

修訂版

# 電波工程

編著者 ■ 黃胤年



新學城分友出版中心  
電子工程編輯委員會 編行

## 關於新學識文教出版中心

■組合性質 由大專校、教、所長，  
科系主任及專家學者  
百餘人所聯組，具有  
作者·讀者·出版者  
綜合特質的文教單位。

■共同理想 開發心智能源，  
創造出版成果，  
分享讀者、作者。

■一致行動 全面推行科學中化，  
促進國家學術獨立，  
提高國民精神所得。



# 電 波 工 程

執筆者 ■ 黃 胤 年

編輯者 ■ 新學城出版中心  
工專用書編輯委員會

版權所有



翻印必究

行政院新聞局出版事業登記證

■局版臺業字第0980號■

## 電 波 工 程

■執筆者：黃 胤 年  
■發行人：李 晔  
■兼主編：李 晔  
■出版者：新學識文教出版中心

台北市新中街10巷7號  
郵撥帳號：109262  
電話：7656502 7656992

特約經銷處：  
台北·力行書局（重慶南路I）  
台中·大學書社（文華路73號）  
台南·東華書局（博愛路72號）  
高雄·超大書城（地下街一層）

■校勘者：黃 胤 年  
■印刷所：新學識文教出版中心

中華民國 67 年 7 月初版  
68 年 9 月再版

基 價 6 元 5 角

●科技為現代學術中心。

●工業為國家圖存利器。

●工科大專為科技與工業的接點；

●教學同仁于此接點散發無限光、熱！

●教材則為發射光、熱的『能源』。

願 工科大專教學同仁，

更多、更廣泛的參與我們合作編著、出版的行列：

「協力開發『能源』，

「光探學術遠景」

「照亮國家前途！」

新學識文教出版中心 謹啓

# 編輯大意

■ 本書依據 65(7)年 6(7)月教育部公布五(二)年制工業專科學校電子工程科課程標準而編撰，可供有關學校教學及專業技術人員參考之用。

■ 本書共分為五章：

**第1章為電磁波**，主要內容為講述電磁波之基本特性，諸如境界條件、Poynting 向量、極化特性、反射及折射特性及有關電波在工程上之定義等。

**第2章為傳輸線**，專述電磁波在傳輸線上之傳播特性，主要內容包括：傳輸線的種類、特性阻抗、輸入阻抗、傳播常數、反射及傳輸係數、駐波比、阻抗匹配及 Smith 圖表之應用等。

**第3章為導波器**，主要內容包括矩形導波管及圓形導波管之導波特性，導波管電路及空腔諧振器等。表面波傳輸線及最近急速發展中之微帶傳輸線及光纖維導波器亦在本章中各設一節特予介紹。

**第4章為天線**，前七節為天線理論，包括：Hertz 偶極天線，駐波天線，行波天線及天線陣等各種天線之輻射特性及輻射阻抗之計算法及大地對特性之影響等；後四節則專述實用天線，包括：長中波天線、短波天線、超短波天線及微波天線之構造、輻射特性及用途等。

**第5章為電波傳播**，主要內容包括地表波，直接波及繞射波之傳播特性

及電場強度之計算法。對流層傳播及電離層傳播亦在本章中做較為詳盡之講述。

- 本書以理論與實際並重。理論部份需要一些數學基礎，但編者盡量以使用圖表的方式代替艱深的數學。相信學過大專微積分之讀者，即有足夠基礎了解本書的數學部份；實際應用部份則盡量蒐集有關數據及圖表，使讀者能利用本書設計天線、傳輸線及導波器及計算電波電場強度及選擇頻率等。
- 本書各章設有習題並附答案以供讀者自習印証之用，諒同為在校大專學生及現場電波工程技術人員或對電波工程有興趣之技術人員所需要。
- 電波工程包括範圍甚廣，書中各章均能單獨成書。本書限於篇幅僅能對電波工程做重點式的敘述，是以在讀畢本書後，仍盼讀者諸君更上一層樓、涉覽更高深的資料。
- 電波工程仍在不斷的研究發展中，本書雖然盡量蒐集最新資料，但滄海遺珠在所難免，若有錯漏，敬請不吝指正幸！

## 第1章 電磁波 ( 13 ~ 66 )

- 1-1 Maxwell 方程式 ( 13 )
  - I. Faraday 定律 ( 13 )
  - II. Ampere 定律 ( 14 )
  - III. Gauss 之電場定律 ( 16 )
  - IV. Gauss 之磁場定律 ( 16 )
- 1-2 電磁能的傳送 ( 19 )
- 1-3 波動方程式 ( 22 )
- 1-4 平面電磁波 ( 24 )
  - I. 自由空間內之平面波 ( 25 )
  - II. 介質內之平面波 ( 27 )
  - III. 導體中之平面波 ( 29 )
- 1-5 境界條件 ( 33 )
- 1-6 平面波的反射(垂直入射) ( 35 )
  - I. 完全導體之反射作用 ( 38 )
  - II. 非完全導體 ( 40 )
  - III. 無損耗介質之反射波 ( 42 )
- 1-7 平面波的反射(斜入射) ( 43 )
  - I. 電場與入射面成垂直(水平極化波) ( 43 )
  - II. 電場與入射面成平行(垂直極化波) ( 48 )
- 1-8 折射率、反射係數及傳送係數 ( 50 )
  - I. 水平極化波 ( 52 )
  - II. 垂直極化波 ( 53 )
- 1-9 電波之極化及輻射 ( 57 )
- 1-10 電波之分類及名稱 ( 62 )

## 第2章 傳輸線 ( 67 ~ 122 )

- 2-1 傳輸線的種類 ( 67 )
  - I. 平行二線 ( 69 )

## II. 同軸電纜 ( 71 )

2-2 傳輸線上之電壓波及電流波 ( 73 )

2-3 電波之相位速度及群速度 ( 79 )

2-4 反射係數、傳送係數及駐波比 ( 82 )

2-5 傳輸線之傳播常數及電波衰減 ( 88 )

2-6 無損傳輸線 ( 94 )

I. 接收端開路 ( $Z_R = \infty$ 時) ( 95 )

II. 接收端短路 ( $Z_R = 0$ )時 ( 96 )

III. 接收端負載為純電感或純電容時 ( 97 )

IV. 接收端負載為純電阻時 ( 97 )

V. 接收端負載為特性阻抗 ( $Z_R = Z_0$ )時 ( 99 )

2-7 Smith 圖表 ( 102 )

2-8 傳輸線的阻抗匹配 ( 108 )

I. 利用個別零件組成之匹配電路 ( 110 )

II. 利用傳輸線做匹配 ( 112 )

III. 平衡不平衡變換器 ( 117 )

## 第3章 導波器 ( 123 ~ 184 )

3-1 導波器之種類 ( 123 )

3-2 平行板導波器 ( 126 )

3-3 矩形導波管 ( 129 )

3-4 圓形導波管 ( 138 )

3-5 導波管與傳輸線之相似點 ( 143 )

I. 駐波 ( 145 )

II.  $1/4$  波長阻抗變換器 ( 145 )

3-6 導波管之阻抗匹配 ( 146 )

I.  $1/4$  波長阻抗變換器 ( 146 )

II. 接收端短路之導波管 ( 146 )

III. 導波管內設開口 ( 147 )

IV. 柱釘 ( 147 )

- V. 無反射終端電路 ( 149 )
- 3-7 導波管電路 ( 150 )
  - I. 導波管之連結 ( 150 )
  - II. 分岐電路 ( 151 )
  - III. 彎曲管及角管 ( 153 )
  - IV. 濾波器 ( 154 )
- 3-8 空腔諧振器 ( 155 )
- 3-9 表面波傳輸線 ( 160 )
- 3-10 微帶傳輸線 ( 165 )
  - I. 平衡式微帶線 ( 167 )
  - II. 不平衡式微帶線 ( 169 )
  - III. 非活動性元件 ( 171 )
- 3-11 光的導波器 ( 光纖維 ) ( 173 )
  - I. 數值口徑 ( 178 )
  - II. 遲滯變形 ( 179 )
  - III. 模態 ( 180 )

#### 第4章 天線 ( 185 ~ 288 )

- 4-1 天線之定義及分類 ( 185 )
- 4-2 Hertz 偶極天線 ( 186 )
- 4-3 駐波及行波天線之輻射特性 ( 191 )
  - I. 駐波天線 ( 192 )
  - II. 行波天線 ( 195 )
- 4-4 半波長天線陣之輻射特性 ( 197 )
  - I. 兩個半波長天線 ( 198 )
  - II. 串連半波長天線列 ( 201 )
  - III. 並連半波長天線列 ( 202 )
  - IV. 半波長天線陣 ( 204 )
- 4-5 大地之反射對天線輻射特性之影響 ( 205 )
- 4-6 天線之輻射阻抗 ( 207 )

- I. 自阻抗 ( 207 )
- II. 互阻抗 ( 213 )
- III. 饋電點阻抗 ( 218 )
- IV. 天線之 $Q$ 因素 ( 221 )
- 4-7 天線之輻射效果 ( 222 )
  - I. 輻射效率 ( 222 )
  - II. 定向性 ( 223 )
  - III. 增益 ( 225 )
  - IV. 有效開口面積 ( 230 )
- 4-8 長、中波天線 ( 232 )
  - I. 接地天線 ( 232 )
  - II. 環形天線 ( 236 )
  - III. Adcock天線 ( 238 )
  - IV. 行波天線 ( 240 )
  - V. 垂直天線之接地 ( 240 )
- 4-9 短波天線 ( 242 )
  - I. 偶極天線 ( 243 )
  - II. 摺疊式偶極天線 ( 250 )
  - III. 束射天線 ( 251 )
  - IV. 諧波天線 ( 252 )
  - V. 行波天線 ( 254 )
  - VI. 短波廣播用天線 ( 255 )
- 4-10 超短波天線 ( 257 )
  - I. 水平面全向天線 ( 257 )
  - II. 寬頻帶天線 ( 261 )
  - III. 附有反射器的天線 ( 263 )
  - IV. 螺旋形天線 ( 267 )
  - V. 對數週期天線 ( 269 )
  - VI. 槽孔天線 ( 273 )
- 4-11 微波天線 ( 275 )

- I. 半波長天線 ( 276 )
- II. 槽孔天線 ( 277 )
- III. 電磁喇叭 ( 277 )
- IV. 拋物線面天線 ( 279 )
- V. 電介質天線 ( 280 )
- VI. 透鏡天線 ( 281 )

## 第5章 電波傳播 ( 289 ~ 402 )

- 5-1 電波之傳播方式 ( 289 )
- 5-2 地表波之傳播 ( 291 )
  - I. Austin-Cohen 之半實驗式 ( 291 )
  - II. Sommerfeld 之數值距離法 ( 292 )
  - III. CCIR 法 ( 294 )
- 5-3 直接波與反射波之干涉 ( 300 )
  - I. 平面大地上之干涉 ( 300 )
  - II. 球面大地上之干涉 ( 302 )
  - III. 電場強度之距離特性 ( 305 )
  - IV. 電場強度之高度特性 ( 307 )
  - V. 列線圖解法 ( 308 )
  - VI. 反射波之擴散現象 ( 310 )
- 5-4 繞射波 ( 315 )
  - I. Bullington 之列線圖 ( 317 )
  - II. 山峯繞射之電場強度 ( 323 )
- 5-5 對流層內之電波傳播 ( 329 )
  - I. 對流層之折射率  $n$  ( 329 )
  - II.  $M$  曲線 ( 331 )
  - III. 地球有效半徑 ( 335 )
  - IV. 導層 ( 340 )
  - V. 電波衰落 ( 342 )
  - VI. 電波衰減 ( 344 )

5-6 電離層傳播 ( 345 )

I. 電離層內電子之運動及折射率 ( 346 )

II. 電離層之變化特性 ( 355 )

III. 電離層內之電波傳播 ( 366 )

IV.  $MUF$  及  $LUF$  之預報 ( 374 )

V. 電場強度之計算 ( 376 )

VI. 電離層波之衰落現象 ( 384 )

5-7 電波雜訊 ( 390 )

I. 宇宙雜訊 ( 391 )

II. 太陽雜訊 ( 391 )

III. 大氣雜訊 ( 392 )

IV. 人爲雜訊 ( 395 )

5-8 各種電波之傳播特性 ( 396 )

I. 長波之傳播特性 ( 396 )

II. 中波之傳播特性 ( 398 )

III. 短波之傳播特性 ( 398 )

IV. 超短波之傳播特性 (  $> 30 \text{ MHz}$  ) ( 399 )

# 第 I 章

## 電 磁 波

### 1-1 Maxwell 方程式

所有之電磁波理論係以Maxwell 之四個方程式及兩個補充關係式為出發點，而發展出來。此方程式係規定電場（Electric Field） $\vec{E}$ ，磁場（Magnetic Field） $\vec{B}$ ，電位移（Electric Displacement） $\vec{D}$ 及磁場強度（Magnetic Field Intensity） $\vec{H}$ 間之關係。發生在自然界之電磁現象（Electromagnetic Phenomena）均可利用此方程式獲得圓滿的解釋或答案。例如磁場對時間之變化會產生電場；相反的，電場對時間之變化會產生磁場；以及電流對時間之快速變化會產生電磁波（Electromagnetic Wave）等現象，都可以利用Maxwell方程式中之一個或一個以上之定律，獲得合理的解釋。

茲逐一將此四個定律之重點說明如下：

#### I. Faraday 定律

圖 1-1 中之實線表示磁力線（Magnetic Field Line）；虛線為圍繞磁力線之假想之封閉圓圈（Closed Loop）。假設通過封閉圓圈之磁通量（Magnetic Flux）為  $\phi$ 。若  $\phi$  對時間不起變化，則封閉圓圈線上並不發生

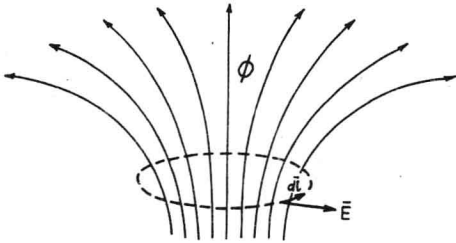


圖 1-1.1

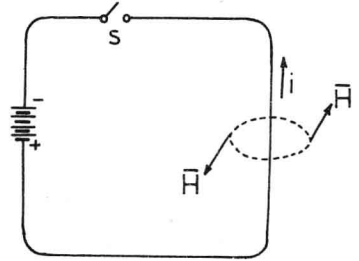


圖 1-1.2

任何現象，但若對時間發生變化，則封閉圓圈上將產生電場（ Electric Field ）  $\bar{E}$ 。設圓圈上之微分長度（ Differential Length ）為  $d\bar{l}$ ，則產生在圓圈上之電動勢（ Electromotive Force，簡稱為 emf ）可用下式表示：

$$emf = \oint \bar{E} \cdot d\bar{l} \quad (1-1.1)$$

式中積分符號之小圓表示沿着封閉圓圈積分一周的意思。根據 Faraday 之實驗，此電動勢之大小等於磁通量對時間之變化率，兩者間之關係可用下式表示。

$$\oint \bar{E} \cdot d\bar{l} = -\frac{d\phi}{dt} \quad (1-1.2)$$

由此式我們可以知道，磁場對時間發生變化即會產生電場。此關係係根據 Faraday 之實驗而求得，故稱為 Faraday 定律。

## II. Ampere 定律

圖 1-1.2 中之實線表示導體；虛線為假想之封閉圓圈。開關 S 在開啓狀態時，導體中沒有電流，故封閉圓圈上並不發生任何現象。若將 S 關閉，使  $i$  的電流流經導體時，封閉圓圈上立刻會產生磁場（ Magnetic Field ）  $\bar{H}$ 。將此磁場沿着封閉圓圈積分一周，即得產生在圓圈上之磁動勢（ Magnetomotive Force，簡稱為 mmf ），其大小可用下式表示。

$$mmf = \oint \bar{H} \cdot d\bar{l} \quad (1-1.3)$$

根據 Ampere 之實驗，此磁動勢之大小應等於電流  $i$  之大小，兩者之關係可用下式表示。

$$\oint \bar{H} \cdot d\bar{l} = i \quad (1-1.4)$$

此關係稱為 Ampere 定律。

在電磁波理論中，電流可以分為在導體內流動之傳導電流（Conductive Current）及在絕緣介質內流動之位移電流（Displacement Current）兩種。位移電流係 Maxwell 所提出之一種電流，其大小與後述之電位移（Electric Displacement）對時間之變化有關係。設  $\bar{D}$  為電位移， $\bar{J}_d$  為位移電流密度則，根據 Maxwell，兩者有下式關係

$$\bar{J}_d = \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \quad (1-1.5)$$

設  $\epsilon$  為介質常數（Dielectric Constant），則電場強度  $\bar{E}$  與電位移  $\bar{D}$  之間有如下關係。

$$\bar{D} = \epsilon \bar{E} \quad (1-1.6)$$

將（1-1.6）式代入（1-1.5）式即得

$$\bar{J}_d = \epsilon \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} \quad (1-1.7)$$

根據以上說明，我們得知（1-1.4）式中之  $i$  應包括傳導電流及位移電流兩種。設以  $i$  專門代表傳導電流，則由（1-1.4）式得

$$\oint \bar{H} \cdot d\bar{l} = i + i_d \quad (1-1.8)$$

(1-1.8) 式表示，不但是傳導電流會產生磁場，電場對時間之變化也會同樣地產生磁場。

### III. Gauss 之電場定律

圖 1-1.3 之曲線表示封閉的表面 (Closed Surface)  $S$ ，其內有電量 (Electric Charge)  $q$ ，此電量會產生電位移  $\vec{D}$  [亦稱為電通密度 (Electric Flux Density)]。 $d\vec{S}$  為封閉表面  $S$  上之微分面積。設  $d\vec{S}$  上向外之電位移為  $\vec{D}$  則向外通過全表面  $S$  之  $\vec{D}$  值為

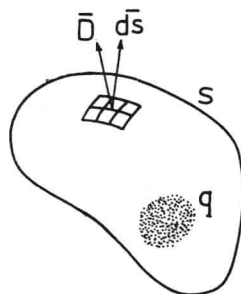


圖 1-1.3

$$\int_S \vec{D} \cdot d\vec{S} \quad (1-1.9)$$

積分符號下之  $S$  表示對  $S$  之全表面做積分。根據 Gauss 之分析，此積分值等於封閉表面內之全電量  $q$

$$\int_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = q \quad (1-1.10)$$

由此可知：從任意封閉表面上向外通過之電通密度總和等於該封閉表面內所含之電量總和，此關係稱為 Gauss 之電場定律 (Gauss's Law for Electric Field)。電通密度總和亦稱為電通量 (Electric Flux)。

### IV. Gauss 之磁場定律

將圖 1-1.3 中之電通密度  $\vec{D}$  改為磁場  $\vec{B}$  [亦稱為磁通密度 (Magnetic Flux Density)] 時，向外通過  $S$  之總磁通量將等於

$$\int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (1-1.11)$$

根據 Gauss 之分析，此積分值會等於零，即