

上海市高等专科学校教材

物理学

下 册

上海市高等专科学校《物理学》编写组编

上海科学技术出版社

上海市高等工程专科学校教材

物 理 学

下 册

上海市高等工程专科学校
《物理学》编写组 编

上海科学技术出版社

上海市高等专科学校教材

物 理 学

下 册

上海市高等专科学校

《物理学》编写组 编

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

总发行所 上海发行所发行 上海群众印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 9.75 字数 213,000

1986 年 4 月第 1 版 1986 年 4 月第 1 次印刷

印数: 1—55,100

统一书号: 13119·1250 定价: 1.60 元

目 录

(下 册)

第十章 静电场	1
§ 10-1 电荷及其相互作用	2
§ 10-2 电场强度	6
§ 10-3 电力线 电通量	16
§ 10-4 高斯定律	21
§ 10-5 静电场力的功 电势	31
§ 10-6 等势面 场强与电势的关系	39
§ 10-7 静电场中的导体	46
§ 10-8 有电介质的静电场	56
§ 10-9 电容器 电容	62
§ 10-10 电场的能量 能量密度	68
*§ 10-11 静电技术的一些应用	72
思考题	75
习题	76
第十一章 磁场	81
§ 11-1 磁场 磁感强度	81
§ 11-2 磁通量 磁场的高斯定律	85
§ 11-3 毕奥-萨伐尔定律及其应用	88
§ 11-4 安培环路定律	94
§ 11-5 磁场对运动电荷的作用	103
§ 11-6 磁场对载流导线的作用	106
§ 11-7 匀强磁场对平面载流线圈的作用	113
§ 11-8 磁介质中的磁场	118

思考题	121
习题	123
第十二章 电磁感应	129
§ 12-1 电磁感应现象 楞次定律	129
§ 12-2 电动势 法拉第电磁感应定律	132
§ 12-3 动生电动势和感生电动势	139
§ 12-4 自感现象和自感系数	146
§ 12-5 磁场的能量	149
思考题	153
习题	154
第十三章 电磁场和电磁波	158
§ 13-1 麦克斯韦的电磁场理论	158
§ 13-2 电磁振荡	164
§ 13-3 电磁波	168
§ 13-4 电磁波谱	172
思考题	176
习题	177
第十四章 光的干涉	178
§ 14-1 相干光 光程	178
§ 14-2 双缝实验 洛埃镜	182
§ 14-3 薄膜干涉	188
§ 14-4 劈尖 牛顿环	191
§ 14-5 迈克耳孙干涉仪	197
思考题	199
习题	201
第十五章 光的衍射	204
§ 15-1 光的衍射现象 惠更斯-菲涅耳原理	204
§ 15-2 单缝衍射	206
§ 15-3 衍射光栅	213
§ 15-4 光学仪器的分辨率	218

*§ 15-5	X 射线的衍射	221
思考题		224
习题		225
第十六章	光的偏振	227
§ 16-1	自然光和偏振光 起偏和检偏	227
§ 16-2	马吕斯定律	232
§ 16-3	反射和折射时光的偏振	233
§ 16-4	双折射 尼科耳棱镜	235
*§ 16-5	旋光现象	238
*§ 16-6	偏振光的干涉	239
思考题		242
习题		243
第十七章	量子物理	245
§ 17-1	量子论的起源	246
§ 17-2	光的量子性	250
§ 17-3	实物粒子的波动性	263
§ 17-4	玻尔的氢原子理论	267
§ 17-5	测不准关系式	277
§ 17-6	波函数及其物理意义	281
§ 17-7	薛定谔方程	286
*§ 17-8	原子中核外电子的状态	291
思考题		295
习题		296
习题答案		298

第十章 静 电 场

电磁学是研究电磁现象及其规律的一门科学，它的内容很广泛，在物理学中主要研究电磁场所服从的规律及物质的电磁性质。电磁学与生产技术关系密切，主要原因有以下几点：第一、电能比较容易与其他形式的能量相互转换，所以利用电能作为能源最方便；第二、电能输送迅速，输送效率高，输送设备也比较简单，所以便于远距离输送，有利于较大规模生产；第三、电磁信息可以电磁波的形式在空中传播，传播速度等于光速，能在极短的时间内，且不受空间的限制而把信息传送到远方；第四、电气测量仪表、电动调节仪表和电动控制设备灵敏度高、可靠性好。尤其由于后面三点原因，可用电来进行遥测、遥控以及实现工业生产自动化。总之，电磁学对现代生产技术的发展起着十分重要的作用。此外，它也是人类深入研究物质结构，发展近代科学理论必不可少的基础理论之一。

从第十章到第十三章，我们将分别讨论静电场、磁场、电磁感应及电磁波的特性及其规律。

在与观察者相对静止的惯性参考系中，静止电荷所产生的电场叫做静电场。因本章讨论的是静电场，所以除非另有说明，一切电荷都认为是静止的。这一章主要阐明真空中静电场的基本性质以及描述这些性质的两个重要物理量——电场强度和电势的意义及两者之间的联系，其次讨论静电场与

导体的相互作用、相互影响,最后对静电场中的介质及其对场的影响作简单介绍。

§ 10-1 电荷及其相互作用

一、电荷

大量实验指出:自然界中只存在两种性质不同的电荷,一种是负电荷,用“-”号表示,例如电子带的就是负电荷;另一种是正电荷,以“+”号表示,例如质子带的就是正电荷。电荷之间存在相互作用力,同号电荷相互排斥,异号电荷相互吸引。电子与质子所带的电量的绝对值相等,其值为

$$e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ 库.}$$

e 是目前测量到的最小电荷单元,称为基本电荷,而其它带电体的带电量总是这一基本电荷的整数倍,这种电荷的不连续性称为电荷的量子化。然而在探讨宏观带电现象时,由于涉及的带电量常比基本电荷大许多数量级,所以宏观带电体的电量变化可以认为是连续的。大量实验又指出:在孤立系统中,不论发生什么过程,系统的电量代数和保持不变。这就是自然界中重要守恒定律之一——电荷守恒定律。

二、库仑定律

1785年法国科学家库仑利用扭秤对静止电荷的相互作用进行定量研究后,给出如下定律:

在真空中,两个点电荷之间的相互作用力 F 的大小与两点电荷 q_1 和 q_2 的乘积成正比,与它们之间的距离的平方成反比,力的方向沿两点电荷的连线,同号电荷相斥,异号电荷相吸。这就是真空中的库仑定律。可用矢量式表示如下:

$$\mathbf{F} = K \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{r}_0, \quad (10-1)$$

式中 r 是两点电荷之间的距离, $\mathbf{r}_0$ 是从施力电荷指向受力电荷的单位矢量, K 是比例系数, 它的数值和单位决定于单位制的选择. 在国际单位制中, 电量的单位为库仑, 简称库(C), 距离的单位为米(m), 力的单位为牛顿(N), 在这一单位制中,

$$K = 8.98755 \times 10^9 \text{ 牛} \cdot \text{米}^2 \cdot \text{库}^{-2},$$

在计算时常用近似值

$$K = 9 \times 10^9 \text{ 牛} \cdot \text{米}^2 \cdot \text{库}^{-2}.$$

为简化由库仑定律导出的一些重要公式, 宁可使库仑定律的形式复杂些, 而令

$$K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}, \quad (10-2)$$

式中 ϵ_0 叫做真空介电常数,

$$\epsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12} \text{ 牛}^{-1} \cdot \text{米}^{-2} \cdot \text{库}^2,$$

在一般计算中, ϵ_0 常取 $8.85 \times 10^{-12} \text{ 牛}^{-1} \cdot \text{米}^{-2} \cdot \text{库}^2$. 用式(10-2)代入式(10-1), 真空中库仑定律又可表达如下:

$$\boxed{\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \mathbf{r}_0.} \quad (10-3)$$

下面以 q_1 对 q_2 的作用为例, 分析上式中力的方向与单位矢量的方向之间的关系(图 10-1). 设从施力电荷 q_1 指向受力电荷 q_2 的矢径为 $\mathbf{r}$, 式中 $\mathbf{r}_0$ 是矢径 $\mathbf{r}$ 的单位矢量. 当 q_1 与 q_2 同号时, 即 $q_1 \cdot q_2 > 0$, 表示 $\mathbf{F}$ 与 $\mathbf{r}_0$ 方向相同, 也就是同号电荷相互排斥的方向. 当 q_1 与 q_2 异号时, 即 $q_1 \cdot q_2 < 0$, 表示 $\mathbf{F}$ 与 $\mathbf{r}_0$ 方向相反, 也就是异号电荷相互吸引的方向.

至于 q_2 对 q_1 的作用力 $\mathbf{F}'$ 的方向与单位矢量 $\mathbf{r}'_0$ 的关系如何? 留给读者分析, 并作出类似于图 10-1 的示意图.

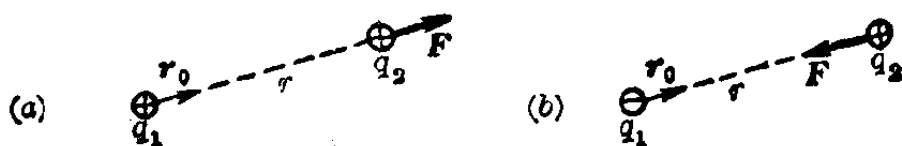


图 10-1 q_2 受到的作用力 F
(a) q_1 、 q_2 同号; (b) q_1 、 q_2 异号

例题 10-1 α 粒子(即氦原子核)的质量为

$$m = 6.68 \times 10^{-27} \text{ 千克},$$

它的带电量 $q = 3.2 \times 10^{-19}$ 库, 试比较两个 α 粒子间的静电力和万有引力.

解 静电力

$$F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q^2}{r^2} = K \cdot \frac{q^2}{r^2},$$

式中 r 为两个 α 粒子间的距离, 万有引力为

$$F_g = G \cdot \frac{m^2}{r^2},$$

式中 G 为引力常数, $G = 6.67 \times 10^{-11}$ 牛·米²·千克⁻². 两力之比为

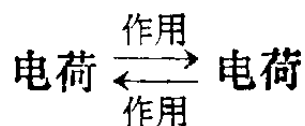
$$\frac{F_e}{F_g} = \frac{Kq^2}{Gm^2} = 3.1 \times 10^{35}.$$

显然在微观粒子的相互作用中, 万有引力比静电力小许多数量级, 因而完全可以不计.

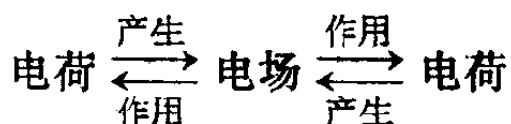
三、电场

库仑定律只说明两点电荷相互作用力的大小和方向是怎样确定的, 并没有说明它们之间的作用是怎样进行的. 关于这一问题, 历史上曾有两种不同的观点. 一种是超距作用的观点, 它认为一个电荷所受到的作用力是由另一个电荷直接作用的结果, 这种作用既不需要中间物质, 也不需要传递时间, 而是从一个电荷即时地到达另一个电荷, 这种作用方式可

示意如下:



另一种是近距作用观点, 它认为在电荷的周围空间存在着电场, 只要另一电荷处于电场中某点时, 就受到该点电场的作用. 当中性物体的正负电荷分开形成电场时, 电场需要一定的时间(即使这个时间很短促, 但不为零)才能传播到远方, 而对远处的另一电荷发生作用, 所以这种作用方式可示意如下:



电场对电荷的这种作用叫做**电场力**, 静止电荷的相互作用叫做**静电力**或**库仑力**, 在本质上它也是电场力.

从静止电荷之间的作用看, 两种观点哪一种正确, 很难作出判断. 自发现电磁波, 并证明光是电磁波的一种形式后, 超距作用的观点就再也没有立足之地了. 因为实验和理论都证明变化着的电磁场是以光速这一有限速度在空间传播的.

理论和实验还指出: 在一定的条件下电磁波能够脱离电荷和电流而独立存在; 它具有自己的运动规律; 和原子、分子组成的实物一样, 电磁场也具有动量、能量和质量. 这说明电磁场具有物质性, 它是物质的另一种形态. 静电场也不例外, 它的物质性表现在静电场具有一定的能量(参阅 § 10-10)等.

电磁场与宏观物体的一个重要区别, 就是空间某处不能同时被两个物体占据, 却可同时存在着两个以上不同的场, 如果它们是同一性质的场就可以迭加.

库仑定律只适用于两个点电荷的相互作用. 但在许多情况下, 常涉及两个以上点电荷的相互作用, 那末某一点电荷受

到的静电力如何计算呢？设有 n 个点电荷组成的系统，实验指出，作用在其中某一点电荷 q_i 上的静电力 $\boldsymbol{F}_i$ 等于其它 $(n-1)$ 个点电荷分别单独存在时，作用在该电荷上的静电力的矢量和。这一结论说明静电力满足力的迭加原理。

§ 10-2 电 场 强 度

引入电场中的电荷要受到电场力的作用，同一电荷在电场中的不同位置，它所受到的电场力的大小和方向一般不同，这表明不同位置的电场有不同的强度和方向。要研究电场的这一性质，有必要引入试验电荷的概念。为了达到测量的精确性和客观性，对试验电荷作如下要求：

1. 试验电荷必须是点电荷，才能确切反映场中某点的性质。

2. 试验电荷的电量 q_0 必须充分小，以致它的引入不会影响所研究电场的场源电荷的分布。

为了简化对问题的分析，下面只限于讨论试验电荷是正电荷的情况。

一、电场强度

实验指出：在给定电场中的同一点处，改变试验电荷的电量 q_0 的大小，试验电荷所受电场力 $\boldsymbol{F}$ 的方向不变，而大小却随着 q_0 的变化而变化，由此可见电场力 $\boldsymbol{F}$ 除与电场在该点性质有关外，还与外界引入的因素 q_0 有关，所以电场力 $\boldsymbol{F}$ 并不能反映电场的客观性质。但实验又指出：在给定电场中，同一点的比值 $\frac{\boldsymbol{F}}{q_0}$ 是一个与试验电荷电量 q_0 无关的常矢量，以符号 $\boldsymbol{E}$ 表示，即

$$\frac{\mathbf{F}}{q_0} = \text{常矢量 } \mathbf{E}.$$

在电场中的不同点处, 矢量 $\mathbf{E}$ 的大小和方向一般不同. 因而矢量 $\mathbf{E}$ 是反映电场中各点的电场方向和强弱程度的物理量, 叫做电场强度, 简称场强. 于是电场强度的定义式为

$$\boxed{\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0}}. \quad (10-4)$$

上式中若取 $q_0 = +1$ 个单位时, 则 $\mathbf{E}$ 和 $\mathbf{F}$ 的数值相等, 即电场中某点的电场强度在量值上等于单位正电荷在该点所受到的电场力的大小, 电场强度的方向就是正电荷在该点所受到的电场力的方向.

在国际单位制中场强 $\mathbf{E}$ 的单位为牛·库⁻¹(N·C⁻¹)或伏·米⁻¹(V·m⁻¹).

另一方面, 若在已知外电场中某点 $P(x, y, z)$ 处, 有一点电荷 q , 该点电荷 q 所受到的电场力 $\mathbf{F}(x, y, z)$, 由式(10-4)为

$$\boxed{\mathbf{F}(x, y, z) = q\mathbf{E}(x, y, z)}, \quad (10-5)$$

式中 $\mathbf{E}(x, y, z)$ 是除被作用电荷 q 外, 其它所有电荷在 $P(x, y, z)$ 点的合场强. 但应注意如果由于电荷 q 的引入而改变场源电荷的分布, 那么要根据电荷重新分布后, 在 P 点的实际场强来计算. 当 $q > 0$ 时, $\mathbf{F}$ 和 $\mathbf{E}$ 同号, 即电场力 $\mathbf{F}$ 与场强 $\mathbf{E}$ 方向相同, 当 $q < 0$ 时, $\mathbf{F}$ 和 $\mathbf{E}$ 异号, 即电场力 $\mathbf{F}$ 与 $\mathbf{E}$ 方向相反.

二、场强的计算(场强计算方法之一)

如果已知场源电荷的分布, 那末根据场强的定义式(10-4)及迭加原理, 在原则上就可算出电场中各点的场强. 下面说

明这种计算方法。

1. 点电荷的场强: 设在真空中有一个点电荷 q , 为研究其场强的分布情况, 在电场中任选一点 P 作为观测点, 从点电荷 q 到 P 点的距离为 r . 设想把一试验电荷 q_0 放到 P 点, 根据库仑定律, 作用在 q_0 上的电场力为

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0 q}{r^2} \mathbf{r}_0,$$

式中 $\mathbf{r}_0$ 是从点电荷指向观测点 P 的单位矢量, 代入场强定义式(10-4)就得到 P 点的场强为

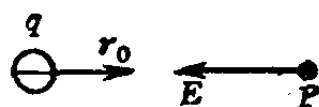
$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2} \mathbf{r}_0. \quad (10-6)$$

上式表明在点电荷的电场中, 任一点的场强 $\mathbf{E}$ 的大小与电荷 q 成正比, 与点电荷到观察点的距离平方成反比. 如果 q 为正电荷, 场强 $\mathbf{E}$ 的方向与 $\mathbf{r}_0$ 的方向一致, 即背离 q ; 如果 q 为负电荷, 场强 $\mathbf{E}$ 的方向与 $\mathbf{r}_0$ 的方向相反, 即指向 q (参阅图 10-2).

2. 点电荷系的场强: 假如在真空中的场源由一系列点电荷 $q_1, q_2, \dots, q_i, \dots, q_n$ 组成 (以三个点电荷为例, 如图 10-3 所示). 要计算任一点场强, 仍把试验电荷 q_0 放在观测



(a) 正点电荷



(b) 负点电荷

图 10-2 点电荷电场的场强方向

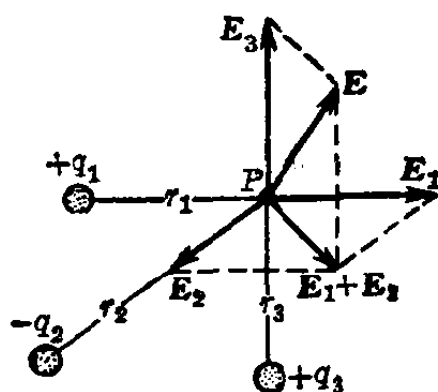


图 10-3 点电荷系中的场强

点 P ，由于静电力满足迭加原理，则 q_0 所受电场力为

$$\mathbf{F} = \sum_{i=1}^n \mathbf{F}_i,$$

式中 $\mathbf{F}_i$ 为试验电荷 q_0 受到点电荷 q_i 对它的作用力。再应用式(10-4)可得 P 点的场强为

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0} = \frac{\sum_{i=1}^n \mathbf{F}_i}{q_0} = \sum_{i=1}^n \frac{\mathbf{F}_i}{q_0}.$$

由式(10-6)可知

$$\mathbf{E}_i = \frac{\mathbf{F}_i}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i}{r_i^2} \mathbf{r}_{i0},$$

式中 $\mathbf{E}_i$ 为点电荷 q_i 单独存在时在 P 点所产生的场强， r_i 和 $\mathbf{r}_{i0}$ 分别为点电荷 q_i 到观测点 P 的距离及其单位矢量，由上面两式得

$$\boxed{\mathbf{E} = \sum_{i=1}^n \mathbf{E}_i} \quad (10-7)$$

及

$$\boxed{\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{r_i^2} \mathbf{r}_{i0}} \quad (10-8)$$

式(10-8)表示在点电荷系所形成的电场中，某点的场强等于各点电荷单独存在时在该点的场强的矢量和。这一结论称为场强的迭加原理。

3. 连续分布电荷的场强：在实际问题中所遇到的电场，常由电荷连续分布的带电体形成。要计算任意带电体附近所产生的场强，不能把带电体看作点电荷，而应直接用点电荷场强公式(10-6)来计算。因为在带电体附近，它的形状和线度与到观测点的距离相比，已不能忽略，所以整个带电体不能被看作点电荷。但是我们可把带电体分割成无数个可以看作为点

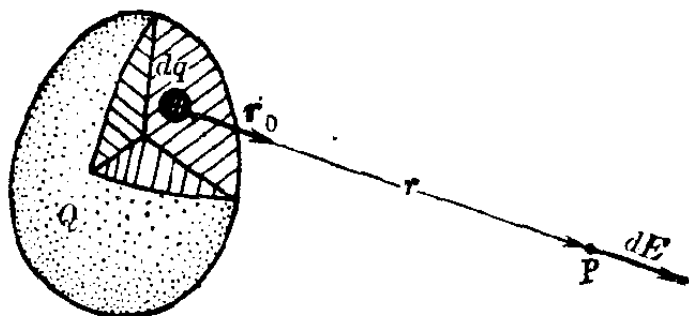


图 10-4 带电体的场强

电荷的电荷元 dq 。每一个电荷元 dq 在电场中某一观测点 P 处的场强为 $d\mathbf{E}$ (图 10-4), 按点电荷的场强公式可写成:

$$d\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} \mathbf{r}_0,$$

式中 $\mathbf{r}_0$ 是从 dq 所在点指向观测点的单位矢量, r 为电荷元到观测点的距离。再利用场强的迭加原理, 就可算出带电体在 P 点处所产生的场强为

$$\mathbf{E} = \int_Q d\mathbf{E} = \int_Q \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\mathbf{r}_0}{r^2} dq, \quad (10-9)$$

式中积分区间遍及整个场源电荷。要求出上述积分, 还须解决两个问题。首先必须按电荷分布的实际情况, 把积分式中的微元 dq 用与坐标有关的微元来表示。连续分布电荷通常可分为体分布、面分布和线分布三种情况。如果电荷连续分布在带电体中, 并已知电荷体密度 $\rho \left(= \frac{dq}{dV} \right)$ 的分布 [ρ 在量值上等于单位体积内所带的电量, 一般情况下它是空间坐标的函数, 即 $\rho(x, y, z)$], 则 $dq = \rho dV$, dV 是电荷元 dq 所占据的体积元。于是式 (10-9) 可写成

$$\mathbf{E} = \int_V \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\rho \mathbf{r}_0}{r^2} dV.$$

同理, 如果电荷连续分布在曲面上, 并已知电荷面密度

$\sigma \left(= \frac{dq}{dS} \right)$ 的分布, 则 $dq = \sigma dS$, dS 是电荷元 dq 所占据的面积元, 于是式(10-9)可写成

$$\mathbf{E} = \int_S \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\sigma \mathbf{r}_0}{r^2} dS.$$

如果电荷连续分布在曲线上, 并已知电荷线密度 $\lambda \left(= \frac{dq}{dl} \right)$ 的分布, 则 $dq = \lambda dl$, dl 是电荷 dq 所占据的线段元. 于是式(10-9)又可写成

$$\mathbf{E} = \int_L \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda \mathbf{r}_0}{r^2} dl.$$

要计算式(10-9)还须解决另一问题. 式(10-9)是一个矢量积分式, 一般不能直接计算, 可先将场强 $d\mathbf{E}$ 沿直角坐标轴方向分解成 dE_x , dE_y , dE_z , 然后分别对它们积分, 求得 $\mathbf{E}$ 的三个分量:

$$E_x = \int dE_x = \int \cos \alpha dE,$$

$$E_y = \int dE_y = \int \cos \beta dE,$$

$$E_z = \int dE_z = \int \cos \gamma dE,$$

式中 α , β , γ 分别为 $d\mathbf{E}$ 与 X , Y , Z 轴的夹角, 最后再由这三个分量确定场强 $\mathbf{E}$ 的大小和方向.

例题 10-2 两个等量异号点电荷 ($-q$ 和 $+q$) 相距 l , 若两点电荷连线的中点 O 到观测点的距离 r 远大于 l 时, 则这对电荷称为电偶极子. 从电偶极子的 $-q$ 到 $+q$ 的矢径为 $\mathbf{l}$, 电量 q 与矢径 $\mathbf{l}$ 的乘积定义为电偶极子的电矩, 用符号 $\mathbf{p}_e$ 表示, 即