

图 9–28 城市上空的闪电

第四节

电势能 电势

闪电（图 9–28）是一种常见的自然现象，是带电的云层与云层之间、带电的云层与地面之间强烈的放电现象。据估计，每秒约有几十到上百次的闪电击中地球表面。一次闪电在短时间内释放出很多能量。这一能量来自放电电荷的电势能。

## 什么是电势能？

我们已经知道，地球上的物体因为受到地球引力作用具有重力势能而能做功，重力做功与重物的移动路径无关，如图 9–29（a）所示。

*B*

*h*

*G*

*A*

图 9–29 重力与电场力做功特点类比

*B*

*d*

*qE*

*A*

+*q*

*E*

如图 9–29（b）所示，在一个电场强度为 *E* 的匀强电场中，沿着不同的路径把试探电荷 +*q* 从 *A* 点移动到 *B* 点。由于匀强电场的电场力为恒力，不论 +*q* 经由什么路径从 *A* 点移动到 *B* 点，电场力所做的功都是一样的。

不仅匀强电场的电场力做功与电荷移动的路径无关，一般静电场的电场力做功也同样

与路径无关。因此，我们可以得到这样的结论：在电场中移动电荷时，静电力做的功只与电荷的起始位置和终止位置有关。由于重力做功与路径无关，物体具有重力势能。与此类似，在静电场中电场力对其中移动的电荷做功也与路径无关，只决定于始末位置，因此，电荷在电场中也具有势能。这种势能就叫做**电势能（electric potential energy）**。

电势能是标量，通常用符号 *E*p 表示；电势能的单位是焦耳，符号 J。

引力做功与路径无关源自万有引力定律，两质点间的万有引力沿质点间的连线方向，与彼此间距离的二次方成反比，即万有引力是各向同性的有心力。同引力一样，以库仑定律描述的电荷间的静电力同样具有各向同性的有心力的特点，也具有做功和电荷移动路径无关的特点。万有引力是保守力，静电力也是保守力。

拓 展 视 野

## 电场力做功与电势能变化之间有何关系？

功是能量变化的量度，当地球上的物体从一个位置移动到另一个位置时，若重力做正功，则物体的重力势能减少；若重力做负功，则物体的重力势能增加。同样，当电场中的电荷从一个位置移动到另一个位置时，若电场力做正功，则电荷的电势能减少；若电场力做负功，则电荷的电势能增加。

将点电荷在电场中由 *A* 点移到 *B* 点，电场力做功

*WAB* = *E*p*A* − *E*p*B*

*E*p*A* 为 *A* 点电势能，*E*p*B* 为 *B* 点电势能。

点电荷在电场中从 *A* 点移到 *B* 点，这个点电荷的电势能的变化量

Δ*E*p = *E*p*B* − *E*p*A*

因此，电场力对电荷做功与电荷的电势能变化量的关系为

*WAB* = −Δ*E*p

重力势能的大小等于物体从现有位置移动到重力势能为零处的过程中重力所做的功。与此类似，电荷 *q* 在电场中某点的电势能在数值上等于把此电荷从该点移动到电势能为零处电场力所做的功。

通常我们把电荷在离场源电荷无穷远处的电势能规定为零，或把电荷在大地表面上的电势能规定为零。而且电势能也和重力势能一样只有相对意义，电势能的变化量才有绝对物理意义。

必须强调，就像重力势能属于重物和地球构成的体系一样，电荷的电势能并非只属于该电荷，而是该电荷和场源电荷相互作用的能量，同属于该电荷和场源电荷。通常为了方便而简称为某电荷的电势能。

示例 1 如图 9–30 所示，在某正点电荷的电场中，沿电场线有 *A*、*B* 两点。若将一个正电荷 *q*1 从 *A* 移至无穷远处，电场力做了 3.0×10−6 J 的功；若将正电荷 *q*1 从 *B* 移至无穷远处，电场力做了 1.5×10−6 J 的功。则：

*A*

*B*

图 9–30 分析电荷在电场中的电势能

（1）该电荷在 *A*、*B* 两点的电势能为多大？

（2）如果将一个电荷量为 *q*2 的负电荷从 *A* 移至 *B*，则该负电荷在 *A*、*B* 两点中哪一点电势能大？

**分析**：电荷 *q* 在电场中某点的电势能在数值上等于把电荷从这点移动到无穷远处电场力所做的功。

**解**：（1）正电荷 *q*1 在 *A* 点受到的电场力方向向右，电荷从 *A* 至无穷远处的过程中，电场力做正功、电势能减小至零，所以 *A* 点的电势能 *E*p*A* 大于零。则

*E*p*A* = 3.0×10−6 J

同理，*B* 点电势能 *E*p*B* = 1.5×10−6 J

（2）负电荷 *q*2 放在 *A* 点，受到的电场力方向向左，从 *A* 移至 *B* 的过程中，电场力做负功，电势能增加，所以 *E*p*A* < *E*p*B*，即负电荷 *q*2 在 *B* 点电势能大。

由示例 1 可知，在同一电场中，同样从 *A* 点到 *B* 点分别移动正电荷与负电荷时，相应的电势能的变化是相反的。

## 如何从能量的角度描述电场的性质？

同一物体在地球上不同位置的重力势能不尽相同，不同物体在地球上同一位置的重力势能也不尽相同。类似地，根据电场力做功与电势能变化的关系，可得同一电荷在电场中的不同位置上的电势能不尽相同，不同电荷在电场中的同一位置上的电势能也不尽相同。

进一步的研究表明，在一个确定的电场中，不同电荷在场中同一位置的电势能与其电荷量之比是一定的，即 = = = … = 。这个比仅由电场决定，和电场强度一样，它与试探电荷置入与否无关。可见，这个比像电场强度从电场力的角度描述电场一样，从能量的角度客观地反映了电场的性质。

在电场中，任意一点电荷的电势能 *E*p 和它所带的电荷量 *q* 之比叫做这一点的**电势（electric potential）**。电势通常用符号 *φ* 来表示，则

*φ* =

电势的国际单位是伏特，简称伏，用符号 V 表示，1 V = 1 J/C。

由上式可看出电势的物理意义。电场中任意一点的电势数值上等于单位正电荷在该点

所具有的电势能。

电势跟电势能一样，其数值不具有绝对意义，只具有相对意义。只有规定了某处的电势为零后，才能确定电场中其他各点的电势的值。

电势 *φ* 是标量，只有大小，没有方向，但有正、负之分，正、负只表示比零电势高还是低。若将正试探电荷沿电场线方向移至无穷远处，电场力做正功，电势能逐渐减小，电势逐渐降低。因此，沿着电场线方向，电势越来越低。

示例 2 在点电荷 + *Q* 的电场中，沿电场线方向有 *A*、*B* 两点。若将一个电荷量为 1×10−8 C 的正电荷 *q* 从 *A* 缓慢移至无穷远处，电场力做了 3.0×10−6 J 的功；若将该正电荷从 *B* 缓慢移至无穷远处，电场力做了 1.5×10−6 J 的功。则 *A*、*B* 两点的电势各为多少？

**分析**：电场中任意一点的电势数值上等于单位正电荷在该点所具有的电势能。

**解**：设正电荷 *q* 在 *A* 点的电势能为 *E*p*A*、在 *B* 点的电势能为 *E*p*B*。由于点电荷 *q* 与产生电场的点电荷均为正电荷，因此在 *q* 从 *A* 移至无穷远的过程中，电场力做正功、电势能减小至零，*A* 点的电势能 *E*p*A* 大于零，可得

*E*p*A* = 3.0×10−6 J

同理，*B* 点的电势能

*E*p*B* = 1.5×10−6 J

则 *A* 点的电势 *φ*A = = V = 3.0×102 V

*B* 点的电势 *φ*B = = V = 1.5×102 V

大家谈

如试探电荷为负电荷是否还能得到关于电势能和电势的讨论中得到的结论？

如果已知电场中某一点的电势 *φ*，则处于该点的点电荷 *q* 所具有的电势能

*E*p = *qφ*

电荷在电场中沿垂直于电场方向移动时电场力不做功，电荷的电势能不发生变化，说明电场中的这些点的电势相等。电场中电势相同的各点构成的面叫做**等势面（equipotential surface）**。可见，等势面一定跟电场强度的方向垂直。等势面和电场线相似，也是用来形象地描述电场的。

如图 9–31 所示是几种常见电场的等势面（图中虚线为等势面的截面图）和电场线。图中，两个相邻等势面间的电势之差是相等的。

（c）等量异号电荷的电场

**+**

**+**

（d）等量同号电荷的电场

（b）点电荷的电场

**+**

**−**

**+**

**+**

**+**

**−**

**−**

**−**

（a）匀强电场

图 9–31 几种常见电场的等势面和电场线

**问题 思考**

**与**

1. 有两个带正电的点电荷 *Q*1、*Q*2 分别位于 *A*、*B* 两点，若保持电荷 *Q*2 静止，并使 *Q*1 分别沿着图 9–32 中 *a*、*b*、*c* 三条不同的路径移动到位置 *C*。在此过程中，电场力是否对 *Q*1 做功？如做功，做的是正功还是负功？ *Q*1 沿三条不同路径移动到 *C* 点的过程中，电场力对 *Q*1 所做功的大小关系如何？*A*、*C* 两点哪点电势高？

*A*

*C*

*b*

*c*

*a*

*B*

图 9–32

+

+

1. 电场中 *A* 点放有电荷量为 1×10−8 C 的点电荷 *q*1，若 *q*1 的电势能为 2×10−6 J，*A* 点的电势为多大？若移走该点电荷，*A* 点的电势为多大？若在 *A* 点放另一电荷量为 − 3×10−8 C 的点电荷 *q*2，则 *q*2 的电势能为多大？
2. 有两个等量异号电荷，如图 9–31（c）所示。在图中找出电势为正、电势为负和电势为零的区域。如将一个负电荷置于此电场中，在哪个区域电势能为正值？（取无穷远处的电势为零）
3. 如图 9–33 所示，在真空中有两个等量同号的正点电荷 *q*1、*q*2，分别置于 *A*、*B* 两点，*DC* 为 *AB* 连线的中垂线。将一负电荷 *q*3 由 *C* 点沿中垂线移动到无穷远的过程中，*q*3 的电势能如何变化？电势如何变化？简述理由。

*A*

*C*

*q*1

*B*

*D*

*q*2

图 9–33

**+**

**+**

1. 在如图 9–34 所示的 4 种情况中，图（b）和图（d）中 *a*、*b* 为两点电荷连线中垂线上关于 *O* 点对称的两点。分别描述 4 种情况中 *a*、*b* 两点的电势和电场强度的关系。

*a*

*b*

*r*

*r*

（c）正点电荷

**+**

*a*

*b*

*O*

（b）两等量同号电荷

**+**

**+**

**+**

**−**

**+**

**+**

**+**

**−**

**−**

**−**

*a*

*b*

**+**

**+**

**+**

**−**

**−**

**−**

（a）带等量异号电荷平行金属板

*a*

*b*

*O*

**+**

**−**

（d）两等量异号电荷

图 9–34

## 本节编写思路

本节通过电场力对电场中移动的电荷做功和重力做功一样与路径无关，只决定于始、末位置的性质，类比重力势能建立电势能的概念。

电场力做了多少功，就有多少电势能和其他形式的能量相互转化，从而建立电场力做功与电势能变化之间的关系。

通过示例 1 感受电场中电势能的变化与其中的电荷有关。类比电场强度是由比值法定义的一个仅由电场本身决定而与试探电荷无关的物理量，也可定义一个从能量角度客观反映电场性质的新物理量：电势。

通过与重力势能对比，了解电荷在电场中的电势能；通过与电场强度的类比，知道用比值法定义表示电场能量性质的物理量——电势，体验类比法在科学研究中的作用。通过几种常见电场的等势面和电场线，感受形象描述电场的方法。

本节学习将加深电场力做功与电势能变化关系的理解，形成关于电势的较为完整的能量观念。要求学生会用等势面描绘静电场，了解电场线和等势面的关系。这将有助于模型建构、科学推理能力的提高。

## 正文解读

学生在生活中已体验了大量的经验情境，这是构建新的物理概念的基础。本节节首图引用闪电现象是为了让学生形象地认识电场中的放电电荷蕴藏着巨大的能量。通过真实的生活情境激发学生的求知欲。

第五节“问题与思考”第 1 题和第七节图 9 – 69 避雷针的原理内容与此呼应。

此处设置“拓展视野”，是为了让学生正确理解保守力的定义，原理详见本节资料链接。

示例 1 通过具体分析电荷在电场中的电势能，强调电势能是电荷和场源电荷共有的能量。

通过用电场力做功与电势能变化的关系来计算电荷在电场中的电势能，了解电势能的系统性和相对性。

引力场与静电场的类比。重为场和电场有许多相似的性质，所以它们之间可以进行类比。电场中反映各点电场强弱的是电场强度 *E* = ，重力场中反映各点重力场强弱的则是 *g* = = 。即重力加速度可与电场强度类比为重力场强度。

重力势能也可与静电势能类比，从而找出和静电势类比的重力势。如果一个质量为 *m* 的物体位于离地面高度 *h*（取地面为零势面），该处的重力加速度为 *g*，则类比静电势 *φ* = ，该处的重力势可以表示为 = = *gh*，即把重力加速度 *g* 与高度 *h* 的乘积称为重力势。

通过示例 2 对电场中电势的具体分析了解电势的客观性、标量性和相对性。阐明零电势的规定以及电势正、负的意义，知道电势的大小与零电势的选择有关，具有相对性。

此处设置“大家谈”是为了说明如示例 2 中的试探电荷为负电荷，则 A、B 两点的电势能均为负值，电场力做功分别为 − 3.0 × 10−6 J和 − 1.5 × 10−6 J，而 A、B 两点的电势不变。从而深入感受电势能的正、负与电场中电荷的正负和其所处位置电势的正、负都有关。为下一节电势差的绝对性、电场力做功与电势差的关系做铺垫。

可以从电场线能够形象地描述电场引导学生思考是否可以同样用等势面描述电场。等势面的教学可联系其他学科的知识，如地理学科中用等高线描绘地形、用等压线描绘气候等。认识一些常见电场的等势面和电场线。通过用等势面描绘电场的一般方法认识等势面在电学研究中的价值。体会到相邻等势面电势之差相等时，等势面的疏密程度反映了该区域电场的强弱。

## 问题与思考解读

1．参考解答：电场力对 *Q*1 做功，电场力方向与位移方向相反，电场力做负功。电场力做功与路径无关，所以电荷 *Q*1 沿三条不同路径移动时电场力做的功相等，*W*1 = *W*2 = *W*3。正电荷 *Q*1 从 A 移动到 C，电场力做负功，正电荷的电势能增加，说明电势增加，所以 C 点电势高。

命题意图：知道电场力做功的特点、电势和电势能的关系。

主要素养与水平：科学推理（Ⅱ）。

2．参考解答：*φ* = = V = 200 V；移走 *q*1 后 A 点的电势仍为 200 V； A 点放入的点电荷 *q*2 电势能为 *E*p = *q*2*φ* = − 3 × 10−8 × 200 J = − 6 × 10−6 J。

命题意图：知道电势与电势能的关系。

主要素养与水平：能量观念（Ⅱ）。

3．参考解答：两个等量异号电荷连线的中垂面为零势面。中垂面将整个电场分为正、负两个对称的区域，正电荷所在一侧为正电势区域，负电荷所在一侧为负电势区域。如将一个负电荷置于负电荷所在一侧的负电势区域，负电荷的电势能为正值。

命题意图：通过电场线和等势面的分布了解两个等量异号电荷周围电势分布的特点。

主要素养与水平：能量观念（Ⅱ）；科学推理（Ⅱ）。

4．参考解答：*q*3 的电势能增加；电势降低。移动负电荷 *q*3 的过程中，电场力始终做负功，电势能增加。负电荷的电势能增加所以电势降低（也可根据等势面判断电势的变化）。

命题意图：对检验电荷在具体电场中运动进行科学推理，从不同的角度思考问题，培养科学态度。

主要素养与水平：能量观念（Ⅱ）；科学推理（Ⅱ）。

5．参考解答：

（a）*φ*a > *φ*b，*E*a = *E*b 且电场强度方向相同

（b）*φ*a = *φ*b，*E*a = *E*b 但电场强度方向相反

（c）*φ*a = *φ*b，*E*a = *E*b 但电场强度方向不同

（d）*φ*a = *φ*b = 0，*E*a = *E*b 且电场强度方向相同

命题意图：通过具体不同类型电场中电势和电场强度的分析，了解电势的标量性和相对性。

主要素养与水平：物质观念（Ⅱ）；能量观念（Ⅱ）；科学推理（Ⅱ）。

## 资料链接

**各向同性有心力是保守力的原因**

质点 *m* 受到的各向同性有心力 ***f*** 可表示为 ***f***（***r***）= *f*（*r*）***r***0，***r***0 为由力心指向受力点的单位矢量。

当质点在 ***f***（***r***） 作用下从 ***r***A 经任意路径运动到 ***r***B 时，***f***（***r***）所做功可表示为

*W* = = = =

即各向同性有心力所做的功 *W* 只与始、末位置有关，而与具体路径无关。

**静电势能**

静电场中的电荷具有静电势能，源于静电场的电场力是保守力。匀强电场中的电场力是恒力，恒力做功与路径无关，必为保守力。现在来考察点电荷的电场力是否为保守力。设空间有点电荷 *Q* 与 *q*，*Q* 对 *q* 的电场力

***F*** = *k****r***0

其中 *k* = ，*ε*0 为真空介电系数，*r* 为两点电荷之间的距离，而 ***r***0 为由 *Q* 指向 *q* 的单位矢量。上式具有和质点间万有引力相同的形式，说明点电荷间的库仑力同样是各向同性（由 1/*r*2 表示）的径向有心力（由 ***r***0 表示），因此也必为保守力（参见必修二教师用书）。任意分布电荷的电场力总可视为各个点电荷电场力的叠加，可见任意分布电荷的电场力，即任意静电场的电场力必为保守力。对受保守力作用的物体体系可引进势能，这就是静电势能的由来。

我们先以最简单的上述两个点电荷组成的俸系讨论静电势能。将两点电荷相距无穷远作为静电势能的零点，并设 *Q* 静止的参照系，可得将 *q* 从和 *Q* 相距 *r* 处移动到无穷远处的过程中 *Q* 的电场力所做的功。结果是

*W* = *k*

保守力的功等于势能的负增量，因此 *W* 就等于 *q* 和 *Q* 相距 *r* 时的电势能 *E*p

*E*p = *k*

如果 *Q* 和 *q* 同号，*E*p > 0；如果 *Q* 和 *q* 异号，*E*p < 0。

取距 *Q* 无穷远处为电场中电势的零点，则距 *Q*为 *r* 处的电势为 *φ* = *k*，*q* 的电势能 *E*p = *qφ*。

和重力势能一样，静电势能 *E*p 并不单属于点电荷 *q*，而是属于 *q* 及其所处的电场。该电场由场源电荷 *Q* 产生，因此 *E*p 也即属于这一彼此间存在库仑相互作用的 *Q* 及 *q* 组成的体系。*E*p 也可表示成 *E*p = *Qφ*ʹ，这里 *φ*ʹ 为 *q* 的电场在 *Q* 所在处的电势。实际上 *E*p 是 *Q* 和 *q* 静电相互作用的能量，是 *Q* 和 *q* 共同产生的电场之电场能的一部分。

如果 *q* 所处的电场是由若干个点电荷或连续分布的电荷所产生的，在这样的电场里 *q* 的电势能也属于包括 *q* 在内的所有电荷组成的体系，属于 *q* 和其他电荷产生的电场，也是包括 *q* 在内所有电荷产生电场的电场能的一部分。

虽然不少教材提到电势（能）零点的选择原则上是具有任意性，但电势零点作为稳定的电势参考点，在实际选择时还会受到一些限制。在每个场源电荷均固定不变且为有限大小，并且分布在有限空间（即既不是点电荷，又不延伸至无穷远）的情形，电势零点可任意选择。理论上如电荷分布在有限区域，常取无穷远处为电势或电势能的零点。在实用上，也可取地球作为电势（能）零点，二者兼容。二者兼容的依据是地球可看作一硕大的导体。众所周知，地球带有负电荷。如果不考虑这一负电荷，便可将地球视为一很大的中性导体。如果空间不存在电荷，即空间无电场，直至无穷远处全部空间均为等势空间。于是地球电势和无穷远处相等，也为零。如果空间存在电荷，或是有带电体接近地球使地球感应带电，或是有带电体和地球接触使地球带电，原则上地球电势会发生变化。但是地球是一庞大的导体，电容极大，区区有限电荷的变化导致地球电势的变化极微。地球电势仍和零相差无几，仍可视为零电势。或者说，地球实际上可取为电荷电势能的零点。将无穷远和地球取为有限分布电荷电势和电势能的零点是等价的。两平行金属板间的匀强电场可取负极板为电势零点。

关于电势和电势能还有一点值得注意。即使对单个带电体我们也可谈论电势，例如均匀带电导体球的电势。但单个导体的电势能是没有意义的。重力势能也一样，即使没有重物，我们也可谈论孤立地球的重力势，在地球表面就是 *gh*。重力加速度 *g* 其实和重物无关，只决定于地球本身。重力势能则不同，孤零零一个地球是无所谓重力势能的，重力势能必是地球和重物组成的体系的性质，和地球与重物均有关，后者即表现为重物质量 *m*。重力势能用 *mgh* 表示，正体现了这是由地球和重物组成的体系的性质。