24-1 电势 2020年12月4日14点47分

物理学的一个目标是确定我们世界中的基本力，例如我们在第21章中讨论的电力。一个相关的目标是确定力是否是保守的，即是否可以将势能与之关联。 将势能与力相关联的动机是，我们可以将机械能守恒原理应用于涉及力的封闭系统。 这一极其强大的原理使我们能够计算出仅凭力来计算就很难的实验结果。 通过实验，物理学家和工程师发现，电力是保守的，因此具有相关的势能。 在本章中，我们首先定义这种势能，然后加以使用。

为了快速品尝，让我们回到第22章中考虑的情况：在图24-1中，带正电荷q1的粒子1位于点P处带正电荷q2的粒子2附近。在第22章中，我们解释了粒子2如何能够无接触地推动粒子1。为了说明力dF（它是矢量），我们定义了一个电场dE（也是矢量），该电场由粒子2在P处建立。无论粒子1是否在P处，该电场都存在。选择将粒子1放置在此处，将其推入是由于电荷q1和先前存在的场dE。这是一个相关的问题。如果我们在P处释放粒子1，则它开始移动并因此具有动能。能量无法通过魔术出现，那么它从何而来呢？它来自与图24-1的布置中两个粒子之间的力相关的势能U。为了说明势能U（标量），我们定义了由粒子2在P处设置的电势V（也是标量）。无论粒子1是否在P处，电势都存在。如果我们选择将粒子1放置在此处，则两粒子系统的势能取决于电荷q1和预先存在的电势V。

本章的目标是（1）定义电势，（2）讨论如何以便针对带电粒子和带电物体的各种排列进行计算，并且（3）讨论电势V与电势能U之间的关系。

电势和电势能

我们将根据势能定义电势（或简称为电势），因此我们的第一项工作是弄清楚如何测量该势能。 早在第8章中，我们通过以下方法测量了物体的重力势能U：（1）将U 0分配给参考配置（例如桌子级的物体），然后（2）计算万有引力的功W。 对象从该级别上移或下移。 然后我们将势能定义为

让我们用新的保守力，即电力，遵循相同的步骤。 在图24-2a中，我们想要找到与位于带电棒的电场中P点的正测试电荷q0相关的势能U。 首先，我们需要U 0的参考配置。合理的选择是使测试电荷无限远地远离杆，因为这样就不会与杆发生相互作用。 接下来，我们将测试电荷从无穷大引入到点P，以形成图24-2a的配置。 一路走来，我们计算了测试电荷上的电力所完成的功。 然后，最终配置的势能由公式24-1给出，其中W现在是由电动势完成的功。 让我们使用该符号强调测试费用是从无穷大引入的。 功和势能可以是正的，也可以是负的，具体取决于棒的电荷符号.

接下来，我们根据力和所产生的势能来定义P处的电势V：

即，电势是从无穷大引入正测试电荷时每单位电荷的电势能量。 不管测试电荷（或其他任何电荷）是否恰好存在，棒都将电位V设置为P（图24-2b）。 从公式24-2可以看出，V是一个标量（因为没有与势能或电荷相关的方向），并且可以为正或负（因为势能和电荷具有正负号）。

重复此过程，我们发现杆的电场中的每个点都建立了电势。 实际上，每个带电物体在其整个电场的各个点处都会建立电位V。 如果我们碰巧在已知存在的V的位置上放置了一个带电荷q的粒子，我们可以立即找到该配置的势能：

其中q可以是正数或负数。

两个注意事项。 （1）不幸的是，将V称为势能的决定（现在已经很老了），因为该术语很容易与势能混淆。 是的，这两个数量是相关的（在这里就是重点），但是它们是非常不同的并且不能互换。 （2）电位是标量，而不是矢量。 （当您遇到家庭作业问题时，您将为此感到高兴。）

语言。 势能是对象系统（或配置）的属性，但是有时我们可以将其分配给单个对象。 例如，棒球撞击外场的重力势能实际上就是棒球-地球系统的势能（因为它与棒球和地球之间的力有关）。 但是，由于只有棒球运动明显（其运动不会显着影响地球），因此我们可以单独为它分配重力势能。 以类似的方式，如果将带电粒子放置在电场中，并且对电场（或建立电场的带电物体）没有明显影响，则通常将电势能仅分配给粒子。

单位。 从公式24-2得出的电势的SI单位是每库仑焦耳。 这种组合经常发生，以至于用一个特殊单位伏特（缩写为V）来表示它。

通过两次单位转换，我们现在可以将电场单位从牛顿每库仑切换到更常规的单位：

第二组括号中的转换因子来自我们上面给出的伏特定义； 第三组括号中的数字是根据焦耳的定义得出的。 从现在开始，我们将以伏特/米而不是牛顿/库仑来表示电场值.

通过电场运动

电位变化。 如果我们在带电物体的电场中从初始点i移至第二点f，则电势会改变

如果我们将一个带电荷q的粒子从i移到f，则根据公式24-3，系统的势能会改变

根据q和V的符号，变化可以为正或负。如果从i到f的电势没有变化（这些点具有相同的电势值），则该变化也可以为零。 因为电力是保守的，所以i和f之间的势能U的变化对于这些点之间的所有路径都是相同的（与路径无关）。

在田间工作。 通过应用保守力的一般关系，我们可以将势能变化量U与当粒子从i移动到f时由电力完成的功W关联起来（方程8-1）：

接下来，我们可以通过代入公式24-4，将该工作与电势变化相关联：

到目前为止，我们一直将功归因于力，但在这里也可以说W是电场对粒子所做的功（因为它当然会产生力）。 功可以为正，负或零。 由于任意两点之间的U与路径无关，因此由场完成的功W也是如此。 （如果需要计算困难路径的工作量，则切换到更容易的路径，您将获得相同的结果。）

节约能源。 如果带电粒子在电场中移动，除了电场引起的电场外，没有其他作用力，则机械能得以保留。 假设我们可以将电势能分配给单独的粒子。 然后我们可以写出从点i到点f的粒子的机械能守恒为

代入方程式24-4，我们发现一个非常有用的方程式，用于说明由于粒子通过电势差而引起的粒子动能的变化:

由施加力量进行工作。 如果除电场力外还有一些力作用在粒子上，我们可以说附加力是施加的力或外力，这通常归因于外在作用力。 这样施加的力可以对粒子起作用，但是该力可能并不保守，因此，一般而言，我们无法将势能与其关联。 我们通过修改公式24-7来说明Wapp工作：

重新排列和代入公式24-4，我们也可以写成

施加力的功可以为正，负或零，因此系统的能量可以增加，减少或保持不变.

在特殊的情况下，粒子在移动前后是静止的，方程24-10和24-11中的动能项为零，我们有

在这种特殊情况下，功Wapp涉及粒子通过电势差V的运动，而不涉及粒子动能的变化。 通过比较公式24-6和24-12，我们可以看到在这种特殊情况下，施加力所产生的功是磁场所产生的功的负数：

24-2 等电位表面和电场 2020年12月4日17点50分

等势面

具有相同电势的相邻点形成一个等势面，该等势面可以是虚构表面，也可以是真实物理表面。 当粒子在同一等势面上的两个点i和f之间移动时，电场不会对带电粒子产生净功W。 这是从等式得出的。 24-6，这告诉我们，如果Vf Vi，则W必须为零。 由于功的路径独立性（以及势能和电势的独立性），对于连接给定等势面上的点i和f的任何路径，W 0都无关乎该路径是否完全位于该表面上。

图24-4显示了由于电荷的某些分布而与电场相关的一系列等势面。 当粒子从路径I和II的一端移动到另一端时，电场对带电粒子所做的功为零，因为这些路径中的每条路径在相同的等势面上开始和结束，因此电势没有净变化 。 当带电粒子从路径III和IV的一端移到另一端时所做的功不为零，但对于这两个路径而言，它们的值相同，因为这两个路径的初始和最终电势相同。 也就是说，路径III和IV连接同一对等势面。

从对称性来看，由带电粒子或球形对称电荷分布产生的等势面是同心球族。 对于均匀电场，表面是垂直于磁力线的平面族。 实际上，等势面始终垂直于电场线，因此垂直于dE，而dE始终与这些线相切。 如果dE不垂直于等势面，它将具有沿该面分布的分量。 然后，该组件将在带电粒子沿表面移动时对其起作用。 但是，根据公式24-6，如果表面确实是等电位表面，则无法完成工作； 唯一可能的结论是dE必须垂直于表面。 图24-5显示了均匀电场以及与带电粒子和电偶极子相关的电场的电场线和等势面的横截面。

从场计算电势

如果我们知道沿着连接这些点的任何路径的电场矢量，就可以计算电场dE中任意两个点i和f之间的电势差。 为了进行计算，我们找到了当电荷从i移至f时，磁场对正测试电荷所做的功，然后使用公式24-6。

考虑一个任意电场（由图24-6中的磁力线表示）和一个正测试电荷q0，该电荷沿着从点i到点f所示的路径移动。 在路径的任何一点上，电荷q0dE沿电荷通过差分位移ds时都会作用在电荷上。 从第7章可以知道，位移期间力dF对粒子的微分功dW由力和位移的点积给出：

对于图24-6的情况，dF = q0dE且公式24-15变为

为了找到当粒子从点i移至点f时，磁场在粒子上完成的总功W，我们通过积分求和了电荷在其沿路径的所有位移ds中移动时所完成的微分功：

如果将方程24-17中的总功W代入方程24-6中，我们发现

因此，电场中任意两点i和f之间的电位差Vf Vi等于从i到f的dEds线积分（即沿着特定路径的积分）的负值。 但是，由于电力是保守的，因此所有路径（易于使用或难以使用）都会产生相同的结果。

公式24-18使我们能够计算场中任意两点之间的电势差。 如果我们设置电位Vi 0，则公式24-18变为

其中我们将下标f放在Vf上。 公式24-19给出了电场中任意点f处的电位V相对于点i处的零电位。 如果让点i为无穷大，则公式24-19给出了相对于无穷大零电势的任意点f的电势V。

均匀场。 让我们将式24-18应用于均匀的场，如图24-7所示。 我们从电势为Vi的等电位线上的点i开始，然后移动到电势为Vf较低的等电位线上的点f。 两条等势线之间的距离是x。 让我们沿着平行于电场dE（因此垂直于等势线）的路径移动。 公式24-18中dE和ds之间的角度为零，点积使我们

因为E对于均匀场是常数，所以公式24-18变为

积分只是对我们将所有位移元素ds从i加到f的指令，但我们已经知道总和为长度x。 因此，我们可以将这个均匀场中的电位Vf Vi的变化写为

这是在距离为x的均匀幅度为E的两个等势线之间的电压V的变化。 如果我们沿磁场方向移动距离x，则电势会降低。 在相反的方向上，它增加了.

电场矢量从较高的电位指向较低的电位.

24-2 带电粒子导致的势能 2020年12月4日18点13分

带电粒子导致的势能

现在，我们使用公式24-18推导带电粒子周围的空间，以表示相对于无穷大处的零电位的电位V的表达式。 考虑到距正电荷q固定粒子的距离R处的点P（图24-9）。 为了使用公式24-18，我们假设我们将正测试电荷q0从点P移至无穷大。 因为我们采用的路径无关紧要，所以让我们选择最简单的路径-一条从固定粒子径向延伸穿过P到无穷远的直线。

要使用公式24-18，我们必须计算点积

图24-9中的电场dE从固定粒子径向向外指向，因此，测试粒子沿其路径的微分位移ds与dE方向相同。 这意味着在公式24-22中，角度u 0和cos u 1为1。由于路径是径向的，我们将ds记为dr。然后，用极限R和∞代入公式24-18

接下来，我们将Vf 0（在）和Vi V（在R）设置。 然后，对于测试电荷部位的电场强度，我们用公式22-3代替：

有了这些变化，公式24-23就可以给我们

求解V并将R切换到r，我们得到

由于在距粒子任何径向距离r处的电荷q导致粒子的电势V为V。

尽管我们已经为带正电的粒子推导了公式24-26，但该推导对于带负电的粒子也成立，在这种情况下，q为负数。 请注意，V的符号与q的符号相同：

带正电的粒子会产生正电势。 带负电的粒子产生负电势。

图24-10显示了带正电粒子的计算机生成的公式24-26的图； V的大小垂直绘制。 请注意，幅度随着r：0的增加而增加。实际上，根据公式24-26，V在r 0处是无限的，尽管图24-10显示了那里的有限平滑值。 公式24-26还给出了球形对称电荷分布的外部或外部表面上的电势。 我们可以通过使用模块21-1和23-6的壳定理之一，用集中在其中心的等电荷代替实际的球形电荷分布，来证明这一点。 然后，只要我们不考虑实际分布内的点，就可以得出导致公式24-26的推导。

带电粒子群导致的势能

借助叠加原理，我们可以找到一组带电粒子所引起的一点处的净电势。 使用包含电荷的正负号的公式24-26，我们可以分别计算给定点上每次电荷产生的电势。 然后，我们总结潜力。 因此，对于n个电荷，净电势为

qi是第i个电荷的值，ri是给定点到第i个电荷的径向距离。 公式24-27中的总和是一个代数和，而不是像将用于计算由一组带电粒子产生的电场的和之类的矢量和。 这就是电势相对于电场的重要计算优势：求和多个标量比求和必须考虑方向和分量的多个矢量要容易得多.

24-4 带电偶极子引起的势能 2020年12月4日18点23分

现在让我们将式24-27应用于电偶极子，以找到图24-13a中任意点P的电势。 在P处，带正电的粒子（距离r（））设置电势V（），而带负电的粒子（距离r（））设置电势V（），则P处的净电势为 由公式24-27给出为

天然偶极子（例如许多分子拥有的偶极子）很小。 因此我们通常只对离偶极子较远的点感兴趣，因此，其中d是电荷之间的距离，r是偶极子中点到P的距离。在这种情况下，我们可以将两条直线近似为 P是平行的，它们的长度差是斜边为d的直角三角形的腿（图24-13b）。 而且，该差异非常小，长度的乘积约为r2。因此，

如果将这些量代入公式24-29，我们可以将V近似为

其中u是从偶极轴测量的，如图24-13a所示。 我们现在可以写成V

其中p（qd）是模块22-3中定义的电偶极矩dp的大小。 向量dp沿着偶极子轴从负电荷转移到正电荷。 （因此，u是从dp方向测量的。）我们使用该矢量报告电偶极子的方向。

诱导偶极矩

许多分子（例如水）具有永久的电偶极矩。 在其他分子（称为非极性分子）和每个孤立的原子中，正电荷和负电荷的中心重合（图24-14a），因此没有建立偶极矩。 但是，如果我们在外部电场中放置一个原子或非极性分子，则该电场会使电子轨道扭曲并使正负电荷中心分开（图24-14b）。 由于电子带负电，因此它们倾向于沿与电场相反的方向移动，这种移动会形成指向电场方向的偶极矩dp。 据说该偶极矩是由电场感应的，然后说原子或分子被电场极化了（也就是说，它具有正侧和负侧）。 瞬间和极化消失了。