
物 理 學

Principles of Physics

第 三 冊

電 磁 學

F. W. Sears 原著

吳 逸 瀚 合 譯
趙 富 鑫

龍門聯合書局

代 序

本書的翻譯，發動於1950年。當時約定王子昌先生譯力學、熱學、波動學和聲學，趙富鑫先生譯電磁學，沈德滋先生譯光學、原子物理學。力學於1951年9月，熱學、波動學及聲學於11月相繼出版。當即着手接排電磁學。因趙先生忙於系務，完成初稿，未及修正，停頓累月。適有吳逸瀚先生譯稿寄到，可是亦有一部份未經整理，習題亦未譯出。於是，由我局雙方建議：可各採雜所長，彙成合譯本；裁剪取捨和統一名詞術語工作，由我局編輯室擔任，並商請王子昌先生任終校。既徵得同意，方着手編排，工作遲滯，以至出版一再愆期，貽誤讀者，我局應作深入檢討。

本書29-36章，39-42章，以及44章，均採用吳氏譯稿，37、38、43、45、46五章，和全部習題採用趙氏譯稿。原書錯誤已發覺者，均經更正。但迄譯紕繆，和排校疏漏之處，在所難免，應由我局負責。希望及時指示，以便於再版時改正，至所感禱。

龍門聯合書局編輯室 1952,8,1.

目 錄

第二十九章	庫侖定律	505
29-1	原子的構造	505
29-2.	接觸起電現象	508
29-3.	導體與絕緣體	510
29-4.	電量。庫侖定律	511
29-5.	庫侖定律的證實。盧瑟福的有核原子	512
29-6.	單位制	515
	第二十九章 習題	519
第三十章	電場	520
30-1.	電場	520
30-2.	電場強度的計算	523
30-3.	電偶極子的電場	528
30-4.	連續分佈的電荷所起的電場	530
30-5.	電力線	533
30-6.	高斯定律	536
30-7.	導體內的電場與電荷	537
30-8.	高斯定律的應用	538
30-9.	密立根油滴實驗	539
30-10.	電介質強度	544
	第三十章 習題	545
第三十一章	電位	548
31-1.	靜電位能	548

31-2.	電位.....	551
31-3.	電位差.....	553
31-4.	電位與電荷的分佈.....	556
31-5.	電位梯度.....	560
31-6.	帶有電荷的球形導體的電位.....	564
31-7.	泊松方程式及拉普拉斯方程式.....	567
31-8.	電場強度、電位與電荷分佈.....	569
31-9.	等位面.....	570
31-10.	導體間電荷的分配.....	572
31-11.	范德格拉夫起電機.....	573
	第三十一章 習題.....	574
第三十二章	電流·電阻·電阻率.....	579
32-1.	電流.....	579
32-2.	電流的方向.....	582
32-3.	完整電路.....	582
32-4.	電導率.....	583
32-5.	電阻及電阻率。歐姆定律.....	585
32-6.	標準電阻器.....	587
32-7.	電阻的計算.....	588
32-8.	電流、電位差及電阻的量度.....	592
32-9.	焦耳定律.....	593
32-10.	電流的平均值及有效值.....	595
	第三十二章 習題.....	598
第三十三章	直流電路.....	602
33-1.	電動勢.....	602
33-2.	電路方程式.....	604

33-3.	電動勢的另一定義	606
33-4.	電路各點間的電位差	607
33-5.	電動勢座的路端電壓	609
33-6.	電位計	611
33-7.	電阻器的串聯及並聯	612
33-8.	含有數個電動勢座的電網絡	616
33-9.	克希霍夫定則	617
33-10.	惠斯通電橋	620
33-11.	功率	622
33-12.	功率及能的量度	625
	第三十三章 習題	626
	第三十四章 化學電動勢和溫差電動勢	632
34-1.	化學能和電動勢	632
34-2.	電極的電位	632
34-3.	電池	633
34-4.	氫極	634
34-5.	電動勢的計算	635
34-6.	氫離子濃度	636
34-7.	丹聶耳電池	637
34-8.	可逆性	639
34-9.	極化	640
34-10.	乾電池	640
34-11.	鉛蓄電池組	641
34-12.	標準電池	642
34-13.	電解	642
34-14.	水的電解	644
34-15.	化學的自由能	645

34-16.	溫差電動勢.....	645
34-17.	湯姆孫電動勢	646
34-18.	拍耳帖電動勢.....	647
34-19.	塞貝克電動勢.....	648
34-20.	溫差電動勢和溫度的關係.....	650
	第三十四章 習題.....	653
第三十五章 電介質的性質.....		654
35-1.	應電荷	654
35-2.	球體上的應電荷.....	657
35-3.	電化率、介質係數及電容率.....	660
35-4.	高斯定律的擴充。電位移.....	664
35-5.	邊界條件.....	667
35-6.	極化.....	669
35-7.	電介質內電荷間的力.....	671
	第三十五章 習題.....	676
第三十六章 電容和電容器.....		677
36-1.	隔離導體的電容.....	677
36-2.	電容器	677
36-3.	平行板電容器	679
36-4.	其他形式的電容器.....	683
36-5.	電容器的充電電流及放電電流.....	685
36-6.	電容器的串聯與並聯.....	688
36-7.	電容器充電後所具有的能量.....	690
36-8.	電場內的能量密度.....	691
36-9.	電容器板與板間的力.....	692
36-10.	位移電流.....	695

第三十六章 習題	698
第三十七章 磁場	702
37-1. 磁的現象	702
37-2. 磁場。磁感應強度	703
37-3. 運動電荷所受到的力	705
37-4. 帶電質點在磁場中的軌線	707
37-5. 迴旋加速器	708
37-6. e/m 的量度	712
37-7. 質譜儀	714
37-8. 作用在載電流導體上的力	716
37-9. 閉合電路所受到的力和轉矩	717
第三十七章 習題	721
第三十八章 電流計、安培計和伏特計。 直流電動機	724
38-1. 電流計	724
38-2. 支樞式電流計	726
38-3. 安培計和伏特計	726
38-4. 衝擊電流計	728
38-5. 電動力式電流計	729
38-6. 直流電動機	730
第三十八章 習題	732
第三十九章 電流和運動電荷的磁場	735
39-1. 電流元的磁場	735
39-2. 直導體的磁場	738
39-3. 磁感應強度的面積分和線積分	739
39-4. 平行直導體間的力。 安。	742
39-5. 圓形迴線的磁場	744

39-6.	螺線管的磁場	748
39-7.	運動點電荷的磁場	750
	第三十九章 習題	752
第四十章	應電動勢	755
40-1.	動生電動勢	755
40-2.	法拉第定律	759
40-3.	楞次定律	762
40-4.	電子迴旋加速器	762
40-5.	法拉第圓盤發電機	764
40-6.	旋轉線圈中的應電動勢	765
40-7.	直流發電機	767
40-8.	測定磁通量用的探索線圈	768
40-9.	電流計的阻尼	770
40-10.	渦電流	771
	第四十章 習題	772
第四十一章	電感	775
41-1.	互感	775
41-2.	自感	778
41-3.	電流在有感電路中的增長	780
41-4.	感應器所具有的電能	782
41-5.	感應器的串聯	783
	第四十一章 習題	786
第四十二章	物質的磁性	788
42-1.	引言	788
42-2.	磁效應的來源	789
42-3.	等值表面電流	791

42-4.	磁化率、磁導率及起磁強度.....	792
42-5.	磁化.....	798
	第四十二章 習題.....	801
第四十三章	鐵磁現象.....	802
43-1.	鐵磁現象.....	802
43-2.	居里點.....	804
43-3.	磁滯.....	804
43-4.	磁域說.....	808
43-5.	磁極.....	809
43-6.	地球的磁場.....	812
43-7.	起磁強度的普遍定義.....	813
43-8.	條形磁鐵的磁化情況.....	816
43-9.	條形磁鐵所受的轉矩.....	817
43-10.	磁矩。磁強計.....	819
43-11.	磁路.....	821
43-12.	磁路方程式的導出.....	824
43-13.	磁場中每單位體積的能量.....	827
	第四十三章 習題.....	828
第四十四章	交變電流.....	830
44-1.	交流串聯電路.....	830
44-2.	交流的方均根值或有效值.....	832
44-3.	電壓與電流的相角關係.....	835
44-4.	交流電路各點間的電位差.....	836
44-5.	旋轉矢量圖.....	839
44-6.	並聯電路.....	841
44-7.	共振.....	842

44-8.	交流電路的功率	845
44-9.	變壓器	848
44-10.	三相交變電流	851
	第四十四章 習題	855
第四十五章	電振盪和電磁波	858
45-1.	電振盪	858
45-2.	阻尼振盪	860
45-3.	持續振盪	861
45-4.	電磁輻射	862
45-5.	電磁波的速度	864
45-6.	坡印亭矢量	870
45-7.	反射和折射。費涅耳公式	872
	第四十五章 習題	876
第四十六章	電子學	878
46-1.	元質點	878
46-2.	熱離子發射。二極真空管	880
46-3.	多極真空管	887
46-4.	陰極射線示波器	888
46-5.	光電效應	889
46-6.	X 射線管	892
46-7.	氣體導電	893
	第四十六章 習題	896
附錄		898
	物理常數表	898
	符號表	899
索引		

第二十九章

庫 倫 定 律

29-1. 原子的構造。 “原子”的原來意義乃指宇宙間所可想像的最小粒子；唯其為最小的粒子，故不能再分解為更小的粒子。實則此義殊不妥當。現在所謂原子者，並非最小的粒子。因為任何原子無不由所謂“次原子質點”構成。各種原子之所以不同，只在其次原子質點的佈置簡繁有別而已。現有各種方法，可將某些次原子質點，個別的或成羣的從原子分離而出。分離次原子質點顯著的例，要算原子核蛻變過程中的原子核分裂。

次原子質點為構成原子的基礎，可分三類：電子、中子及質子。固然還有其他的次原子質點或已被發現，或尚在假想中，但他們的存在只是暫時的，並不構成一般物質的一部分。所有原子，其次原子質點的排列無不合乎一般的規律。質子與中子結成一緊密的集團，稱為原子核。原子核倘想像其為球體，它的直徑的數級為 10^{-12} 厘米。原子核的外面有許多電子，離開原子核都很遠。1913年丹麥物理學家波耳所提供的原子模型，電子係沿圓周軌道或橢圓軌道繞原子核迴轉。此種模型雖然不能相信它是十分正確，但仍可用以想像原子的構造。整個原子的大小用電子軌道的直徑來決定，這個直徑的數級為 2×10^{-8} 或 3×10^{-8} 厘米，約較原子核直徑大一萬倍。波氏所提出的原子可視為一微小的太陽系。太陽居於中央，相當於原子核，和太陽相距甚遠的各行星，相當於各電子。

一個質子和一個中子的質量幾乎相等，各約等於一個電子質量的1840倍。所以每一原子的質量幾乎都集中在原子核內。此等次原子質點的質量可計算如下。我們知道每一克分子的單原子氫含有6.02

$\times 10^{23}$ 個質點(阿佛加德羅常數),共有質量 1.008 克。所以每一單獨的氫原子,它的質量倘算至三位有效數字,則為

$$\frac{1.008}{6.02 \times 10^{23}} = 1.67 \times 10^{-24} \text{ 克} = 1.67 \times 10^{-27} \text{ 仟克。}$$

上面已經講過所有原子皆由三種次原子質點構成,但氫原子卻是唯一的例外。(關於同位素的問題將在下節討論。)氫原子核只是一個質子,在它外面也只有一個電子。所以在氫原子的全部質量中,1/1840 係電子的質量,其餘係質子的質量。倘把這些質量算至三位有效數字,則得

$$\text{電子的質量} = \frac{1.67 \times 10^{-24}}{1840} = 9.11 \times 10^{-28} \text{ 克} = 9.11 \times 10^{-31} \text{ 仟克。}$$

$$\text{質子的質量} = 1.67 \times 10^{-24} \text{ 克} = 1.67 \times 10^{-27} \text{ 仟克。}$$

又因中子的質量幾乎與質子的質量相等,所以

$$\text{中子的質量} = 1.67 \times 10^{-24} \text{ 克} = 1.67 \times 10^{-27} \text{ 仟克。}$$

平常的氫都是三種不同氫原子的混合物,這幾種氫原子就稱為氫的同位素。除上節所述只含有一個質子及一個電子的氫原子之外,還有重氫原子即氘原子,和氚原子。(註) 平常,氫內氘原子的成分只有 5000 分之一,氚原子之成分則更少。氘原子的原子核(稱為氘核)共有一個質子及一個中子。氚原子的原子核含有一個質子及兩個中子。不論氘或氚原子,在其原子核外皆只有一個電子。

為對此三種不同形式之氫加以區別起見,我們把它們的化學符號分別寫為 ${}_1\text{H}^1$, ${}_1\text{D}^2$ (倘用一致的符號則應寫為 ${}_1\text{H}^2$) 及 ${}_1\text{H}^3$ 。附記在字母左下角的數字用以表示原子核內的質子數,亦即表示原子核外所有的電子數;這些數字稱為原子的原子序數。每一原子,在正常狀態或在未電離狀態時,所有的電子數即等於其所有的質子數。這和質子及電子的電性質直接有關的事實,以後再來說明。右上角的附誌表示原子核內所有的質點數目,也是和該原子的原子量最接近的一個整數。顯然可知氘原子的質量幾為 ${}_1\text{H}^1$ 原子質量的兩倍,氚原子則幾為其三倍。

(譯註) 氘讀如刀,氚讀如川,而只含一電子與一質子的氫稱為氕,讀如撇。

原子的化學性質主要決定於核外電子的個數，而與原子核的質量只有些微的關係，所以從化學的觀點來說，同位素間的區別是微不足道的。

在週期表中排在氫後面第一個元素為氦。氦的同位素中成分最多者為 ${}^4\text{He}$ ，其原子核共有兩個質子及兩個中子，還有兩個核外電子。這一個同位素的原子核稱為 α 質點。氦尚有一種同位素 ${}^3\text{He}$ ，其原子核共含有兩個質子及一個中子，在氦中它所佔的成分約為 100,000 分之一。在週期表中，排在氦後面第一個元素為鋰，它的成分約為 92% 的 ${}^7\text{Li}$ 和 8% 的 ${}^6\text{Li}$ 。這些原子內質子、中子及電子的佈置情形讀者可自行推求。

原子的複雜性，跟着它在週期表中的順序而增加。天然存在着的，最複雜的原子為鈾，係 ${}_{92}\text{U}^{238}$ 、 ${}_{92}\text{U}^{235}$ 、 ${}_{92}\text{U}^{234}$ 三種同位素的混合物；其相對的成分為 99.28%、0.71% 及 0.006%。尚有更複雜的原子，在原子能的發展過程中，亦曾經“製成”過，如釷 ${}_{90}\text{Th}^{232}$ 及鐳 ${}_{88}\text{Ra}^{226}$ 。鐳的原子核共含有 88 個質子及 138 個中子，另有 88 個核外電子。次原子質點的總數竟達 333 個之多！

質子與電子間，除萬有引力外，還發現有其他的力作用着。並且這種力比較萬有引力還大得多，對於這種力的解釋，可以說是由於質子與電子的一種特性，即所謂電或電荷。這點與解釋萬有引力時說物質具有引力質量的特性正相似。但我們所知萬有引力只係相互吸引的力，而電力則引力與斥力二者都有。這是萬有引力和電力不同之處。質子施斥力於其他的質子，電子亦施斥力於其他的電子；但電子與質子間則互相吸引。因此有兩種不同電荷出現。所以把其中一種規定為正(+)電荷，另一種規定為負(-)電荷。質子具有正電荷，電子則具有負電荷。根據觀察電子與質子間力的作用，我們常稱，相同電荷互相排斥，不同電荷互相吸引。

所有電子各具有完全相同的負電荷；所有質子亦各具有完全相同的正電荷。不但如此，在任何一系統中，例如在一正常的原子中，所含的電子個數必與其所含的質子個數相等，故不顯出有淨電荷。由此得

一結論：一個質子所有的電荷與一個電子所有的電荷符號相反，而大小相等。電荷量的大小小於一個電子或一個質子所具有者，還沒有發現過。所以一個電子或一個質子所具有的電荷應視為電荷最小的自然的單位。

電子與質子間的引力和斥力僅與此等質點間的距離有關。此外還發現電子與質子間因相對運動而起的另一種力。磁現象就是由於這些質點間相對運動而起的力。兩根條形磁鐵間明顯的引力與斥力，以前曾應用與電荷相似的“磁性實質”即所謂“磁極”的理論來解釋。但我們都很熟悉通有電流的導線，其周圍也發現有磁效應。其實，電流僅係電荷的移動。所以現在把一切的磁效應都歸源於電荷的相對運動。因此電與磁並非兩種不相聯繫的學科，而是都由電荷性質所引起的彼此相關的兩種現象而已。

以上的導言，只扼要說明過去數百年包羅極廣的實驗學識的一小部分而已，至於最近的發展情形，目下還在許多研究所研究中。其中某些實驗將在本書中述及。

29-2. 接觸起電現象。 照上節所述，普通物質的原子所含電子數與其所含質子數相等。所以物質平常不呈現電效應，稱為在電的中和狀態，或稱為沒有帶電荷。凡用某種方法推翻某物體內電子數量與質子數量的平衡者，則稱該物體帶電。換言之，凡物體含電子過剩或不足者，都稱為帶電體，或簡稱為電荷。改變正電荷與負電荷間的正常平衡方法很多。歷史上最古的便是一般所謂摩擦起電現象。其實這個現象不如稱它為接觸起電更為適當。因為所需要的只是緊密接觸而已。將一物體與另一物體的表面劇烈摩擦，不過使得面與面間更多的點發生緊密接觸而已。

倘硬橡皮棒與貓皮摩擦後，把它攜近用絲線懸掛的通草球，則通草球初被橡皮棒吸引，但一經接觸便被橡皮棒推斥。再把這樣處理過的兩個通草球來試驗，則發見它們互相推斥。在另一方面，每一通草球都

可被貓皮所吸引。這種效應可解釋如下：當橡皮棒與貓皮接觸時，有電子自動從貓皮移至橡皮棒。因此橡皮棒獲得過剩的電子，故帶有負電荷；同時貓皮失去若干電子，故帶有正電荷。

未曾帶有電荷的通草球何以先被橡皮棒吸引，其理由以後說明之（在第三十五章中說明）。當通草球與帶有負電荷的橡皮棒接觸後，棒上過剩的電子有若干個移至通草球上。根據橡皮棒對通草球的推斥，或兩個帶有電荷的通草球間的相互推斥，顯然可見帶有相同電荷的物體必互相推斥。由通草球與貓皮間的吸引，證明帶有不同電荷的物體必互相吸引。靜電學中所有的現象，只是說明帶電體間這些吸力或斥力的作用。亦即說明電荷的最小實體（電子及質子）之間力的作用。靜電學這個名詞似欠妥善，因為受電力作用的電荷常要運動的。

由實際量度可知：將橡皮棒與貓皮相接觸後，橡皮棒所獲得的電荷與貓皮所獲得的電荷恰好相等，但符號相反。因此在使物體帶電荷的過程中，並不創造電荷，祇將一個物體上的電荷轉移至另一個物體上。僅憑此項實驗，還不能說明所遷移者究竟是何種質點。但從其他事實可以證明，所遷移者係電子。

一帶有電荷的通草球可用作探驗體，以探驗另一物體是否帶有電荷。圖 29-1 所示之**金箔驗電器**，用以探驗電荷，當更為靈敏。兩條薄薄的金箔或鋁箔 *A*，緊裝於金屬桿 *B* 的一端。此金屬桿穿過用橡皮、琥珀或硫製成之支座 *C*。外壳 *D* 上開有小窗，以便觀察裏面的金箔，同時又可防止空氣流動的影響。當帶電體與此驗電器的端鈕接觸時，則此兩金箔各得符號相同的電荷，因而互相推斥，由兩金箔張開的程度可以量度其所獲得電荷的多少。

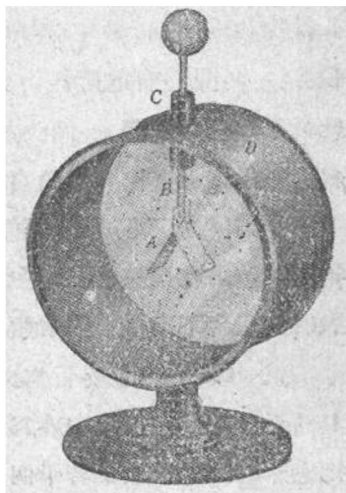


圖 29-1. 金箔驗電器。

量度電荷大小較合適的儀器為弦綫

靜電計，其原理可用圖 29-2 來說明。一根細線 A （即“弦線”）略受張力而張緊於帶有正負電荷的兩金屬板 B 與 C 之間。

今假定以正電荷給與細線，則細線受 B 板上正電荷推斥，並受 C 板上負電荷吸引。結果，細線稍向右曲。再以量度用的顯微鏡，觀測細線中點的位移，即可量度靜電計所獲得的電荷。

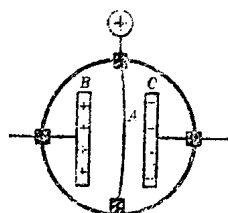


圖 29-2. 弦線靜電計。

倘若將具有數百伏電位差的“B”電池的一極，接至驗電器的端鈕，另一極接至該驗電器的外殼上，則兩金箔亦將張開。此與將帶電體上由接觸而形成的電荷給予金箔的情形相同。用前述兩種不同方法所給予金箔的電荷，在種類上並無區別。故一般而論，“靜電”與“流電”並無不同。電流這個名稱乃指電荷的流動，而靜電學所討論者，大部份為在靜止狀態時電荷間的相互作用。所以在上面兩個場合，電荷本身皆無非是電子和質子。

29-3. 導體與絕緣體。 將銅線的一端接於驗電器的端鈕上，另一端用玻璃桿支住，如圖 29-3 所示。倘用帶有電荷的橡皮棒與支在玻璃桿上的銅線端相接觸，則驗電器內的金箔立即張開。可見必有電荷經由銅線遷移。此種銅線稱為**導體**。倘改用橡皮帶或絲線以代銅線重作同樣的實驗，則金箔並不張開。所以稱絲線及橡皮為**絕緣體**，亦稱**電介體**。電荷經由實際物質的運動在第三十二章中當更詳細說明。但在此，可以這樣說，大多數的物體皆不出乎上述兩類。導體准許電荷通過，絕緣體則不然。

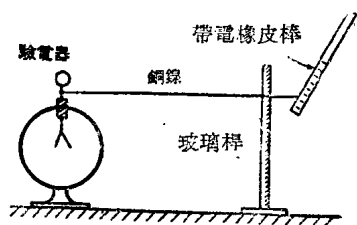


圖 29-3. 銅為導體。

就一般而論，金屬皆為良好的導體，而非金屬則為絕緣體。金屬所具的正價及其在溶液中成為正離子的事實，皆所以說明金屬原子容易把它外層的電子放棄若干個。在金屬導體內，如銅線之類，每有少數的外層電子與母體原子分離，而在該金屬體內自由運動。此種電子稱為

自由電子。剩下來帶有正電荷的原子核及其餘的電子，則仍留在原位不變。在另一方面，絕緣體內則無此種自由電子存在。（即使有之，亦為數極微。）

接觸起電現象，並不限於橡皮與貓皮，亦不限於一般絕緣體。任何兩種不同的物體相接觸時，莫不呈現此種現象，不過在程度上有所差別。如用導體，則應裝於絕緣柄上，否則所帶的電荷立即漏掉。

29-4. 電量。庫倫定律。 具有過剩的電子或質子的物體稱為帶電體。帶電體所有淨電荷的大小即可就此項過剩的電子或質子的數量以說明之。但實際用以表示物體所帶電荷的單位，遠較每一電子或每一質子所具有的電荷為大。我們現在用字母 q 或 Q 以表示物體上十電荷或一電荷的過剩量。關於單位電荷的定義姑暫擱置，留待以後說明。

關於帶電體間作用力的定律，庫倫 (1736-1806) 於 1784-1785 年間首先作數量方面的研究。他用扭秤以量度帶電體間的作用力。十三年後卡文狄許亦用此種扭秤量度萬有引力。庫倫在他所量度的準確範圍內，證明兩帶電體間的引力或斥力遵守“平方反比”定律，即

$$F \propto \frac{1}{r^2}.$$

在庫倫的時代，關於電量的概念尚未能明確認識，對於電荷的單位以及如何去量度它的方法也沒有擬定出來。到後來才證明，相隔一定距離的兩個帶電體，彼此相互作用的力與各帶電體所有電荷 q' 及 q 的乘積成正比。即

$$F \propto \frac{qq'}{r^2}. \quad (29-1)$$

此比例式乘以常數 k 後，便成等式：

$$F = k \frac{qq'}{r^2}. \quad (29-2)$$

此比例常數 k 的大小，視所用力、電荷、距離的單位而定。式(29-1)或式(29-2)稱為庫倫定律。今以文字敘述如下：