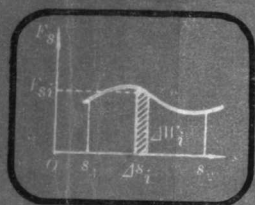


中学物理教学参考丛书

机械能



上海教育出版社

中学物理教学参考丛书

机 械 能

朱 章

上海教育出版社

中学物理教学参考丛书

机 械 能

朱 章

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 江苏南漕印刷厂印刷

开本 787×1032 1/32 印张 5.75 字数 122,000

1983年11月第1版 1983年11月第1次印刷

印数 1—14,500本

统一书号: 7150·2969 定价: 0.48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。

《机械能》的主要内容是论述机械运动范围内有关功与能的基本概念和基本规律。全书共分四章：第一章阐明功和功率的基本概念，并介绍机械功的原理及其应用；第二章首先阐述动能的概念，在这基础上介绍动能定理，然后论述势能的概念，讨论物体系势能的特征；第三章论述功能原理、机械能转换和守恒定律；第四章解题分析，介绍一些常见的解题方法。

限于编者的业务水平，书中难免有错误和不妥当的地方，恳请读者批评指正。

目 录

第一章 功和功率	1
一、功	1
(一) 功的概念的提出	1
(二) 功的定义	7
(三) 功的计算	8
(四) 功的单位及其量纲式	20
(五) 功是标量	21
二、功率	22
(一) 功率的概念及其计算	22
(二) 功率和速度的关系	23
(三) 功率的单位及其量纲式	25
三、机械功的原理及其应用	26
(一) 机械功的原理	26
(二) 几种简单机械	26
(三) 机械效率	30
第二章 机械能	36
一、能的概念	36
二、动能、动能定理	39
(一) 动能	39
(二) 动能定理	43
三、势能	57
(一) 势能的概念	57
(二) 重力势能	60

(三) 弹性势能	66
(四) 引力势能	69
(五) 保守力和非保守力、物体系的势能	75
第三章 功能原理、机械能转换和守恒定律	84
一、功能原理及其应用	84
(一) 功能原理	84
(二) 克服媒质阻力和摩擦阻力的功和机械能的关系	90
(三) 动力和阻力同时对物体做功时功和机械能的关系	92
(四) 学习功能原理时应注意的几个问题	95
二、机械能转换和守恒定律及其应用	101
(一) 机械能转换和守恒定律	101
(二) 三种宇宙速度的计算	107
三、碰撞中的能量	113
四、谐振动的能量	123
五、能量的转换和守恒定律	130
第四章 解题分析	132
一、功和功率	132
二、机械能	137
三、动能定理、功能原理	140
四、机械能转换和守恒定律	145
习题	161
习题答案	172

第一章 功 和 功 率

一、功

(一) 功的概念的提出

功的概念是从人们的生产实践中逐步形成起来的。我们在观察和研究物体(质点)运动时,发现物体(质点)所受的作用力和力的作用点沿力的方向所通过的路程的乘积具有重要的物理意义。下面我们先通过实例,从作用于物体的力和力的作用点沿力的方向移动的距离之间的关系及其乘积的效应为出发点,引出功的概念,然后从力对物体作功引起物体的能量的变化来阐明功的本质。

在生产劳动中,要把重物搬到高处去,为了达到用力方便(改变用力的方向)和省力的效果,人们使用了各种简单机械,滑轮就是其中常用的一种。图 1-1 所示的装置,把动滑轮和定滑轮一起使用,可以达到既能省力又能改变用力的方向,不仅如此,而且人们在应用它来提升重物的过程中,还可

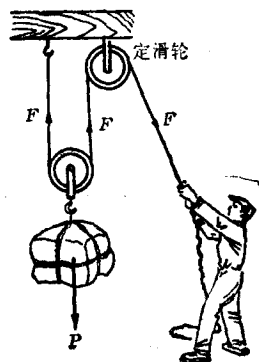


图 1-1

以发现力和力的作用点移动距离之间的相互联系。从图 1-1 可以看出,在动滑轮的重量可以忽略不计和不考虑摩擦的情

况下,如果要把重量为 P 的重物匀速提升高度 h ,只要在绳子的另一端用大小等于 $\frac{1}{2}P$ 的力 F 匀速向下拉就够了,但发现

在省力的同时却增加了力的作用点移动的距离(或者说力的作用点所经过的路程),也就是在力的方向上拉下绳子的长度增长到 $2h$ 。如果不用这滑轮组直接把重量为 P 的重物匀速提到 h 高度,用大小和 P 相等的力拉重物向上移动 h 就行了。显然,用了动滑轮,力省了一半,但力的作用点移动的距离却增加了一倍,这说明,在用滑轮组起吊重物过程中,力和力的作用点移动的距离是相互联系的,当一个量变小,另一个量就变大,但在变的过程中存在着不变的量,这个不变的量就是力和力的作用点移动的距离的乘积。如上例,直接把重物 P 升高 h 时,力和力的作用点移动的距离的乘积为 $P \cdot h$,在使用滑轮

组时,力 F 和力的作用点移动的距离的乘积为 $F \cdot 2h = \frac{1}{2}P \cdot 2h = P \cdot h$,它们两者是相等的,这说明,在这两种情况下,用力的大小虽不等,但由于力和力的作用点沿力的方向移动的距离的乘积相等,产生的作用效果就相同。

再研究一个实例。斜面也是一种常用的简单机械,如果我们要竖直把重物扛上汽车,所用的力就不能小于物体的重量 P 。如果借用一个斜面,将重物沿斜面推上汽车[图 1-2(a)]就可省力,斜面的倾角 α 越小,需用的推力 F 就越小。但是斜面倾角越小,要把重物推上同样的高度所需的斜面就越长,即作用于物体上的推力的作用点沿斜面移动的距离越大[图 1-2(b)]。可以证明将重物分别沿倾角不同的斜面推上同一汽车的过程中,力和力的作用点移动的距离的乘积是一个不变的量,即 $F \cdot AB = F_1 \cdot A_1B = P \cdot BC$ 。

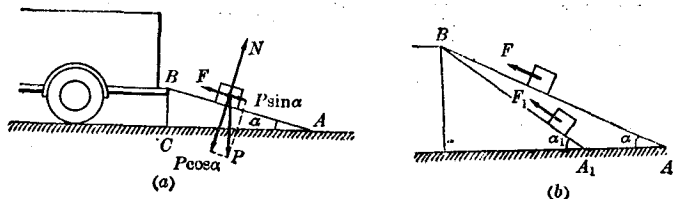


图 1-2

图 1-2(a)表示一个与水平面成 α 角的光滑斜面 AB ，在斜面上的物体一共受到三个力：重力 P ，斜面对物体的托力 N （方向与斜面垂直向上）；推动物体沿斜面向上的推力 F 。为了容易看清各力对物体沿斜面平行方向和与斜面垂直方向的效应，所以把 P 分解为两个分力：一个与斜面垂直的 $P\cos\alpha$ ，一个与斜面平行的 $P\sin\alpha$ ，由图可知，使物体能沿光滑斜面向上作匀速直线运动的条件是： $F - P\sin\alpha = 0$ ，即 $F = P\sin\alpha$ ，则力 F 和 F 的作用点的移动距离的乘积

$$F \cdot AB = P\sin\alpha \cdot AB = P \cdot \frac{BC}{AB} \cdot AB = P \cdot BC。$$

图 1-2(b) 是推物体沿斜面 AB 或斜面 A_1B 上汽车的示意图，根据前面计算，同理得

$$F_1 \cdot AB_1 = P\sin\alpha_1 \cdot AB_1 = P \cdot \frac{BC}{A_1B} \cdot A_1B = P \cdot BC，$$

所以 $F \cdot AB = F_1 \cdot A_1B = P \cdot BC。$

从上面这两个实例看出，力和力的作用点沿力的方向移动的距离的乘积（即力和受力物体沿力的方向移动的距离的乘积）的量值，在用来说明使用简单机械规律时，是起着重要作用的，因此，在物理学中引出了功的概念：一个物体在力的作用下沿力的方位（与力同指向或反指向）移动，这就叫做力

对物体做功。力对物体所作的功的量值等于力和受力物体沿力的方向移动的距离的乘积。

“功”的概念不仅仅在说明简单机械的规律方面起着重要作用，在研究任何机械运动规律时，同样起着重要作用，再举一实例来说明如下：

设有一辆机车拉着一节质量为 $m = 1000t$ 的货车沿着一段长 $s_1 = 1200m$ 的平直轨道作匀加速直线运动，速度由 $v_1 = 9m/s$ 增加到 $v_2 = 15m/s$ ，如果货车受到的摩擦阻力忽略不计，这时，机车拉货车的牵引力是多大？如果要使同一货车沿着轨道行驶 $s_2 = 600m$ 就能使它的速度同样由 v_1 增加到 v_2 ，那么，机车的牵引力应改为多大？在这两种情况下，牵引力和力的作用点移动的距离（即货车移动的距离）的乘积是否改变？

根据匀变速直线运动规律，货车的加速度 a_1 可由公式 $v_2^2 = v_1^2 + 2a_1s_1$ 求得

$$a_1 = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2s_1} = \frac{(15)^2 - (9)^2}{2 \times 1200} = 0.06(m/s^2)。$$

再由牛顿第二运动定律得

$$F_1 = ma_1 = 1000 \times 10^3 \times 0.06 = 60000(N)。$$

同理：由公式 $v_2^2 = v_1^2 + 2a_2s_2$ 得

$$a_2 = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2s_2} = \frac{(15)^2 - (9)^2}{2 \times 600} = 0.12(m/s^2)。$$

$$F_2 = ma_2 = 1000 \times 10^3 \times 0.12 = 120000(N)。$$

在第一种情况下：

$$F_1s_1 = 60000 \times 1200 = 7.2 \times 10^7(N \cdot m)。$$

在第二种情况下：

$$F_2s_2 = 120000 \times 600 = 7.2 \times 10^7(N \cdot m)。$$

由此可知

$$F_1 s_1 = F_2 s_2。$$

这就说明：要使同一货车由速度 v_1 增加到速度 v_2 ，机车的拉力 F 越大，力的作用点移动的距离（即货车的移动距离） s 就越短；机车的拉力 F 越小，力的作用点移动的距离就越长。但力 F 和力的作用点移动的距离 s 的乘积 Fs 却始终不变，是一常量。因此，“功”在说明一切机械运动时都起着很重要的作用。

从上面实例还可看出，力对物体（质点）作用，它的效应是使物体获得加速度，经过路程积累过程，物体的速度获得变化，这种力通过路程累积起来的效应，叫做力的路程累积效应，我们常用功的量值 Fs 来量度它，因此，力对物体通过路程累积作用过程，就是力对物体做功的过程。对同一物体来讲，不同的力作用于它，从相同的运动速度开始，要能获得速度的变化相同，则不同的力对该物体所作的功必须相等。通过力对物体做功过程可使物体的运动状态发生变化，那么，力对物体所作的功跟受力物体的运动状态变化的定量关系又怎样呢？

如果，力（ F ）的路程（ s ）累积效应使质量为 m 的物体的速度起变化，物体的速度由 v_0 变到 v_t ，根据牛顿第二运动定律可求得力的路程累积效应为

$$Fs = mas \quad (1)$$

因为

$$v_t^2 = v_0^2 + 2as,$$

所以

$$as = \frac{v_t^2 - v_0^2}{2}。$$

将上式代入(1)式得

$$Fs = mas = \frac{1}{2}mv_t^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 \quad (2)$$

式(1)中的 Fs 就是功量,简称为功。

式(2)表明通过做功的过程,物体的运动状态起了变化,这一变化的表达式是 $\frac{1}{2}mv_i^2 - \frac{1}{2}mv_0^2$ 。我们把 $\frac{1}{2}mv_0^2$ 和 $\frac{1}{2}mv_i^2$

叫做物体的动能($\frac{1}{2}mv_0^2$ 叫做物体的速度为 v_0 时的动能, $\frac{1}{2}mv_i^2$ 叫做物体的速度为 v_i 时的动能),在这种情况下,我们说,通过力对物体做功过程使物体的动能发生变化。

由(2)式可知,力对物体所作的功(Fs)等于物体的动能的变化量($\frac{1}{2}mv_i^2 - \frac{1}{2}mv_0^2$),在这种情况下,我们可以说:功是物体动能变化的量度。

有时,力对物体做功,使物体的相对位置发生改变,而不改变物体的运动速度,这种情况是:通过力对物体做功过程使物体的势能发生变化,如上面所举的实例:用滑轮匀速提升重物到高处的过程和用斜面将重物沿斜面匀速推上汽车的过程都是属于这一类,在这种情况下,功的大小等于重力势能的变化量,所以我们就说:功是物体重力势能变化的量度。

外力对物体做功常常使受力物体的动能和势能同时发生变化,例如汽车加速上坡的运动,外力对物体所做的功等于动能和势能的总变化量,即等于物体的机械能的变化量。这种情况以后将进一步讨论。

根据上面的讨论,得出结论:功是物体能量变化的量度。通过力对物体做功过程物体能量发生变化,因此,功是一种过程物理量。

在研究“功”的概念时,应注意两点。

(1) 谁对谁做功的问题:力 F 作用于物体,使物体在力的

方向上移动一段距离,我们就说力 F 对物体做功。当力的作用起着推动物体运动(力的方向与物体的位移方向同指向)的效果,就说力 F 对物体做正功;如果力的作用起着阻碍物体运动(即力的方向与物体的位移方向相反)的效果,那么就说力 F 对物体做负功(也可说成受力物体克服阻力 F 做功)。例如:机车拉着列车前进,则机车的拉力对列车做正功;而机车所受列车的反作用力则对机车做负功(或者说机车克服列车的反作用力做功)。

(2) 物理学里的“功”的概念有两个因素组成:一个是力,一个是力的作用点在力的方向上(同指向或反指向)的位移,有了这两个因素,才能说力对物体做功,缺了任何一个因素都不能称为做功:没有作用力当然谈不上做功;物体虽然受到作用力,但在力的方向上没有产生位移,力对物体仍然没有做功。例如,一个人提着一桶水,站着不动,人对水桶虽然有力的作用,但在力的方向上水桶没有移动,所以这不算做功;如果这个人提着水桶沿水平方向移动,虽然既有力作用在水桶上,水桶也产生了位移,可是人提着水桶的拉力垂直于地面,在拉力的方向上水桶还是没有移动,所以人提水桶的拉力对水桶仍没有做功;如果,我们从井里把水桶提上来,那么,人的拉力就对水桶做了功。必须注意,物理学上“功”的概念有它的特定含义,不能和“劳动”、“工作”等日常词汇混淆起来。

(二) 功的定义

从“功”的概念,可以看出,功这个名词在物理学中具有特定的意义。在功的量度中必须考虑两个因素:作用于物体的力和力的作用点在力的方向上的位移。由于这种特性,功的定义是:功等于沿位移方向作用于物体的力与力的作用点的

位移的大小的乘积。我们常以这一定义为基础，有时为了便于直观地阐明和帮助理解功的物理含义，在各种特定条件下，写出相对应的各种表达形式。这些表达形式将在以下有关内容内加以阐明。

(三) 功的计算

1. 两种计算方法

功的计算方法一般有两种：分析法和图解法，至于何种方法比较简便，需根据具体情况和条件，进行具体分析，才能确定。现举例说明如下：

力对物体做功中的最简单情况是物体在大小和方向都不变的恒力作用下作直线运动，而且物体的位移方向和力的方向一致，如图 1-3 所示，根据功的定义，恒力 F 对物体所作的功 W 等于作用在物体上的力 F 与力的作用点在力的方向上的位移 s 的乘积，所以功的表达式为

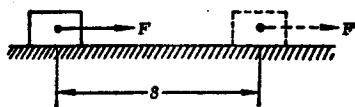


图 1-3

$$W = F \cdot s \quad (1-1)$$

由于物体作直线运动，位移的大小和物体移动的路程相等，因此，物体在恒力作用下完成一段位移 s ，实际上就是物体在恒力作用下移动了一段路程 s ，所以，在这种情况下，我们常说，力对物体所做的功等于作用在物体上的力和物体在力的方向上移动的路程的乘积。距离等于位移的大小，所以，在上述的定义中，有时把“路程”改写为“距离”。

我们还可用图解法来计算功的量值：

根据功的表达式 $W = F \cdot s$ 中各物理量之间的关系，可用力—位移图（简称 $F-s$ 图）来表示。用纵坐标表示作用在物体上的力，用横坐标表示物体在力的方向上的位移，如图 1-4 所示。如果作用力是一恒力，它的大小和方向都不随位移而变化，那么，力随位移而变化的图线是一条平行于横轴的直线。可以算出，图线下面的一块矩形面积的数值就等于功的数值。这个 $F-s$ 图叫做示功图。

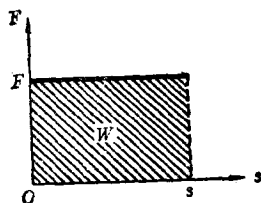


图 1-4

2. 恒力所作的功

在一般情况下，力的方向与物体运动方向往往并不一致。设原来静止的物体，在拉力 F 作用下在光滑水平面上移动，拉力 F 的方向与物体运动方向的夹角为 θ （图 1-5），在计算拉力 F 对物体所做的功时，我们把拉力 F 分解成为一个与移动方向平行的力 $F_1 = F \cos \theta$ 和一个与移动方向垂直的力 $F_2 = F \sin \theta$ 。由于物体在垂直方向上没有移动，也就是没有位移，所以力 F_2 在整个移动过程中对物体不做功，这样，当物体在水平方向移动的位移为 s 时，力 F 对物体所做的功就等于它的水平方向分力 F_1 对物体所做的功

$$W = F_1 s = F s \cos \theta,$$

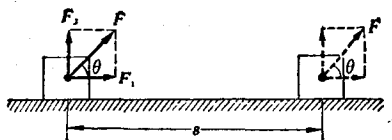


图 1-5

$$\text{即} \quad W = F s \cos \theta \quad (1-2)$$

上式是恒力做功的一般表达式。

在力和物体运动方向不一致的情况下,根据上式,力对物体做功的定义是:力所作的功等于力在位移方向的分力的大小与力的作用点的位移的大小的乘积。即功的数值等于力 F 、力的作用点的位移 s 及力与位移方向间的夹角 θ 的余弦 ($\cos \theta$) 的乘积。

根据功的定义,我们还可从另一角度来考虑计算功的量值。我们可把位移 s 分解为两个分量,如图 1-6 所示,一个是与 F 同方向的位移分量 $s_1 = s \cos \theta$, 一个是与 F 的方向垂直的位移分量 $s_2 = s \sin \theta$, 垂直分位移不构成做功的条件,所以,力 F 对物体所做的功等于力 F 和分位移 s_1 的乘积,即

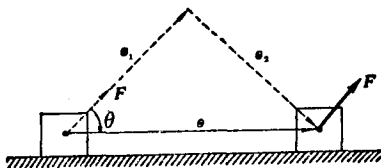


图 1-6

$$W = F_1 s_1 = F s \cos \theta。$$

上面所叙述的,表明用分析法计算功的量值的两种方法:

结果完全一致,因此我们可以说,功的量值可用力、由力引起受力物体的位移、力和位移之间夹角的余弦的乘积来量度,即

$$W = F s \cos \theta.$$

下面我们利用上式来讨论力对物体做功的一些情况:

(1) 当 $\theta = 0$ 时,力和运动方向一致, $\cos \theta = 1$, 那么, $W = Fs$, 力作正功, 这就是作用力和物体运动方向一致时的特殊情况。例如, 起重机在吊升重物过程中, 起重机对重物的作用力所作的功是正功。

(2) 当 $0^\circ < \theta < 90^\circ$ 时, $1 > \cos \theta > 0$, 有效分力 $F \cos \theta$ 和物体运动方向一致, 这时, 有效分力对物体的运动有推动作用, 我们说, 力对物体做了功, 力作正功。例如, 人用绳索斜向拉车前进(即拉绳方向与水平方向夹一角度), 拉力对车作正功。

(3) 当 $\theta = 90^\circ$ 时, 也就是力和受力物体运动方向垂直时, $\cos \theta = 0$, 则 $W = 0$, 这时力对物体不做功。例如, 物体作匀速圆周运动时, 向心力的方向始终与物体运动方向垂直, 所以, 向心力不做功。

(4) 当 $180^\circ > \theta > 90^\circ$ 时, 则 $-1 < \cos \theta < 0$, 即 $\cos \theta$ 为负值, 这时有效力对物体的运动起着阻碍作用, 在这种情况下, 我们说力对物体做了负功, 或者说物体克服阻力作了功。例如, 物体作斜抛运动时, 物体在上升过程中, 重力对它做负功(注意, 抛体在下落过程中, 重力则对它做正功)。

(5) 当 $\theta = 180^\circ$ 时, 力和物体运动方向相反, $\cos \theta = -1$, 那么, $W = -Fs$, 力对物体做负功, 或者说物体克服阻力做了功, 这是作用力和物体运动方向相反的特殊情况。例如, 木箱在地面上移动时, 作用于木箱上的摩擦力所作的功是负功。

根据上面的讨论得出结论: 力对物体所作的功是正功还