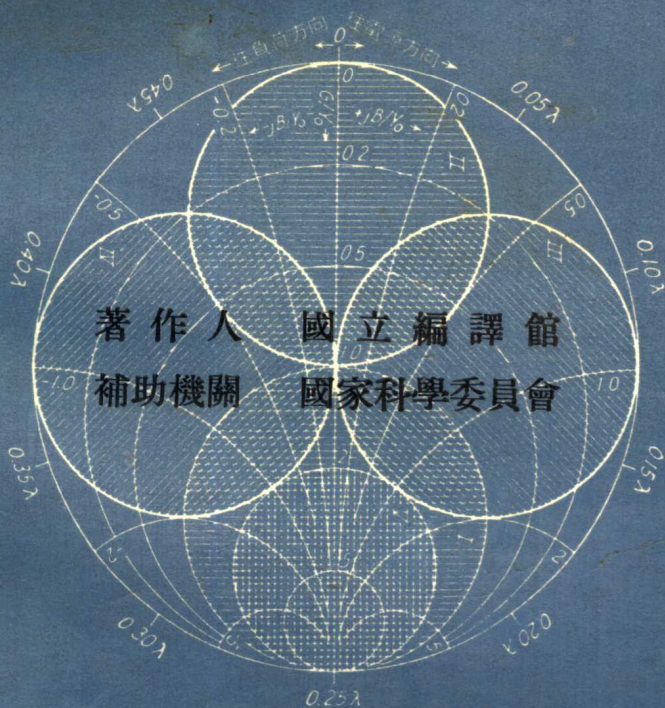


五年制工業專科學校教科書

微波學

編譯者 王 師



正中書局印行

原著者前言

本書由余等合著之微波理論與技術 (MICROWAVE THEORY AND THCHNIQUES) 一書改寫而成，適合於研習電子通信較高水準學生之需要，可供研讀一個學期；亦適合於供給電子工程人員復習微波設備之基礎原理。

微波之詳細數學分析部分，應屬於較高深之課程，本書中予以省略，但對基礎原理，仍予以適當之安排，而未減損。導波管內電磁波之傳播分析，表達為純量 (Scalar) 之形態，以便於未曾研習向量分析法 (VECTOR ANALYSIS) 者之學習。

每章末所列之習題及附錄二所列之實習綱要，對學習將有所裨益。在課文中省略之若干數學推演則構成習題，以資藉省篇幅。

關於微波之文獻資料，至為豐富。本書包括之材料，僅是微波方面之較重要部分，並未包括有關文獻之全部。備註之參考資料，係本書直接採用者，更完備之參考資料請查閱微波理論與技術一書內所列。

本書之寫成，係依據許多工程師及科學家之著作，各著作之名稱及出版資料，茲免一一縷述，僅致謝忱而已。

著 者：

H. J. R.

J. G. S.

P. F. O.

H. L. K.

譯 者 前 言

目前國內各工業專科學校電子工程科之微波學課程一門，亟需一本兼顧原理及實用之微波學教科書。H. J. R, J. G. S, P. F. O, 及 H. L. K. 氏合著之微波原理 (MICROWAVE PRINCIPLES) 一書，係依據其合著之微波理論與技術 (MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES) 一書縮寫而成，略去艱深理論，而保持原理與實用之價值，頗切上述之需要，爰為譯述。

以本書供作教本，將可獲致一完善之教學體系。茲敬請採用本書之施教者，注意以下三點。

- 一、銜接相關之課程：例如，微波天線之原理與應用已在電磁波或天線等課程內講授，則本書第六章之天線可從略。
- 二、適應教學時間之長短：例如，每週授課三小時，則本書可供講授一年。又如，每週授課三或四小時，僅授一個學期，則第六章天線，第十一章磁控管及第十二章行波管與電子波管等章節可予省略。
- 三、針對學生之程度：例如，學生程度較低，則原理部份尚須參考微波理論與技術一書，或其他有關專書，以深入淺出方式，作必要之補充。

本書不僅可供專科教材之用，亦可供微波工程及技術人員之參考。

本書譯成，得葉弘夫、葉平界、林俊雄三君助力甚多，併致謝意。

本書譯印，雖力求完善，錯誤或恐難免，尚祈明達指正幸。

譯 者 識

中華民國五十九年四月於臺北

目 錄

第一章	傳輸線	i
第二章	導波管	19
第三章	導波管和同軸線之元件	59
第四章	阻抗匹配	113
第五章	測 試	125
第六章	天 線	147
第七章	微波諧振器	167
第八章	微波放大器及振盪器的基本原理	197
第九章	三極四極管的微波放大器及振盪器	237
第十章	調速管	261
第十一章	磁控管	329
第十二章	行波管及電子波管	369
附錄一	週期性負荷導波管的傳播特性	399
附錄二	微波實驗	407

第一章

傳輸線 (Transmission Lines)

1-1. 緒 言

本章係作傳輸線基本原理之複習。行波 (traveling wave)、駐波 (standing wave)、傳播因素 (propagation factor) 和特性阻抗 (characteristic impedance) 等概念, 均用以說明無損傳輸線 (dissipationless transmission line) 之原理。同軸和平行傳輸線 (coaxial and parallel-wire transmission lines) 常以上述概念來解說。同樣地, 這些概念在第二章將論及較複雜之微波傳導結構中仍是相當重要。由研究基本傳輸線原理所得之實用阻抗圖表 (Impedance-chart) 和導納圖表 (admittance chart) 分析法, 是解說金屬導波管 (hollow metal-pipe waveguides) 及同軸線 (coaxial-line) 等實際問題之有效方法。

1-2. 傳輸線之微分方程式

分析傳輸線之正統方法係將該線分成無限個對稱 π 形或丁形電路說明之, 並定每一小節傳輸線長度為無限小 Δz 。在線上各 π 形或丁形電路上之電壓和電流關係是與實際電路相同, 根據上述假定, 該傳輸線係無損耗, 且其電壓、電流均為正弦波, 是故, 由圖 (1-1) 所表示之無損

[1]

耗丁形電路兩端之電壓差爲

$$\Delta V = -j\omega L \Delta z I \quad (1-1)$$

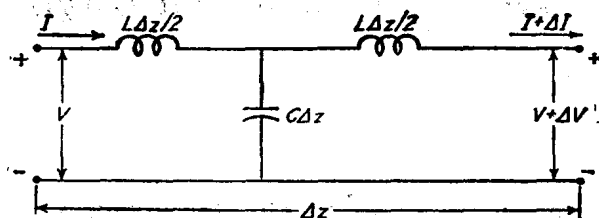


圖 1-1. 無損傳輸線基本線段之等值電路

式中 L 係每單位長度之電感量, ω 係激勵電源之角速度 (angular frequency of the excitation source)。另同軸線 (coaxial cable) 之電感量可由下式算出:

$$L = 0.2 \ln \frac{b}{a} \text{ 微亨/公尺 (microhenrys per meter)} \quad (1-2)$$

式中 a 係內導體半徑, b 爲外導體之內半徑。

同樣地, 可列一電流增量 (current increment) ΔI 方程式如下:

$$\Delta I = -j\omega C \Delta z V \quad (1-3)$$

式中 C 係單位長度之電容量。同軸線電容量可由下式求得,

$$C = \frac{55.5 \epsilon_r}{\ln b/a} \text{ 微微法/公尺 (Micromicrofarads per meter)} \quad (1-4)$$

式中 ϵ_r 係相對介質常數 (relative dielectric constant)。

若令 Δz 趨近於 0, 則 (1-1) 和 (1-3) 式分別趨近於

$$\frac{dV}{dz} = -j\omega L I \quad (1-5)$$

$$\frac{dI}{dz} = -j\omega CV \quad (1-6)$$

將(1-5)和(1-6)式代入各該式，對 z 微分後，所得結果如下：

$$\frac{d^2 V}{dz^2} = -\omega^2 LCV \quad (1-7)$$

$$\frac{d^2 I}{dz^2} = -\omega^2 LCI \quad (1-8)$$

這兩微分方程式可用以求解傳輸線上任何一點之電壓和電流值。

1-3 微分方程式之穩態解式

邊界條件 (boundary conditions) 須求得一以末端條件 (terminal conditions) 表示 (1-7) 和 (1-8) 式之解。如圖 1-2 所示。圖中 V_s 和 I_s 係指輸送端之電壓和電流，另 V_r 和 I_r 則為接收

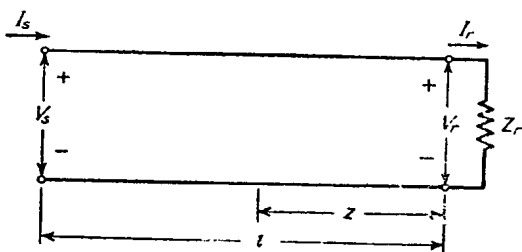


圖 1-2. 傳輸線邊界值和符號之定義

端之電壓和電流，而 Z_r 為負載阻抗 (load impedance)。由接收端至線上任一點之距離為 z ，全線長度為 l 。(1-7) 和 (1-8) 式之正式解答 (formal solution) 可表示沿傳輸線上任一點之瞬時電壓 (instantaneous

4 微 波 學

voltage) $v_{z,t}$ 和瞬時電流 (instantaneous current) $i_{z,t}$, 可由下列各式說明:

$$v_{z,t} = V_r \left(\cos \beta z \sin \omega t + \frac{Z_o}{Z_r} \sin \beta z \cos \omega t \right) \quad (1-9)$$

$$i_{z,t} = I_r \left(\cos \beta z \sin \omega t + \frac{Z_r}{Z_o} \sin \beta z \cos \omega t \right) \quad (1-10)$$

其中

$$\beta = \omega \sqrt{LC} \quad (1-11)$$

$$Z_o = \sqrt{L/C} \quad (1-12)$$

而 β 一項稱之為相角函數 (phase function), 其值係決定沿傳輸線每單位長度相角位移 (phase shift) 之大小。而 Z_o 稱為傳輸線之特性阻抗 (characteristic impedance), 具有阻抗因次之數值。就無損耗情況而論, Z_o 可視為一純電阻 (pure resistance)。當線上串接之阻抗 R 和並接之電導 (conductance) G 不予省略, 則特性阻抗可化成更一般性的關係。

$$Z_o = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (1-12a)$$

由(1-12a)式可知, 僅在 $RC = GL$ 時, 有損傳輸線 (lossy line) 是純電阻的, 因大多數微波傳輸線中, 其損耗均極小, 故 Z_o 可視為如(1-12)式中所示之純電阻值 R_o 。

1-4. 解答中之行波意義

如採用三角恒等式

$$\sin(A \pm B) = \sin A \cos B \pm \cos A \sin B \quad (1-13)$$

則(1-9)和(1-10)式可化爲,

$$v_{z,t} = \frac{V_r}{2} \left[\left(1 + \frac{Z_0}{Z_r} \right) \sin(\omega t + \beta z) + \left(1 - \frac{Z_0}{Z_r} \right) \sin(\omega t - \beta z) \right] \quad (1-14)$$

$$i_{z,t} = \frac{I_r}{2} \left[\left(1 + \frac{Z_r}{Z_0} \right) \sin(\omega t + \beta z) + \left(1 - \frac{Z_r}{Z_0} \right) \sin(\omega t - \beta z) \right] \quad (1-15)$$

如負載阻抗 Z_r 之大小等於傳輸線特性阻抗之值, 則稱此負載爲匹配負載 (matched load), 因而(1-14)和(1-15)式可簡化成

$$v_{z,t} = V_r \sin(\omega t + \beta z) \quad (1-16)$$

$$i_{z,t} = I_r \sin(\omega t + \beta z) \quad (1-17)$$

由(1-16)和(1-17)式中可看出, 如時間增量 Δt (increment Δt of time) 伴隨一大小爲 $-(\omega/\beta) \Delta t$ 之線長增量 (increment of distance) ΔZ 時, 則式中之正弦函數爲一常數。即是傳輸線上一固定相角位移之點, 以 ω/β 速率由電源端向負載端移動, 因而(1-16)和(1-17)式表一行波。當傳輸線上任一點之電壓和電流皆爲同相 (in phase) 時, 電壓對電流之比值等於傳輸線之特性阻抗大小, 而行波上具有 2π 弧度差之兩點距離, 則稱爲波長 (wave length), 以 λ 表示之。一般平行線 (parallel-wire) 和同軸線中之波長係與在同介質常數 (dielectric constant) 和導磁率 (permeability) 之無束媒介物 (unbounded medium) 中相同。至於金屬管 (hollow metal pipe) 中電磁波之波長以及同軸線之線徑大小, 影響其波長等問題將於第二章論及。

如令 Z_r 爲 0, 則負載電壓 V_r 必爲 0, 因此負載係短路, 將 $Z_r = \frac{V_r}{I_r}$ 和 $V_r = 0$ 代入 (1-14) 和 (1-15) 式, 則該兩式簡化爲

$$v_{z,t} = \frac{I_r Z_0}{2} \sin(\omega t + \beta z) - \frac{I_r Z_0}{2} \sin(\omega t - \beta z) \quad (1-18)$$

$$i_{z,t} = \frac{I_r}{2} \sin(\omega t + \beta z) + \frac{I_r}{2} \sin(\omega t - \beta z) \quad (1-19)$$

(1-18) 和 (1-19) 式中, 等號右邊第一項分別與 (1-16) 和 (1-17) 式者相似, 此即表示行波移向負載, 由此一行波趨近末端, 故名之爲入射波 (incident wave)。第二項表示一具有與入射電波相等速率之行波移向電源端, 此波稱爲反射波 (reflected wave)。因而, 傳輸線之電壓或電流大小可以入射波與反射波之和表示。當 $Z_r = 0$ 時, 入射波與反射波相加之結果, 將因 $Z_r = V_r/I_r$, $Z_r = 0$ 和 $V_r = 0$ 等式代入 (1-9) 和 (1-10) 式而簡化。在圖 1-3a 中, 線電壓 (line voltage) 之大小係 Z 之函數, 各波形對應於各不同瞬間, 並皆爲正弦波之半週期。在波形中, 極小值兩點間之距離即爲半波長。圖 1-3b, 係表示一對應之線電流

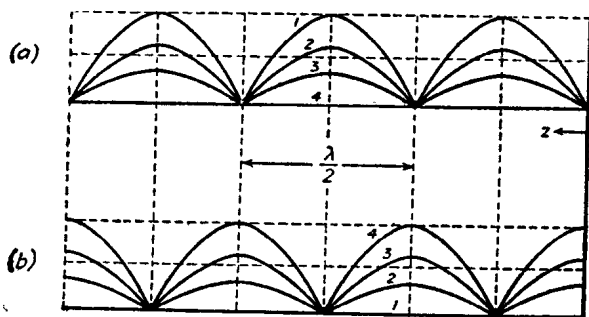


圖 1-3. 不同時間下之不同電壓和電流波形

(a) 線電壓大小及由短路端開始之長度

(b) 線電流大小及由短路端開始之長度

大小。由於極大值和極小值之位置非時間之函數，故可說線上有駐波 (standing wave) 存在。因無損傳輸線之末端短路，而使入射波與反射波大小相等，故駐波之最小值為零。通常，傳輸線所接負載 Z_r 並不等於特性阻抗之值，以致入射波與反射波並不相等，故駐波電壓與電流之最小值不為零。無損傳輸線上之駐波係由 (1-14) 和 (1-15) 式所決定，詳如圖 1-4。

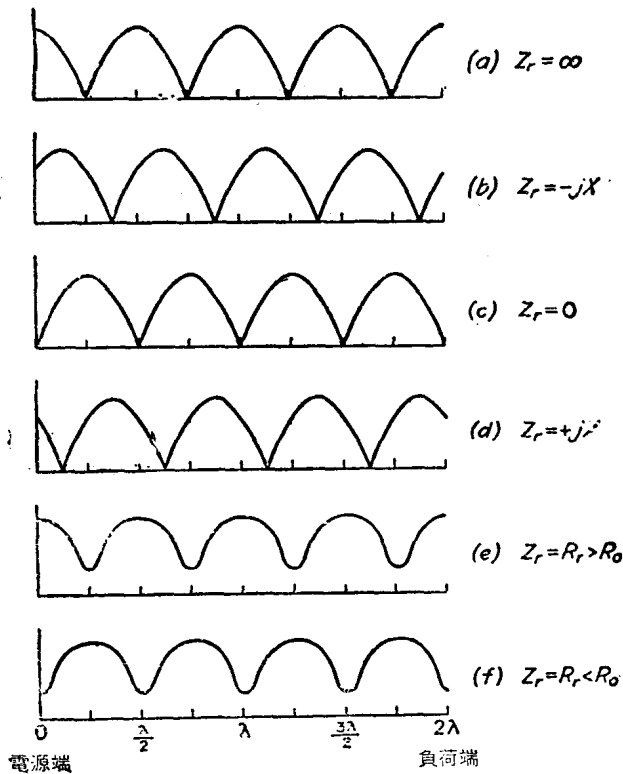


圖 1-4. 兩波長無損傳輸線上之電壓駐波

1-5 駐波性質。

傳輸線上與駐波有關數量簡易測試法，係量度其電壓極大值與極小值，以及各值在傳輸線上之位置與負載位置之關係。詳如圖 1-5 所示。通常，駐波最大值與最小值之關係，以駐波電壓比 (voltage standing-wave ratio) (縮寫為 VSWR) 示之，其定義如下：

$$\text{VSWR} = S = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} \quad (1-20)$$

駐波電壓比之數值與從負荷起至最近之電壓極小值距離 (如圖 1-5 中 Z 值) 完全由負載阻抗對傳輸線特性阻抗比值大小而定。由 (1-14) 式可求出最大電壓值。

$$V_{\max} = \frac{V_r}{2} \left[\left| 1 + \frac{Z_o}{Z_r} \right| + \left| 1 - \frac{Z_o}{Z_r} \right| \right] \quad (1-21)$$

和最小電壓值

$$V_{\min} = \frac{V_r}{2} \left[\left| 1 + \frac{Z_o}{Z_r} \right| - \left| 1 - \frac{Z_o}{Z_r} \right| \right] \quad (1-22)$$

將 (1-21) 和 (1-22) 式代入 (1-20) 式中，並加以演算簡化，則可求出

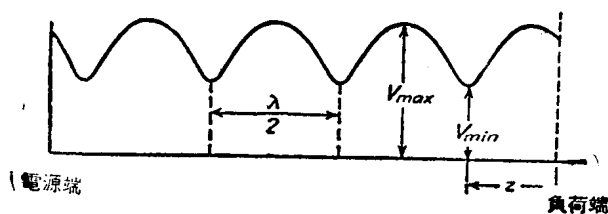


圖 1-5. 使用於駐波測試中之符號定義

VSWR 之結果，

$$S = \frac{1 + \left| \frac{Z_r - Z_0}{Z_r + Z_0} \right|}{1 - \left| \frac{Z_r - Z_0}{Z_r + Z_0} \right|} \quad (1-23)$$

在運用(1-23)式時，須注意表示大小之符號 (magnitude signs) 一般以 ρ_r 表之如下式，

$$\rho_r = \frac{Z_r - Z_0}{Z_r + Z_0} \quad (1-24)$$

就一已知之傳輸線而論， ρ_r 之數值完全由負載阻抗決定。另 ρ_r 之數值係與在負載上之反射電壓電波幅(reflected voltage amplitude) 和入射電壓波幅大小之比值相等。〔參看(1-14)式〕，故名之為反射係數 (reflection coefficient)。

由導出(1-23)式的同一運算方法，可將線電流代替線電壓為基礎，導出相同駐波的式子。就這兩式詳加比較，即可發現電流極大值之點，乃是電壓極小值之所在，而電流極小值則和電壓最大值出現於同一點上，這些點之位置，說明了阻抗最小(導納最大)和阻抗最大(導納最小)等之對應現象。

傳輸線上每一小段之輸入阻抗 (input impedance) 係以輸入點之線電壓與線電流之比值計算。(1-9) 和 (1-10) 式常用以解此比值。就 $Z_r = 0$ 和 $V_r = 0$ 時之短路傳輸線而論，該兩式可予以簡化，並說明無損傳輸線之輸入阻抗，係完全電抗性的，如下所示，為線長 l 之正切函數 (tangent function)。

$$Z_i = jZ_0 \tan \beta l \quad (1-25)$$

開路傳輸線 (open-circuited line) 輸入阻抗之式子係與 (1-25) 式相類似，只要把(1-25)式中之正切函數改成負餘切函數 (negative co-

tangent function)。由短路和開路傳輸線之演算過程中，將獲一重要之結論，即適當長度之傳輸線可以一等值電感抗或電容抗 (inductance or capacitance reactance)〔或電納 (susceptance)〕表示。

(1-23)式說明了 VSWR 之認識，係得自於量度 (measurement)，從而確定 Z_r 和 Z_0 間之關係，總之，對 Z_r 一數以及電壓極大值或極小值與負荷間之距離之瞭解，即可算出 Z_r 之正確數值。雖則計算公式可以導出，然實際情況中係利用傳輸線圖表 (transmission-line chart) 去求解。含各種式子基本關係之各樣圖表中，一般最常用的是矩形圖表 (rectangular chart) 和司密斯圖表 (Smith chart)，通常之演算，以運用司密斯圖表最為方便。

1-6. 矩形圖表

矩形圖表係繪出負荷傳輸線上任一點之輸入阻抗於電阻——電抗 (resistance-reactance) 或電導——電納 (conductance-susceptance) 之矩形坐標上。詳如圖 1-6，圖中所示之阻抗 (導納) 數值，係與線上之特性阻抗比較形成標準化 (normalized) 的關係，包圍於點 (1, 0) 之各圓，係表示在一無損傳輸線上各固定駐波比圓 (circles of constant standing wave ratio)，穿過點 (1, 0) 之各圓，係等線角 (constant line angle) βz 之軌跡， βz 軌跡可任定右邊實軸 (real axis) 為零度表之， βz 值增加，即表示趨近於電源端 (generator)。各固定駐波比圓與零電抗軸 (zero-reactance axis) 相交於 Z_0/S 和 $Z_0 S$ (或 $Y_0 S$ 和 Y_0/S) 兩點上，此項特性對圖解某些傳輸線的問題，甚為有用。

為說明此圖表用法，假定一具有 100Ω 特性阻抗無損傳輸線負載電阻 $Z_r = 423 + j175$ ，欲求在離負載端其 $\beta z = 20$ 度之點之輸入阻抗。

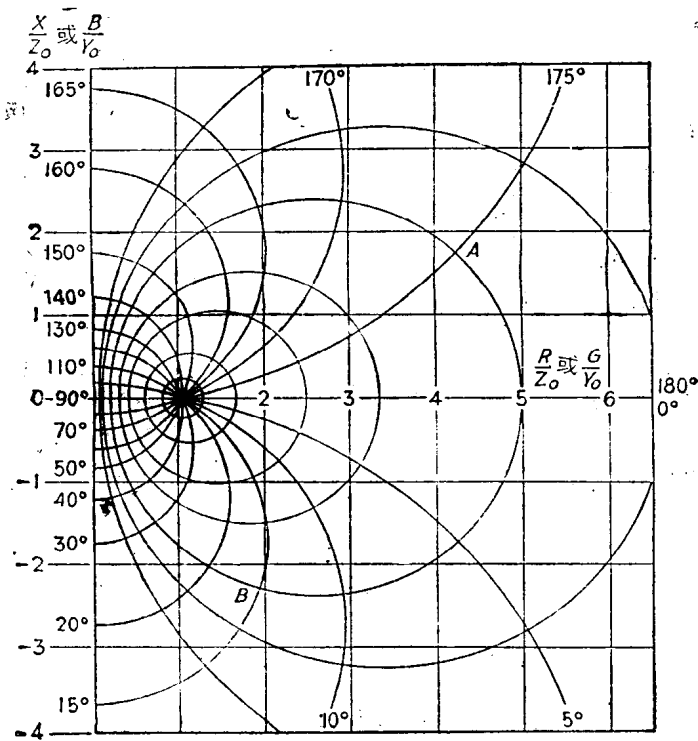


圖 1-6. 矩形傳輸線圖表

標準化負載阻抗(normalized load impedance)為 $Z_L/Z_0 = 4.23 + j1.75$ 標示於圖 1-6 中之 A 點, 即 $S=5$ 和 $\beta z=175^\circ$ 度之兩圓交點, 沿 $S=5$ 圓順時針方向量取 20 度線長得 B 點, 此點之標準化負載阻抗為 $Z_L/Z_0 = 1.92 - j2.30$ 。

1-7 司密斯圖表

圖 1-7 所示, 即司密斯圖表, 由下列各組線所構成:

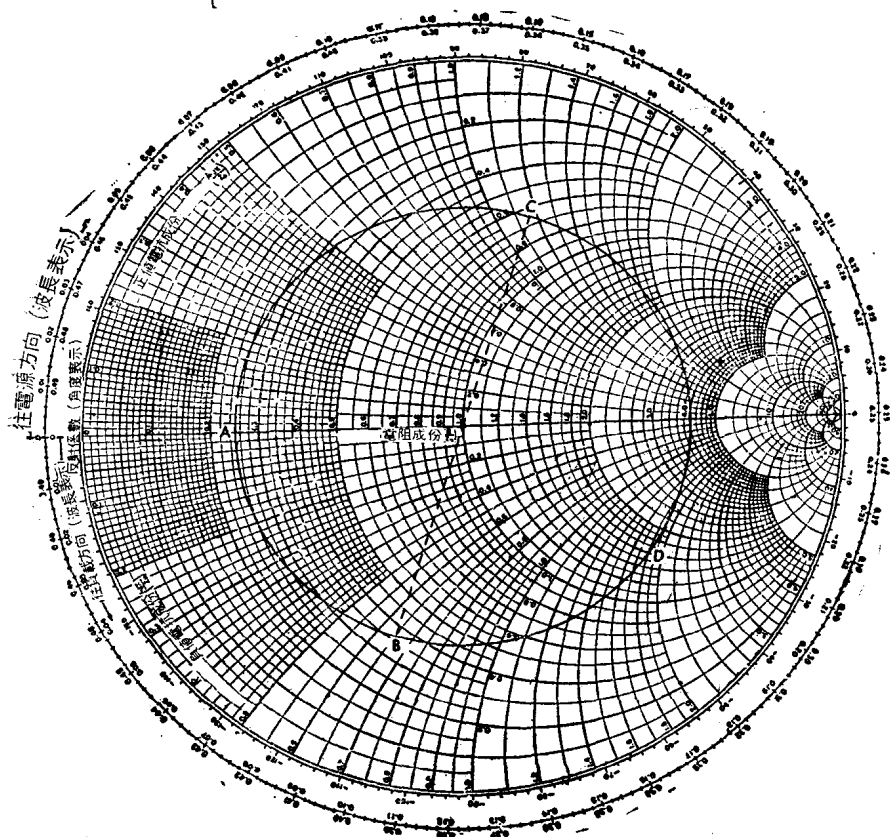


圖 1-7. 司 密 斯 圖 表

(1) 各固定電阻或固定電導圓 (constant-resistance or constant-conductance circles), 如圖 1-8 所示。各圓之圓心, 皆在實軸上並通過實軸之右端點。

(2) 各固定電抗或固定電納圓 (constant-reactance or constant-susceptance circles), 如圖 1-9 所示。各圓之圓心皆在整個圖表實軸右

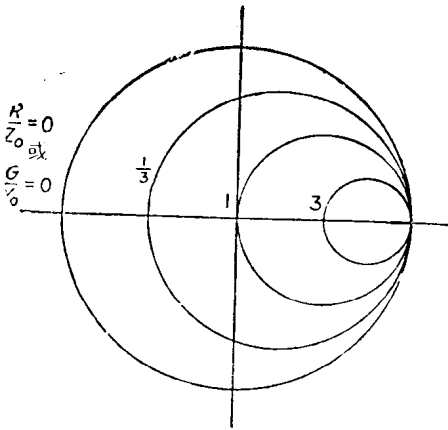


圖 1-8. 固定電阻或固定電導之軌跡

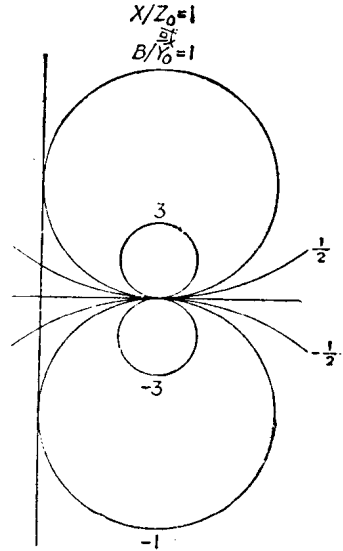


圖 1-9. 固定電抗或固定電納之軌跡

端之垂直線上，並通過實軸右端，實際上，在一完整圖表出現的，僅係各圓之部份而已。

(3) 固定 S 或固定 $|\rho|$ 之圓係集中於圖表之內，以中心點為圓心，如圖 1-10 所示，為免煩雜不清，這些圓在司密斯圖表中常予以略去。然如求解問題需要時，可用圓規輕易繪出。如同在矩形圖表中所述一樣，固定 S 圓 (constant S -circles) 與零電抗 (zero-reactance) 或零電納 (zero-susceptance) 軸相交於 $Z_0 S$ 點和 Z_0/S 點 (或 $Y_0 S$ 和 Y_0/S 兩點)。

(4) 輻射狀線 (radial lines) 也示於圖 1-10 中，係表示固定線角 (constant line angle) βz 之軌跡。在完整圖表中，各輻射狀線係被省略，然對應於線角 (line angle) 之波長刻度 (wavelength-scales) 則標示