

经典和近代

物理学

[美] K. W. FORD 著 高航译

2

Classical and Modern
Physics

经典和近代
物 理 学

第 二 册

[美] K. W. Ford 著
高 航 译

高 等 教 育 出 版 社

1982

498689

这是一部美国的理工科大学物理学教科书。原书分三卷，前两卷为经典物理学，后一卷为近代物理学。全书可作一年半的物理课教科书，也可删去某些章节作为一学年的物理学教科书。

译本分四册出版。第一册包括物理学导论和数学，第二册包括力学，第三册包括热力学和电磁学，第四册包括相对论和量子力学。本书可作我国理工科各专业的物理课教学参考书。

K. W. Ford

Classical and Modern Physics

A TEXTBOOK FOR STUDENTS OF SCIENCE
AND ENGINEERING

Xerox College Publishing, 1974

经典和近代

物 理 学

第 二 册

[美] K. W. Ford 著

高 航 译

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

河北香河县印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 14.75 字数 347,000

1982年10月第1版 1984年1月第1次印刷

印数 00,001—8,100

书号 13010·0820 定价 2.25 元

目 录

第三篇 力 学

第七章 力与运动 牛顿第一和第二定律	1
§ 7.1 无外力的运动 牛顿第一定律	1
§ 7.2 力的概念	5
§ 7.3 牛顿第二定律 惯性质量	10
§ 7.4 牛顿第二定律的应用	14
§ 7.5 谐振子	19
§ 7.6 地球附近的运动	25
§ 7.7 引力质量	33
§ 7.8 二维运动	37
§ 7.9 带电粒子在电磁场中的运动	46
§ 7.10 参照系	53
第八章 系统的运动与动量 牛顿第三定律	81
§ 8.1 动量与牛顿第二定律 冲量	82
§ 8.2 质心	87
§ 8.3 牛顿第二定律应用于系统	93
§ 8.4 牛顿第三定律	96
§ 8.5 内力相消	101
§ 8.6 系统的一维运动	105
§ 8.7 动量守恒	109
§ 8.8 非孤立系的动量守恒	114
§ 8.9 质心与动量守恒	116
§ 8.10 火箭推进	120
* § 8.11 两质点的系统 约化质量	124
§ 8.12 动量守恒的意义	129

第九章 角动量	147
§ 9.1 角动量概念	147
§ 9.2 系统的角动量	155
§ 9.3 轨道角动量与自旋角动量	159
§ 9.4 转动惯量	162
§ 9.5 转矩与角动量变化定律	175
§ 9.6 绕固定轴的转动	180
* § 9.7 旋进	186
§ 9.8 角动量守恒	190
§ 9.9 面积定律	195
* § 9.10 空间的各方向性	203
第十章 能量	227
§ 10.1 恒力所作的功	228
§ 10.2 一维运动的功与动能	231
§ 10.3 质点一般运动的功与动能	236
* § 10.4 质点系的功与动能	242
§ 10.5 功是能量转移的一种方式	249
§ 10.6 功的守恒	252
§ 10.7 一维运动中的势能	256
§ 10.8 一维运动中的机械能守恒 能量图	266
§ 10.9 转动能量	276
* § 10.10 一般情况下的保守力与势能	280
§ 10.11 单摆	289
§ 10.12 能量守恒的评价	291
第十一章 万有引力	316
§ 11.1 力学中的力定律	316
§ 11.2 万有引力定律	317
§ 11.3 地球的重力	323
§ 11.4 引力势能 逃逸速率	325
§ 11.5 地球的形状	330
§ 11.6 开普勒定律	335

* § 11.7	引力定律的推导	343
§ 11.8	海王星的发现	355
第十二章	力学的进一步应用	376
§ 12.1	表面摩擦	376
§ 12.2	刚体静力学	379
§ 12.3	流体中的力	385
§ 12.4	流体的流动	397
§ 12.5	空气摩擦阻力	408
§ 12.6	两体碰撞	414
物理学历史上的重要年代		447
索引		450

第三篇 力 学

第七章 力与运动 牛顿第一和第二定律

前几章介绍了力学的许多概念和观点以及一些力学定律（守恒定律）。本篇的任务，是加深某些力学概念的定义，把这些概念和定律组成有条理的结构，即力学理论，用力学理论及其定律来描述并解释各种运动。

§ 7.1 无外力的运动 牛顿第一定律

要使物体在地面上作水平运动，需要对物体施加某种方式的作用（推、拉或机械推动），这是一般的观察结果。不管是什么作用引起物体运动，一旦这作用被解除或断开，物体就停止下来。这一事实使得亚里士多德及其以后的学者都认为水平运动需要连续的推动力。例如，亚里士多德相信，是空气对飞箭施加作用以推动箭前进。早在十七世纪，伽利略首先看出这种认识的错误。他认识到，如果能去掉摩擦力，物体就能在光滑的表面上无限期地滑动而不会慢下来。牛顿把这一观点推广到宇宙万物，并写成他的第一定律：“每个物体或者保持静止状态，或者保持匀速直线运动，除非外力迫使物体改变这种状态。”用数学表示时，牛顿第一定律是

牛顿第一定律

$$\text{如果 } \vec{F}=0 \quad \text{则 } \mathbf{a}=0 \quad (7.1)$$

外力为零意味着加速度为零(即相当于恒定速度)。牛顿第一定律的重大历史意义, 在于它表明必须从力学上说明月球和行星的运动。既然这些星球有加速度, 就必有外力作用于星球。

牛顿第一定律可应用于地球上的物体。如果作用在物体上的两个或两个以上的外力之和为零, 则物体以恒定速度运动。反之, 如果物体以恒定速度运动, 则作用在物体上的净力必为零。然而, 这定律应用于孤立物体时特别重要。想象在真空空间有一颗不受外界一切影响的陨星(图 7.1a), 以恒定速度运动。实际上, 牛顿

孤立物体“自然”运动的定义

第一定律先规定一物体如果不受外界一切影响应如何运动, 由此来定义哪一类运动是“自然”运动, 即不受干扰的运动。这样,

它就确定了哪一类运动需要进一步说明。比方说, 箭的水平速度分量恒定(摩擦力忽略不计), 表明箭是自由运动, 便不需要用力来解释。月球朝向地球的加速度, 表明月球不是自由体, 需要用力来解释它的运动。

把牛顿第一定律应用于孤立物体的另一个理由, 是用这个定

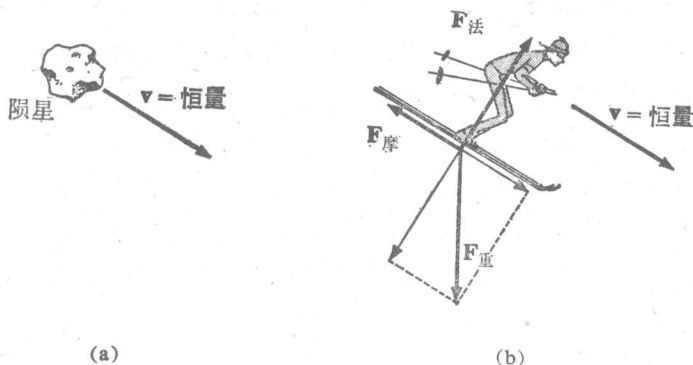


图 7.1 无外力的运动。(a) 不受外界一切影响的孤立物体, 以恒定速度运动。(b) 非孤立系, 如果所受外力为零, 也以恒定速度运动。

律时不需要去规定力。我们所说物体“孤立”，就是说物体不受外力的意思。牛顿第一定律的近代陈述：不受外界影响的孤立物体必以恒定速度运动。在这一陈述中，牛顿第一定律没有牵涉到力。实际上，甚至在牛顿第二定律和第三定律（它们都涉及力）不适用的领域，牛顿第一定律也适用。例如一个基本粒子，当它与其他粒子相互作用时，不遵守经典力学的定律。然而当没有相互作用时，它还是遵守牛顿第一定律，以恒定速度运动^①。就我们所知，牛顿第一定律对于孤立物体是普遍适用的^②。

牛顿第一定律
没有牵涉及力

甚至在经典力学领域以外，
牛顿第一定律
也能适用

尽管牛顿第一定律很简明，然而，由于运动的日常经验，我们比较习惯于按照亚里士多德的思路，而不是按照牛顿的思路去看待运动。因此，把牛顿第一定律用到日常场合，有时会发生混乱。例如我们问，滑雪者以恒定速度下坡时，是否有什么力作用于他？不加思索的回答是“有”。认为滑雪者被重力拉着下坡。其实，作用于滑雪者的净外力是零。上坡方向的摩擦力与下坡方向的重力分量一定正好相抵消，而斜坡法线方向的两个力也一定相抵消(图 7.1b)。

惯性参照系

关于牛顿第一定律，还有重要的两点需要讨论。一点是可推广到内部可能有复杂运动的孤立系。这一点将在 § 8.5 讨论。另一点是牛顿第一定律在定义惯性参照系时的作用。物体的加速度随观察者的参照系而定。不动的物体，在正在加速的观察者看来，

① 靠近地球的基本粒子不会是真正“自由”的，因为它受到重力而加速。可是，基本粒子的速度很大，以致由重力引起的速度变化可以忽略不计。（见练习 7.45）

② 这与空间的均匀性有关。见 § 4.8。

似乎是在加速。加速的物体，在随同一起加速的观察者看来，却似乎是静止的。这些事实表示，孤立物体只对某些观察者来说才是

惯性系定义

未加速的。这些观察者的参照系叫做惯性参照系。只有在惯性参照系中，牛顿第一定律和第二定律才能成立。因此，前面提到的牛顿第一定律的“普遍适用性”，必须理解为对一切物体、一切大小尺度和一切速度都适用，但只

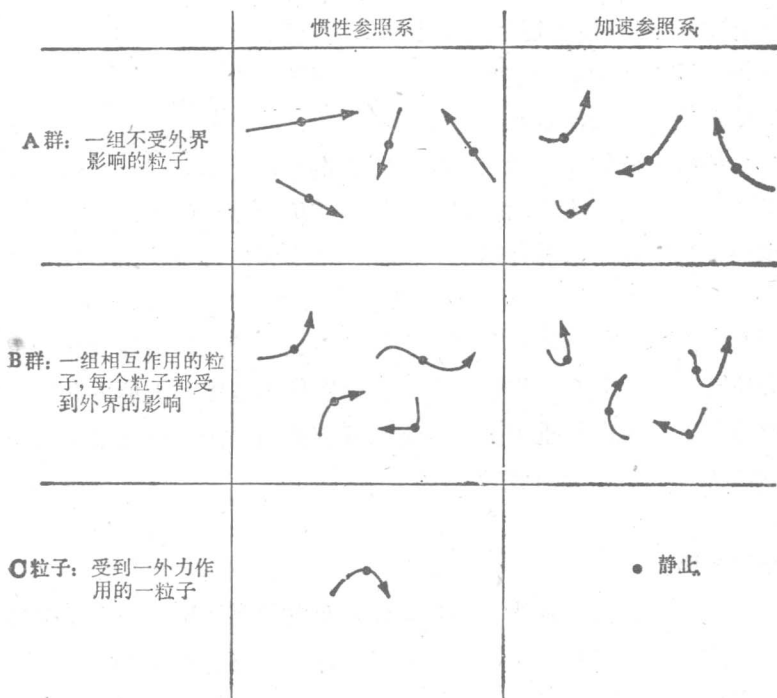


图 7.2 两种参照系中粒子的运动。在惯性系(左边)中，一切不受外界影响的自由物体都以恒定速度运动。在加速参照系(右边)中，个别物体(诸如粒子 C)的运动可能大为简化，但其他所有运动看来几乎都是加速的，包括自由粒子(A群)的运动也是如此。

限于某些参照系。

事实上，牛顿第一定律在物理学中起双重作用，在提供惯性参照系定义的同时，还提供有关自然界的重要陈述。牛

牛顿第一定律提供
惯性系的定义

顿第一定律的双重作用，可通过这样的陈述来体现：如果在一个参照系中，一个自由物体是未加速的，则其他自由物体在这参照系中也是未加速的。这一陈述的前半部分定义一惯性系，后半部分表达未受干扰的惯性运动定律。孤立系在惯性参照系中是以最简单的方式运动（图 7.2）。对参照系的进一步讨论，见 §7.10。

牛顿第一定律也
是惯性系中的一
个有意义的定律

§ 7.2 力的概念

在非技术性的用法上，可以这么说：一位作家的文词的力量，人的品格的力量；或者在国外驻军的力量。我们可能读到这种词句：原子爆炸产生巨大的力（意指能量），或者说飞轮以巨大的力（意指角动量）旋转，这是错误的技术性用法的两个例子。在物理学上，力有一个专门的含义，而且这个含义相当简单；它也必须如此，才能成为一个有用的定量概念。物理学家采取一种日常最常见的力的含义，即推或拉，并把力的含义提炼成一个定义，这定义准确到足以形成测量的基础。

力的概念 推或拉

按照牛顿第一定律，加速度为零既然意味着力为零，那么由此得出，非零加速度必然说明有非零外力存在。所以加速度可用来规定力。力的国际制单位牛顿（N）就是用这种方法规定的。使

确定力的一种方法：加速—标准质量

1 kg 质量得到 $1\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ 的加速度所需的力^①就是 1 N。用基本单位表示 1 N (重复方程 2.3):

力的单位

$$1\text{N} = 1\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-2} \quad (7.2)$$

这原来是力的一个方便的宏观单位, 1N 等于地球表面 102 g 的重量。你举起一本 2 kg 的书时, 大约要用 20 N 的力。体重 150 磅的人大约重 670 N。

虽然我们采用牛顿(N)这个单位, 但我们宁愿参照静态测量来规定力的概念, 至少是暂时如此。力除了产生加速度外, 还能改变物体的形状或大小。玩具气球在两手之间受到一对力的作用, 外形变了。两端支起的木板, 由于受重力向下拉, 而形成弓形。软枕头的形状随着所受力的不同而变化。树由于风力而弯曲。弹簧拉时伸长, 压时紧缩。这种一般性的力效应可称为形变。没有任何一种物体有这么刚硬, 受到外力作用时毫无形变。

力的效应

规定力的另一种方法：标准弹簧的伸长

力的形变效应可用来规定力。设有一个精心设计的标准弹簧, 拉伸时, 弹簧的伸长可用来测量力(图 7.3)。弹簧的一端固定在适当位置(这需要某种力, 但不是我们所关心的力)。要测量的力施加于弹簧的另一端。使弹簧伸长 1cm 所需的力, 称为 1 单位的力。两个这样的力(各为 1 单位)沿同一方向作用时, 产生 2 单位的力。如果两个大小相等方向平行的力相加而得 1

^① 这是一个既可行又有用的定义。这个定义的根据是牛顿第二定律。牛顿第二定律将在下节讨论。

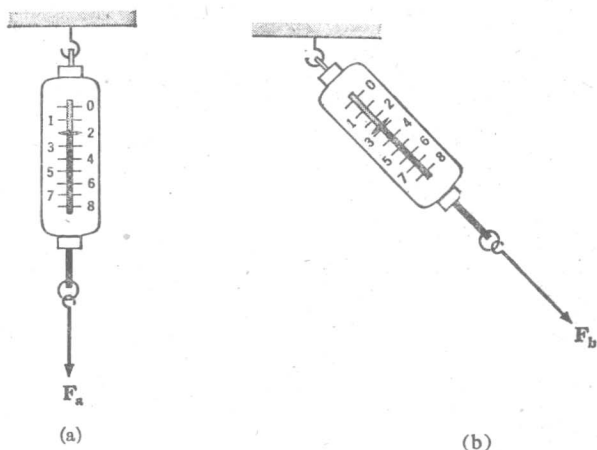


图 7.3 力的操作型定义。一根遵守胡克定律的弹簧，给以相等的力增量，弹簧就会产生相等的伸长。两图表明，弹簧在原理上能把力作为矢量(包括方向和大小)来确定并测量。

单位的力，则这两个力各为 0.5 单位。通过这样的组合，任何未知力，在原理上都可与单位力和所选弹簧的伸长联系起来。如果这弹簧刚好具有适当的性质，即其伸长与所施加的力成正比，那么这弹簧就是一个实用而有效的测力装置，而不只是从原理上去规定力的一种工具。于是，如果弹簧伸长 2.5 cm，就测得力为 2.5 单位，伸长 0.78 cm，就测得力为 0.78 单位，等等。事实上，我们制造这样的弹簧时，能够使它具有很高的准确度，我们就说这种弹簧遵守胡克定律。胡克定律是说：形变与外力成正比。

理想弹簧遵守胡克定律

因为力是矢量，力的定义必须包括下述含意：首先，力既有大小又有方向；弹簧定义的力(图 7.3)就能包括大小和方向这两种性质。但是力的矢量性质含意还要多。这就是说，在物理学上，把两个或两个以上的力合成为一个力的合成法，与数学上的矢量合成法完全一样。利用标准弹簧，

力是矢量

可以不费力地检验几个力的合成法则,以证明力的矢量特性,如图 7.4 所示.例如,可以证明大小相等方向互成直角的两个力,其合力的方向在两个力的正中间,其大小比每个力都大 41%.还可以证明:大小相等方向相反的两个力作用在弹簧上时,其净力为零.

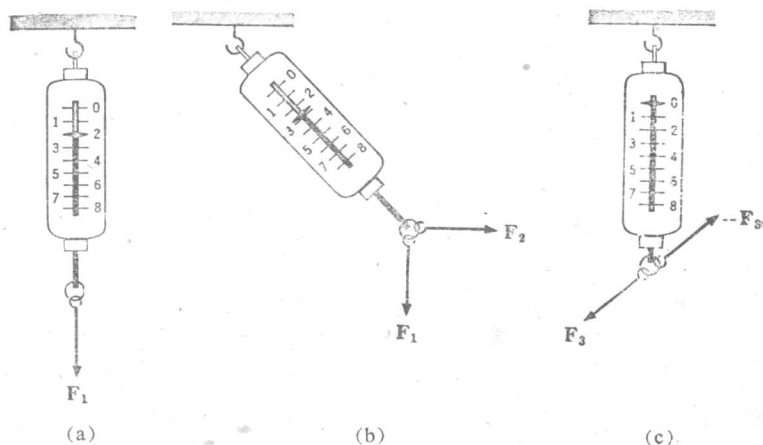


图 7.4 直接检验力的矢量性质。(a) 力 F_1 单独作用时,在标度尺上为 2。(b) 两个大小相等的力 F_1 和 F_2 产生一合力,其方向在两力的正中间,其大小为 2.8。(c) 大小相等方向相反的力相加,其和为零。

例题 1 重 14N 的木块,静止在木板上,木板对水平倾斜 30° (图 7.5)。问作用在木块上的摩擦力多大?

解 因为木块未被加速,所受的净外力为零,所以我们可写

$v=0$ 时,
总力为零

$$W + F + N = 0 \quad (7.3)$$

式中 W 为重量, F 为平行于木板的摩擦力, N 为木板施加的垂直于木板表面的力。因为 $F + N = -W$, 图 7.5 中竖直虚线箭号具有 W 的长度,而

$$F = W \sin 30^\circ$$

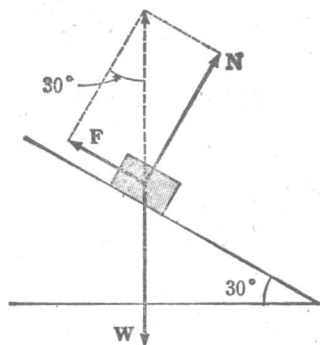


图 7.5 静止在倾斜木板上的木块，作用于木块的总力为零。

以 $W = 14 \text{ N}$ 和 $\sin 30^\circ = 0.5$ 代入上式，得

$$F = 7 \text{ N}$$

如果木板倾斜更大的角度，而又不足以引起木块滑动，问 F 的大小有无改变？方向有无改变？

■ **例题 2** 飞机以恒定速度巡航，受到地心吸力 F_G (向下) 和阻力 F_D (向后)，问作用于飞机的升力 F_L 和推力 F_T 各为何？(见图 7.6)？

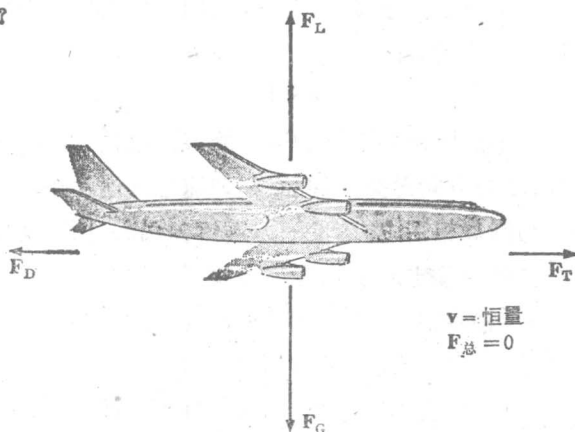


图 7.6 飞机以恒定速度飞行，要使作用在飞机上的总力为零，就要求 x 轴分量和 y 轴分量分别为零。

解 根据牛顿第一定律,我们再次得知总力必为零:

如果 $v = \text{恒量}$,
则总力为零

$$\mathbf{F}_G + \mathbf{F}_D + \mathbf{F}_L + \mathbf{F}_T = 0 \quad (7.4)$$

因为上式是矢量方程,所以由此求出 \mathbf{F}_L 和 \mathbf{F}_T 这两个未知力的大小. 如果设单位矢量 \mathbf{i} 指向前,单位矢量 \mathbf{j} 指向上,则方程 7.4 可写成

$$(F_T - F_D)\mathbf{i} + (F_L - F_G)\mathbf{j} = 0$$

如果一个矢量为零,则其两个分量都为零. 所以

$$F_T = F_D$$

$$F_L = F_G$$

§ 7.3 牛顿第二定律 惯性质量

加速度与力
成正比

物体的加速度必定是物体所受净外力的函数,在原理上,也可能与速度或其他变量有关系. 事实上,实验表明加速度与力之间的关系是最简不过的正比关系:

$$\mathbf{a} \sim \mathbf{F} \quad (7.5)$$

注意,这是矢量的比例关系. 加速度的方向总是与净外力的方向一样,而与速度的方向无关. 例如,在匀速圆周运动中,速度的方向绕圆周并与圆周相切;加速度的方向指向圆心,所以力也指向圆心. 为了强化前面确定的加速度与力成正比这一点,我们进一步注意,上述比例关系并不是指力与加速度之间的因果联系. 通常比较自然地认为(这种想法是无害的),力是原因,加速度是结果. 从逻辑上看,说力是由加速度引起,这是有根据的,事实上,有时很容易这样想. 我们可以说,汽车向前的加速度“使得”我们感到坐位靠背有额外的力. 总之,作为自然界的一条定律,公式 7.5 仅

仅表示：力和加速度总是以某种方式同时出现。

在实验室使用图 7.7 所示的设备来研究加速运动的特性，是

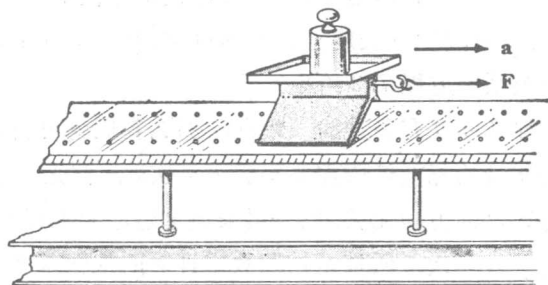


图 7.7 证明牛顿第二定律和测量惯性质量的实验装置。装载砝码的小车支承在几乎无摩擦的气垫导轨上，外力 F 恒定，加速度 a 就恒定。

很方便的。一小车骑在摩擦力很小的水平轨道上，小车上可以放置不同量值的砝码。载有砝码的小车由一已知力沿轨道牵引，量出小车的加速度。由于没有加速度的竖直分量，也没有净力的竖直分量，只需考虑水平外力。这样一个实验得出的第一个结果是：恒力产生恒加速度。第二个结果是：如果小车以特定方式装载，则加速度与外力成正比。这些结果都证实公式 7.5 的比例关系。

由于 F 和 a 两者都能测量出来，那么连接其间的比例常数也就能确定。对于任一有负载的小车来说，其运动可用下式描述：

$$F = ma \quad (7.6)$$

牛顿第二定律

这就是牛顿第二定律^①。它对于一般运动的应用将在下几节讨论。这里我们只讨论它在确定力学基本概念中的作用。

^① 牛顿自己对第二定律的描述，虽然内容与方程 7.6 相当，但用词不同。本章使用现代化的说法，以适应我们的需要。