

工專物理

(下)

目 錄

第十九章 靜電學

19-1	電 荷	2
19-2	電荷與原子構造	2
19-3	電荷與電流	4
19-4	金箔驗電器與導電	5
19-5	電荷之分佈	6
19-6	接地與感應	7
19-7	庫倫定律	8
19-8	電 場	12
19-9	電力線	14
19-10	電位與電位差	16
19-11	電位梯度和電場	20
19-12	電 子	23

第二十章 電容與介電質

20-1	電 容	27
20-2	平行板電容器	28
20-3	介電質	30
20-4	電容器之組合	35
20-5	貯藏在電容器的能量	41
20-6	電容器的種類	44

第二十一章 電流與電阻

21-1	電 流	46
21-2	電流與電位差	49
21-3	歐姆定律	51
21-4	電阻率隨溫度變化	55
21-5	超導電性	57
21-6	能量轉換與電功率	58
21-7	電阻器的組合	61

第二十二章 直流電路

22-1	電能源	69
22-2	內電阻	75
22-3	電池的組合	78
22-4	克希荷夫定律——網路分析	80
22-5	測量儀器	84
22-6	RC 電路	92
22-7	熱離子真空管	96

第二十三章 磁 場

23-1	磁的現象	100
23-2	磁 場	101
23-3	圓周運動的電荷	105
23-4	電流的磁場	109
23-5	作用於電流上的磁力	117
23-6	電流間的磁力	119
23-7	電流迴路上的磁轉矩	122

第二十四章 物質的磁性

24-1	磁性的原子理論	126
------	---------	-----

24-2	磁場強度或場強度	129
24-3	抗磁性	131
24-4	順磁性	131
24-5	鐵磁性	132
24-6	磁性裝置	136
24-7	鐵氧磁	138

第二十五章 電磁感應

25-1	法拉第定律與感應電動勢	141
25-2	磁場中的運動導體	144
25-3	發電機與馬達	146
25-4	互感應	154
25-5	自感應	156
25-6	電感的組合	158
25-7	直流串聯電路中的電感器	161
25-8	磁 能	164
25-9	電感器的類別	166
25-10	變壓器	167

第二十六章 交流電與電磁波

26-1	有效電流與電壓	173
26-2	純電感電路中之交流電	176
26-3	純電容電路之交流電	179
26-4	串聯電路的阻抗	181
26-5	交流電路中的功率消耗	185
26-6	共 振	187
26-7	電磁波	189
26-8	相對論性之都卜勒效應	193

第二十七章 光與照度

27-1	光的本性	196
27-2	光線與陰影	197
27-3	光源	199
27-4	光源的特性	200
27-5	表面照度	206
27-6	亮度	211
27-7	光度計	212

第二十八章 幾何光學

28-1	反射定律	216
28-2	平面鏡	218
28-3	球面鏡	219
28-4	球面像差與拋物柱面反射鏡	229
28-5	折 射	230
28-6	稜 鏡	239
28-7	透 鏡	240
28-8	簡單光學儀器	250
28-9	透鏡組合	256
28-10	透鏡的缺點	260

第二十九章 波動光學

29-1	顏 色	264
29-2	楊氏雙狹縫	267
29-3	繞射光柵	270
29-4	單狹縫繞射	273
29-5	薄 膜	274
29-6	電極化	278

第三十章 量子物理與原子

30-1	光 譜	282
------	-----	-----

30-2	光電效應	285
30-3	拉塞福原子	290
30-4	波爾原子	292
30-5	熒光與磷光	296
30-6	量子數	297
30-7	週期表	299
30-8	物質波	301
30-9	雷 射	304

第三十一章 固 態

31-1	鍵 結	308
31-2	晶體結構	310
31-3	X-射線	312
31-4	能 帶	318
31-5	電子統計學	321
31-6	半導體	324
31-7	霍耳效應	329

第三十二章 原子核與核能

33-1	自然放射性的發現	332
33-2	輻射的類型	333
33-3	核構造	334
33-4	結合能	336
33-5	原子核蛻變	338
33-6	核之活 動性	341
33-7	人工蛻變	344
33-8	Q-值	346
33-9	連鎖反應	347
33-10	核能廠	349
33-11	核融合	351

附 錄

附錄 1 轉換因素和物理常數·····	353
附錄 2 週期表·····	356

19-1 電 荷

古希臘人（西元前 600 年前）曾注意到，琥珀用毛皮摩擦後，會吸引輕的物體，像稻草與軟木*。假如其他物體與適當的材料摩擦，也會有這種特性。這些物體稱為帶電體（electrified）而具有靜電荷。

共有兩種不同種類的電荷。當玻璃棒與蠟絲摩擦時，玻璃棒帶電。當橡膠棒與毛皮摩擦時，橡膠棒亦帶電。但兩棒具有不同種類的電荷。電荷有兩種不同的形式，可用一簡單實驗來證明。若一帶電的玻璃棒，用長而輕的纖維懸着，它會排斥另一根帶同樣電的玻璃棒。當第二根棒移近時，懸着的棒就會移開。但是當帶電的橡膠棒移近懸着的玻璃棒時，它們相互吸引，而玻璃棒亦向橡膠棒移動。兩根帶同樣電的橡膠棒也會互相排斥。

在十八世紀時，朋傑明·富蘭克林（Benjamin Franklin）替這兩種電荷命名。當玻璃棒與蠟絲摩擦時，被認為帶正電（positive charge）。而當橡膠棒與毛皮摩擦時，則帶負電（negative charge）。

帶相同類型靜電荷的物質互相排斥。帶不同類型靜電荷的物質互相吸引。

19-2 電荷與原子構造

所有物質都由原子組成，此原子是化學元素中最小的質點。在二十世紀，科學家斷定，一個原子由一小而非常稠密的帶正電荷的核（nucleus），一個或多個輕而帶負電荷的電子（electrons）所組成。電子非常高的速度繞核旋轉（見第三十章）。每個電子具有 $9.108 \times$

*“electricity”一詞源出希臘字的琥珀“electron”。

）。

19-3 電荷與電流

電流 (electric current) 是電荷的流動。習慣上以電流的方向作為正電荷流動的方向。假若電子在物體中向某一方流動。電流則往相反的方向流動。

在國際制中，電流的單位是安培 (Amperes)。由於它比電荷更易量度，故為一種基本單位。安培係用兩平行電流間的力來定義。考慮真空中相距 1 m，並帶相同電流的兩根平行導線。當每單位長度導線的吸引力* 恰為 $2 \times 10^{-7} \text{ N/m}$ 時，每一導線電流的大小，被定義為 1 安培 (A, Ampere)。

國際制中，電荷的單位稱為庫倫 (Coulomb)，是一種導出單位。1 庫倫 (Coulomb, C) 被定義為，當導體中具有 1 安培電流，每秒流過導體某固定點的電荷量。因此

$$q = I t \quad (19-1)$$

式中 q 為電荷，單位為庫倫， I 為電流，單位為安培； t 為時間，單位為秒。

原子電荷單位 (atomic charge unit) e ，被定義為每一質子所具有的電荷，其大小為 1.602×10^{-19} 庫倫。一個電子具有與原子電荷單位大小相同、而極性相反的電荷。

電荷與特殊粒子如質子及電子相結合，每一粒子恆具有大小等於一個電荷單位的電量。因此，電荷以不連續而定量的方式存在，稱為量子化 (quantized)。任何電荷等於一個電荷單位的整數倍。

例題 19-1 假如銅線帶 1.5 mA 的穩定電流。求在一分鐘內有多少電子流經銅線的一固定點。

解： $q = It = (1.5 \times 10^{-3} \text{ A})(60 \text{ s}) = 9.0 \times 10^{-2} \text{ C}$

* 有關該力的由來，將在第二十三章中討論。

當正電荷移近無電的驗電器時，電子被正負荷吸引，而從箔片與導電棒流到金屬平板。此時金屬平板可說被感應（induced）出負電荷，箔片由於缺乏電子，故產生一淨正電荷，結果箔片下垂。

同樣，當負電荷移近無電的驗電器時，金屬平板上的電子被排斥，流到箔片，使它們張開。此時驗電器的金屬平板含有感應的淨正電荷。當負電荷移開，電子重行分佈使箔片下垂。

假如金箔驗電器的金屬平板與一帶負電的物體接觸，一部分電子從物體流到平板上。這些電子互相排斥，經過導電棒到箔片，結果箔片張開，顯示出有淨電荷存在。當帶電體移開，驗電器仍保有過量的電子，此係經由導電過程（conduction process）而充負電。這些過量的電子，會重新分佈施金屬平板、導電棒與箔片上。結果因部份電子從箔片流開，所以箔片會稍微下垂。

假如驗電器與帶正電的物體接觸，也可藉導電而充正電。在這種情形下，電子從驗電器流到物體，而在驗電器留下正電荷。

箔片張開角度的大小，與接近或接觸驗電器金屬平板的物體上的淨電荷有關。淨電荷愈多，箔片張開愈大。

19-5 電荷的分佈

電荷在絕緣體中不易流動。任何淨電荷恆分佈於導體的表面。在表面彎曲最大的區域聚積的淨電荷也較多。任何淨電荷有向導體尖端表面集中的傾向（圖 19-2）。由於相同電性間的靜電斥力，造成導體尖端到環境間的漏電。這種現象被利用到某些裝置上，以便從導體移轉電荷到另一導體。

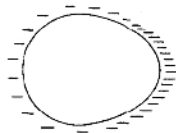


圖 19-2 導體表面的電荷分佈，電荷有聚集在最大曲率區域的傾向

它們帶有 $2.5 \times 10^{-6} \text{ C}$ 與 $-3.2 \times 10^{-7} \text{ C}$ 的電荷，相距 0.15 m 。

解：

$$\begin{aligned} F &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{d^2} \\ &= \frac{(9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2) (2.5 \times 10^{-6} \text{ C}) (-3.2 \times 10^{-7} \text{ C})}{(0.15 \text{ m})^2} \\ &= -0.32 \text{ N} \end{aligned}$$

負值意指不同電荷間的吸引力。

庫倫定律適用於成雙的電荷，在多於兩個電荷的系統中，一個電荷的總電力，等於所有其他電荷作用在其上的電力向量和 (vector sum)。

例題 19-3 圖 19-4 (a) 說明真空中三個很小並帶電的質點系統。求其他兩電荷 q_1 與 q_2 作用於電荷 $q = 4.0 \mu\text{C}$ 的淨電力。

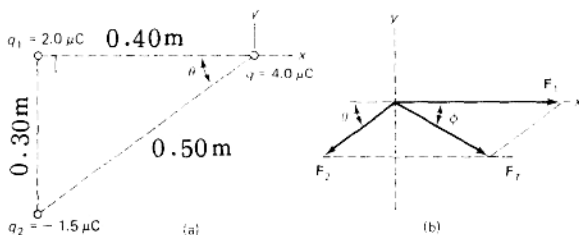


圖 19-4 例 19-3

解： 選取一便利的座標制，使 q 在原點 [圖 19-4 (a)]。求 q_1 與 q 間排斥力的大小為

$$F_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q}{d_1^2}$$

$$= \frac{(9 \times 10^9 \text{ Nm}^2 / \text{C}^2)(4.0 \times 10^{-6} \text{ C})(2.0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(0.40 \text{ m})^2}$$

$$= 0.45 \text{ N}$$

同理， q_2 與 q 間吸引力的大小為

$$F_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_2 q}{d_2^2}$$

$$= \frac{(9 \times 10^9 \text{ Nm}^2 / \text{C}^2)(4.0 \times 10^{-6} \text{ C})(-1.5 \times 10^{-6} \text{ C})}{(0.50 \text{ m})^2}$$

$$= -0.216 \text{ N}$$

這些力示於圖 19-4 (b) 中。將這些力分解成垂直分量，因 $\cos \theta = 0.4 \text{ m} / 0.5 \text{ m}$ ， $\sin \theta = 0.3 \text{ m} / 0.5 \text{ m}$

力	X - 分量	Y - 分量
F_1	$F_1 = 0.45 \text{ N}$	0
F_2	$-F_2 \cos \theta$ $= -(0.216 \text{ N})$ $\cdot (0.4 / 0.5)$ $= -0.173 \text{ N}$	$-F_2 \sin \theta$ $= -(0.216 \text{ N})$ $\cdot (0.3 / 0.5)$ $= -0.130 \text{ N}$

故合力 F 的分量 $F_x = 0.45 \text{ N} - 0.173 \text{ N} = 0.277 \text{ N}$ ，且 $F_y = -0.130 \text{ N}$ 或

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = \sqrt{(0.277 \text{ N})^2 + (-0.130 \text{ N})^2}$$

$$= 0.306 \text{ N}$$

而 $\tan \phi = F_y / F_x = -0.130 \text{ N} / 0.277 \text{ N} = -0.469$

或 $\phi = -25.1^\circ$

[見圖 19-4 (b)]。

19-8 電 場

兩個或多個電荷，即使不接觸，也能互相作用。由於電力能超越空間，凡是具有淨電荷的物體，總是受其他電荷存在的影響。

電場 (electric field) 存在於任何受荷受力的區域。因電力僅發生於電荷間，故電場直接與電荷有關。電場由電荷產生，而電荷也受電場存在的影響。

任何場所的電場，被一稱為電場強度 (electric field intensity)。 $\mathbf{E}$ 的向量所描述。電場強度被定義為：每單位正試驗電荷所受的電力。因此，具有電荷 q_0 的某點受到一電力 $\mathbf{F}$ ，其電場強度為：

$$\mathbf{E} = \mathbf{F} / q \quad (19-4)$$

但，正試驗電荷的存在，會干擾電場，故試驗電荷被假設為極小。在國際制中，電場強度的單位為 N/C 。

例題 19-4 求示波器 (oscilloscope) 中電子所受的電力。設在一大為 $5.0 \times 10^3 \text{ N/C}$ 的均一電場強度中被加速。

解：一個電子的電荷 $= -1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ；

$$\begin{aligned} \text{因此 } F &= q_0 E = (-1.6 \times 10^{-19} \text{ C})(5.0 \times 10^3 \text{ N/C}) \\ &= -8.0 \times 10^{-16} \text{ N} \end{aligned}$$

亦即 $8.0 \times 10^{-16} \text{ N}$ 的力作用於電場強度的相反方向。

設在真空 (或空氣) 中一孤立電荷 q ，在離電荷 q 為 d 的某點，將正試驗電荷 q_0 置於該處，測其所受影響以決定電場強度。根據庫倫定律，試驗電荷 q_0 受到一電力，其大小為：

$$F = [1 / (4\pi\epsilon_0)] [(qq_0) / d^2]$$

因此，由式 (19-4)，該點的電場強度的大小為

$$E = F / q_0 = [1 / (4\pi\epsilon_0)] (q / d^2) \quad (19-5)$$

示。畫電力線時係將小正試驗電荷置於各個點，而考慮其移動的方向。例如，一孤立正電荷排斥一正試驗電荷，結果使電力線從孤立正電荷輻射開來。

- (2) 電力線永不相交。若相交，即意味着淨電場強度在空間的某點有兩個不同的方向。
- (3) 電場產生於任何淨電荷區。電力線從淨正電荷區發生。且是連續的，終止於同樣大小的淨負電荷區。
- (4) 不同電力線間的空間，是電場強度大小的一種指標。電力線越密集的区域，電場強度愈大。

任何區域，電力線密集的程度，用電通密度 (electric flux density) D_F 表示。被定義為單位垂直面積的電力線數。故

$$D_F = \phi_E / A_1 \quad (19-7)$$

此處， ϕ_E 是通過面積 A_1 的電力線數。此面積與這些電力線成垂直。在任意點，電通密度 D_F 直接與淨電場強度 E 成正比。而代表電力場的電力線數 ϕ_E 受到限制，使比例常數受到介質的電容率 ϵ 。故在真空中（或在空氣中近似）電通密度

$$D_F = \epsilon_0 E = \phi_E / A_1 \quad (19-8)$$

此處， $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / \text{Nm}^2$ ，為自由空間的電容率。

習 題

- 19-15 一非常大的圓形平板上具有淨負電荷。畫出其周圍的電力線。
- 19-16 畫出具有淨正電荷的無限長直導線的電力線。提示：考慮對稱於兩相等導線段的某點，並決定那些線段對該點的電場強度。

功可使電位能增加。

正如重力位能一樣，我們通常只考慮某參考點電位能的改變。注意，電位能，決定於電荷 q_0 的大小與極性。吾人能很方便地描述任何電荷系統所產生的電場，以決定不論大小或極性所有電荷上的影響。關於這一點，我們定義任意電場中兩點間 A 與 B 的電位差 (electric potential difference) ΔV_{BA} ，為當試驗電荷從 A 運動到 B 時，每單位正試驗電荷外界所作的功 $W_{A \rightarrow B}$

$$\Delta V_{BA} = W_{A \rightarrow B} / q_0 \quad (19-9)$$

在國際制中，電位差被稱為伏特 (volt, V) 的導出單位所定義。所以，1 伏特 = 1 焦耳 / 1 庫倫 (或 $V = J / C$)，在電位差為一伏特的兩點間，移動一庫倫的電荷需要一焦耳的功。注意，電位差是一純量 (scalar)。它不等於能量差，但它與能量差成正比。

在電路與許多問題中，接地 (地球) 通常被選為零參考電位，再決定其他電位。

例題 19-5 若質子在電位差為 1000 V 的兩點間被加速。求其能量變化。

解：電場所作的功，等於能量的變化。因質子的電荷為 $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$

$$W = q \Delta V = (1.6 \times 10^{-19} \text{ C}) (10^3 \text{ V}) \\ = 1.6 \times 10^{-16} \text{ J}$$

當試驗電荷 q_0 在環繞電荷 $-q$ 的圓弧上從 B 點運動到 C 點時，庫倫吸力恆垂直於所經的路徑，故沒有作功。此時電荷 q_0 在 B 點與 C 點的電位能相同。當位移具有一與庫倫力而方向相同的分量時，電位能才有變化。故 B 點與 C 點間的電位差等於零。由於電場是保守的，故從 A 點移動電荷 q_0 到 C 點，無論經由那一條路徑，都需作相同的功。若試驗電荷 q_0 距電荷 $-q$ 無窮遠，則其間將無庫倫力，故 q_0 的電位能為零。因此，離淨電荷無窮遠的電位也被設為零。欲將電荷 q_0 從無窮遠運動到點 B，外界須每單位正試驗電荷作功

$W_{\infty \rightarrow B}$ 即為任何點B的電位 (electric potential) V_B 的定義

$$V_B = W_{\infty \rightarrow B} / q_0 \quad (19-10)$$

同理，任何帶電表面的電位，被定義為將每單位正試驗電荷從無窮遠處帶到表面所作的功。

異性電荷互相吸引，因此將一單位正試驗電荷從無窮遠移到帶有淨負電荷的表面，需作負功。帶有淨負電荷的物體具有負電位。同理，將一單位正試驗電荷從無窮遠移到帶有淨正電荷的表面，需作正功。故帶有淨正電荷的物體具有正電位。

距一孤立點電荷 q 分別為 r_A 與 r_B 的兩點間，其電位差為

$$\Delta V_{BA} = \frac{q}{4\pi\epsilon} \left(\frac{1}{r_B} - \frac{1}{r_A} \right) \quad (19-11)$$

此處， ϵ 為周圍介質的電容率。可藉設 r_A 為無窮遠，其電位 $V_A = 0$ 來決定距點電荷為 r_B 的電位。

$$V_B = [1 / (4\pi\epsilon)] (q / r_B) \quad (19-12)$$

同理，電荷 q 均勻地分佈於半徑為 r 的球形導體的電位為

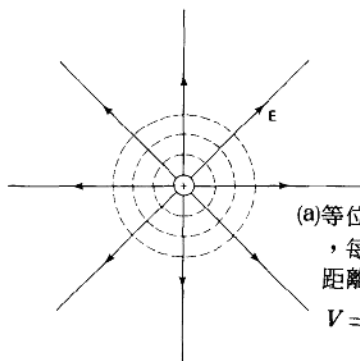
$$V = [1 / (4\pi\epsilon)] (q / r) \quad (19-13)$$

電位為有關電位能的純量，故電荷系統在某點的總電位，等於由系統中各電荷電位的代數和 (algebraic sum)。

$$V_{\text{總}} = \sum_i V_i = \frac{1}{4\pi\epsilon} \sum_i \frac{q_i}{r_i} \quad (19-14)$$

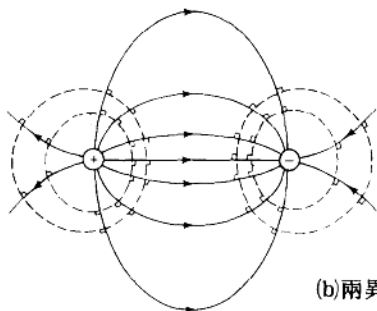
此處 r_i 為點到電荷 q_i 的距離。

例題 19-6 點電荷 $q_1 = 2.0 \times 10^{-8} \text{ C}$ 與 $q_2 = -1.5 \times 10^{-8} \text{ C}$ 在真空中相距 0.5m (圖 19-10)。求電荷連線的中心點A，與距 q_1 為 0.2m 且距 q_2 0.3m 的點間電位差。



(a)等位面為環繞孤立點電荷的同心球，每一等位面的電位與距電荷 q 的距離 r 成反比

$$V = [1 / (4\pi\epsilon)] (q/r)$$



(b)兩異性電荷間區域的等位面

圖 19-11 等位面（虛線）

須作功，且等位面上兩點間的電位差不等於零。

任何導體表面亦為一等位面。因為若電位差存在，電荷即在表面流動。

考慮在電場強度為 $\mathbf{E}$ ，將一正試驗電荷 q_0 移動一很小位移 Δs ，均一電場所作的為負功 ΔW 。若電荷上沒有外來限制（磁力），其位移平行於電場強度。故電場所作的功為 $\Delta W = -F \Delta s \cos 0 = -F \Delta s$

$$V = \sqrt{\frac{2 q \Delta V}{m}} = \sqrt{\frac{2 (1.6 \times 10^{-19} \text{ C}) (240 \text{ V})}{9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}}} \\ = 9.2 \times 10^6 \text{ m/s}$$

(d) 一個電子的重量

$$W = mg = (9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}) (9.8 \text{ m/s}^2) \\ = 8.9 \times 10^{-30} \text{ N}$$

所以電力遠大於重力。

習題

19-26 畫出相距某距離的兩個相同電荷周圍的等位面。

19-27 一個電子在 3000 N/C 的均一電場中運動多少距離，可使其動能增加 $5.0 \times 10^{-17} \text{ J}$ 。

答： 0.104 m 。

19-28 若真空管的陰極與陽極相距 $3.6 \times 10^{-2} \text{ m}$ ，並具有 320 V 的電位差，求其間的電場強度。

19-29 一個電子在相距 $1.5 \times 10^{-2} \text{ m}$ ，且有 120 V 電位差的兩極間加速。求(a)作用於電子上的平均電力，及(b)電子加速度，(c)假如電子最初為靜止，需多少時間才能運動 $1 \times 10^{-2} \text{ m}$ ，其所能達到的最大速率為何？

答：(a) $1.28 \times 10^{-15} \text{ N}$ ；(b) $1.4 \times 10^{15} \text{ m/s}^2$ ；(c) 3.8 ns ， $5.3 \times 10^6 \text{ m/s}^2$ 。

19-12 電 子

放電管 (discharge tubes) 是用來研究不同壓力下通過氣體的電的推移。它們由具有兩塊電極板的玻璃罩所組成。陰極 (cathode) 是對稱為陽極 (anode) 的正電極板而言。是保持負電位的電極板