

部定大學用書

電 磁 學

國立編譯館大學用書編審委員會主編

周達如編著

國立編譯館出版
正中書局印行

部 定 大 學 用 書

電 磁 學

(上册)

國立編譯館大學用書編審委員會主編

周 達 如 編 著

國 立 編 譯 館 出 版
正 中 書 局 印 行



版權所有

翻印必究

中華民國五十九年五月臺初版

中華民國六十四年二月臺三版

部定電磁學（全二冊）
大學用書

上冊 基本定價 貳元叁角

（外埠酌加運費滙費）

主編者	國立編譯館
編著者	周達如
出版者	國立編譯館
發行人	黎元譽
發行印刷	正中書局

（臺北市泰安街一巷三號）

海外總經銷 集成圖書公司

（香港九龍油麻地北海街七號）

海風書店

（日本東京都千代田區神田神保町一丁目五六番地）

行政院新聞局登記證 局版臺業字第〇一九九號
（1000） （6399）西

序

電磁學爲若干自然科學及大部分工程科學之理論基礎。其全部理論均係包含於 Maxwell 四種場關係與作用於一運動電荷上 Lorentz 磁力之公式內。本書之目的在闡明此等場關係與電磁力之基本觀念，並建立此等關係之理論根據，作爲讀者將來研究其他專門學問之理論基礎。此等觀念最好能用向量表出，故本書由最初開始即係將向量運算與靜電場同時講授；其後一切理論均係用向量運算，遍及全書。讀者僅須具備向量方面之初步知識，當不致於閱讀時遭遇若何困難。書中所有向量均係用粗體字排印。本書除於各章節內敘述若干電磁有關之發展歷史外，其餘均係根據近代物理、固體理論以及物理數學之新觀念編寫者。

本書對於理論之說明力求嚴正。曾於第三章對於一般向量場之 Helmholtz 定理及無限大平行板真空電容器內均勻電場之理想化情形；於第八章對於無限長真空螺管線圈內均勻磁場之理想化情形；以及電流變化時正負電荷間之位移電流密度 $\dot{\mathbf{D}}$ 成爲漩場來源之觀念；於第十章對於一般向量場之向量位與無向量位；於第八章及第十三章對於空間能流之觀念，均不憚煩，詳加闡述。同時曾於書中插入場作圖法、體形變換；發電裝置與用電裝置內之能量變換；阻體、容體與感體；以及雙極振盪與導波器等章節，以便理論與實際得以兼顧。

本書經教育部審定爲部定大學用書，可以用作我國大專學院物理系、電機系或電子系一學年電磁學課程之教本，備有充分教

2 電 磁 學 (上)

材供給教師選擇。對於電路之重要原理及若干電儀表有關之知識，本書均有簡明之敘述，可以配合物理系電磁有關之實驗課程；電機系如開有電路及電儀表等課程時，上述教材即可免予講授，以節省授課時間。每章之後均附有習題甚多，可供教師挑選，用為學生家中作業之教材。習題中附有 * 記號者較為重要，曾於附錄內將答案列出。

本書初次出版，編校雖力求完善，謬誤仍難避免。敬希各界指正。

著 者 謹 識

電 磁 學

目 次

第一章 物質、電荷、及所附之能量；單位系.....	1
1-1. 電子、質子、與中子.....	2
1-2. 原子構造.....	5
1-3. 質量與能量.....	11
1-4. 電荷之單位；Coulomb 定律.....	13
1-5. c.g.s 單位系.....	17
1-6. Gauss 單位系 Heaviside-Lorentz 單位系.....	23
1-7. 合理化 m.k.s. 單位系.....	25
第二章 靜電場.....	36
2-1. 電力之向量性質.....	37
2-2. 靜電荷周圍之電場.....	44
2-3. 點電荷羣周圍之合成電場.....	48
2-4. 分布電荷周圍之電場.....	52
2-5. 靜電位.....	58
2-6. 電場強度之線積分.....	64
2-7. 電位梯度.....	67
2-8. 電通與電通密度.....	71
2-9. 三向量之乘積.....	76

第三章 發散場與漩場	87
3-1. Gauss 定律	88
3-2. 向量場之發散	94
3-3. Poisson 方程式與 Laplace 方程式	102
3-4. Gauss 定律之應用	107
3-5. 容體與電容	115
3-6. 向量場之旋度	119
3-7. Stokes 定理	124
3-8. Helmholtz 定理	128
第四章 靜電場有關之若干理論解法	141
4-1. 充有電荷之球形導體	141
4-2. 電像原理	147
4-3. 對於靜電感應現象之電像解法	151
4-4. 單一性定理	156
4-5. 使用球坐標之典型解法	159
4-6. 使用圓柱坐標之典型解法	165
4-7. 使用直角坐標 Laplace 方程式之解法	170
4-8. 無限電像系列	174
4-9. 部分電容	179
第五章 電場作圖	192
5-1. 複量	193
5-2. 二元問題之複變數函數解法	196
5-3. 電場作圖法	203
5-4. 電場作圖之應用	207

5-5. 偏心圓柱之二元問題.....	211
5-6. 偏心圓柱解法之應用.....	216
5-7. 電力線作圖法.....	221
5-8. 形體變換.....	225
5-9. Schwarz-Christoffel 變換	230
第六章 介 質	244
6-1. 絕緣物質之固體結構.....	244
6-2. 介質之極化.....	248
6-3. 介質電場內 Gauss 定律之應用.....	254
6-4. 極化係數與介質常數.....	260
6-5. 境界條件.....	266
6-6. 均勻電場內絕緣體之極化.....	272
6-7. 單個原子之顯微性電場.....	277
6-8. 靜電場內之能量關係.....	280
6-9. 發生一靜電場所需之總能量.....	286
6-10. 永久電石.....	292
第七章 穩定電流.....	301
7-1. 金屬之導電與表面電子發射.....	301
7-2. 液體、氣體、與固體介質內電流載體之運動.....	308
7-3. Ohm 定律, 阻體與電阻.....	313
7-4. 發電裝置內能量與功率之變換.....	320
7-5. 用電裝置內能量與功率之變換.....	331
7-6. 穩定電流場.....	334
7-7. 對於電路之若干重要解法.....	341
7-8. 直流電位計與直流電橋.....	350

第一章 物質、電荷、及所附之 能量：單位系

物體均由物質之組合而形成，物體之最小成分公認為原子；一原子又係由若干荷電粒子所構成。於正常狀態下，即原子未受任何外力時，其所含之正負電荷應相等，原子屬於電中性。其運動或與運動有關之一切現象，可受普通力學之支配。但於原子失去或多有一荷電粒子時，此原子即被電化 (be electrified)。其運動或與運動有關之一切現象，則屬於電磁學討論之範圍。原子內各荷電粒子所帶之電荷，即為吾人所謂“電” (electricity) 之來源。電荷之實質與成因，目前尚未能具體瞭解。不過公認電荷為一種最原始之物理原動力，可藉以使能量由一種形式變換為另一種形式。例如，若能由任何方法使一中性物體之電荷，分離為其正負成分時，此兩成分間即存有一電位差 (Potential difference)，此相當於位能形式之一種。而此種位能又可迅速變為其他形式之能量，例如，被變為荷電粒子運動時之動能或電能，以及正負荷電粒子結成中性分子所變換之化學能均屬之。因電荷所附之能量可迅速變形，乃使“電”廣泛為吾人所用，成為目前動力與康樂之主要來源。

2 電 磁 學 (上)

1-1. 電子、質子、與中子

構成原子之基本粒子，一般可分為下述之數種。

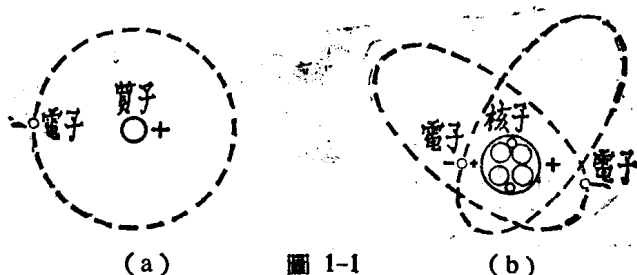
A. 電 子

1891年，Stoney 於其電解實驗計算游子 (ions) 所帶電量時，主張有基本電量 (electric elementary quantum) 存在，所謂基本電量即為不能再分之最小電量，Stoney 曾將此種基本電量命名為電子 (electrons)。但以前 Crookes 於研究真空管放電時，亦曾於 1879 年假定陰極線 (Cathode ray) 係由甚多微小電粒子之運動所形成；並曾主張一切物體之最小單元即為此等電的微粒子，咸認為此即 Stoney 以後所謂之電子。1896 年，Lorentz 於實驗電磁感應時，證明原子內有電子存在；並假定有自由電子 (free electrons) 與束縛電子 (bound electrons) 之分。自由電子可於導線內自由運動，感應電流即為自由電子之運動所傳導；束縛電子緊結於原子內部作軌道運動，於正常狀態下不能脫出其原子母體。1897 年，J.J. Thomson 為將原子內帶有負電荷之微粒子於 X 線實驗加以孤立之第一人，並將電子所帶之電荷加以測定。此等微粒子即為電子之事實遂得以證明。此乃電子學說之開端。

B. 質 子

1903 年，J.J. Thomson 開始考慮原子之構造，以為原子係由一中心物質及外圍若干繞之運動之電子所構成，中心物質之密度甚大。1913 年，Rutherford 與 Bohr 對 Thomson 之原子構造加以修正，以為原子應包含一原子核 (atom nucleus) 及外圍作環繞運動之若干電子，一如行星繞太陽之運轉。同年，Moseley 於試驗 X 線分光時發表其心得，認為原子內環繞原子核運動之電子

數，應與其原子序相同。1916 年，Sommerfeld 與 Bohr 所設計之原子模型，以電子繞原子核運動之軌道為圓形或橢圓形。例如，第 1 號元素之氫原子，於正常狀態下，其原子核帶有一個正基本電荷，核外有一個電子繞之作軌道運動，氫原子之全部質量幾乎均係包



含於其原子核內，且係所有元素內最簡單之原子核組織，特名之為質子 (proton)。其情形如圖 1-1(a) 所示。至於第 2 號元素之氦原子，其質量約為氫原子之 4 倍，但帶有兩個正基本電荷，故其原子核假定係由四個質子及兩個核內電子所組成。因此，於正常狀態下應有兩個核外電子繞之作軌道運動，以便其整個原子成為電中性。軌道則係假定為橢圓形。其情形如圖 1-1(b) 所示。至斯時為止，一般認為物質均係以質子與電子之方式組成物體。1895 年所發現之 α 放射線，以後即被證明不外為氦原子核之一種游離狀態 (ionized state)。

C. 中 子

1931 年，Bothe 與 Becher 以 α -粒子 (α -particle) 撞擊原子核使之人工破壞成功後；1932 年，Joliot-Curie 夫婦即假定原子核係由質子與中子 (neutron) 所組成，並明示中子為一個質子與一個電子之結合。因此，中子之大小及質量與質子相仿，但不

4 電 磁 學 (上)

帶任何實際電荷。表 1-1 即示此三種基本粒子之電荷及質量。同年不久, Chadwick 以快速運動之 α - 粒子撞擊第 4 號元素鈹 (beryllium) 原子核使之人工破壞後, 放出一中子而形成第 5 號元素硼 (boron) 之輕同位素 (isotopes)。對於中子之存在遂得以證明。

表 1-1

粒 子 名 稱	電 荷 (cl)	質 量 (kg)
電 子	-1.602×10^{-19}	9.107×10^{-31}
質 子	$+1.602 \times 10^{-19}$	1.6729×10^{-27}
中 子	0	1.6751×10^{-27}

化學週期表中最初幾號元素之原子核組織如表 1-2 所示。表中除正規原子外, 氘₂為氫之重同位素, 一般稱為重氫或氘(deute

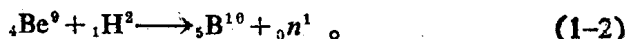
表 1-2 若干輕元素之原子核組織

原子序	化 學 元 素	質量	核子記號	原 子 核 組 織
1	氫 (Hydrogen)	1	${}_1\text{H}^1$	 1 質子
	氫 ₂ (Denterium)	2	${}_1\text{H}^2$	 $\left. \begin{array}{l} 1 \text{ 質子} \\ 1 \text{ 中子} \end{array} \right\} 1 \text{ 雙子}$
2	氦 (Helium)	4	${}_2\text{He}^4$	 $\left. \begin{array}{l} 2 \text{ 質子} \\ 2 \text{ 中子} \end{array} \right\} 1 \alpha\text{-粒子}$
3	鋰 ₆ (Lithium ₆)	6	${}_3\text{Li}^6$	 $\left. \begin{array}{l} 3 \text{ 質子} \\ 3 \text{ 中子} \end{array} \right\} \begin{array}{l} 1 \alpha\text{-粒子} \\ 1 \text{ 質子} \\ 1 \text{ 中子} \end{array}$
	鋰 (Lithium)	7	${}_3\text{Li}^7$	 $\left. \begin{array}{l} 3 \text{ 質子} \\ 4 \text{ 中子} \end{array} \right\} \begin{array}{l} 1 \alpha\text{-粒子} \\ 1 \text{ 質子} \\ 2 \text{ 中子} \end{array}$
4	鈹 (Beryllium)	9	${}_4\text{Be}^9$	 $\left. \begin{array}{l} 4 \text{ 質子} \\ 5 \text{ 中子} \end{array} \right\} \begin{array}{l} 2 \alpha\text{-粒子} \\ 1 \text{ 中子} \end{array}$

rium), 其質量為氫之 2 倍, 其原子核則係由一質子及一中子所組成, 又稱為一雙子 (deuteron)。第 3 號元素鋰, 則為鋰 (Lithium) 之輕同位素, 其質量為氫之 6 倍。上述 Chadwick 製造中子之事項, 可由下示之核子反應式 (nuclear reaction equation) 表示之。今因 1α - 粒子適為 2 氦核之結合, 故以快速 α - 粒子撞擊鈹核子 ${}_{4}\text{Be}^4$ 時, 一方面 α - 粒子發生對裂 (nuclear fission), 即



另一方面其所生之 ${}_1\text{H}^2$ 可與一個鈹核子發生反應而放出一個中子, 即



上式中之核子記號, 右上角之指數示質量, 左下角之指數示正電荷。 ${}_5\text{B}^{10}$ 即為第 5 號元素硼之輕同位數, ${}_0n^1$ 則示一中子, 其質量為 1 及電荷為零。

1-2. 原子構造

原子構造 (atomic structure) 自 1913 年經 Bohr 制定後, 漸次發展與改良, 每原子包含一原子核及若干繞之作軌道運動之電子。最簡單之氫核僅為一個質子, 其他較重之原子核可含有更多之質子與中子。因電子質量遠較質子質量為小, 故原子內質量之極大部分, 均係包含於核子內。核子係質子與中子非常緊密之結合, 較重原子之核子內, 其質量雖可較電子之質量大至數十萬倍; 但其所佔領之空間則較電子佔領之空間所大有限, 吾人不難想像原子內中心物質密集之程度。不過究竟係何種力量可使核子內之質子與中子如此緊結, 目前尚未能澈底明瞭。因原子核所帶正基本電荷之個數與原子序相同, 故一正當中性原子之軌道電子數亦應與

6 電 磁 學 (上)

原子序相同。每電子附有一負基本電荷等於 -1.602×10^{-19} 庫 (coulomb)。根據 Bohr 之原子構造, 電子可視作一附有負基本電荷之質量粒子環繞原子核運動; 至於電荷之實質如何? 電荷究係如何附着於此種質量粒子? 以及作用於正負電荷間電力之實質如何? Bohr 並無深入之說明。根據 1925 年以來 De Broglie, Schrödinger 等人所建立之波動力學 (wave mechanics), 則係將電子視作原子核周圍一種高度密集類似波動之能量小包 (energy packet), 於物質波 (mass wave) 內在各相鄰原子間可維持其一定能量而不致漸次消失。對於電荷之構造, 近年來當不乏學者正在研究, 可能基於波動理論之觀念, 對於物質運動時所附着之電的引力及斥力較易說明。不過吾人於電磁學入門, 爲易於了解起見, 最初仍以將電子視作一荷電之質量粒子, 較爲簡便。

原子內環繞核子之電子軌道, 其直徑約爲 10^{-10}m 之程度, 而核子之直徑則約爲 10^{-14}m 或更小。若將電子視作較核子更小之圓球, 則其於 10^{-10}m 直徑軌道上運動時, 原子內空洞之情形, 適足以與一太陽系 (solar system) 之縮小模型相比擬。常被稱爲原子行星模型 (planetary model of the atom)。因此, 電子除公轉外, 尚須作自轉 (spin); 核子亦作適當之自轉。於一定軌道上運動之電子, 因其繞核子運動之切線速度, 可有一動能; 因受核子作用之引力, 亦有一位能。於任何時點, 原子內一圓形軌道上運動電子之離心力 (mv^2/r), 均須等於核子作用於電子之引力, 以達成一動力平衡 (dynamic equilibrium)。因電子自轉時電荷隨之轉動, 根據 Lorentz 之電子理論, 電荷係分布於電子表面, 此相等於一環繞電流 (circulating current), 可產生一磁場於其轉軸之方向, 故電子尚可具有磁能 (magnetic energy)。一電子於穩定軌道上運動而

未受外力時，其總能量即始終不變。但於此軌道爲橢圓形時，其總能量雖亦保持不變，不過其位能與動能將不斷互相變換。例如，原子核位於橢圓軌道之一焦點上，電子之運動漸次接近原子核時，位能減小而動能增大；漸次遠離原子核時，動能減小而位能增大；總能量仍保持不變。故電子離原子核愈近時之速率將愈大，離之愈遠時之速率將愈小。

目前地球上自然存在之元素僅有 92 種，不過大多數元素含有幾種輕或重同位素。各同位素之核子組織雖有差別，但其軌道電子之分布則無何不同。由輕元素至重元素之各種原子內，軌道電子係分布於 $K, L, M, N, O, \dots$ 等 7 層軌道，其分布情形不難於若干物理或化學書籍中獲知之。一般離原子核愈近軌道層電子之能量亦愈小，欲使一電子升至較遠軌道層運動時，必須接受外來能量。爲比較原子內各層軌道電子能量之多寡，通常係以某一定特殊能量爲基準，並由此以決定原子內各電子所在軌道之能階 (energy level)。例如，氫原子可以其絕對零度時電子圓形軌道之能量爲基準，謂之氫原子之正常能量狀態或基本能量狀態 (fundamental energy state)。正常狀態下各原子最高層軌道上運動之電子，謂之原子之價電子 (valence electrons)。整個原子內電子之分布，任何元素均有一定；價電子以內各層軌道電子之能量，常遠較價電子之能量爲小，故僅由價電子之個數及其能階之高低，即可決定元素之物理及化學性質。蓋一原子損失一或二個價電子時，即可成爲一價或二價之正游子。

原子內之電子軌道層，除最接近原子核之 K 殼 (K -shell) 外，其他各層軌道尚可含有若干副殼 (subshells)。所有各層軌道上之

電子數及其能階，均可由量子理論(quantum theory)解電子波動方程式，並參照由實驗所得各種原子之光譜 (spectrum) 加以決定。此等問題屬於物理學之範疇。目前對於大部分元素，各種原子內所有軌道電子之能階，除有極少數幾個疑問外，幾乎全部均已算出。此等能階均係就絕對零度決定者，蓋物理學中大多數問題，均係以絕對零度時之情形為正常狀態。當物體之溫度由絕對零度漸次上升時，原子內若干軌道電子因接受外加熱能，可由較低層軌道上升至較高層軌道運動，此種情形可由最簡單之氫原子加以說明。一瓶氫氣於絕對零度時，所有氫原子均係靜止於容器底部，且作均勻之排列；同時各原子之唯一核外電子均應在其離原子核最近之 K 殼圓形軌道上運動，亦即在其能階最低之軌道上運動。若以此軌

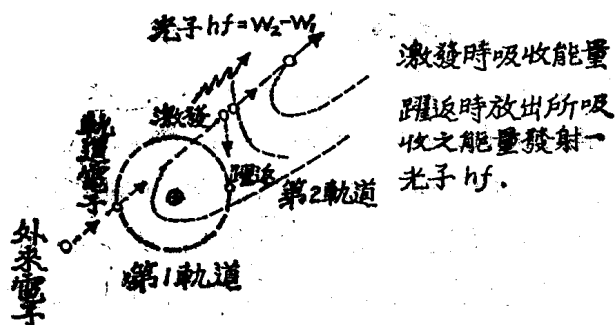


圖 1-2

道為正常軌道 (fundamental orbits)，即所謂氫原子之第1軌道，電子之能量為 W_1 時，則外來一電子以高速撞擊其附近一氫原子之軌道電子，如外來電子有充分動能可將其撞出於較外之第2軌道，被撞之軌道電子即可由外來電子接受一定能量，由第1軌道突然上升至第2軌道作橢圓運動如圖 1-2 所示。今以第2軌道上電子之能量為 W_2 ，則軌道電子由外來電子吸收之能量為 $W_2 - W_1$ ；

軌道電子之能階升高，此相當於其總能量增大，軌道遂可擴至離原子核更遠，此種情形謂之原子之激發 (excitation)。如外來電子有更多動能時，亦可將軌道電子激發至更外層之第 3, 第 4 等軌道上運動。被激發電子因其軌道之突出，激發後不久 (約 10^{-8} 至 10^{-7} 秒) 即有機會與其相鄰另一氫原子之軌道電子相撞，並將其由外來電子吸收之全部能量 $W_2 - W_1$ 交付於被撞電子，而使其激發於另一相鄰氫原子之第 2 軌道；其本身即行躍返 (jump return) 至其母體原子原來之第 1 軌道。此種過程於相鄰兩原子間包含一電子之激發與躍返及一能量之吸收與發射 (absorption and emission)，謂之發射一能量子 (energy quantum) 或發射一光子 (photon)。激發狀態遂被傳播於相鄰之氫原子；因氫原子之整齊排列，此種激發狀態將繼續向相鄰之原子傳播。軌道電子之激發與躍返，相當於原子之往復運動，此種運動謂之原子之熱振動 (thermal vibration)。激發狀態不斷傳播至更遠時，則相當於介質內之熱傳導 (thermal conduction)，蓋能量均係由高溫向低溫之方向傳導。根據量子理論，原子振動時所吸收或發射之能量，即為其所發射能量子或光子之能量，係比例於振動之頻率 f ，一般可書作

$$hf = W_2 - W_1, \quad (1-3)$$

此處 h 為一自然常數，謂之 Planck 常數，其數值據測定為 6.625×10^{-34} j-s。

原子內一電子於激發及躍返時，介質內即發生電場與磁場之變化，其變化頻率 f 仍與振動之頻率相同。頻率較低時屬於熱能之範圍，此時能量子 hf 又謂之熱子 (phonon)；頻率較高時屬於光能之範圍，則謂之光子。此等電場與磁場之變化相當於一種電磁波動，故熱與光均應為一種電磁波 (electromagnetic wave)。