步掌握，这就有可能利用某些分子或原子的固有振动频率（或周期）作为时间的计量基准。事实上，近年来已制成了大量的氨分子钟和原子钟，它们的精度都分别达到 10^{-9} 和 10^{-10} 以上，这比基于地球自转的时钟准确几十倍或几

百倍以上。因此1967年第十三次国际权度大会决定采用铯原子钟作为新的时间计量基准，定义1秒精确等于铯——133原子在 $(F=4, M_F=0)$ 和 $(F=3, M_F=0)$ 超精细能级之间跃迁振动的9 192 631 770个周期。(注)

利用原子钟就有可能对许多具有重大科学意义和实践意义的问题进行研究，这些问题包括从地球自转的变化和相对论的验证一直到航行技术的改进。

四、质点的模型

在研究机械运动时，物体的形状和大小是千差万别的，但在很多问题中，这些差别对物体运动的影响不大，因而我们为了突出研究对象的主要性质，也就是抓住主要矛盾，暂时不考虑一些次要的因素，引入“质点”这样一个理想模型来代替实际的物体。

所谓质点，是在一定的问题中可以忽略物体的形状及大小，把物体当作一个具有质量的点来看待。这样就可以使问题大为简化。便于突出机械运动的主要矛盾。在许多实际的问题中如单摆的振动，带电粒子在电场中的运动等等都可以把实际物体当作质点来考虑，另一方面，当我们研究一些比较复杂的物体运动时（如刚体、流体）虽然不能把整个物体看成质点，但在处理方法上可把复杂物体看成由许多质点组成，在解决质点运动的基础上来研究这些复杂物体的运动。

五、质点运动状态的描述

对于机械运动的认识，存在着辩证唯物观点和形而上学

(注) F 和 M_F 是表征某个能级的参数(量子数)

观点的斗争。

恩格斯指出：“运动本身就是矛盾，连简单的机械移动之所以能够实现，也只是因为物体在同一瞬间既在一个地方又在另一个地方，既在同一个地方又不在同一个地方，这种矛盾的连续的产生及其同时的解决就是运动”。我们对运动状态的研究和描述，正是要从“物体在同一瞬间既在同一地方又不在同一地方”这个运动本身的矛盾出发。为我们选定时刻 t ，位置坐标 (x, y, z) ，和速度 $\vec{v}$ 来描述质点在选定参照系中的运动状态。对应于某时刻 t ，质点处在参照系内某一位置 (x, y, z) 点，这反映质点在时刻 t 处在 (x, y, z) 点这个地方，但是运动质点一定具有速度，这速度 $\vec{v}(t)$ 反映了质点离开 (x, y, z) 点位置的趋势，也就是说质点在 t 时刻正在离开 (x, y, z) 点位置，即又不在此位置。我们知道，对某个选定的参照系来说，质点作机械运动就是要发生位置的变动，因此，在一时刻质点虽然处于空间的某一个位置，但由于质点是运动着的，因此它同时又不固定在这一个位置上，而是正在离开这个位置，否则这质点就不是运动而是静止了。由此可见，对任一时刻 t ，用位置坐标 (X, Y, Z) 和速度 $\vec{V}(t)$ 可以描述“物体在同一瞬间既在同一地方又不在同一地方”这种运动状态的自身矛盾。

必须指出，形而上学的观点却把运动状态描述为：“运动就是物体在某一瞬间在一个地方，然后在接而来的另一瞬间则在另一个地方”，列宁批驳这种形而上学的观点是“把运动描写成为静止状态的总和、联结。”“它所描写的只是运动的结果，而不是运动自身，”我们在讨论运动状态的描述时必须注意不要和这些形而上学的观点混在一起。

决定质点在某一时刻的位置的式子称为运动方程，如

$$x = f_1(t)$$

$$y = f_2(t)$$

$$z = f_3(t)$$

就是运动方程。

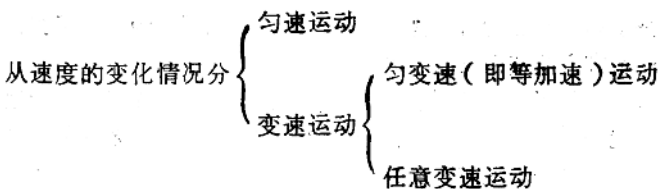
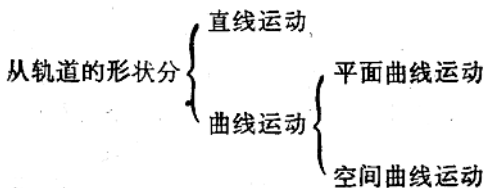
〔例1〕：上抛运动的运动方程为

$$x = 0, y = 0, z = v_0 t - \frac{1}{2}gt^2$$

质点运动所走过的路径称为轨道（或轨迹），一般消去运动方程中的 t 便可得轨道方程。

〔例2〕：运动方程式为 $x = a \cos \omega t, y = a \sin \omega t, z = 0$ ；
方程式为 $x^2 + y^2 = a^2, z = 0$ 的圆。

则轨道质点运动的分类



【课堂讨论】

某小船运载木箱逆水而行，经过一桥下时，一个木箱不慎落入水中，半小时后才发觉，即回程追赶，在桥下游 5.0

千米处赶上木箱，设小船顺流及逆流划行之速度不变，问小船回程追赶所需时间，并求水流速度。

本题关键在于适当选取参照系，这样就可使问题大为简化。

§1.2 直线运动

当物体（质点）运动的轨迹是一直线时，称为直线运动。它可以用一维坐标描述，如图（1.1）所示，取0为坐标原点，物体在任一时刻 t 所经过的位置用 $s(t)$ 来表示。

关于匀速直线运动的规律已为大家熟知，现在进一步讨论变速直线运动的规律。在这里，我们必须注意分析速度变和不变的矛盾，并创造一定的条件促使它们相互转化。

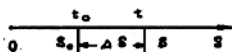


图1.1

一、平均速度和瞬时速度

大家知道，在匀速直线运动中，表征质点运动快慢的速度是一常量，它表示为：

$$v = \frac{s - s_0}{t - t_0} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (\text{常量})$$

式中 s_0 和 s 是质点在 t_0 和 t 时刻所经过的位置， Δs 是 Δt 时间内所走过的距离。

如果运动不是匀速的，则上式所代表的只是在 Δt 时间间隔内质点运动的平均快慢，因此叫做平均速度。表示为：