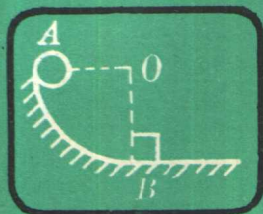
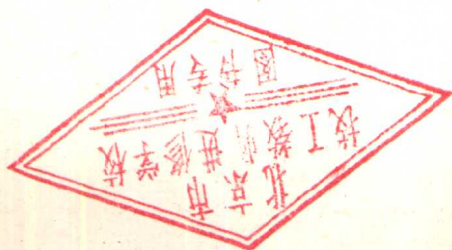


中学物理教学参考丛书



力和运动



上海教育出版社

中学物理教学参考丛书

力和运动

许德明等 编

上海教育出版社

中学物理教学参考丛书

力和运动

许德明等 编

上海教育出版社出版

(上海永福路 123 号)

新华书店上海发行所发行 江苏官东印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 6.5 字数 138,000

1984 年 8 月第 1 版 1984 年 8 月第 1 次印刷

印数 1—30,000 本

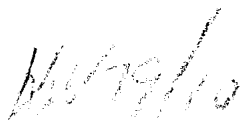
统一书号: 7150·3146 定价: 0.60 元

编 者 的 话

本书是中学物理教学参考丛书之一，主要供中学物理教师参考。全套丛书共有十七本，将陆续出版。

《力和运动》的主要内容是讨论牛顿运动定律和动量守恒定律。全书共分五章，第一章论述牛顿三大运动定律以及质量的概念；第二章介绍动量、冲量等概念，阐述动量守恒定律，并以碰撞为例加深对有关知识的理解；第三、四章简明地叙述非惯性参考系和刚体动力学；第五章解题分析，综述中学动力学解题规律。书末附有练习题，供教师在教学中参考。

参加本书编写的有金明华、汪宗锐、朱宏义、丁定一、许德明等同志。

A handwritten signature in black ink, likely belonging to one of the authors mentioned in the text, located at the bottom of the page.

目 录

第一章 牛顿运动定律	1
一、牛顿第一定律.....	1
(一)牛顿第一定律及其重要意义	1
(二)伽利略斜面实验的贡献	3
(三)物体的惯性	5
二、牛顿第二定律.....	6
(一)牛顿第二定律	6
(二)牛顿第二定律的实验	7
(三)应该注意的几个问题	12
三、质量.....	24
(一)牛顿对质量的认识	24
(二)惯性质量	25
(三)引力质量	27
(四)测度质量(物质之量)	31
(五)质量和重量	32
四、牛顿第三定律	36
(一)牛顿第三定律	36
(二)应该注意的几个问题	36
(三)几个实例分析	39
第二章 动量守恒定律	45
一、动量和动量守恒.....	45
(一)动量	45
(二)冲量	48
(三)动量定理	50
(四)动量守恒定律	57

二、碰撞	64
(一)碰撞现象的特征和类型	64
(二)正碰	72
(三)斜碰	74
三、若干问题的讨论	76
(一)动量和动能	76
(二)碰撞习题的编写	80
(三)火箭反冲运动浅析	83
第三章 牛顿运动定律的适用性	89
一、伽利略变换、伽利略相对性原理	89
(一)惯性参考系和非惯性参考系	89
(二)伽利略变换	90
(三)伽利略相对性原理	94
二、惯性力和惯性离心力	97
(一)惯性力	97
(二)惯性离心力	103
三、牛顿运动定律和高速运动	106
(一)洛仑兹变换	106
(二)几个有关公式的修正	110
第四章 刚体动力学	114
一、刚体的转动定律	114
(一)质点和刚体	114
(二)平动和转动	115
(三)线量和角量	119
(四)牛顿第二定律和转动定律	124
(五)惯性和惯量	123
二、质心运动定律	131
(一)质心	131
(二)质心运动定律	135

(三)刚体的一般运动	137
三、动量矩守恒定律	140
(一)动量原理和动量矩原理	140
(二)动量守恒定律和动量矩守恒定律	141
第五章 解题分析	145
一、牛顿运动定律	145
(一)物体受力情况的分析	145
(二)应用牛顿运动定律解题的一般步骤	147
(三)隔离法	149
(四)动力学和运动学结合的问题	155
二、动量守恒定律	161
(一)动量定理	161
(二)动量守恒定律	165
(三)碰撞	170
三、综合题解题分析	173
(一)综合题及其一般解法	173
(二)例题分析	177
习题	181
习题答案	196

第一章 牛顿运动定律

物理学是现代科学技术的基础学科之一，它研究的是物质运动的基本规律。力学是研究物体的机械运动，其中研究物体运动位置变化规律的部分叫运动学；不仅研究物体的运动规律而且研究物体运动和作用力之间关系的部分叫动力学。动力学的奠基人是伽利略、牛顿等人，特别是牛顿，总结了前人的经验和知识，提出了三个运动定律，现在我们称为牛顿三大定律，它是经典力学的基础。

一、牛顿第一定律

(一) 牛顿第一定律及其重要意义

牛顿在伽利略等人所作的大量实验的基础上，全面地总结了物体运动的规律。牛顿在他所著的《自然哲学的数学原理》一书中指出“每个物体倘非有外力影响之使其改变状态，则该物体仍保持其原来静止的或等速直线运动状态。”这就是牛顿第一定律。从伽利略、牛顿到现在，已经有三百多年的历史了。现用课本对牛顿第一定律的叙述是“一切物体在没有受到外力作用的时候，总保持匀速直线运动状态或静止状态，直到有外力迫使它改变这种状态为止”，这两种叙述在内容上无多大的差别。

由牛顿第一定律可知：当物体不受到其他物体作用时，就保持其速度（矢量！）不变。物体运动的速度只能相对于

选定的参考系统而言，不同的参考系统对同一物体的运动将有不同的描述。因而必须指出牛顿第一定律适用于什么样的参考系统。在牛顿看来，空间是脱离物体的、始终不变的、“绝对”静止的“绝对空间”，而物体的运动就是在“绝对空间”中运动，即“绝对运动”。因此，牛顿第一定律中的运动，牛顿以为是“绝对运动”。但是，宇宙间不存在这种“绝对运动”，牛顿第一定律是在地球上通过实验观察，并经过推理而得到的。实际上，物体相对于地球的运动并不完全遵守第一定律，以太阳为参考系，物体的运动则更为准确地遵守第一定律。

牛顿第一定律是牛顿运动定律最基本的内容，它具有两个重要的意义。首先，牛顿第一定律定义了力。在这以前，人们对力的概念，只停留在人体肌肉紧张等定性的、主观感觉的水平。牛顿第一定律指出物体作匀速直线运动是不需要用力去“维持”的，只有在运动状态发生变化时，才需有力作用。在力学中把这种物体和物体间发生的相互作用，就是使物体运动状态发生变化的作用定义为力。力的概念与牛顿第一定律有不可分割的联系，当一个物体受到另一个物体施于它的力，它相对于参考系的速度就变化，或者说相对于参考系统产生加速度。不同的作用产生的加速度也不同，所以人们就很自然地以作用于一定物体所产生的加速度作为力的大小的量度（关于具体的量度方法见力学单位制的有关资料）。其次，牛顿第一定律指出了一切物体都具有惯性——物体具有保持静止状态或匀速直线运动状态的性质（物体的一种固有属性），所以牛顿第一定律也称为惯性定律。把适用牛顿第一定律的参考系称为惯性参考系。

(二) 伽利略斜面实验的贡献

大约在二千多年以前, 我们的祖先就开始对物体的机械运动进行了研究, 寻找物体运动的原因, 并把物体的运动和力联系起来。当时人们认为(就是现在, 不少人也是这样认为): 要将一张桌子匀速地从一处移到另一处, 必须有一个不变的力作用; 同样, 要使马车保持匀速向前, 要有一个恒力作用, 即必须要有马拉着它才能匀速前进……。一旦取消外力, 运动物体就会慢下来, 直到恢复所谓“自然状态”——静止为止。因此, 人们认为, 要维持一个物体的运动速度, 就需要不停地对它施力, 认为力是维持物体速度的原因。

希腊哲学家亚里士多德(公元前 384~322 年)曾断言: 使物体维持恒定的运动(即速度不变), 就需要恒定的外力作用于它。日常直觉和经验似乎说明这种说法是颇有道理的。

由于亚里士多德的观点符合人们的直觉印象, 因此在他以后近两千年, 未遇到什么批评, 人们对力的认识始终没有突破他的观点。直到十七世纪, 意大利学者伽利略对力的解释才开始迈出了前进的步伐, 用令人信服的论证, 否定了亚里士多德这个貌似正确的断言。伽利略指出, 一旦物体具有任何速度, 只要没有加速和减速的原因, 这个速度就将牢固地保持不变。换句话说: 在摩擦小得可以忽略不计的情况下, 物体虽没有外力推动它, 仍保持以恒定的原有速度运动。也就是说: 力不是维持运动速度不变的原因。看来这个结论似乎与日常经验有矛盾, 但是, 这个结论却是正确的。下面我们简单介绍著名的伽利略斜面实验和他是怎样从中推论出上述的科学断言的。

第一个斜面实验。伽利略指出: 小球沿斜面向下运动, 因

为具有加速原因,小球的速度越来越大[图 1-1(a)];小球沿斜面向上运动,因为有减速原因,小球的速度越来越小[图 1-1(b)]。从而他推论出:当小球在既没有向下倾斜也没有向上倾斜的水平面上运动时,因为不存在加速和减速的原因,即物体不受水平力的作用,沿水平面上的运动应当是速度不变的[图 1-1(c)]。当然,伽利略知道这种情况是不存在的,小球的速度肯定越来越小,而且终究要停止下来,这是因为存在有水平摩擦力的作用,使速度发生了变化。但是,他看出,如果水平面的摩擦力越小,小球维持运动的时间就越长。摩擦力在这里是阻碍了小球的运动,如果摩擦力没有的话,小球的运动一定能保持下去,且不需要任何外力来维持它。

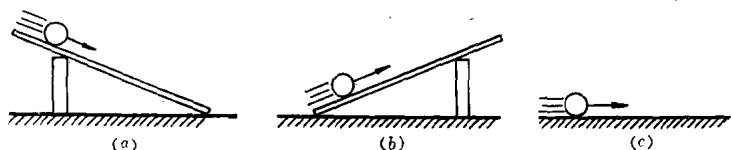


图 1-1

伽利略的第二个斜面实验。把两个斜面对放在一起[图 1-2(a)], 小球在第一个斜面上从静止开始滚下, 在一段水平面上滚了一小段路后, 再沿第二个斜面上滚, 小球几乎到达在第一个斜面上时的同一高度。由于摩擦存在, 小球是不可能到达这一原始高度的。但是, 伽利略指出, 这样的高度应该是小球上滚运动高度的极限。从而他推论, 当第二个斜面与水平面间的夹角减小时[图 1-2(b)], 小球到达原始高度所走的路程就增大。当坡度最后减小到零时, 即第二个斜面成为水平面[图 1-2(c)], 小球再也达不到它的原始高度, 它应该一直向前运动下去。根据上述的推理, 伽利略作出结论说: 由此可见, 上述小球沿水平面的运动是永恒的。

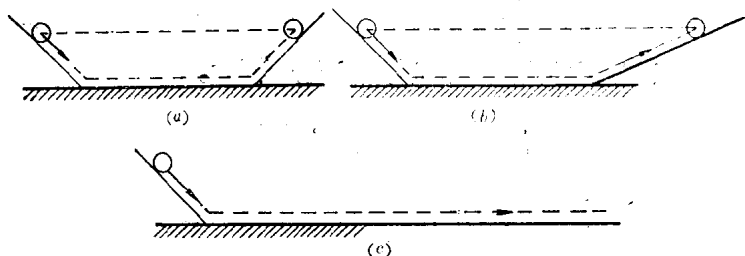


图 1-2

伽利略和亚里士多德同样是通过实验来观察物体运动的,但他们却得到完全不同的结论,原因是思考方法不同。亚里士多德依靠的是实验结果的堆积,对实验条件缺乏分析研究。但伽利略比亚里士多德观察得更仔细,他看到同样一个球在比较光滑的水平面上和在粗糙的水平面上运动情况不同,经过分析实验条件和结果的关系,从而加以理想化,建立了无摩擦的理想光滑水平面的物理模型,推断出物体在不受外力作用下的运动是一种永恒的运动。因此,伽利略的认识比亚里士多德深刻得多。伽利略从可靠的实验基础出发,把逻辑思维和实验事实相结合,得出科学的结论,为我们开创了研究物理学的一种方法,他的卓越成就也就在这里。

(三) 物体的惯性

牛顿第一定律指出,一切物体都具有保持静止或匀速直线运动的性质,物体保持原来运动状态不变的特性叫惯性。所以牛顿第一定律又叫惯性定律。有人在叙述牛顿第一定律和惯性时,常把惯性和惯性定律混淆起来。例如,有人认为“当物体不受任何外力作用时,物体具有保持静止或匀速直线运动状态不变的性质,叫惯性。”其实这种叙述仍是牛顿第一定

律的内容,所谓物体的惯性是物体的固有属性,它跟物体受不受到力的作用没有关系。所以在理解物体的惯性时,不应把“不受任何外力作用”这个条件加入这一概念。

二、牛顿第二定律

(一) 牛顿第二定律

在牛顿以前,伽利略等人通过大量的实践,积累起了不少力学知识,牛顿分析总结了他们的经验,于1687年在《自然哲学的数学原理》中发表了这一定律,原文是:“运动的改变和所加的动力成正比,并且发生在所加的力的那个直线方向上。”现今对牛顿第二定律的常见叙述形式为:物体的加速度跟所受外力的合力成正比,跟物体的质量成反比,加速度的方向跟合力的方向相同。

牛顿第二定律的数学表达式可写成

$$\Sigma \mathbf{F} = m\mathbf{a} \quad (1-1a)$$

或写为

$$\Sigma \mathbf{F} = m \Sigma \mathbf{a} \quad (1-1b)$$

式中的 $\Sigma \mathbf{F}$ 是外力的合力, $\Sigma \mathbf{a}$ 表示各力 $\mathbf{F}$ 单独作用时产生的各加速度 $\mathbf{a}$ 的矢量和。

牛顿第二定律的另一种形式为 $\mathbf{F} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{P}}{\Delta t}$ 。式中的 $\Delta \mathbf{P}$ 为动量的增量, Δt 为时间的增量。公式表示为物体动量的变化率与作用在物体上的力成正比。牛顿第二定律两种形式一般可同等使用,但公式 $\mathbf{F} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{P}}{\Delta t}$ 的形式使用得更为广泛,特别是当物体运动的速度接近光速时,物体的质量因此而发生显著变化(参见第三章),前面一种形式的牛顿第二定律不适用,而后一种形式的牛顿第二定律仍适用。

(二) 牛顿第二定律的实验

牛顿第二定律是实验定律，它是通过实验归纳总结而得到的，又经实践检验而证实的客观规律。目前中学物理实验室常见的实验有三种：斜面直槽实验、阿特伍德机实验和气垫导轨实验等。

1. 斜面直槽实验

(1) 实验简述

用小球在斜面直槽内运动来验证牛顿第二定律，由于简单易做，常被采用。小球表面磨得非常光滑。实验时使小球在直槽内从静止开始下滑(图 1-3)，然后进行各种测量。

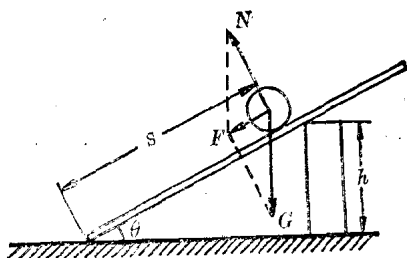


图 1-3

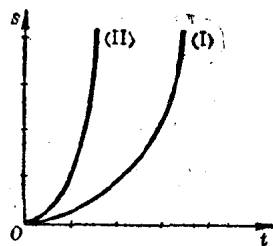


图 1-4

当斜面倾角 θ 不变时，使小球从不同高度 h 下滑，小球在斜面上的位移为 s ，经历的时间为 t 。从记录的数据作出如图 1-4 所示路程——时间图象，可知这是一个二次曲线，即

$$s \propto t^2,$$

对比匀加速运动公式

$$s = \frac{1}{2} at^2,$$

可知这是一种匀加速直线运动。图 1-4 中(I)和(II)表示两种

倾角 θ 的情况, (II) 表示倾角 θ 较大, 曲线上升得较快, 所以图象也说明了运动的加速度与 θ 有关, θ 越大, 加速度 a 也越大。

小球在斜面上下滑的初始位置离地面的高度 h 不变, 但使斜面倾角 θ 发生变化, 实验测得小球到底端时的速率都相等。设第一次斜面倾角为 θ_1 , 末速为 v_1 , 测得位移为 s_1 ; 第二次斜面倾角为 θ_2 , 末速为 v_2 , 测得位移为 s_2 。根据运动学公式, 两次末速度分别可用下式表示,

$$v_1^2 = 2a_1 s_1$$

和
$$v_2^2 = 2a_2 s_2。$$

由于 $v_1 = v_2$, 故有

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{s_2}{s_1} \quad (1-2)$$

上式说明当小球从同一高度 h 无摩擦地下滑时, 它的加速度与斜面的长度成反比。

小球在斜面上受到两个力, 即重力 G , 方向竖直向下; 斜面对小球的支承力 N , 方向与斜面垂直(图 1-3)。 G 和 N 的合力方向沿斜面方向向下, 合力 F 大小应为

$$F = G \sin \theta = G \frac{h}{s}。$$

当斜面倾角 θ_1 、 θ_2 不同时, 合力 F_1 、 F_2 也不同, 它们分别

为
$$F_1 = G \frac{h}{s_1}, \quad F_2 = G \frac{h}{s_2},$$

故

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{s_2}{s_1} \quad (1-3)$$

上式说明当小球在斜面上无摩擦地从同一高度 h (不同的倾角) 下滑时, 作用在小球上的合外力 F 跟斜面长度 s 成反比。

联立(1-2)和(1-3)解得

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{F_1}{F_2} \quad (1-4)$$

从上述实验可得, 对于同一个物体或质量相等的物体来说, 物体得到的加速度大小与合力的大小成正比, 而且加速度的方向与合力的方向相同。上式也可改写为

$$a \propto F \quad (1-5)$$

上面我们只说明了不同的力作用在同一个物体上时, 物体的加速度和力的数量关系, 那么同样大小的力作用在不同的物体上, 加速度又怎样变化呢? 用类似上述的方法, 将不同的物体放在斜面上, 调节倾角, 使物体得到相同的合力 F , 实验证实不同的物体(质量不同)在相同大小的力作用下, 将获得不同的加速度, 分析数量关系后可知加速度与其质量成反比,

$$a \propto \frac{1}{m} \quad (1-6)$$

式中的 m 表示物体的质量。

把(1-5)和(1-6)结合起来, 就可得到牛顿第二定律的表达式

$$a \propto \frac{F}{m}$$

或

$$F \propto ma,$$

写成等式为

$$F = kma \quad (1-7)$$

式中的 k 为比例系数, 取适当的单位制时, 可使系数 $k=1$, 这样上式可写成常见的牛顿第二定律基本形式

$$F = ma,$$

这就是我们常用的质点动力学的基本方程, 也叫做质点运动方程。

(2) 误差原因

在作上述实验中测得的加速度值, 总比用牛顿第二定律直接计算得到的值小。设计算得到的加速度值为 a , 实验测得的加速度为 a' , 上述实验中 a'/a 约等于 $5/7$ 。引起误差的原因是忽略了摩擦力。如果斜面光滑, 小球在斜面上的运动将是平动。实际上斜面总是不那么光滑的, 因而小球在斜面上的运动是一种滚动(参见第四章)。

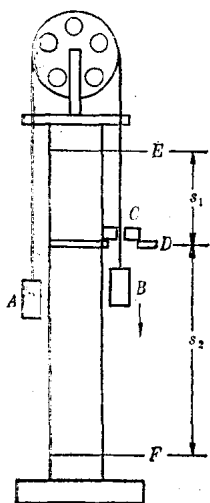


图 1-5

2. 阿特伍德机实验

图 1-5 所示是阿特伍德机装置简图, 图中的轻质滑轮要求摩擦小, 对实验无显著影响, 装置 A 和 B 要求质量相等且远大于滑轮的质量, 开始时用手把 A 或 B 向上推一下给它们一个初速, 能观察到 A 、 B 的运动近似为匀速运动。然后在 B 上放一个槽码 C (C 的直径比 B 的大些), 当 B 在支架 D 的孔中经过时, C 正好被 D 搁住。因此系统从放手开始使 B 从 E 点起到 D 作匀加速运动。用牛顿第二定律算出在这段位移中的加速度

$$a = \frac{m_C g}{m_A + m_B + m_C}。$$

式中的 m_A 、 m_B 、 m_C 为砝码 A 、 B 和 C 的质量。 B 经过 D 时, C 被 D 架子搁住, 系统作匀速运动, 它的速度就是 B 在 ED 段作匀加速运动的末速度。测出从 D 到 F 的位移 s_2 及时间 t , 则速度为

$$v = \frac{s_2}{t},$$