

大專用書

電波工程

劉樹珊 編著

大專用書

電波工程

劉樹珊 編著



大 專 用 書

電 波 工 程

版權所有 翻印必究

著 者 兼 發 行 人 : 劉 樹 珊
住 址 : 台北縣新店北新路一段215巷15⁸3樓
電 話 : 9111708
郵 撥 : 117110
總 經 銷 : 三民書局有限公司
地 址 : 台北市重慶南路一段 61 號
電 話 : 3315969 • 3613322
3613355 • 3318484
郵 撥 : 9998
定 價 : 新台幣 120 元
版 次 : 中華民國 68 年 9 月初版

序

本書係依據六十五年部頒五年制工專課程標準及六十六年部頒二年制工專課程標準所編輯。可供大專學校電波工程及電波學之課本，及從業技術人員之參考手冊。

編撰之準則，力求理論與實用併重，內容新穎，由淺入深，逐層論述，着重以物理觀念解釋各種數學公式之來源及應用，使數學觀念與物理現象合而為一，以提高讀者對實際問題之解決能力。具有普通微積分數學基礎者均可研讀。

第一章討論射頻輸電線及光纖導波線；第二章討論電磁波原理及導波管；第三章討論天線輻射原理及各頻段之均向與定向天線；第四章討論各頻段與各路徑之一般電波傳播，及衛星通信系統之電波傳播。

本稿係作者參考多年來講授微波、天線及電磁波之手稿，并補充目前有關最新資料，經多次修訂，方始完稿。文字力求簡明易懂；附圖之電路方面側重等效電路之分析；每節之後多附例題，以增進對公式之理解。

本書初次印行問世，錯誤自屬難免，敬希各位老師及讀者不吝指教是幸。

劉樹珊 序於台北

中華民國六十八年九月

電 波 工 程

目 錄

第一章 射頻輸電線

第 一 節	射頻輸電線之種類	1
第 二 節	輸電線之特性阻抗	2
第 三 節	輸電線之方程式	4
第 四 節	傳播常數及相移速度	8
第 五 節	反射系數及駐波形成	11
第 六 節	匹配線之特性	18
第 七 節	無耗射頻線特性	20
第 八 節	駐波比值	33
第 九 節	史密斯阻抗圖表結構原理	35
第 十 節	阻抗匹配	53
第十一節	衰減射頻線之特性	75
第十二節	諧振線原理	84
第十三節	諧振線之應用	91
第十四節	光纖導波線	96
	習 題	102

第二章 導波管

第 一 節	導波管之優點	105
第 二 節	電磁波之基本觀念	107

第 三 節	均勻平面波之垂直反射	115
第 四 節	均勻平面波之斜反射	118
第 五 節	縱向電場波 (TE) 之形成	121
第 六 節	長方形導波管 $TE_{1,0}$ 波之特性	128
第 七 節	長方形導波管之高次波	140
第 八 節	圓柱形導波管	143
第 九 節	長方形導波管之激勵法	146
第 十 節	導波管之組合併	148
第十一節	導波管之耦合電路	158
第十二節	導波管之輸送系統	165
第十三節	空腔諧振原理	168
第十四節	空腔諧振器之應用	178
	習 題	186

第三章 天 線

第 一 節	天線輻射基本原理	189
第 二 節	半波天線之特性	200
第 三 節	半波天線輻射圖形之分析	207
第 四 節	馬可尼 (Marconi) 天線之特性	211
第 五 節	激勵天線列	212
第 六 節	寬邊天線列輻射圖形之分析	218
第 七 節	異相電流天線列輻射圖形之分析	224
第 八 節	寄生天線列	227
第 九 節	微波天線	234
第 十 節	拋物面天線饋電法	237
第十一節	拋物面天線輻射場之分析	247

第十二節 餘割平方天線原理.....	255
習 題.....	257
第四章 電波傳播	259-276
習 題.....	276

第一章 射頻輸電線

第一節 射頻輸電線之種類

一、前言：

射頻輸電線 (RF Transmission Line) 按其用途區分，有**諧振線** (Resonant Line) 與 **非諧振線** (Non-resonant Line) 二種。後者又稱**匹配線** (Matched Line)，是名符其實傳送電能之導線。而前者又稱**駐波線** (Standing Wave Line)，可作阻抗匹配之變阻器 (Impedance Transformer)，超高頻率振盪器之調諧電路，及發收開關等用途。

射頻輸電線按其結構區分，有**平行線**及**同軸線**。平行線結構簡單，由於輻射耗損過大，故其工作頻率不高，平行線係對地平衡之一對導線。所謂對地平衡，是指其中一導線之某點，若為正電壓，則受另一導線相應點之同值負電壓所平衡，故此式輸電線便於推挽式電路之連接。

二、同軸線：

同軸線是由兩根同心之內外導體，其間隔以絕緣所組成。由於同軸線之外導體，兼有屏蔽作用，故同軸線產生之電磁場，係限於內外導體之間，而無輻射耗損之弊。同軸線之衰減現象，亦較平行線為低

2 電波工程

，其工作頻率可高至 3000 MHz。其特性阻抗亦低，約為 50 歐至 70 歐左右。惟同軸線對地不平衡，僅適於單管電路之連接，若需接於平衡電路，仍須添置其他補助設備。

使用於雷達方面之同軸線，有柔軟式及堅硬式二種，（圖 1-1 (a)）所示為柔軟式同軸線，外導體係由金屬絲編織而成，內外導體之間，隔以柔性之塑膠絕緣質，編織線之外層，尚包有保護材料。

工作頻率接近 3000MHz 時，柔式同軸線之介質耗損相當可觀，宜改用以空氣為介質之堅硬式同軸線，如圖 1-1 (b)及(c)所示。該式同軸線內導體支持之方法，有用絕緣墊片支持及枝線支持二種。墊片之材料，有瓷質或塑膠。圖 1-1 (c)為枝線（Stub）支持之同軸線，支線係一端閉路，另一端與輸電線之幹線並聯，其長度為 $\lambda/4$ 。 $\lambda/4$ 之支線有絕緣特性，雖其本身亦為金屬，不致影響幹線之工作性能。惟支線之長度隨頻率而變，工作頻率愈低，所需之支線愈長，製造愈難，故該式同軸線，限用於微波範圍。

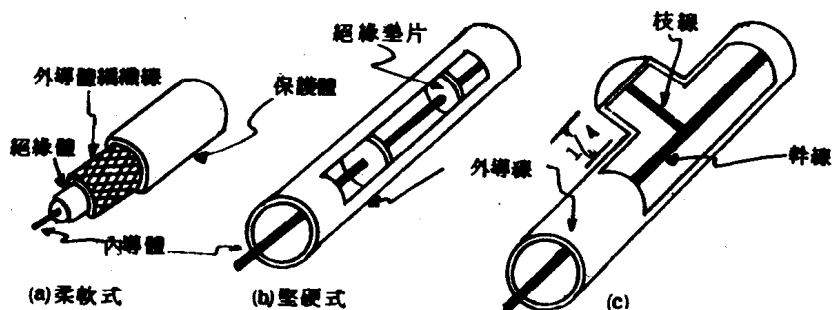


圖 1-1 各式同軸線

第二節 輸電線之特性阻抗

導線本身有電阻 R 及電感 L ，兩線間有電容 C 及由漏電形成之電

導 G ，這四個無形之常數，在導線上係均勻分佈，故稱輸電線之**分佈常數** (Distribution Constants)，其中以電感及電容，對輸電線之特性影響最大。圖 1-2 (a) 係表示一對平行輸電線包含之分佈常數。

無限長之輸電線，其輸入端之阻抗，有固定之數值，此阻抗稱為輸電線之**特性阻抗** (Characteristic impedance)，以 Z_0 表示。其值可由 $Z_0 = \sqrt{L/C}$ 公式求得，該公式之由來，可用下述之簡易法證之。

如圖 1-2 (a) 所示，輸電線可認作由很多小段之導線所組成，假設小段之長度為 h ，每段均包含電感電阻電容及電導，以 LRC 及 G 表示單位長度之值。

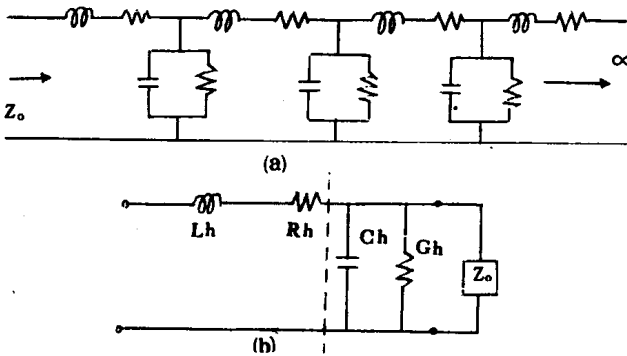


圖 1-2 輸電線之特性阻抗

按定義，無限多小段串聯之輸電線，其輸入阻抗為 Z_0 ，且無限大加 1，仍為無限大。於是無限長之輸電線，在其輸入端再加一小段，其輸入阻抗仍為 Z_0 ，如圖 1-2 (b) 所示。解該電路之輸入阻抗，使其等於 Z_0 ，即可求得 Z_0 之值。以圖中之點線為界，右邊電路之導納 (Admittance) 為

$$\frac{1}{Z_0} + j\omega Ch + Gh$$

左邊電路之阻抗爲 $j\omega Lh + Rh$ ，於是輸入阻抗爲

$$(j\omega Lh + Rh) + 1 / \left(\frac{1}{Z_0} + j\omega Ch + Gh \right) = Z_0$$

等式兩邊乘以 $(Z_0/h) (1/Z_0 + j\omega Ch + Gh)$ ，再組合則得

$$Z_0^2 (j\omega C + G) + Z_0 (\omega^2 LC - j\omega LG - j\omega CR - RG) h - j\omega L - R = 0$$

因爲我們假定輸電線是由無限多之小段所組成，每段長爲 h ，若使 h 接近於零，則上式之第二項可略之不計，於是可求得 Z_0 之值爲

$$Z_0 = \sqrt{\frac{j\omega L + R}{j\omega C + G}}$$

在微波範圍， $\omega L \gg R$ ， $\omega C \gg G$ ，於是上式中之 R 及 G 可略而不計，故輸電線之特性阻抗簡化爲

$$Z_0 = \sqrt{L/C}$$

由上式可知， Z_0 之值爲實數，即特性阻抗係純電阻性，其值視輸電線之電容及電感而定，與頻率無關。平行線之 Z_0 約在 200 歐至 800 歐之間，而同軸線之 Z_0 約在 20 歐至 100 歐之間。

第三節 輸電線之方程式

圖 1-3 所示之輸電線，其長度爲 l ，一端接負荷 Z_R ，另一端接射頻電源 E_s ，其內阻爲 Z_s 。接收端（亦稱負荷端）之電壓爲 E_R ，通過負荷之電流爲 I_R 。發送端（亦稱電源端）之電壓爲 E_s ，其輸出電流爲 I_s 。

今截取輸電線甚短的一段 dx ，分析其電壓電流之關係如下：如第

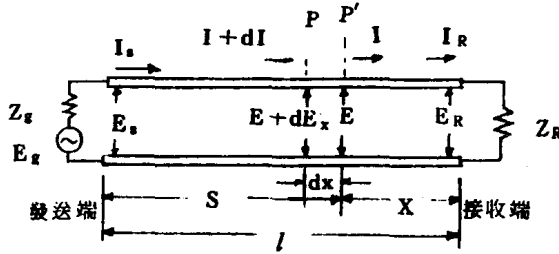


圖 1-3 輸電線方程式之分析

二節所述， RLC 及 G 各為輸電線單位長之電阻、電感、電容，及電導，以 Z 代表單位長之串聯阻抗，包含 R 及 L ；以 Y 代表單位長度之並聯導納，包含 G 及 C ；即

$$Z = R + j\omega L$$

$$Y = G + j\omega C$$

按圖 1-3，設以接收端為準，任意點 P' 之距離為 x ， P 與 P' 雖相距 dx ，但電壓及電流各不相同，前者較後者為高，若 E 及 I 各表 P' 點之電壓及電流，則 P 點之電壓及電流應為 $E + dE$ ，及 $I + dI$ 。其相差之電壓 dE 係由於電流流經 dx 產生電壓降，即

$$dE = I [(R + j\omega L) dx] = IZdx \quad (1-1)$$

二點間之電流差 dI ，則由於 dx 線間有並聯導納之所致，即

$$dI = E [(G + j\omega C) dx] = EYdx \quad (1-2)$$

由 (1-1) 及 (1-2) 二式，得

$$\frac{dE}{dx} = IZ \quad (1-3)$$

$$\frac{dI}{dx} = EY \quad (1-4)$$

將 (1-3) 式對 x 微分一次後，並以 (1-4) 代入，得

6 電波工程

$$\frac{d^2 E}{dx^2} = Z \quad \frac{dI}{dx} = ZYE \quad (1-5)$$

(1-5) 式係一元二次微分方程式，其一般之解答為

$$E = E_1 e^{\sqrt{ZY}x} + E_2 e^{-\sqrt{ZY}x} \quad (1-6)$$

式中 E_1 及 E_2 為未定之積分常數。讀者對此答案若有懷疑，可將(1-6)式微分兩次，可驗證其無誤，即

$$\begin{aligned} \frac{dE}{dx} &= E_1 \sqrt{ZY} e^{\sqrt{ZY}x} - E_2 \sqrt{ZY} e^{-\sqrt{ZY}x} \\ \frac{d^2 E}{dx^2} &= E_1 (ZY) e^{\sqrt{ZY}x} + E_2 (ZY) e^{-\sqrt{ZY}x} \\ &= (ZY) (E_1 e^{\sqrt{ZY}x} + E_2 e^{-\sqrt{ZY}x}) \\ &= (ZY) E \end{aligned}$$

由(1-3)式可得

$$I = \frac{1}{Z} \frac{dE}{dx} = \frac{1}{Z} (E_1 \sqrt{ZY} e^{\sqrt{ZY}x} - E_2 \sqrt{ZY} e^{-\sqrt{ZY}x})$$

即

$$I = \sqrt{\frac{Y}{Z}} (E_1 e^{\sqrt{ZY}x} - E_2 e^{-\sqrt{ZY}x}) \quad (1-7)$$

(1-6) 及 (1-7) 二式，即為輸電線之電壓電流方程式，輸電線之各項特性，可說均由此兩方程式誘導而出。其未定常數 E_1 及 E_2 ，可由邊界條件決定其值，接收端之條件為

$$x = 0, \quad E = E_R, \quad I = I_R$$

將上列條件代入(1-6)及(1-7)兩式，得

$$E_1 + E_2 = E_R$$

$$E_1 - E_2 = \sqrt{\frac{Z}{Y}} I_R$$

上二式聯結結果爲

$$E_1 = \frac{1}{2} (E_R + \sqrt{\frac{Z}{Y}} I_R)$$

$$E_2 = \frac{1}{2} (E_R - \sqrt{\frac{Z}{Y}} I_R)$$

將 E_1 及 E_2 之值代回 (1-6) 及 (1-7) 二式，并令 $Z_0 = \sqrt{\frac{Z}{Y}}$ ，

$\gamma = \sqrt{ZY}$ ，使二式簡化，於是輸電線之方程式爲

$$E = \frac{1}{2} (E_R + I_R Z_0) e^{\gamma x} + \frac{1}{2} (E_R - I_R Z_0) e^{-\gamma x} \quad (1-8)$$

$$I = \frac{1}{2} (I_R + \frac{E_R}{Z_0}) e^{\gamma x} + \frac{1}{2} (I_R - \frac{E_R}{Z_0}) e^{-\gamma x} \quad (1-9)$$

式中之 Z_0 ，即爲第二節所述之特性阻抗。 γ 稱爲輸電線之傳播常數 (Propagation Constant)，詳第四節。

若接收端之情況不明，可取用發送之邊界條件，即

$$x = l, \quad E = E_s, \quad I = I_s$$

將上列條件代入 (1-6) 及 (1-7) 二式，則可求得積分常數 E_1 及 E_2 之值爲

$$E_1 = \frac{1}{2} (E_s + I_s Z_0) e^{-\gamma l}$$

$$E_2 = \frac{1}{2} (E_s - I_s Z_0) e^{\gamma l}$$

將 E_1 及 E_2 代回 (1-6) 及 (1-7) 二式，且按圖 $S = l - x$ ，於是

$$E = \frac{1}{2} (E_s + I_s Z_0) e^{-\gamma s} + \frac{1}{2} (E_s - I_s Z_0) e^{\gamma s} \quad (1-10)$$

$$I = \frac{1}{2} \left(I_s + \frac{E_s}{Z_0} \right) e^{-\gamma s} + \frac{1}{2} \left(I_s - \frac{E_s}{Z_0} \right) e^{\gamma s} \quad (1-11)$$

(1-8) (1-9) 及 (1-10) (1-11)，均為表示輸電線上任意點之電壓電流方程式。不過前者係與接收端之 E_R 及 I_R 有關，線上任意點之距離 (x) 係與接收端為準；而後者則與 E_s 及 I_s 有關，線上任意點之距離 (s) 係以發送端為準。

第四節 傳播常數及相移速度

一、傳播常數：

傳播常數 γ 為

$$\gamma = \sqrt{ZY} = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}$$

因 Z 及 Y 均為複數，故傳播常數 γ 亦為複數，可用 $\alpha + j\beta$ 代之，即 $\gamma = \alpha + j\beta$ ，其實數項 α 稱為**衰減常數** (Attenuation Constant)，即輸電線單位長度衰減之值，其單位為**奈泊** (neper)，

奈泊與分貝 (dB) 之關係爲 (詳第十一節)。

1 奈泊 = 8.686 分貝。

傳播常數之虛數項 β ，稱爲**相移常數** (Phase Constant)，即單位長度之輸電線，對傳播信號相位移動之值，其單位爲弧度。

在射頻體系中，因工作頻率甚高，由是 $\omega L \gg R$ ， $\omega C \gg G$ ，按二項定理 $(a + b)^n = a^n + na^{n-1}b + \dots$

設 $a \gg b$ ，且 n 爲分數，故一二兩項保留外，其餘各項數值太小，可捨之不計。於是傳播常數 γ 可仿此展開，求取 α 及 β 之值，即

$$\begin{aligned}\alpha + j\beta &= \sqrt{ZY} = (j\omega L + R)^{\frac{1}{2}} (j\omega C + G)^{\frac{1}{2}} \\ &= \left[(j\omega L)^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{2} (j\omega L)^{-\frac{1}{2}} R + \dots \right] \\ &\quad \left[(j\omega C)^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{2} (j\omega C)^{-\frac{1}{2}} G + \dots \right] \\ &= j\omega \sqrt{LC} + \frac{1}{2} R \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{1}{2} G \sqrt{\frac{L}{C}} \\ &\quad + \frac{1}{4} RG (j\omega)^{-1} (CL)^{-\frac{1}{2}}\end{aligned}$$

第四項之值甚微可略而不計

$$\therefore \alpha + j\beta \cong \frac{1}{2} \left(R \sqrt{\frac{C}{L}} + G \sqrt{\frac{L}{C}} \right) + j\omega \sqrt{LC}$$

$$\text{故 } \alpha = \frac{1}{2} \left(R \sqrt{\frac{C}{L}} + G \sqrt{\frac{L}{C}} \right)$$

$$= \frac{1}{2} \left(\frac{R}{Z_0} + GZ_0 \right) \quad (1-12)$$

$$\beta = \omega \sqrt{LC} \quad (1-13)$$

二、波長：

波長 λ (Wavelength) 之定義，是信號沿輸電線進行，其相位移動 2π 弧度所需之距離。而相移常數 β 是代表單位長度相移之弧度，故輸電線之波長為

$$\lambda = 2\pi / \beta$$

以空氣為介質之射頻線，其波長之值約與空間波長相等。惟固體介質之同軸線，其波長之值約等於空間波長乘以 $1/\sqrt{K}$ ， K 為固體介質常數。

三、相移速度：

相移速度 V_P (Phase Velocity) 或稱傳播速度，是信號沿輸電線進行，每秒移動之距離，其值為：

$$V_P = \omega / \beta$$

又因 $\beta = 2\pi / \lambda$ ，及 $\beta = \omega \sqrt{LC}$ ，故輸電線之相移速度亦為

$$V_P = f\lambda = 1 / \sqrt{LC} \quad (1-14)$$

無耗射頻線之相移速度與光速相同。輸電線耗損之效應，使衰減增加，波長減小，相速減低。固體介質之同軸線，其相速為 $V_P = \text{光速} / \sqrt{K}$ 。由於信號沿輸電線前進時，係依相速進行，故輸電線單位長度之延遲時間為

$$T_D = \frac{1}{V_P} = \sqrt{LC} \text{ 秒}$$