电磁场原理

上海交通大学

三九〇教研组编

1979年7月

第一章 静 电 场

1-1 电 磁 场

1. 在我们开始学习《电磁场原理》的时候，首先应当概要地了解一下“电磁场”是什么？电磁场是物质的一种特殊形态。在一般人的知觉中，总认为自然界的物质是指各种实物，例如可感觉到的物体，或者是那些已被人们所熟知的分子、原子、电子等等。然而近代科学的发展告诉我们，除了实物以外，在物质世界中还有另一类与实物同时存在的客体，这就是场。在电磁现象的研究领域内，所谓实物就是指“带电粒子”，所谓场就是指“电磁场”。

带电粒子周围的空间总是存在着电磁场，带电粒子被电磁场所包围，电磁场与带电粒子是伴随而存在的。我们通俗地说，电磁场是由带电粒子所激发的。带电粒子与其周围的电磁场相互之间有着紧密的联系，也就是说，有怎么样的带电粒子就会有怎么样的电磁场；同时，当带电粒子被引入到另外带电粒子周围的电磁场中时，这外电磁场就要与被引入的带电粒子相互作用。把这两点概括起来，我们说带电粒子与电磁场这两种物质形态之间存在着相互联系和相互作用。自然界的所有电磁现象乃是这种相互联系和相互作用的各种表现；电磁场理论就是研究这种相互联系和相互作用的规律性的科学。

电磁场为什么是物质？我们认为，在带电粒子周围的电磁场是一种不以人的意志为转移的客观存在。这种存在决不是人的主观思维，而是一种客观物质。恩格斯指出：“世界的真正统一性在于它的物质性，而这种物质性是由哲学和自然科学的

长期和持续的发展加以证明的”（见《反杜林论》）。近代自然科学的实验已经证明了电磁场具有质量、能量和动量等，所有这些乃是物质的基本属性。在这里应当指出，列别捷夫的光压实验在证明电磁场的物质性方面具有重要的意义，因为这一实验在历史上第一次证实了电磁场具有质量和动量。由于电磁场的质量密度极其微小，在此以前，人们没有确认电磁场具有质量。质量乃是物质的最基本属性，一旦证实了电磁场具有质量，这就使人们对电磁场物质性的认识取得了飞跃。电磁场具有能量乃是日常生活中公认的事实，如所周知，电磁场的能量在各种电工设备中与其他形态的能量互相转换。电磁场的质量和能量的关系，是由全能量 W 和全质量 m 之间的关系式 $W=mc^2$ 来确定的，式中 c 是真空的光速。

为什么电磁是物质的一种特殊状态呢？物质的运动形式具有多样性，有物理的和化学的；有机械的和电磁的等等。电磁场是物质的一种电磁运动过程；用电磁场的概念联系起来的那种物质运动，不能归结为机械的运动或其他形式的运动，它是物质的一种特殊的运动形式，因此，它本身是物质的一种特殊形态。

爱因斯坦在总结现代物理学的成就后明确指出：“我们有两种存在：实物和场。毫无疑问，我们现在不能如同十九世纪初期的物理学家那样，设想把整个物理学建筑在实物概念的基础上。”“在物理学中出现了一个新的概念，这是自牛顿时代以来最重要的发现：场。用来描述物理现象的最重要的不是带电体，也不是粒子，而是在带电体之间或粒子之间的空间的场，这需要用很大的科学想象力才能理解。”（见《The Evolution of physics》）

2. 按照量子论的观点，实物和场均具有微粒性和波动性。在宏观电磁场理论的研究领域内，我们着重于研究实物即

带电粒子的微粒性，以及电磁场的波动性。在自然科学的研究中，为了对研究对象作定量的分析和综合，我们必须首先确定它的表征量。带电粒子的表征量是*电荷*；一个带电体带了多少电，就是用多少电荷来表征的。就这种表征的量的方面来说，电荷是以库仑（简称库）为单位的。一个电子所带的负电荷为1.602×10^{-19}库，我们目前所遇到的正的或负的电荷，都是这个电荷量的整倍数。电磁场的表征量有*电场强度*、*磁场强度*、*电位*、*磁位*………等，我们将在以各章中加以详细阐述。

电磁场可以分为电场和磁场两个方面。但是必须明确，作为客观存在的电磁场本身是一个统一的整体。把电磁场分成电场和磁场两个成分，这是相对的；从绝对的宇宙中来看，电磁场是电场和磁场两者紧密联系所构成的统一体。在对于观察者来说是静止的带电体的周围，我们仅能发现电场；但是，如果此时另一个观察者相对于这带电体作运动，则他将在带电体周围的空间同时发现磁场。同样，在对于观察者来说是静止的永久磁铁的周围，我们仅能发现磁场；但是，如果此时另一个观察者相对于这永久磁铁作运动，则他将在永久磁铁周围的空间同时发现电场。由此可以得出结论：客观上永远存在着与观察条件无关的统一的电磁场，把它分成两部分是与试验条件有关的。还需指明，上面所说的在某些场合下只发现电的方面或磁的方面的现象，这些结论是仅对现象的宏观研究而言的。本课程所论述的是宏观电磁现象的基本规律。在电工实践的领域内，我们有可能创造某些条件，使观察者在空间的某一区域内仅发现电磁现象的一个方面，即单一的电场或单一的磁场。这样一来，我们就能分别地得出有关电场特性和磁场特性的一系列结论；然后再得出有关统一的电磁场特性的一般结论。

1-2 静电场与电场强度

1. 如果带电体所带的电荷在宏观上是不随时间改变的，同时这带电体对于我们观察者没有相对的运动，则我们说这静止的物体带着静电。在这样的带电体的周围，观察者只观察到不随时间改变的电现象，而观察不到磁现象，就是只观察到与带电体电荷相联系的电磁场的一个特殊方面。所谓一个方面，是说一般电磁场有电场与磁场两个方面，现在所观察到的是电场。所谓特殊，是说它是一个不随时间改变的电场。这种电场叫做**静电场**。

2. 电场(本章所谓电场都指静电场)的特性可以利用它的任一种表现来表征。通常所用的是电场对引进电场的另一带电体所受到的作用力。人们最初对于电现象的认识就是这种力。作确定电场特性用的带电体叫做**试体**，其电荷叫做**试验电荷**，用 q_t 代表。试体本身的几何尺寸必须很小，然后由它确定出来的电场特性才能代表场中一点上的特性。同时试验电荷也必须很小，然后它在场中出现才不会影响原有电荷的分布。

观察结果，试体在电场中任一点上受到的力与试体的电荷成正比，而且电荷改变符号，力也改变成相反的方向，用 q_t 与 $\vec{f}(x,y,z)$ 分别代表试验电荷与它在场点 (x, y, z) 上受到的力，则比率

$$\vec{E}(x,y,z)=\frac{\vec{f}(x,y,z)}{q_t} \qquad (1\text{-}1)$$

与试验电荷无关，而只依赖于这一点上的电场。因此，电场中每一点上的矢量 E 可以用来表征电场的特性，而把它叫做**电场强度**。力的单位是牛（牛顿的简称），电荷的单位是库，所以电场强度的单位是牛/库。电场强度的方向与正的试验电荷所受到的力的方向一致。

注意，式(1-1)中只代表电场作用于电荷的力，而那些可能作用于电荷非电来源的力，譬如说，重力，机械力，化学力等，都必须排除在外。

3. 在利用试体研究电场时，发现观察点与电场相连系的或如通俗所说与产生电场的带电体之间距离比起带电体本身的线度如果是相当的大，则带电体的大小与形状都无关紧要，而它所带的电荷便可看成集中于它的作用中心点，这样的电荷叫做点电荷。

观察结果，点电荷 q 在真空中产生在一点上的电场强度的量值与 q 的量值成正比，而与场点(观察点)到点电荷的距离 r 的平方成反比，其方向沿着点电荷与场点相连的直线上，由点电荷指向场点或由场点指向点电荷则随电荷 q 为正或负而定。在有理化实用单位制下，点电荷的电场强度可以表示成：

$$\vec{E}=\frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\vec{r^0} \tag{1-2}$$

式中单位矢量 $\vec{r}_0$ 是由点电荷指向场点，ε_0 是表征真空电特性的常数，叫做电常数。电常数

$$\varepsilon_0=\frac{1}{4\pi\times10^{-7}\times(3\times10^8)^2}=\frac{1}{36\pi}\times10^{-9}$$

$$=8.855\times10^{-12}\text{（法/米）},$$

这里法是电容单位法拉的简称（§1-9）。式(1-2)中引入 4π 而使 ε_0 有上述的值，其目的是为了使一般电磁公式能够有简单的形式。而且，让具有球对称性的一些公式内出现 4π 也是很合理的。

由公式(1-2)与电常数的单位，可见电场强度的单位是

$$[\vec{E}]=\frac{\text{库}}{(\text{法/米})\text{米}^2}=\frac{\text{库}}{\text{法·米}}=\frac{\text{伏}}{\text{米}}。$$

伏是电压的单位伏特的简称（§1-2），伏/米与牛/库相当。今

后我们采用伏/米为电场强度的单位。

例题 1-1　点电荷 $q(q>0)$ 位于点 $P(a_1,\ b_1,\ c_1)$，决定点 $Q(a_2,b_2,c_2)$ 点上的电场强度（图 1-1）。

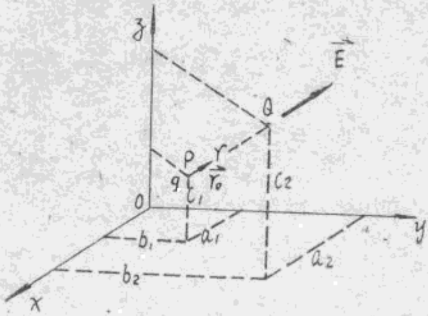


图 1-1　例题 1-1 用图

点 Q 的电场强度

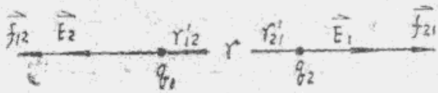
$$\vec{E}=\frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\vec{r^0},$$

式中　$r^2=(a_2-a_1)^2+(b_2-b_1)^2+(c_2-c_1)^2$

$$\vec{r^0}=\cos\alpha\vec{i}+\cos\beta\vec{j}+\cos\gamma\vec{k}$$

$$=\frac{a_2-a_1}{r}\vec{i}+\frac{b_2-b_1}{r}\vec{j}=\frac{c_2-c_1}{r}\vec{k}。$$

4. 根据公式 (1-1) 与 (1-2) 可以看出，真空中两个点电荷 q_1 与 q_2 的相互作用力（图 1-2）：



$q_1>0,\ q_2>0$

图 1-2　库仑定律

$$\left.\begin{aligned}\vec{f}_{21}=\vec{E}_1 q_2=\frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\vec{r}^{\,0}_{12}\\ \vec{f}_{12}=\vec{E}_2 q_1=\frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\vec{r}^{\,0}_{21}\end{aligned}\right\}\qquad(1-3)$$

式中单位矢量$\vec{r}_{12}^0=-\vec{r}_{21}^0$，所以$\vec{f}_{12}=-\vec{f}_{21}$。公式(1-3)叫做库仑定律。库仑定律表明出：同号电荷相推斥，异号电荷相吸引。这种推斥或吸引的力是一个点电荷在另一个点电荷的场中所受到的作用力，叫做电场力或库仑力。

5．公式(1-2)还具有这样的意义在内，就是根据实验结果，点电荷产生在场中一点上的电场强度与电荷的电量q成正比，就是说，有线性关系。这肯定了一个点电荷产生在场中一点上的电场强度与场中有没有其他点电荷存在无关，就是说有它的独立性。事实上，电荷q可以看作是n个点电荷q_1，$q_2\cdots$与q_n合成，就是线性变换

$$q=q_1+q_2+\cdots+q_n。$$

这样，式(1-2)就可以写成

$$\begin{aligned}\vec{E}&=\frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\vec{r}^0\\&=\frac{q_1}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\vec{r}^0+\frac{q_2}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\vec{r}^0+\cdots+\frac{q_n}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\vec{r}^0\\&=\vec{E}_1+\vec{E}_2+\cdots+\vec{E}_n\end{aligned}$$

式中

$$\vec{E}_k=\frac{q_k}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\vec{r}^0$$

是点电荷q_k单独产生的电场。既然各个电荷产生电场有它的独立性，因此，我们可以作出一般的论断：位于同一点上或不同点上的多个点电荷一同产生在场中一点上的电场强度是各个点电荷单独产生在这一点上的电场强度之和。这就是静电场的叠加原理。

据此，n个点电荷的合成电场：

$$\vec{E}=\vec{E}_1+\vec{E}_2+\cdots+\vec{E}_n=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\sum_{k=1}^{n}\frac{q_k}{r_k^2}\vec{r}_k^0$$

式中 r_K 是点电荷 q_K 与场点之间的距离，$\vec{r}_K^0$ 是由点电荷 q_K 指向场点的单位矢量。

如果电荷占有一定的体积，则我们可以把它看成是体积分布，而引用电荷体密度 ρ 的概念：

$$\rho=\lim_{\Delta V\to 0}\frac{\Delta q}{\Delta V}=\frac{dq}{dV} \tag{1-4}$$

式中 Δq 是占有很小的体积 ΔV 的电荷。元电荷

$$dq=\rho dV \tag{1-5}$$

具有点电荷的性质，于是占有体积 V 的电荷所产生的电场

$$\vec{E}=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\int\frac{dq}{r^2}\vec{r}^{\,0}=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\int_V\frac{\rho\vec{r}^{\,0}}{r^2}dV。 \tag{1-6}$$

如果电荷是面分布，例如，导体上的电荷分布，则我们可以引用电荷的面密度 σ 的概念，就是

$$\sigma=\lim_{\Delta S\leftarrow 0}\frac{\Delta q}{\Delta S}=\frac{dq}{ds} \tag{1-7}$$

式中 Δq 是占有很小的面积 ΔS 的电荷。这时，元电荷

$$dq=\sigma dS \tag{1-8}$$

而占有面积 S 的电荷所产生的电场

$$\vec{E}=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\int_S\frac{\sigma\vec{r}^{\,0}}{r^2}dS。 \tag{1-9}$$

同样，对线分布的电荷，例如，线径很细的导线上的电荷分布，我们引用电荷的线密度 τ 的概念，就是

$$\tau=\lim_{\Delta l\to 0}\frac{\Delta q}{\Delta l}=\frac{dq}{dl}。 \tag{1-10}$$

这时，元电荷

$$dq=\tau dl \tag{1-11}$$

与电场强度

$$\vec{E}=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\int_l \frac{\tau\vec{r}^0}{r^2}dl。\qquad(1\text{-}12)$$

必须指出，电荷的密度只有体密度才具有真实的物理意义，因为任何电荷总是占有一定体积的。面密度与线密度都是体密度的极限形式，就是：

$$\sigma=\lim_{\substack{\rho\to\infty\\ h\to 0}}\rho h,\qquad(1\text{-}13)$$

$$\tau=\lim_{\substack{\rho\to\infty\\ s\to 0}}\rho s,\qquad(1\text{-}14)$$

式中 h 是电荷作面分布时的厚度，s 是电荷作线形分布时线形区域的截面。此外，公式(1-6)，(1-9)，(1-12)都是矢量形式。每个公式可以分开写成三个分值表达式。例如，在直角坐标制，公式(1-6)可以分开写成如下：因为

$$\vec{E}=E_x\vec{i}+E_y\vec{j}+E_z\vec{k}\qquad(1\text{-}15)$$

$$\vec{r}^0=\cos\alpha\,\vec{i}+\cos\beta\,\vec{j}+\cos\gamma\,\vec{k}\qquad(1\text{-}16)$$

式中 α，β 与 γ 是元电荷到场点的位置矢量的方向角。于是，

$$\left.\begin{aligned}E_x&=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\int_V\frac{\rho\cos\alpha}{r^2}dV\\ E_y&=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\int_V\frac{\rho\cos\beta}{r^2}dV\\ E_z&=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\int_V\frac{\rho\cos\gamma}{r^2}dV\end{aligned}\right\}\qquad(1\text{-}17)$$

例题 1-2　决定均匀带有电荷线密度 τ 的有限直线段的电场（图 1-3）。

由图中所示几何关系，有：

$$\rho=r\csc\theta,\ \zeta=z-r\,\mathrm{ctg}\,\theta,\ d\zeta=r\csc^2\theta d\theta,$$

带电的长度元 $d\zeta$ 产生在场点 $(r,\ z)$ 的电场强度 $d\vec{E}$ 的两

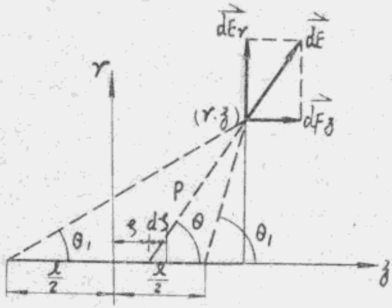


图 1-3 均匀带电有限直线段

个分值：

$$dE_r = \frac{\tau d\zeta}{4\pi\varepsilon_0\rho^2}\sin\theta = \frac{\tau\sin\theta d\theta}{4\pi\varepsilon_0 r}$$

$$dE_z = \frac{\tau d\zeta}{4\pi\varepsilon_0\rho^2}\cos\theta = \frac{\tau\cos\theta d\theta}{4\pi\varepsilon_0 r}。$$

全线段产生在场点 $(r,\ z)$ 的电场强度 $\vec{E}$ 的两个分值：

$$E_r = \frac{\tau}{4\pi\varepsilon_0 r}\int_{\theta_1}^{\theta_2}\sin\theta d\theta = \frac{\tau}{4\pi\varepsilon_0 r}(\cos\theta_1 - \cos\theta_2)$$

$$E_z = \frac{\tau}{4\pi\varepsilon_0 r}\int_{\theta_1}^{\theta_2}\cos\theta d\theta = \frac{\tau}{4\pi\varepsilon_0 r}(\sin\theta_2 - \sin\theta_1)$$

电场强度 $\vec{E}$ 与 $\vec{E}_z$ 所构成的夹角的正切等于

$$\frac{E_r}{E_z} = \frac{\cos\theta_1 - \cos\theta_2}{\sin\theta_2 - \sin\theta_1}$$

$$= \frac{2\sin\frac{1}{2}(\theta_1+\theta_2)\sin\frac{1}{2}(\theta_2+\theta_1)}{2\sin\frac{1}{2}(\theta_2-\theta_1)\cos\frac{1}{2}(\theta_1+\theta_2)}$$

$$= \mathrm{tg}\frac{1}{2}(\theta_1+\theta_2),$$

就是，夹角等于$\frac{1}{2}(\theta_1+\theta_2)$。由此看出，矢量$\vec{E}$的方向沿着$\angle APB$的平分线（图 1-4））。

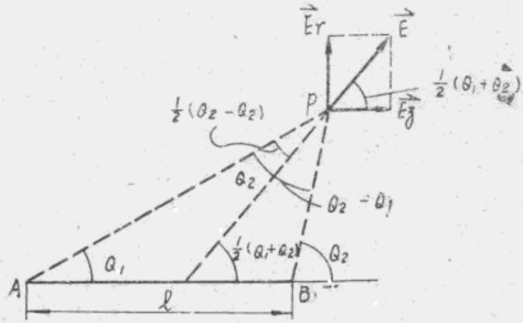


图 1-4 表明 $\frac{E_r}{E_z}=\mathrm{tg}\frac{1}{2}(\theta_1+\theta_2)$ 用图

例题 1-3 决定均匀带电的无限长直线的电场。

由例题 1-2 的结果，使 $\theta_1=0$ 与 $\theta_2=\pi$，则得无限长带电直线的电场：

$$E_z=0$$

$$E=E_r=\frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0 r}。$$

事实上，带电直线都是有限长的。但是当我们考虑这线附近的电场，特别是在这线的中间部分的附近，由于$\theta_1\approx 0$，$\theta_2\approx\pi$，因此可以把它看成无限长直线。

6. 电场的情况可用图形来表明。

在电场中可以作一些线，使线上每点的切线与电场强度矢量有一致的方向，并在线上加用一个箭头来表示线上各点电场强度的一般方向。这样作成的线叫做电场强度线或简称$\vec{E}$线。

决定$\vec{E}$线的微分方程组是：

$$\frac{dx}{E_x}=\frac{dy}{Ey}=\frac{dz}{E_z}。\qquad (1\text{-}18)$$

方程组(1-18)组的导出，可在 $\vec{E}$ 线上取长度元 $d\vec{l}$。因为在同一点上 $\vec{E}$ 与 $d\vec{l}$ 共线，所以

$$\vec{E}\times d\vec{l}=0。\qquad (1\text{-}19)$$

在直角坐标制，

$$\vec{E}=E_x\vec{i}+E_y\vec{j}+E_z\vec{k}。$$

$$d\vec{l}=dx\vec{i}+dy\vec{j}+dz\vec{k},$$

代入式(1-18)，便得

$$\begin{aligned}\vec{E}\times d\vec{l}&=(E_x\vec{i}+E_y\vec{j}+E_z\vec{k})\\&\times(dx\vec{i}+dy\vec{j}+dz\vec{k})\\&=(E_ydz-E_zdy)\vec{i}+(E_zdx-E_xdz)\vec{j}\\&+(E_xdy-E_ydx)\vec{k}\\&=0\end{aligned}$$

或

$$\begin{aligned}E_ydz-E_zdy=0\\E_zdx-E_xdz=0\\E_xdy-E_ydx=0\end{aligned}$$

这就是方程组(1-18)。

为了使电场强度不仅表示出场中矢量 $\vec{E}$ 的方向，同时还要能够相对地表示矢量 $\vec{E}$ 的量值。其办法是采用电场强度管（$\vec{E}$ 管）的轴线以代替 $\vec{E}$ 线。所谓电场强度管是电场中一个区域内 $\vec{E}$ 线的总体。就是说，在这管内的 $\vec{E}$ 线仅在这管内。显然，管壁是由一些 $\vec{E}$ 线构成；管的轴线也是一条 $\vec{E}$ 线。这样就可以使场中一点上垂直于矢量 $\vec{E}$ 的单位面积所穿过的 $\vec{E}$ 管轴线数目正比于矢

量$\vec{E}$的量值。在电场图中从$\vec{E}$管轴线的密集或疏散就可以看出电场的强弱。为了简单起见，今后把这些管的轴线也叫做$\vec{E}$线。

例题 1-4　应用方程组(1-18)决定点电荷q电场中的$\vec{E}$线。

点电荷的电场

$$\vec{E}=\frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\vec{r}^{\,0}=\frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}(\cos\alpha\,\vec{i}+\cos\beta\,\vec{j}+\cos\gamma\,\vec{k})$$

$$E_x=\frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\cos\alpha=\frac{qx}{4\pi\varepsilon_0 r^3},$$

$$E_y=\frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\cos\beta=\frac{qy}{4\pi\varepsilon_0 r^3},$$

$$E_z=\frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\cos\gamma=\frac{qz}{4\pi\varepsilon_0 r^3}。$$

在这情况下，方程组(1-18)成为

$$\frac{dx}{z}=\frac{dy}{y}=\frac{dz}{z}。$$

由$\frac{dx}{x}=\frac{dy}{y}$解得$\ln x=\ln c_1 y$或$x=c_1 y$，这里$c_1$是一个积分常量。同样，由$\frac{dx}{x}=\frac{dz}{z}$解得$x=c_2 z$。这里$c_2$是另一个积分常量。我们知道$x=c_1 y$是一个通过$z$轴的平面族，而$x=c_2 z$是一个通过$y$轴的平面族。这两个平面族相交的一些直线，便是我们所要决定的$\vec{E}$线。

1-3　电压，电位与电位梯度

1. 在力学上，我们已经知道重力位这个概念，而且知道重力位所以能够引入是因为重力作功仅由运动路径的两个端点的位置决定，而与运动所经的路径无关。据此，我们来研究静

电场中有没有引入位的概念的可能。

在图 1-5 所示的电场中，试验电荷 q_t 移动一个长度元 $d\vec{l}$ 电场力所做的功

$$dA = f\cos\theta dl = \vec{f}\cdot d\vec{l} = q_t\vec{E}\cdot d\vec{l}。$$

试验电荷 q_t 由 P 点移动到 Q 点时，电场力所做的功

$$A_{PQ} = q_t\int_P^Q \vec{E}\cdot d\vec{l}$$

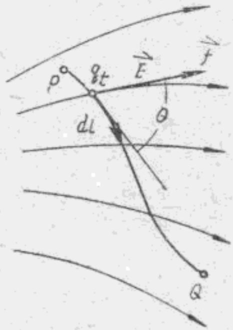


图 1-5　电场力做功的计算

把试验电荷撇开，我们研究 A_{PQ} 与 q_t 的比率，用 u 代表这种比率，并把它叫做**电压**。于是从 P 点到 Q 点的路径上所作用的电压

$$u_{PQ} = \frac{A_{PQ}}{q_t} = \int_P^Q \vec{E}\cdot d\vec{l}, \quad (1\text{-}20)$$

其单位是焦/库，叫做伏特，简称伏。

就点电荷 q 的电场来说，电压

$$u_{PQ} = \int_P^Q \vec{E}\cdot d\vec{l} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\int_{r_P}^{r_Q}\frac{\vec{r^0}\cdot d\vec{l}}{r^2},$$

$$= \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\int_{r_P}^{r_Q}\frac{dr}{r^2} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\left(\frac{1}{r_P} - \frac{1}{r_Q}\right) \quad (1\text{-}21)$$

与积分路径无关，而只依赖于 P 点与 Q 点的位置。这个结论虽然由点电荷的特殊情况得出，但是并不失去一般性。因为对任何电荷分布，我们总可以把它分成许多具有点电荷性质的元电荷。每个元电荷的电场既然具有上述性质，而和的线积分等于线积分的和，所以由这些元电荷的电场叠加起来的合成电场显然也具有这个性质。在将来讨论到电介质的极化时，还要看到这个与路径无关的结论不仅对于真空中静电场，而且对于有电介质存在的静电场，也是正确的。

静电场中的电场强度矢量 $\vec{E}$ 的线积分与积分路径无关的特