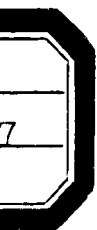


中学物理教师用书



功 和 能

阎 金 铎

北 京 教 育 出 版 社

功 和 能

阎 金 铎

北 京 教 育 出 版 社

内 容 提 要

本书包括三方面的内容：功、能、功和能的关系。全书分别讨论了功的概念和能的概念，功和能的关系——动能定理、功能原理，力学范围内的能量守恒定律——机械能守恒定律，以及它们的应用。

功 和 能

Gong He Neng

阎 金 铎

*

北京教育出版社出版

(北京北三环中路6号)

新华书店北京发行所发行

马池口印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 3.75印张 81,000字

1987年11月第1版 1987年11月第1次印刷

印数 1—2,300

ISBN 7-5303-0007-5/O·3

书号：7327·14 定价：0.74元

编者的话

中学物理教学的不断发展和改革，对广大物理教师在业务上提出了新的要求。为了帮助教师深入理解物理学基础理论的主要内容，以便高屋建瓴地驾驭教材，我们编写了这套《中学物理教师用书》。

这套丛书按照全日制重点中学教材系统选题，每个选题自成系统，分册出版（书目见后）。每一分册基本上与中学物理课本的一章相对应。这套书不是供教师直接用于讲课的教学参考资料。它是从普通物理的高度或运用理论物理的观点，对中学物理中重要概念、规律的来龙去脉及与有关知识的联系，进行较系统的分析和阐述，把高等师范院校物理课与中学物理课的知识加以沟通。书中对中学物理教师在教学中遇到的学生难于理解、掌握的内容和常见的错误，进行了深入的分析。为了开阔教师思路，本套书也适当提供了一些与基本概念、规律、方法有关的物理学史资料；对中学物理课所涉及的物理学内容至今的发展状况以及近代物理知识，也做了一些介绍。

这套书是应广大中学物理教师的要求而写的。在确定选题、制定编写方针的过程中，北京师范大学的阎金铎同志、北京15中学的周誉蔼同志和北京师范学院乔际平同志提了许多有益的建议、做了很多工作。本套书各册的提纲，都是经王天谔、王杏村、申先甲、乔际平、周誉蔼、张维善、唐树德、常利、钱玄、梁敬纯、阎金铎、缪秉成、魏凤文等同

志集体讨论确定的。

我们希望这套书能够对中学物理教师进修提高和钻研教材都有用处。但由于我们的水平所限，很难如愿。盼望广大中学物理教师在使用中提出宝贵意见。

一九八五年一月

目 录

引言.....	1
一、功.....	3
(一) 功的概念.....	3
1. 什么是功.....	3
2. 恒力做功的数学表述.....	5
3. 正功、负功.....	9
4. 变力做功的处理方法.....	14
5. 功的量值与参照系有关.....	20
(二) 关于力做功问题的讨论.....	21
1. 哪个力对哪个物体做功.....	21
2. “各个力做功之和”与“合力做的功”相等 吗.....	24
3. 作用力的功与反作用力的功是等值、异号吗.....	27
4. 静摩擦力做功的几个问题.....	30
5. 滑动摩擦力做功的特点.....	32
6. 子弹穿过物体过程中摩擦力做功问题.....	35
7. 重力、弹力做功的特点.....	38
二、能量的概念.....	41
1. 什么是能量.....	41
2. 如何量度动能.....	41
3. 动能的量值也与参照系有关.....	45
4. 引入势能的条件.....	47

5. 势能是相对量.....	49
6. 各种运动形式的能量.....	52
三、功和能的关系	54
(一) 动能定理及其应用	54
1. 质点的动能定理.....	54
2. 应用质点动能定理解决问题的思路和步骤.....	67
3. 质点组动能定理.....	64
4. 刚体转动的动能定理.....	69
5. 动能定理在任何惯性系中都成立.....	73
(二) 功能原理和机械能守恒定律	74
1. 功能原理是质点组动能定理的另一种形式.....	74
2. 应用功能原理解决问题的思路和步骤.....	76
3. 功能原理在流体运动中的应用.....	81
4. 机械能守恒的条件.....	86
5. 应用机械能守恒定律解决问题的思路和步骤.....	89
6. 不违背机械能守恒的力学过程, 准能实现吗.....	94
(三) 非惯性系中的功能关系	97
1. 非惯性系中的力.....	97
2. 惯性力的功.....	99
3. 非惯性系中的动能定理.....	100
(四) 高速运动情况下的功能关系	103
1. 空间、时间、质量是与运动状态有关的.....	103
2. 相对论力学中的基本方程.....	106
3. 相对论力学中的功能关系.....	108
4. 质量和能量的关系.....	111

引 言

物体相互作用时，许多物理量如速度、加速度、力等，都会发生改变。但是，有些物理量在一些过程中是不变的，这种物理量叫做守恒量。

在十七世纪，牛顿运动定律建立的前、后，许多人都在探索、寻求这种守恒量，以便利用它们来量度机械运动。

正如大家所知道的，在研究大量的碰撞现象中，人们发现 mv 这个量是守恒的，从而建立了动量的概念；在研究竖直抛体运动和弹性体碰撞现象中，人们又发现 mv^2 这个量也是守恒的，从而又引入了动能的概念。动量和动能都可以量度机械运动，都是描写机械运动状态的物理量。

初学者感到困惑的是：究竟在什么情况下，应该用动量，又在什么情况下，应该用动能，来描写物体的运动状态？实际上，这主要取决于你是从什么角度来研究问题。

如众周知，物体的运动是在时、空中进行的，也就是说，物体的运动总要经历一定的时间，也要通过空间中一段路程。例如，一个物体从离地面 h 高的地方自由下落，在下落过程中，总要经历一定的时间，也要通过一段路程，而且其运动状态不断地发生变化。物体的运动状态之所以发生变化，是在时、空中不断受到力的作用的结果。

因此，我们讨论物体运动状态的变化，可以从两种不同的角度来进行研究：

一是，物体在一定时间内不断受到力的作用，即力对时

间的积累作用。描写力对时间积累作用的物理量叫做力的冲量。从这个角度来研究，用动量来描写物体的运动状态。在力对时间积累作用等于零的情况下，研究对象的动量是守恒的。

另一是，物体在一定的路程内不断受到力的作用，即力对空间的积累作用。描写力对空间积累作用的物理量叫做功。从这个角度来研究，用动能来描写物体的运动状态。在力对空间积累作用等于零的情况下，研究对象的动能是守恒的。

这里应当指出：自然界中存在着许多种运动形式，机械运动、热运动、电磁运动、原子及原子核内部的运动、化学运动、生物运动等等，而且任何一种运动形式都可以直接或间接地转化为其他运动形式。在深入研究运动形式相互转化的过程中，人们发现能量是一个守恒不变的物理量，它是各种形式的运动的普遍量度。

正如恩格斯(于1880或1881年间)所著“运动的量度——功”论文中所指出的：“ mv 是以机械运动来量度的机械运动； $\frac{mv^2}{2}$ 是以机械运动转化为一定量的其他形式的运动的能力来量度的机械运动。”

由此可见，从功和能的角度来研究问题更为普遍。因此，正确地理解这两个概念，掌握它们之间的关系，以及能量守恒定律，对研究机械运动，机械运动与非机械运动相互转化的问题，都有着十分重要的意义。

本书分别讨论功的概念和能量的概念，功和能的关系——动能定理、功能原理，力学范围内的能量守恒定律——机械能守恒定律，以及它们的应用。

一、功

(一) 功的概念

1. 什么是功

在生产劳动中，为了省力或操作方便，人们创造了各种机械代替人的手工劳动。杠杆、轮轴、滑轮等就是常用的简单机械。功的概念就是从大量机械的工作中抽象概括出来的。

首先让我们分析各种机械工作时的共性。

用撬杠（杠杆）把石头撬起，用轮轴装置将井下的水桶提起，用滑轮装置将重物升高，……都是机械在工作。尽管各种机械的结构和功用不同，但仔细观察它们的工作过程，就会发现它们具有共同的特性：

第一，任何一种机械在工作时，必须对工作对象施以力的作用。例如，撬杠给石头以力的作用，轮轴或滑轮装置的绳索给水桶或重物施以拉力。

第二，工作对象在机械给它的力的作用下，沿该力的方向发生移动，而且在移动过程中始终受到这个力的作用。

可见，力和沿力方向的位移是机械工作过程中所不可缺少的两个因素。

现在让我们再分析完成某一项任务时，不利用机械和利用机械的异同。

设有一项任务是：把重1000牛顿的货物，匀速提升2米高。

如果不利用机械，人直接把货物提升，则人需对货物施以竖直向上的力，大小为1000牛顿，并使它向上移动2米。

如果利用图1—1所示的滑轮装置，把货物匀速提升2米，人拉绳子的力应是多大呢？

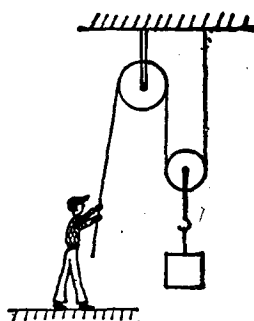


图 1—1.

由于滑轮和绳子的重量比货物的重量小得很多，从而可以忽略不计。这样，要匀速提升重量为1000牛顿的货物，人只要用500牛顿的力拉绳子就行了。然而，在省力的同时，却增加了拉下绳子的距离，也就是说，把货物提升2米，需要拉下绳子4米。显然，利用图1—1所示的装置，力省了一半，但绳子的位移却增加了1倍。

如果利用图1—2所示的滑轮装置，把货物匀速提升2米，则人拉绳子的力只需要250牛顿，然而，要拉下绳子8米。

可见，完成同一任务，利用机械装置，虽然力变小了，但受力点（受到力作用的质点）移动的距离变大了。从以上数据可知，力和受力点沿力方向的位移的乘积却保持不变，都是2000牛顿·米，即2000焦耳。

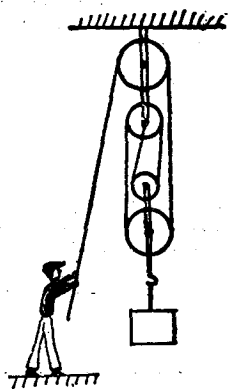


图 1—2

从以上分析可以看出：力和沿力方向的位移这两个因素，在说明机械运动的规律时起着重要的作用。因此，人们

总结概括出：当物体在力的作用下，沿力的方向移动一段位移时，我们就说该力对物体做了机械功，简称为功。

这里应当说明，功的概念与平常所说的“工作”，是有联系的，但也有区别。工作一词的含义比较广泛，它意味着人们通过劳动，消耗了一定的时间和精力，完成了某一项任务，取得一些成绩或教训，其效果是改变了客观事物存在的状态，它涉及物质的各种运动形式。然而，物理学中的功，只涉及物质的物理的运动形式，即物体间的相互作用，且有位置变动。所以，功的含义比平常所说的“工作”要狭窄得多。物体没有受到其他物体给它的力的作用，尽管物体在光滑的水平面上有位移，自然谈不到功；物体受到了力的作用，但在力的方向上没有移动，力对物体也没有做功。总之，一个物体受到力的不断作用，而且在力的方向上发生一段位移，或者说，物体在运动过程中，沿位移方向上始终有力的作用，该力才对物体做了功。

功是描写力对空间积累作用的物理量，它表明的是力对空间的积累效应。力对物体做功所产生的效果是改变物体的状态，使物体发生位置或运动状态的改变。

2. 恒力做功的数学表述

利用数学语言来表述物理内容，是最简洁、最准确的。表述的方式有两种：公式法和图象法。

首先，我们用数学公式法来表述恒力的功。

功是力对空间的积累效应。力和沿力方向的位移，或者，位移和沿位移方向的力，是力对物体做功的两个要素。这两个要素越大，力对空间的积累效应越显著，也就是说力对物体做功越多。功的大小可用这两个要素的乘积来表示。

如果恒力（大小和方向都不变化的力）和物体（质点）位移的方向一致，则恒力对物体做功的大小等于力和位移的乘积，即

$$W = FS,$$

式中 W 表示功， F 表示恒力， S 表示位移。在国际单位制中，力的单位是牛顿，位移的单位是米，则功的单位是牛顿·米，叫做焦耳。

如果恒力和物体位移的方向不一致，例如，用力拉一物体前进，拉力的大小为 F ，其方向与物体水平前进方向的夹角为 θ ，如图1—3所示。这时，把力 F 分解为两个分力，水平方向的分力 F_1 和竖直方向的分力 F_2 。分力 F_2 跟物体位移的方向垂直，对物体不做功；分力 F_1 跟物体位移的方向一致，做功等于

$$W = F_1 S.$$

因为

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

所以，力 F 对物体做功等于

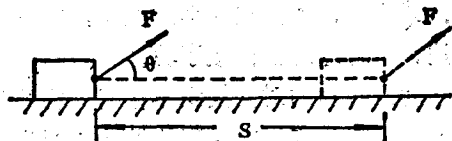


图 1—3

$$W = FS \cos \theta.$$

由于力是矢量，位移也是矢量，而功是标量。根据数学规定，两个矢量相乘结果得标量的乘法，叫做矢量的标积，其结果等于两个矢量的大小相乘，再乘以两个矢量之间的夹角的余弦，所以，上式可改写为

$$W = F \cdot S,$$

这是恒力对物体做功的数学表达式。它不仅说明了什么是功，而且说明了如何定量计算恒力做功的大小。

只要物体在恒力作用下运动，无论物体做直线运动，还

是曲线运动，恒力做功的大小就根据上式来计算。

例如，在离地面 H 的地方（ A 点），平抛出去一个物体，落在 B 点，如图1—4所示。抛体在运动过程中，始终受到重力作用，重力对物体做功等于多大呢？

由于在地球表面附近物体所受的重力可视为恒力，所以是属于恒力做功问题。



图 1—4

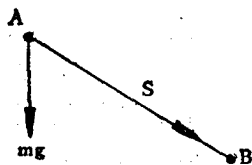


图 1—5

重力的方向是竖直向下的，物体的位移是从 A 点指向 B 点的一个有向线段，如图1—5所示。因此，重力对物体做功的大小等于

$$W = F \cdot S = mg s \cos(mg, s) = mgH.$$

又如，在一个带活塞的气缸里盛有一定质量的气体，它从状态1（ P, V_1, T_1 ）等压膨胀到状态2（ P, V_2, T_2 ），如图1—6所示。在此过程中，气体对活塞做功等于多大呢？

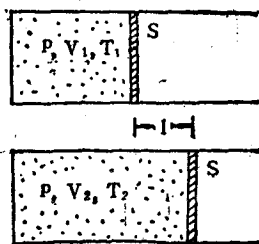


图 1—6

气体对活塞做功，实际上是气体给活塞的压力对活塞做功。由于过程是等压过程，气体的压强保持恒定不变，所以，气体给活塞的压力是一个恒力。

已知活塞面积为 S ，气体压强为 p ，则气体给活塞的压力等于

$$F = pS.$$

设活塞在这一恒力作用下移动的距离为 I ，由于活塞受力的方向跟活塞移动的方向一致，所以，气体对活塞做的功等于

$$W = pSI.$$

又因为上式中的 SI 等于气体体积的变化量，即 $V_2 - V_1$ ，所以，上式可改写为

$$W = p(V_2 - V_1).$$

下面，我们用数学图象法来表述恒力的功。

如果恒力的方向与物体位移的方向一致，则取纵坐标为力轴，横坐标为位置轴。在一段位移内 $S(x_2 - x_1)$ ，恒力与位置的函数关系可用图1—7中的水平直线 AB 表示。

AB 直线下方与 X 轴所包围的面积的大小，等于 $F(x_2 - x_1)$ ，即为该力对物体所做的功的大小。

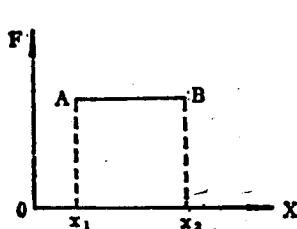


图 1—7

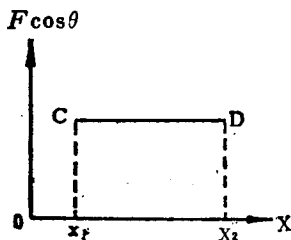


图 1—8

如果恒力的方向与物体位移的方向不一致，例如象图1—3所示的情况，则取纵坐标为沿位移方向上的分力 $F \cos \theta$ 轴，横坐标仍为位置轴。在一段位移内 $(x_2 - x_1)$ ，力 F 沿 X 轴的分力仍为恒力，可用图1—8中的水平直线 CD 表示。

CD 直线下方与 X 轴所包围的面积的大小，等于 $F(x_2 - x_1) \cos \theta$ ，即为该力对物体所做的功的大小。

这种图象表述的方法，对说明功的含义是有益的。一方面，它很明显地表示出在物体一段位移内始终不断的有力的作用，即说明了功是力对空间的积累效应；另一方面，它可以简明地显示出功的大小。

实际上，有一些问题，例如前面谈到的气体等压膨胀过程中气体对活塞做功的问题，利用图象法表述也比较方便。取活塞移动的方向为水平 X 轴，竖直向上为气体给活塞的压力 ps 轴，则气体等压膨胀过程中活塞受力跟活塞位置的关系，如图1—9中的直线1 2所示。气体对活塞做功的大小等于该直线下方与 X 轴所包围的面积的大小，即

$$W = ps(X_2 - X_1) = p(V_2 - V_1).$$

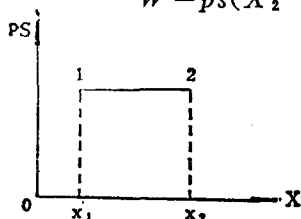


图 1—9

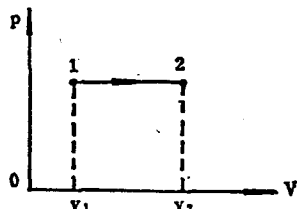


图 1—10

这里顺便指出，在热学中的示功图，通常使用的是 $P-V$ 图，即水平轴表示气体的体积，竖直轴表示气体的压强。图中的每一个点，表示气体处于一种平衡状态；图中的一条线，表示气体进行的过程。气体由状态1等压膨胀到状态2，可用图1—10中的水平直线1 2表示。该直线下方与 V 轴所包围的面积的大小，就是气体对活塞所做的功的大小，即

$$W = p(V_2 - V_1).$$

3. 正功、负功

由恒力做功的数学表述式

$$W = F \cdot S = FS \cos \theta$$

可知：

(1) 当恒力的方向跟物体(质点)位移的方向一致, 或者, 虽然恒力的方向跟物体位移的方向不一致, 但它们之间的夹角小于 90° , 即 $0^\circ \leq \theta < 90^\circ$ 时, 则

$$0 < \cos \theta \leq 1,$$

从而 W 为正值, 说明了力对物体做正功。

例如, 人拉车前进时, 拉力对车所做的功就是正功; 被平抛出去的运动物体, 重力对它做的功也是正功。

(2) 当恒力的方向跟物体位移的方向垂直, 即 $\theta = 90^\circ$ 时, 则

$$\cos 90^\circ = 0,$$

从而 $W = 0$, 说明了力对物体不做功。

例如, 当物体在水平面上运动时, 物体受到的竖直向下的重力, 以及水平面给物体的竖直向上的支持力, 对物体都不做功。

(3) 当恒力的方向跟物体位移的方向相反, 或者, 虽然恒力的方向跟物体位移的方向不是恰好正相反, 但它们之间的夹角大于 90° , 即 $90^\circ < \theta \leq 180^\circ$ 时, 则

$$-1 \leq \cos \theta < 0,$$

从而 W 为负值, 说明了力对物体做负功。

例如, 起重机吊升货物的过程中, 作用在货物上的重力对物体做的功, 就是负功。

应当明确: 功虽然有正、负之分, 但这个正、负并不表示方向。功是只有大小, 没有方向的量, 是一个标量。既然有正、负之分, 可以把它称为代数量。几个力分别对物体做功之和, 服从代数的运算法则。各个力对物体所做的功的代