**7-1 动能[kinetic energy]** 2021年3月17日19点28分

什么是物理?

物理学的基本目标之一是研究每个人都谈论的东西：能量。 这个话题显然很重要。 确实，我们的文明基于获取和有效利用能源的基础。

例如，每个人都知道任何类型的运动都需要能量：在太平洋上飞行需要能量。需要将材料提升到办公楼的顶层或在轨道上的空间站。 投掷快球需要它。我们花费大量金钱来获取和使用能源。由于能源资源，战争已经开始。战争由于一侧突然的，过度的能源使用而结束。每个人都知道能源及其使用的许多示例，但是能源一词的真正含义是什么？

什么是能量?

能量一词如此广泛，以至于很难写出清晰的定义。从技术上讲，能量是与一个或多个对象的状态（或条件）相关的标量。但是，这个定义太模糊了，以至于现在对我们没有帮助。

宽松的定义至少可以使我们起步。能量是我们与一个或多个对象的系统关联的数字。如果某个力通过移动某个对象而发生变化，那么能量数就会发生变化。经过无数次实验后，科学家和工程师意识到，如果仔细计划分配能量数字的方案，那么这些数字可用于预测实验的结果，甚至更重要的是，可用于建造飞行器之类的机器。成功的基础是我们宇宙的奇妙特性：能量可以从一种类型转换为另一种类型，并从一种对象转移到另一种对象，但是总数量始终是相同的（能量是守恒的）。从来没有发现过这种节能原理。

金钱。 可以将许多类型的能源视为代表许多类型的银行帐户中的货币的数字。 已经制定了有关此类货币数字的含义以及如何进行更改的规则。 您可以将钱号从一个帐户转移到另一个帐户，也可以从一个系统转移到另一个系统，也许以电子方式转移，而实际上没有任何物质在移动。 但是，总金额（所有金额的总和）可以始终考虑：它始终是保守的。 在本章中，我们仅关注一种能量（动能），仅关注一种可以传递能量（工作）的方式。

**动能**

动能是与物体的运动状态相关的能量。对象移动得越快，其动能就越大。当物体静止时，其动能为零。

对于质量m的物体，其速度v远低于光速,

例如,以的速度飞过我们的鸭子的动能为.也就是说,我们将该数字与鸭子的运动相关联.

SI的动能(和所有类型的能量)的单位是焦耳(J),以詹姆斯·普雷斯科特·焦耳（James Prescott Joule）的名字命名,詹姆斯·普雷斯科特·焦耳是1800年代的英国科学家,其定义为

7.2 功和动能 2021年3月17日19点44分

功

如果通过向对象施加力将对象加速到更高的速度,则会增加对象的动能().同样,如果通过施加力将对象减速到较小的速度,则会降低对象的动能.我们通过说你的力已将能量从您自己或从对象到您自己的能量转移到了对象上，从而解决了动能的这些变化。在通过力的这种能量传递中，**功**被认为是通过力在物体上完成的。更正式地说，我们将工作定义如下:

功W是通过作用在物体上的力传递到物体或从物体传递的能量。 传递给物体的能量是正功，而从物体传递的能量是负功。

“功”被转移了能量； “做工作”是传递能量的行为。功具有与能量相同的单位，并且是标量。

术语转移可能会引起误解。这并不意味着有任何物质流入或流出物体。也就是说，转移不像水流。相反，这就像两个银行帐户之间的电子货币转移：一个帐户中的数字增加而另一个帐户中的数字减少，而两个帐户之间没有任何物质通过。

请注意，在这里我们不关心“工作”一词的一般含义，这意味着任何体力劳动或精神劳动都是工作。例如，如果您用力推动墙壁，则由于需要不断重复的肌肉收缩而使您感到疲倦，并且从通常的意义上讲，您正在工作。但是，这样的努力不会引起与壁之间的能量传递，因此不会在此处定义的壁上进行功。

为避免在本章中造成混淆，我们仅在做功使用符号W,并且应以等价的mg表示重量.

功和动能

让我们通过考虑可沿无摩擦线滑动的珠子（沿水平x轴拉伸）找到工作的表达方式（图7-2）。 与金属丝成角度f的恒定力使焊珠沿着金属丝加速。 我们可以将力和加速度与牛顿第二定律相关联，该定律是为x轴上的分量编写的：

其中m是珠子的质量。 当珠子移动通过位移时,力会将珠子的速度从初始值更改为其他值.因为力是恒定的,所以我们知道加速度也是恒定的.因此,我们可以使用公式2-16来编写沿x轴的分量,

将该等式求解为ax，代入等式7-3，然后重新排列，即可得到

第一项是位移d结束时胎圈的动能Kf，第二项是开始时胎圈的动能Ki。 因此，公式7-5的左侧告诉我们动能已被力改变，而右侧则告诉我们该改变等于Fxd。 因此，通过力（由于力引起的能量传递）在胎圈上完成的功W为

如果知道Fx和d的值，则可以使用此公式计算功W.

为了计算物体移动一定位移时力对物体的作用力，我们仅使用沿物体位移的力分量。 垂直于位移的力分量为零.

从图7-2中，我们可以将Fx记为F cos ϕ，其中ϕ是位移→d和力→F的方向之间的夹角。 因此，

我们可以使用标量（点）乘积的定义（等式3-20）来写

其中F是→F的大小。 （您可能希望复习模块3-3中标量积的讨论。）当以单位矢量表示法给出→F和→d时，公式7-8对于计算功特别有用.

注意事项 使用公式有两个限制。 7-6至7-8可以计算力对物体所做的功。 首先，该力必须是恒定力； 也就是说，物体移动时其大小或方向都不得改变。 （稍后，我们将讨论如何处理大小变化的可变力。）第二，对象必须是类粒子。 这意味着物体必须是刚性的。 它的所有部分必须一起朝同一方向移动。 在本章中，我们仅考虑类似颗粒的物体，例如图7-3中的床及其乘员。

工作的迹象。 用力对物体进行的工作可以是正向工作，也可以是负向工作。 例如，如果公式7-7中的角度less小于90°，则cos ϕ为正，因此功也为正。 但是，如果ϕ大于90°（最大180°），则cos ϕ为负，因此功也是如此。 （当ϕ = 90°时，您能看到功为零吗？）这些结果引出了一条简单的规则。 要找到由力完成的功的符号，请考虑与位移平行的力矢量分量：

当力的矢量分量与位移的方向相同时，它会产生正向作用；当力的矢量分量与方向的方向相反时，它会产生负向作用。 当它没有这样的矢量分量时，它将执行零工作。

工作单位。 功具有焦耳的SI单位，与动能相同。 但是，从方程式。 在图7-6和7-7中，我们可以看到等效单位是牛顿计（N·m）。 英制中的对应单位是英尺磅（ft·lb）。 扩展公式7-2，我们得到

网络。 当两个或两个以上的力作用在一个物体上时，作用在该物体上的净功是各个力所完成的功的总和。 我们可以通过两种方式来计算网络。 （1）我们可以找到各部队完成的工作，然后将这些工作相加。 （2）或者，我们首先可以找到这些力的合力→Fnet。 然后，我们可以使用公式7-7，将幅值Fnet代入F，并将→Fnet和→d方向之间的夹角代入ϕ。 类似地，我们可以使用等式7-8，其中用→Fnet代替→F。

公式7-5将磁珠的动能变化（从初始Ki = 1 2mv2 0到后来的Kf = 1 2mv2）与在磁珠上完成的功W（= Fxd）相关联。 对于这样的类粒子对象，我们可以推广该方程。 令ΔK为物体动能的变化，令W为在其上完成的净功。 然后

这些陈述传统上称为粒子的功-动能定理。 它们同时适用于正功和负功：如果在粒子上完成的净功为正，则粒子的动能会增加功的数量。 如果净功为负，则粒子的动能会减少功的量。 例如，如果粒子的动能最初为5 J，并且向该粒子净转移了2 J（正净功），则最终动能为7J。 由粒子产生2 J（负净功），最终动能为3J.

7-3 重力做功 2021年3月18日11点24分

重力做功

接下来，我们研究作用在物体上的重力对物体所做的工作.图7-6显示了质量为m的颗粒状番茄，其以初始速度v0向上抛出，因此初始动能Ki = 1 2 mv2 0。 也就是说，番茄的动能降低是因为→Fg随番茄的上升而起作用。 因为我们可以将番茄视为颗粒，所以可以使用公式7-7（W = Fd cos ϕ）表示位移→d期间所做的功。 对于力大小F，我们将mg用作→Fg的大小。 因此，由重力→Fg完成的功Wg为

对于上升的物体，力→Fg与位移d相反，如图7-6所示。 因此，ϕ = 180°且

减号告诉我们，在物体上升期间，作用在物体上的重力将能量从物体的动能中转移出mgd. 这与物体上升时的速度减慢是一致的.

物体达到最大高度并回落后，力→Fg和位移→d之间的夹角zero为零。 因此，

加号告诉我们，重力现在将能量mgd传递给下落物体的动能（当然，它会加速）。

现在，假设我们通过向物体施加垂直力→F来提升它。 在向上位移期间，我们的作用力对物体产生正向作用力Wa，而重力对物体产生负向作用力Wg。 我们的作用力倾向于将能量传递给物体，而重力倾向于将能量从其传递给物体。 根据公式7-10，由于这两种能量转移，物体动能的变化ΔK为

其中K f是位移结束时的动能，Ki是位移开始时的动能。 如果我们放低物体，该方程式也适用，但是重力会向物体传递能量，而我们的力会向物体传递能量。

如果物体在举起前后都是静止的（例如，将书从地板举起到架子上），则Kf和Ki均为零，公式7-15简化为

请注意，如果Kf和Ki不为零，但仍相等，我们将得到相同的结果。 无论哪种方式，结果都意味着施加力所完成的功是重力所做功的负。 即，施加的力将与重力从物体传递的能量传递给物体的能量相同。 使用公式7-12，我们可以将公式7-16重写为

ϕ是→Fg和→d之间的夹角。 如果位移垂直向上（图7-7a），则ϕ = 180°，所施加的力等于mgd。 如果位移垂直向下（图7-7b），则ϕ = 0°且所施加力的功等于-mgd。

公式7-16和7-17适用于任何物体被举起或放下，物体在举起前后均保持静止的情况。 它们与所用力的大小无关。 例如，如果您将杯子从地板上举到头顶上方，则在举起过程中，您对杯子的作用力会发生很大变化。 不过，由于杯子在举升前后都处于静止状态，因此您对杯子的作用力由公式7-16和7-17给出，其中，在公式7-17中，mg是杯子的重量，而d是 是您提起它的距离.

7-4 弹性力做功 2021年3月18日11点44分

弹性力做功

接下来，我们要研究通过特殊类型的可变力（即弹簧力，即来自弹簧的力）对类粒子物体所做的工作。 自然界中的许多力与弹簧力具有相同的数学形式。 因此，通过研究这一力量，您可以了解许多其他力量。

图7-10a显示了处于松弛状态的弹簧，即既未压缩也未拉伸。 一端是固定的，而另一个自由端则连接着一个类似颗粒的物体（例如一块）。 如果我们如图7-10b所示向右拉动块来拉伸弹簧，则弹簧向左拉动块。 （由于弹簧力起到恢复松弛状态的作用，因此有时被称为恢复力。）如果如图7-10c所示，通过将滑块向左推动来压缩弹簧，则弹簧现在将滑块推向 正确的。

对于许多弹簧而言，一个很好的近似值是，当弹簧处于松弛状态时，来自弹簧的力→Fs与自由端从其位置开始的位移→d成比例。 弹簧力由下式给出

在1600年代后期的英国科学家罗伯特·胡克（Robert Hooke）之后，这就是所谓的胡克定律。 公式7-20中的负号表示弹簧力的方向始终与弹簧自由端位移的方向相反。 常数k称为弹簧常数（或力常数），是弹簧刚度的量度。 k越大，弹簧越硬。 也就是说，k越大，对于给定位移，弹簧的拉力或推力就越强。 k的SI单位是牛顿/米.

在图7-10中，x轴平行于弹簧的长度放置，当弹簧处于其松弛状态时，原点（x = 0）位于自由端的位置。 对于这种常见的安排，我们可以将公式7-20编写为

其中我们已经更改了下标。 如果x为正（弹簧在x轴上向右拉伸），则Fx为负（向左拉）。 如果x为负（弹簧向左压缩），则Fx为正（向右推动）。 请注意，弹簧力是可变力，因为它是自由端位置x的函数。 因此，Fx可以符号化为F（x）。 另请注意，胡克定律是Fx和x之间的线性关系.

为了找到随着弹簧力在图7-10a中的移动而完成的功，让我们对弹簧做两个简化的假设。 （1）它是无质量的； 也就是说，其质量相对于方块的质量可以忽略不计。 （2）是理想的弹簧； 也就是说，它完全遵守胡克定律。 我们还假设块体与地板之间的接触是无摩擦的，并且块体是颗粒状的。 我们给块一个向右的冲击力，以使其移动，然后不理会它。 当砌块向右移动时，弹簧力Fx确实作用在砌块上，从而降低了动能并减慢了砌块的速度。 但是，我们无法通过使用公式7-7（W = Fd cos ϕ）来找到这项工作，因为没有一个F值可插入该公式中-F值随模块拉伸弹簧而增加。

解决这个问题的方法很整洁。 （1）我们将块的位移分解成很小的小段，这些小段是如此之小，以至于我们可以忽略每个段中F的变化。 （2）然后在每个分段中，力（大约）具有单个值，因此我们可以使用公式7-7在该分段中找到功。 （3）然后，我们将所有段的工作结果相加以获得总工作量。好吧，这是我们的意图，但是我们真的不想在接下来的几天里花大量的时间来累加结果，而且，这些结果只是近似值。取而代之的是，让片段无穷小，以使每个工作结果的误差都为零。然后让我们通过积分而不是手工来求和所有结果。通过轻松的演算，我们可以在数分钟而不是数天的时间内完成所有这些工作。假设该块的初始位置为xi，之后的位置为xf。然后将这两个位置之间的距离分成许多段，每个段的长度为Δx。从xi开始，将这些段标记为段1、2，依此类推。当块移动通过一个段时，弹簧力几乎不会变化，因为该段太短以至于x几乎不会变化。因此，我们可以将力的大小近似为该段内的常数。将这些幅度标记为分段1中的Fx1，分段2中的Fx2，依此类推。

现在，在每个段中的力都恒定的情况下，我们可以使用公式7-7找到在每个段中完成的功。 ϕ = 180°，cos ϕ = -1。 然后完成的工作是分段1中的-F x1Δx-分段2中的-Fx2Δx，依此类推。 弹簧从xi到xf所完成的净功Ws是所有这些功的总和：

其中j标记段。 在Δx变为零的极限值下，公式7-22变为

根据公式7-21，力大小Fx为kx。 因此，替代导致

相乘得出

由弹簧力完成的功W s可以具有正值或负值，这取决于在块从xi移至xf时能量是向块还是从块净转移。 警告：最终位置xf出现在公式7-25右侧的第二项中。 因此，公式7-25告诉我们：

如果程序段结束时比初始位置更接近松弛位置（x = 0），则工作W s为正。 如果该块结束于距x = 0更远，则为负。如果该块结束于距x = 0相同距离，则为零。

如果xi = 0且我们将最终位置称为x，则公式7-25变为

现在假设我们在继续向其施加力F→a的同时沿x轴移动该块。 在位移过程中，我们的作用力在滑块上起作用，而弹簧力起作用。 根据公式7-10，由于这两个能量传递而导致的块动能变化ΔK为

其中K f是位移结束时的动能，Ki是位移开始时的动能。 如果块在位移前后是静止的，则Kf和Ki均为零，公式7-27简化为

如果连接到弹簧的滑块在位移之前和之后都是静止的，则通过施加力使其位移所完成的功是弹簧力对其所进行功的否定。

注意：如果块在位移前后都不稳定，则此陈述不正确.

7-5 变化力做功 2021年3月18日11点58分

让我们回到图7-2的情况，但现在考虑力在x轴的正方向上，力的大小随位置x的变化而变化。 因此，随着珠子（颗粒）的移动，作用在其上的力的大小F（x）发生变化。 仅此可变力的大小改变，而不改变其方向，并且在任何位置的大小都不随时间改变。

图7-12a显示了这种一维可变力的曲线图。 我们想要表达当粒子从初始点xi移至终点xf时，在此力作用下对粒子所做的功。 但是，我们不能使用公式7-7（W = Fd cos ϕ），因为它仅适用于恒定力→F。 同样，在这里，我们将使用微积分。 我们将图7-12a曲线下的区域划分为许多宽度为Δx的窄条（图7-12b）。 我们选择足够小的Δx，以允许我们在该间隔内将力F（x）视为合理恒定。 我们将Fj，avg设为第j个间隔内F（x）的平均值。 然后在图7-12b中，Fj，avg是第j条的高度。 将F j，avg视为常数，则第j区间中的力所完成的功ΔWj的增量（少量）现在近似由公式7-7给出，并且为

在图7-12b中，ΔWj等于第j个矩形阴影带的面积。 为了近似由粒子从xi移动到xf时由力完成的总功W，我们在图7-12b中添加了xi和xf之间所有条带的面积：

公式7-30是一个近似值，因为图7-12b中由矩形条顶部形成的折断的“天际线”仅近似于F（x）的实际曲线。

通过减小带材宽度Δx并使用更多带材，我们可以使逼近效果更好（图7-12c）。 在极限条件下，我们使带材宽度接近零； 这样，条带的数量就变得无限大，作为精确的结果，

这个极限正是我们在极限xi和xf之间的函数F（x）的积分所表示的意思。 因此，公式7-31变为

如果我们知道函数F（x），则可以将其代入公式7-32，引入适当的积分极限，进行积分，从而找到工作。 （附录E包含一列公共积分。）在几何上，功等于F（x）曲线和x轴之间的区域，在极限xi和xf之间（在图7-12d中阴影）。

现在考虑受三维力作用的粒子

其中成分Fx，Fy和Fz取决于粒子的位置； 也就是说，它们可以是该职位的职能。 但是，我们作了三个简化：F x可能取决于x但不取决于y或z，Fy可能取决于y但不取决于x或z，并且F z可能取决于z但不取决于x或y。 现在让粒子移动一个增量位移

根据公式7-8，在位移d r→期间，由F→对粒子所做的功dW的增量为

当粒子从具有坐标（xi，yi，zi）的初始位置ri移动到具有坐标（xf，yf，zf）的最终位置rf时，→F完成的功W为

如果→F仅具有x分量，则方程式7-36中的y和z项为零，并且方程式简化为方程式7-32.

公式7-32给出了在一维情况下作用在粒子上的可变力所完成的功。 现在让我们确定功等于动能的变化，如功-动能定理所述。 考虑质量为m的粒子，该粒子沿x轴移动并受到沿该轴指向的净力F（x）的作用。 公式7-32给出了当粒子从位置xi移到位置xf时通过该力对粒子所做的功，公式为7-32

其中我们使用牛顿第二定律用ma代替F（x）。 我们可以将公式7-37中的数量ma dx写成：

请注意，当我们将变量从x更改为v时，需要用新变量来表示积分的极限。 还要注意，由于质量m是一个常数，我们可以将其移动到积分之外。 将方程7-41右侧的项识别为动能可以使我们将该方程写为

7-6 功率 2021年3月18日12点07分

用力完成工作的时间比率称为因力而产生的力量。 如果力在时间量Δt中做功W，则在该时间间隔内由力引起的平均功率为

瞬时功率P是工作的瞬时时间率，我们可以写成

假设我们知道力作为时间的函数所做的功W（t）。 然后，为了在工作过程中在时间t = 3.0 s处获得瞬时功率P，我们将首先获取W（t）的时间导数，然后评估t = 3.0 s的结果。 SI的功率单位是每秒的焦耳。 该设备使用频率很高，以詹姆斯·瓦特（James Watt）的名字命名，以瓦特（W）为单位，瓦特大大提高了蒸汽机的工作效率。 在英国系统中，功率单位是每秒的英尺-磅。 通常会使用马力。 这些与

检查公式7-42可以发现，功可以表示为功率乘以时间，如常用的单位千瓦时。 因此，

也许因为它们出现在我们的水电费账单上，所以瓦特和千瓦时已被确定为电气单位。 它们可以等效地用作功率和能量的其他示例的单位。 因此，如果您从地板上捡起一本书并将其放在桌面上，则可以自由报告已完成的工作，例如4×10−6 kW·h（或更方便的是4 mW·h ）。 我们还可以根据力和粒子的速度来表达作用力作用于粒子（或类似粒子的物体）的速率。 对于沿直线（例如，x轴）移动并受到与该直线成一定角度ϕ的恒力→F作用的粒子，公式7-43变为

将等式7-47的右边重新组织为点积→F·→v，我们也可以将等式写为

例如，图7-14中的卡车在尾随载荷上施加了→F的力，该载荷在某一时刻的速度为→v。 由→F引起的瞬时功率是→F在该时刻对负载起作用的速率，由公式7-47和7-48给出。 通常说这种力量为“卡车的力量”，但要记住这是什么意思：力量是施加的力起作用的速率。