8-1 势能 2021年3月19日09点52分

什么是物理？

物理学的一项工作是确定世界上不同类型的能量，尤其是那些具有共同重要性的能量。 能量的一种通用类型是势能U。从技术上讲，势能是可以与施加力的对象系统的配置（布置）相关联的能量。

这是您实际上熟悉的事物的相当正式的定义。一个示例可能会比定义更好地帮助您：蹦极绳跳线从分级平台跳入（图8-1）。物体系统由地球和跳线组成。物体之间的力就是重力。系统的配置发生了变化（跳线和地球之间的距离减小了，当然，跳动的快感也是如此）。我们可以通过定义重力势能U来解释跳线的运动和动能的增加。这是与两个在重力作用下相互吸引的物体（此处是跳线和地球）之间的分离状态相关的能量。当跳线开始在跳水的末端附近拉伸松紧绳时，物体系统由绳和跳线组成。物体之间的力是弹性（类似于弹簧的）力。系统的配置发生变化（电源线伸出）。我们可以通过定义弹性势能U来考虑跳线的动能减少和绳索的长度增加。这是与弹性物体（此处为松紧绳）的压缩或伸展状态相关的能量。物理学决定了如何计算系统的势能，以便可以存储或使用能量。例如，在任何特定的蹦极跳线跳入之前，某人（可能是机械工程师）必须通过计算可以预期的重力和弹性势能来确定要使用的正确绳索。然后，跳跃只是令人兴奋的，而不是致命的。

功和势能

在第7章中，我们讨论了功与动能变化之间的关系。 在这里，我们讨论功与势能变化之间的关系。 让我们向上扔一个西红柿（图8-2）。 我们已经知道，随着番茄的生长，重力在番茄上产生的功Wg为负，因为该力从番茄的动能转移了能量。 现在，我们可以说这个能量是通过重力转移到番茄-地球系统的重力势能上的。 番茄在重力作用下变慢，停止，然后开始回落。 在下降过程中，传递反向：重力在番茄上所做的功Wg现在为正，该力将能量从番茄-地球系统的重力势能转换为番茄的动能。

对于上升或下降，引力势能的变化ΔU定义为等于引力对番茄所做的功的负值。 使用通用符号W进行工作，我们将其写为

该方程式也适用于游丝-弹簧系统，如图8-3所示。 如果我们突然推块使其向右移动，则弹簧力会向左作用，从而对块产生负作用，从而将能量从块的动能转移到弹簧-块系统的弹性势能。 滑块变慢并最终停止，然后开始向左移动，因为弹簧力仍然是向左的。 能量的传递然后被逆转了-它是从弹簧块系统的势能到块的动能。

保守和非保守力

让我们列出刚才讨论的两种情况的关键元素:

系统由两个或多个对象组成.

力在系统中的粒子状对象(番茄或块)与系统的其余部分之间起作用.

当系统配置发生变化时，力确实作用在颗粒状物体上（称为W1），从而在物体的动能K和系统的某些其他类型的能量之间传递能量.

当构型改变被反向时，力使能量传递反向，从而在该过程中做功W2.

在W1 = -W2始终为真的情况下，另一种能量是势能，该力被称为保守力。您可能会怀疑，重力和弹簧力都是保守的（因为否则我们就不能像以前那样谈论重力势能和弹性势能）。不保守的力量称为非保守力量。动摩擦力和阻力是非保守的。例如，让我们发送在地板上滑动的块，该块并非没有摩擦。在滑动过程中，来自地板的动摩擦力通过将能量从动能转移到一种称为热能的能量（与原子和分子的随机运动有关）而减慢了块的运动。从实验中我们知道，这种能量传递不能逆转（热能不能通过动摩擦力传递回块的动能）。因此，尽管我们有一个系统（由砌块和地板组成），在系统各部分之间起作用的力以及通过该力进行的能量传递，但该力并不保守。因此，热能不是势能。当仅保守力作用在类粒子物体上时，我们可以大大简化涉及物体运动的其他难题。接下来，让我们开发一种用于识别保守力量的测试，这将提供一种简化此类问题的方法。

保守力量的路径独立性

确定力是保守的还是非保守的主要测试是：让力作用于沿着任何闭合路径移动的粒子，该粒子从某个初始位置开始并最终返回到该位置（以便粒子开始往返运动） 并在初始位置结束）。 仅当在沿着此路径和任何其他闭合路径的往返过程中，它与粒子之间来回传递的总能量为零时，该力才是保守的。 换一种说法：

由保守力作用在围绕任何闭合路径运动的粒子上的净功为零。

从实验中我们知道，重力通过了该闭合路径测试。 一个例子是图8-2的番茄。 番茄以速度v0和动能1 2mv0 2离开发射点。作用在番茄上的重力使它减速，停止并随后回落。 当番茄回到发射点时，它再次具有速度v0和12 mv0的动能2。因此，重力在上升过程中从番茄传递的能量与其在下降过程中传递回到番茄的能量一样多。 。 在往返过程中，重力在番茄上完成的净功为零。 封闭路径测试的重要结果是：

保守力作用在两点之间移动的粒子上所做的功与粒子所走的路径无关。

例如，假设粒子沿着路径1或路径2从图8-4a中的a点移动到b点。如果仅保守力作用在粒子上，则沿着这两个粒子对粒子所做的功是相同的 路径。 在符号中，我们可以将结果写为

其中下标ab分别指示起点和终点，下标1和2指示路径。

这个结果是有力的，因为它使我们可以简化仅涉及保守力量时的难题。假设您需要计算由保守力沿两点之间的给定路径完成的功，并且如果没有其他信息，则计算是困难的，甚至是不可能的。 您可以通过在这两点之间替换一些其他路径来找到工作，对于这些路径而言，计算更容易且更可行。

公式8-2的证明

图8-4b显示了由单个力作用的粒子的任意往返行程。 粒子沿路径1从起始点a移至点b，然后沿路径2返回至点a。当粒子沿每个路径移动时，力确实作用在粒子上。 不用担心在何处完成正面工作，在何处进行负面工作，让我们仅将沿路径1从a到b的工作表示为Wab，1，将沿b沿路径2到b的工作表示为Wba，2。 如果力量是保守的，那么往返期间的净功必须为零：

换句话说，沿向外路径完成的工作必须是沿反向路径完成的工作的负面结果。 现在让我们考虑当粒子沿着路径2从a移到b时通过力对粒子所做的功Wab，2，如图8-4a所示。 如果这种力量是保守的，那工作就是Wba，2的否定：

确定势能值

在这里，我们找到方程式，该方程式给出了本章中讨论的两种类型的势能的值：重力势能和弹性势能。 但是，首先我们必须找到保守力与相关势能之间的一般关系。 考虑一个类粒子物体，该物体是保守力→F起作用的系统的一部分。 当该力确实作用在物体上时，与系统相关的势能的变化ΔU是所完成功的负数。 我们将此事实写为公式8-1（∆U = −W）。 对于最一般的情况，力可能会随位置而变化，我们可以按照公式7-32编写功W：

该方程式给出了物体从点xi移动到点xf时通过力完成的功，从而改变了系统的结构。 （由于力是保守的，因此这两点之间所有路径的作用都是相同的。）

将公式8-5代入公式8-1，我们发现，由于构型的改变而引起的势能的改变通常表示为：

重力势能

我们首先考虑质量为m的粒子沿y轴垂直移动（正方向为向上）。 当粒子从点yi移到点yf时，重力→Fg对其起作用。 为了找到质点-地球系统引力势能的相应变化，我们使用公式8-6进行两个更改：（1）由于重力垂直作用，因此我们沿y轴而不是x轴进行积分。 （2）我们用-mg代替力符号F，因为→F g的大小为mg，并且指向y轴。 然后我们有

只有重力势能（或任何其他类型的势能）的变化∆U在物理上有意义。 但是，为了简化计算或讨论，有时我们要说的是，当粒子处于某个高度y时，某个重力势能值U与某个粒子-地球系统相关联。 为此，我们将公式8-7重写为

然后，当粒子处于参考点yi的参考构型时，我们将Ui视为系统的重力势能。 通常，我们使Ui = 0且yi =0。这样做会将公式8-8更改为

这个方程式告诉我们：

与粒子-地球系统相关的重力势能仅取决于粒子相对于参考位置y = 0的垂直位置y（或高度），而不取决于水平位置。

弹性势能

接下来，我们考虑图8-3中所示的块弹簧系统，其中块在弹簧常数k的弹簧末端移动。 当块从点xi移到点xf时，弹簧力Fx = -kx确实作用在块上。 为了找到阻滞弹簧系统弹性势能的相应变化，我们在公式8-6中用-kx代替F（x）。 然后我们有

要将势能值U与位置x处的块相关联，我们选择参考配置为当弹簧处于其松弛长度且块处于xi = 0时。弹性势能Ui为0，等式8 -10变成

8-2 机械能守恒 2021年3月19日10点29分

系统的**机械能[mechanical energy]**是其中物体的势能和动能之和:

在本模块中,我们研究了只有保守力引起系统内能量传递时,即摩擦力和拖曳力未作用于系统中的对象时,机械能发生了什么变化.同样,我们将假定系统与环境隔离;也就是说,系统外部物体的外力不会引起系统内部能量的变化.

当保守力对系统内的物体做功W时,该力在物体的动能和系统的势能之间传递能量.根据公式7-10,动能变化为

并且根据公式8-1,势能的变化为

结合公式8-13和8-14,我们发现

换句话说,其中一种能量的增加等于另一种能量的减少.

我们可以将公式8-15重写为

下标指的是两个不同的时刻,因此是指系统中对象的两种不同的排列方式.重新排列公式8-16,得到

换句话说,

在仅保守力引起能量变化的孤立系统中,动能和势能可以改变,但它们的总和即系统的机械能不能改变.

该结果称为机械能守恒原理.(现在您可以看到保守力量的名称。）借助公式8-15,我们可以用另一种形式写出该原理,如下所示:

机械能守恒的原理使我们能够解决仅使用牛顿定律很难解决的问题:

当系统的机械能保持不变时，我们可以将一个瞬间的动能和势能之和与另一个瞬间的动能之和联系起来，而无需考虑中间运动，也不必寻找所涉及力的功.

图8-7显示了一个示例，其中可以应用机械能守恒原理：随着摆的摆动，摆-地球系统的能量在动能K和重力势能U之间来回传递，其中 总和K + U是常数.如果我们知道摆锤处于最高点时的重力势能（图8-7c），则公式8-17会给我们摆锤在最低点处的动能（图8-7e）。

8-3 阅读势能曲线 2021年3月19日11点02分

我们再一次考虑一个粒子，该粒子是保守力在其中起作用的系统的一部分。 这次假设粒子被约束沿x轴移动，而保守力确实对其起作用。 我们要绘制与该力及其作用有关的势能U（x），然后考虑如何将图与力和粒子的动能联系起来。 但是，在讨论这些图之前，我们需要力与势能之间的另一种关系。

公式8-6告诉我们，如果我们知道力F（x），那么在一维情况下如何找到两点之间的势能变化ΔU。 现在我们要走另一条路了； 也就是说，我们知道势能函数U（x）并想找到力。 对于一维运动，当粒子移动距离Δx时，作用在粒子上的力所完成的功W为F（x）∆x。 然后我们可以将公式8-1写成

求解F（x）并传递到微分极限屈服

我们可以通过放置U（x）= 1 2kx2来检查此结果，这是弹簧力的弹性势能函数。 然后，公式8-22如预期那样得出F（x）= -kx，这是胡克定律。 同样，我们可以用质量为m的粒子在地球表面上方x的高度替换U–x = mgx（这是质点-地球系统的重力势能函数）。 然后，公式8-22得出F = -mg，这是作用在粒子上的重力。

图8-9a是系统的势能函数U（x）的图，其中粒子处于一维运动，而保守力F（x）在其上起作用。 通过（在图形上）取U（x）曲线在各个点的斜率，我们可以轻松找到F（x）。 （公式8-22告诉我们F（x）是U（x）曲线的斜率的负值。）图8-9b是以此方式找到的F（x）的图。

在没有非保守力的情况下，系统的机械能E的常数为

这里的K（x）是系统中粒子的动能函数（此K（x）给出的动能是粒子位置x的函数）。 我们可以将公式8-23重写为

假设Emec（记住，它的值是一个常数）恰好是5.0J。它将在图8-9c中用一条水平线表示，该水平线在能量轴上穿过值5.0J。 （实际上在那里显示。）式8-24和图8-9d告诉我们如何确定粒子任何位置x的动能K：在U（x）曲线上，找到该位置的U x，然后从E mec中减去U。例如，在图8-9e中，如果粒子在x5右边的任意点，则K = 1.0J。当粒子在x2处时，K的值最大（5.0 J），而当x2处的粒子最小（0 J）。粒子在x1处。由于K永远不会为负（因为v2始终为正），所以粒子永远不会移动到x1的左边，这里Emec-U为负。取而代之的是，当粒子从x2向x1移动时，K减小（粒子变慢），直到在x1处K = 0（粒子在此处停止）。请注意，当粒子达到x1时，公式8-22给出的作用在粒子上的力为正（因为斜率dU / dx为负）。这意味着粒子不会保留在x1处，而是开始向右移动，与之前的运动相反。因此x1是一个转折点，是K = 0（因为U = E）并且粒子改变方向的地方。图的右侧没有拐点（其中K = 0）。当粒子向右移动时，它将无限期地继续。

图8-9f显示了Emec的三个不同值，它们叠加在图8-9a的势能函数U（x）的图上。让我们看看他们如何改变局势。如果E mec = 4.0 J（紫色线），则转折点从x1移至x1和x2之间的一个点。同样，在x5右侧的任意位置，系统的机械能等于其势能；因此，粒子没有动能，并且（根据公式8-22）没有力作用在粒子上，因此它必须是静止的。据说处于该位置的粒子处于中性平衡。 （处于水平桌面的大理石处于这种状态。）如果E mec = 3.0 J（粉红色线），则有两个转折点：一个在x1和x2之间，另一个在x4和x5之间。另外，x3是K = 0的一个点。如果粒子恰好位于此处，则作用在其上的力也为零，并且粒子保持静止。但是，如果它在任一方向上甚至稍微移位，则非零力会将其沿相同方向推得更远，并且粒子将继续移动。据说处于这种位置的粒子处于不稳定的平衡状态。 （一个在保龄球顶部保持平衡的大理石是一个示例。）接下来，如果Emec = 1.0 J（绿线），请考虑粒子的行为。如果我们将其放置在x4处，它会卡在此处。它不能自行向左或向右移动，因为这样做将需要负动能。如果我们稍微向左或向右推动它，则会出现恢复力，将其移回x4。据说处于该位置的粒子处于稳定的平衡。 （一个放置在半球形碗底部的大理石就是一个例子。）如果将粒子放置在以x2为中心的杯状势阱中，则它位于两个转折点之间。它仍然可以移动一些，但只能移到x1或x3的一半。

8-4 外力在系统上做功 2021年3月19日11点14分

在第7章中，我们将功定义为通过作用在物体上的力而传递到物体或从物体传出的能量。 现在，我们可以将该定义扩展到作用在对象系统上的外力。

功是通过作用在系统上的外力传递到系统或从系统传递的能量。

图8-11a代表正功（能量向系统的转移），图8-11b代表负功（系统的能量转移）。当一个以上的力作用在系统上时，它们的净功就是传递到系统或从系统传来的能量。这些转账就像往来于银行帐户的资金。如果系统由单个粒子或类粒子物体组成（如第7章所述），则在力作用下对系统所做的功只能改变系统的动能。此类传递的能量表述为方程7-10的功-动能定理（∆K = W）。也就是说，单个粒子只有一个能量帐户，称为动能。外力可以将能量转移到该帐户中或从该帐户中转移出去。但是，如果系统更复杂，则外力可能会改变其他形式的能量（例如势能）。也就是说，更复杂的系统可以具有多个能源帐户。让我们通过研究两种基本情况来找到此类系统的能量陈述，一种不涉及摩擦，另一种不涉及摩擦。

要参加保龄球比赛，您首先要蹲在地板上，并将手放在球下。 然后，您迅速拉直身体，同时也急剧拉起双手，将球朝大约脸部水平方向向上发射。 在向上运动过程中，施加在球上的力显然起作用了。 也就是说，是外在的能量传递能量，但是传递到什么系统呢？ 为了回答这个问题，我们检查一下哪些能量发生了变化。 球的动能改变ΔK，并且由于球和地球之间的距离变得更远，所以球地球系统的重力势能也改变ΔU。 为了同时包含这两个变化，我们需要考虑球形地球系统。 那么您的力量就是在该系统上工作的外力，而功是

其中∆E mec是系统机械能的变化。 这两个方程式如图8-12所示，是当不涉及摩擦力时通过外力在系统上完成的功的等效能量表述.

接下来，我们考虑图8-13a中的示例。 恒定的水平力→F沿x轴并通过大小为d的位移拉动块，从而将块的速度从→v0增大到→v。 在运动过程中，来自地板的恒定动摩擦力→f k作用在滑块上。 让我们首先选择块作为我们的系统，并对其应用牛顿第二定律。 我们可以将沿x轴（Fnet，x = max）的分量的定律写为

因为力是恒定的，所以加速度→a也是恒定的。 因此，我们可以使用公式2-16来写

将该方程求解为a，将结果代入方程8-27，然后重新排列，即可得到

在更一般的情况下（例如，在该状态下，该块正在上升），势能可能会发生变化。 为了包括这种可能的变化，我们通过写出公式8-29来进行概括

通过实验我们发现，随着砖块的滑动，砖块及其所沿的地板部分会变热。 正如我们将在第18章中讨论的那样，物体的温度与物体的热能Eth（与物体中原子和分子的随机运动相关的能量）有关。 此处，砌块和地板的热能增加是因为（1）在它们之间存在摩擦，并且（2）在滑动。 回想一下，摩擦是由于两个表面之间的冷焊造成的。 当砖块在地板上滑动时，这种滑动会导致砖块和地板之间的焊缝反复撕裂和变形，从而使砖块和地板变热。 因此，滑动增加了它们的热能Eth。 通过实验，我们发现热能的增加ΔEth等于幅度fk和d的乘积：

Fd是由外力→F（由力传递的能量）完成的功W，但是在哪个系统上完成了功（在哪里进行了能量传递）？ 为了回答这个问题，我们检查一下哪些能量发生了变化。 砌块的机械能发生变化，砌块和地板的热能也发生变化。 因此，用力→F完成的工作是在楼板系统上完成的。 那工作是

8-5 能量守恒 2021年3月19日11点37分

现在，我们讨论了几种情况，其中能量转移到对象和系统或从对象和系统转移，就像货币在帐户之间转移一样。 在每种情况下，我们都假定总是可以考虑所涉及的能量。 也就是说，能量不可能神奇地出现或消失。 用更正式的语言，我们（正确地）假设能量服从一个称为能量守恒定律的定律，该定律与系统的总能量E有关。 该总数是系统的机械能，热能以及除热能之外的任何内部能量的总和。 （我们尚未讨论其他类型的内部能量。）法律规定：

系统的总能量E只能根据传递到系统或从系统传递的能量数量进行更改。

我们考虑的唯一能量传递类型是通过外力在系统上完成的功W。 因此，对于我们来说，这条法律规定

其中∆E mec是系统机械能的任何变化，∆Eth是系统热能的任何变化，而∆Eint是系统任何其他类型的内部能量的变化。 ΔEmec中包括动能变化∆K和势能变化∆U（弹性，万有引力或我们可能找到的任何其他类型）。

这种能量守恒定律不是我们从基本物理原理中得出的。 相反，这是基于无数实验的定律。 科学家和工程师从未发现过例外。 能量根本无法神奇地出现或消失。

孤立系统

如果系统与环境隔离，则不会有任何能量传递到该系统。 对于这种情况，能量守恒定律规定：

孤立系统的总能量E不能改变。

在一个孤立的系统中，可能会发生许多能量传递，例如在动能和势能之间，或者在动能和热能之间。但是，系统中所有类型的能量的总和不能改变。同样，能量也无法神奇地出现或消失。我们可以使用图8-14中的攀岩者为例，将他，他的装备和地球近似为一个孤立的系统。当他沿岩面下降时，改变了系统的结构，他需要控制系统重力势能的传递。 （这种能量不能仅仅消失。）其中一些转移给了他的动能。但是，他显然不希望过多地转移到该类型，否则他会移动得太快，因此他将绳索缠绕在金属环上，从而在向下移动时在绳索和环之间产生摩擦。环在绳索上的滑动然后以他可以控制的方式将系统的重力势能转换为环和绳索的热能。攀登者-装备-地球系统的总能量（其重力势能，动能和热能的总和）在下降过程中不会改变。

对于一个孤立的系统，能量守恒定律可以用两种方式来写。 首先，通过在公式8-35中设置W = 0，我们得到

公式8-37告诉我们：

在隔离的系统中，我们可以将一个瞬间的总能量与另一瞬间的总能量相关联，而无需考虑中间时间的能量。

当您需要在系统中发生特定过程之前和之后关联系统的能量时，这一事实对于解决有关隔离系统的问题而言可能是非常强大的工具。 在模块8-2中，我们讨论了隔离系统的特殊情况-即非保守力（例如动摩擦力）不在其中起作用的情况。 在这种特殊情况下，∆Eth和∆Eint均为零，因此公式8-37简化为公式8-18。 换句话说，当非保守力不起作用时，孤立系统的机械能就得到保护。

外力可以改变物体的动能或势能，而无需在物体上做功，也就是说，不将能量传递给物体。 相反，该力负责将能量从一种类型传递到对象内部的另一种类型。

图8-15显示了一个示例。最初静止的溜冰者从栏杆上推开，然后在冰上滑动（图8-15a和b）。由于来自钢轨的外力→F，她的动能增加。但是，该力不会将能量从铁轨传递给她。因此，武力对她没有任何作用。相反，她的动能由于肌肉中生化能的内部传递而增加。图8-16显示了另一个示例。发动机通过四轮驱动提高了汽车的速度（所有四个车轮都由发动机转动）。在加速过程中，发动机使轮胎在路面上向后推动。该推动产生摩擦力→f，该摩擦力→f沿向前方向作用在每个轮胎上。来自道路的净外力→F（这些摩擦力的总和）使汽车加速，从而增加了其动能。但是，→F不会将能量从道路传递到汽车上，因此在汽车上也不起作用。而是，由于储存在燃料中的能量进行内部传递，汽车的动能增加了。

在这两种情况下，如果可以简化情况，有时可以将物体上的外力→F与物体机械能的变化相关联。 考虑溜冰者的例子。 在图8-15c所示的推入距离d期间，我们可以通过假设加速度恒定，速度从v0 = 0变为v的方式进行简化（也就是说，假设→F的幅值为F，角为constant）。 推动之后，我们可以将滑冰者简化为一个粒子，而忽略了其肌肉的活动增加了其肌肉中的热能并改变了其他生理特征的事实。 然后我们可以应用公式7-5（1 2mv2 − 1 2mv0 2 = Fxd）来写

如果情况还涉及对象高程的变化，我们可以通过写以下公式将变化ΔU包括在重力势能中：

该方程式右侧的力对物体无作用，但仍对左侧所示的能量变化负责.

功率

既然您已经了解了如何将能量从一种类型转移到另一种类型，那么我们可以扩展模块7-6中给出的功率定义。 功率定义为通过力完成工作的速率。 在更一般的意义上，功率P是能量通过力从一种类型传递到另一种类型的速率。 如果在时间Δt内转移了能量∆E，则由于该力而产生的平均功率为