

第一章傳輸線理論

1.1引言

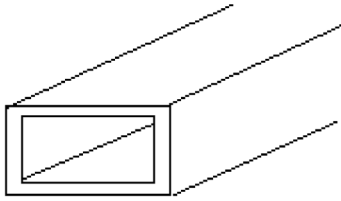
微波傳輸線是傳輸微波能量和信息的電磁裝置，也可用來構成各種微波元件。

本節主要講述兩點：

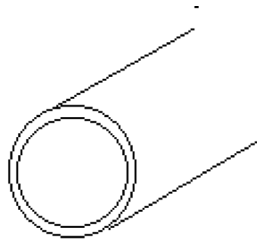
傳輸線的基本概念以及分佈參數的概念

一、傳輸線的基本概念

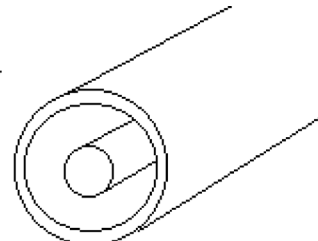
微波傳輸線是傳輸微波能量和信息的電磁裝置，也可用來構成各種微波元件。



矩形波導



圓形波導



同軸線波導

按其傳播的被導電磁波的特徵，大致可分為三種類型：

(1)TEM波傳輸線

(2)波導傳輸線

(3)表面波傳輸線

傳輸線的分析方法有“場”和“路”兩種方法。

二、分佈參數的概念

分佈參數是相對於集總參數而言的。

微波傳輸線與集總參數電路不同，當高頻信號通過傳輸線時將產生如下一些分佈參數效應

- 分佈電阻效應
-
- 分佈電導效應
-
- 分佈電感效應
-
- 分佈電容效應

所以在高頻情況下，傳輸線是具有分佈參數的電路。

1.2 傳輸線方程及其解

傳輸線方程是研究傳輸線的電壓、電流及其相互關係的方程。

本節主要講述三個問題：

傳輸線方程、傳輸線方程的解以及傳輸線的特性參量

一、傳輸線方程

傳輸線方程是研究傳輸線的電壓、電流及其相互關係的方程。

對於均勻傳輸線，由於參數是沿線均勻分佈的，所以只需考慮線元 dz 的情況，並把它看成集總參數電路。

$$dV(z)/dz=ZI(z) \quad (1-3a)$$

$$dI(z)/dz=YV(z) \quad (1-3b)$$

二、傳輸線方程的解

$$V(z)=V_L^+e^{+\gamma z}+V_L^-e^{-\gamma z}=V^+(z)+V^-(z)$$

$$I(z)=[V_L^+e^{+\gamma z}-V_L^-e^{-\gamma z}]/Z_0=[V^+(z)-V^-(z)]/Z_0=I^+(z)+I^-(z)$$

終端處の入射波電壓:

$$V_L^+ = \frac{V_L + I_L Z}{2}$$

終端處的反射波電壓:

$$V_L^- = \frac{V_L - I_L Z}{2}$$

三、傳輸線的特性參量

1. 傳播常數

$$\gamma = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)} = \alpha + j\beta$$

2. 特性阻抗

定義：傳輸線上任一點的行波電壓與行波電流之比，即入射波電壓與入射波電流之比，或反射波電壓與反射波電流之比的負值。

$$Z_0 = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)/(G_0 + j\omega C_0)}$$

3. 相速度和波長

相速度是指沿一個方向傳播的行波（入射波或反射波）前進的速度，定義為電磁波等向位點移動的速度。

微波傳輸線:

$$V_p = 1/\sqrt{L_0 C_0}$$

雙導線和同軸線:

$$V_p = c/\sqrt{\epsilon_r}$$

同一瞬間，沿傳輸線分佈的行波電壓（或行波電流）相位相同的相鄰兩點之間的距離稱為波長，換言之，即同一瞬間相位相差 2π 的兩點間的距離為波長。

$$V_p = 1/\sqrt{L_0 C_0}$$

1.3 傳輸線的阻抗和反射係數

阻抗是傳輸線理論中一個很重要的概念，它可以很方便地分析傳輸線的工作狀態。

本節主要講述三個問題：

傳輸線的輸入阻抗、反射係數以及反射係數與阻抗的關係

一、傳輸線的輸入阻抗

阻抗是傳輸線理論中一個很重要的概念，它可以很方便地分析傳輸線的工作狀態，傳輸線上某點 z 處向負載方向看的輸入阻抗定義為該點總電壓與總電流之比，即

$$Z_{in}(z) = \frac{V(z)}{I(z)}$$

可得

$$Z_{in}(z) = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan \beta z}{Z_0 + jZ_L \tan \beta z}$$

上式表明：均勻無耗傳輸線上z處的輸入阻抗與 Z_0 、 Z_L 、z及工作頻率有關。

無耗傳輸線的輸入導納是

$$Y_{in}(z) = \frac{1}{Z_{in}} = Y_0 \frac{Y_L + jY_0 \tan \beta z}{Y_0 + jY_L \tan \beta z}$$

二、反射係數

傳輸線上的波一般為入射波和反射波的迭加，為了表徵傳輸線的反射特性，我們引入“反射係數”的概念。均勻無耗傳輸線上某處的反射波電壓與入射波電壓之比定義為該處的電壓反射係數，即

$$\Gamma_v(z) = \frac{V^-(z)}{V^+(z)} = \frac{V_L^- e^{-j\beta z}}{V_L^+ e^{j\beta z}} = \frac{V_L^-}{V_L^+} e^{-j2\beta z}$$

波的反射現象是傳輸線上最基本的物理現象，反射係數不但有明確的物理概念，而且還可測定。因此在微波測量和微波網絡的分析與綜合中都廣泛採用了反射係數這一物理參量。

三、反射係數與阻抗的關係

1. 反射係數與輸入阻抗的關係

$$Z_{in}(z) = Z_0 \frac{1 + \Gamma(z)}{1 - \Gamma(z)}$$

或

$$\Gamma(z) = \frac{Z_{in}(z) - Z_0}{Z_{in}(z) + Z_0}$$

2. 反射係數與負載阻抗的關係

$$Z_L = Z_0 \frac{1 + \Gamma_L}{1 - \Gamma_L}$$

或

$$\Gamma(z) = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

1.4 無耗傳輸線工作狀態的分析

對於均勻無耗傳輸線，可根據反射係數的大小，將其工作狀態分為三種：

1. 行波狀態

2. 駐波工作狀態

3. 行駐波工作狀態

一、行波狀態

當傳輸線無限長或負載阻抗等於特性阻抗時，線上只有入射波，沒有反射波，入射波功率全部被吸收，這種稱為與負載相匹配的傳輸線，其上的狀態為行波狀態。

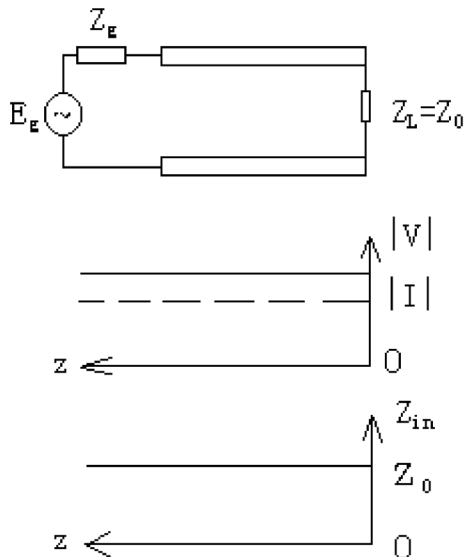
$$V(z) = V^+(z) = V_L^+ e^{j\beta z}$$

$$I(z) = I^+(z) = I_L^+ e^{j\beta z}$$

- (1) 線上電壓和電流的入射波振幅恆定不變
- (2) 波的相位是 z 和 t 的函數
- (3) 電壓行波和電流行波同相，傳輸線傳輸有功功率：

$$P = \frac{1}{2} \frac{|V_L^+|^2}{Z_0}$$

- (4) 線上的輸入阻抗處處相等，都等於特性阻抗 Z_0 。
- (5) 電壓、電流的幅值和阻抗沿線隨 z 的分佈情況：



二、駐波狀態

當傳輸線終端或接電抗負載，線上發生全反射，這時負載並不消耗能量，而把它全部反射回振盪器，同時線上出現了由入射波和反射波相互迭加而形成的駐波，這種狀態稱為駐波工作狀態。

$$v(z) = 2 |V_L^+| \cos(\beta z - \varphi_L / 2) \cos(\omega t + \varphi_L / 2 + \varphi_1)$$

$$i(z) = 2 \frac{|V_L^+|}{Z_0} \sin(\beta z - \varphi_L / 2) \cos(\omega t + \varphi_L / 2 + \varphi_1 + \pi / 2)$$

- (1) 電壓和電流的振幅是位置 z 的函數
- (2) 電壓、電流的相位和位置 z 無關；在相鄰兩個節點的範圍內，電壓(或電流)同相，而在節點兩邊相位差 π
- (3) 傳輸線不能傳輸能量，而只能存儲能量

$$4) \text{輸入阻抗為純電抗： } Z_{in}(z) = -jZ_0 \cos(\beta z - \varphi_L / 2)$$

三、行駐波狀態

若均勻無耗傳輸線終端接復阻抗,反射波與入射波振幅不相等,於是傳輸線呈現部分反射的狀態。

$$V(z) = 2|V_I^+ \Gamma_I| \cos(\beta z - \varphi_I / 2) e^{j(\beta z / 2 + \pi)} + |V_I^+| (1 - |\Gamma_I|) e^{j(\beta z + \pi)}$$

$$I(z) = j \frac{1}{Z_0} 2|V_I^+ \Gamma_I| \sin(\beta z - \varphi_I / 2) e^{j(\beta z / 2 + \pi)} + \frac{1}{Z_0} |V_I^+| (1 - |\Gamma_I|) e^{j(\beta z + \pi)}$$

1. 沿線電壓、電流分佈

(1) 線上同時存在著駐波和行波

(2) 駐波和行波振幅間的關係取決於反射係數的模,且隨其模的增大,駐波振幅也增大,而行波振幅則減小

(3) 在電壓和電流駐波振幅 $V_{st} = 0$ 和 $I_{st} = 0$ 的位置上,電壓和電流為最小值,並分別等於各自的行波振幅

(4) 最大點和最小點的位置

電壓最大點就是電流最小點,反之亦然。最大點與最小點之間的相距 $\lambda/4$,兩最大點或兩最小之間的距離為 $\lambda/2$ 。

2. 電壓駐波比與行波係數

電壓(或電流)駐波比 ρ 定義為沿線電壓(或電流)最大值與最小值之比,即

$$\rho = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$$

3. 阻抗特性

(1) 阻抗的數值週期性變化,在電壓最大值和電壓最小值處,阻抗為純電阻:

$$Z_{i\max} = \rho Z_0$$

$$Z_{i\min} = \frac{Z_0}{\rho}$$

(2) 每隔 $\lambda/4$, 阻抗的性質變化一次,即具有 $\lambda/4$ 變換性

(3) 每隔 $\lambda/2$, 阻抗重複一次,即具有 $\lambda/2$ 重複性

4. 傳輸功率

$$P(z) = P^+(z) - P^-(z)$$

$$P^+(z) = \frac{1}{2} \frac{|V_I^+|^2}{Z_0}$$

$$P^-(z) = \frac{1}{2} \frac{|V_I^+|^2}{Z_0} |\Gamma_I|^2$$

1.5 阻抗匹配與阻抗變換

在微波傳輸系統、微波測量及微波元器件的設計中,阻抗匹配非常重要,它關係到系統的傳輸效率、功率容量與工作穩定性,關係到微波測量的系統誤差和測量精度,以及微波元器件的質量等一系列問題。因此,匹配問題在微波技術中極其重要,需專門討論。

一、阻抗匹配的概念

阻抗匹配是指系統處於最佳狀態時的阻抗關係。

(1) 負載阻抗匹配,是指負載阻抗與傳輸線的特性阻抗相等,即 $Z_L = Z_0$, 這時,線上無反射,呈行波狀態,負載犧牲

全部入射功率，傳輸線的功率容量最大，效率最高。

(2)信號源阻抗匹配,是指信號源內阻與傳輸線特性阻抗相等,即 $Z_g = Z_0$

(3)共軛匹配,是指在傳輸線上任一截面的輸入阻抗(或稱等效負載)與信號源在此截面上的等效內阻 Z_g' 互成共軛值,即 $Z_g' = (Z_L')^*$

二、阻抗匹配方法

(1) $\lambda/4$ 阻抗變換法

當負載阻抗 $Z_L = R_L$ 時,可直接將 $\lambda/4$ 變換器串接於主傳輸線和負載間,特性阻抗為

$$Z_{0r} = \sqrt{R_L Z_0}$$

當負載阻抗 $Z_L = R_L + jX_L$ 時,在距負載 d 處將出現電壓最小點(或最大點)該出的輸入阻抗為純電阻,只要在該處串接入 $\lambda/4$ 變換器,特性阻抗為

$$Z_{0r} = Z_0 / \sqrt{\rho}$$

(2)短截線匹配法

利用一根或多根短路或開路短截線(通常多采用短路線),傳接或併接於主傳輸線中,靠它們產生的附加反射來抵消傳輸線原來的反射,從而達到匹配的目的。

1.6 阻抗圓圖及其應用

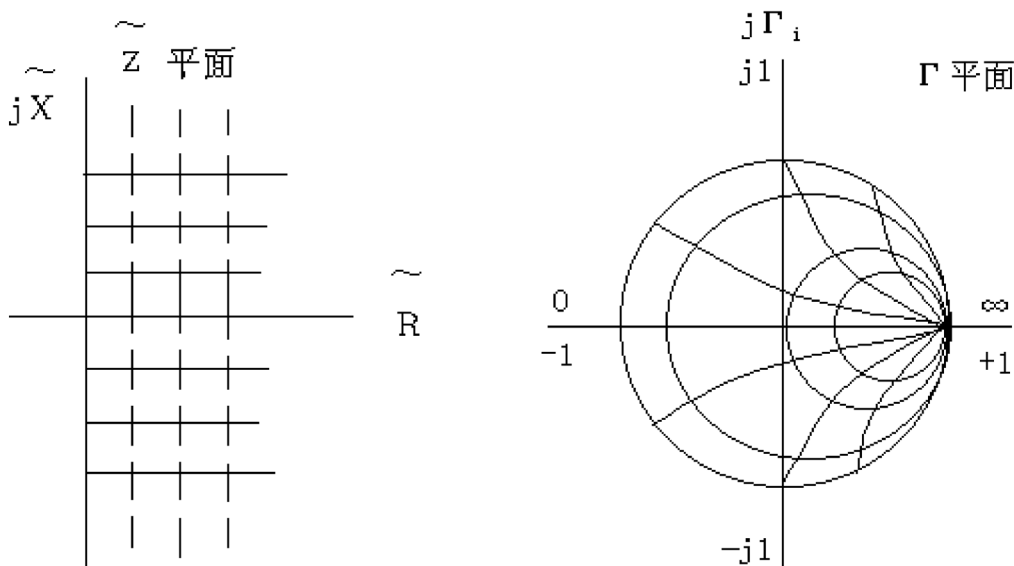
在微波工程中,常遇到阻抗變換和阻抗匹配和與其有關的計算問題。當然,這些都可直接採用上述各節的計算公式解決,但由於這些公式包含了複數和三角函數,運算繁瑣。因此,有必要在這種代數解析法之外,另闢蹊徑。本節要討論的阻抗圓圖就是求解上述問題的一種圖解法。

一、阻抗圓圖的建立

凡落在 Γ 平面單位圓上的點都代表純電抗,且上半圓周是正的,代表感抗,下半圓周是負的,代表容抗。

凡與 \bar{Z}_{in} 平面上的等電阻線的映像也是經過 $\Gamma=+1$ 點的圓族,並且這些圓與實軸 Γ_R 正交(保角性)。

凡與 \bar{Z}_{in} 平面上的等電抗線的映像也是經過 $\Gamma=+1$ 點的圓族,並且這些圓和等電阻圓也正交(保角性)。



二、阻抗圓圖的應用

- (1)計算阻抗、導納、反射係數和駐波比
- (2)單短截線匹配
- (3)雙短截線匹配

1.7 傳輸線的計算機輔助算法

隨著計算技術的迅速發展和自動測量的迫切需要，傳輸線問題也採用計算機輔助算法(CAA)和計算機輔助設計(CAD)。顯然，採用計算機求解，能做到快捷、準確；如果需要，還可在顯示器上顯示圓圖並在圓圖上作圖的動態求解過程，從而形象、直觀。解傳輸線問題一般有相應的解析表達式，容易將它們編成計算程序。在這裡，我們給出在IBM機上用BASIC語言編制的解傳輸線問題的程序清單，以饗讀者。

```

20 CLS:PI=3.1415926#:LOCATE 2,25:PRINT" CONTENTS"
30 LOCATE 4,5:PRINT" Z(Y)-Y(Z).....(1)"
40 LOCATE 4,35:PRINT" ZL(YL),L-Zin(Yin).....(2)"
50 LOCATE 6,5:PRINT" Zin(Yin),L-ZL (YL).....(3)"
70 LOCATE 6,35:PRINT" Z-Ref.Coef.....(4)"
80 LOCATE 8 ,5:PRINT" Ref.Coef.-Z.....(5)"
90 LOCATE 8,35:PRINT" VSWR,Dmin-ZL..... (6)"
100 LOCATE 10,5:PRINT" ZL-VSWR,Dmin.....(7)"
110 LOCATE 10,35:PRINT" SHUNT STUB MATCHING... ..(8)"
120 LOCATE 12,5:PRINT" SERIES STUB MATCHING.....(9)"
130 LOCATE 12,35:PRINT" DOUBLE STUB MATCHINGS.....(10) "
160 LOCATE 20,5:INPUT" YOUR SELECTION";I
170 ON I+1 GOTO 1000,180,210,240,270,300,350,400,430,450,600
180 CLS:LOCATE 8,4:PRINT" Z(Y)-Y(Z) INTERCHANGES":PRINT
190 COSUB 700:GOSUB 800:GOSUB 710
200 PRINT"Y(Z)=" R;" +j("X;")":GOTO 720
210 CLS:LOCATE 8,4:PRINT" ZL(YL),L-Zin(Yin) CALCULATIONS":PRINT
220 GOSUB 700:PRINT:INPUR"L= ";L:GOSUB 910:GOSUB 710
230 PRINT"Zin(Yin)="R;" +j("X;")":GOTO 720
240 CLS:LOCATE 8,4:PRINT" Zin(Yin), L-ZL(YL) CALCULAYIONS":PRINT
250 GOSUB 700:PRINT:INPUT" L=";L:L=-L:GOSUB 910:GOSUB 710
260 PRINT"ZL(YL)="R;" +j("X;")":GOTO 720
270 CLS:LOCATE 8,4:PRINT" Z-Ref.Coef. INTERCHANGES":PRINT
280 GOSUB 700:R=H:X=G:GOSUB 810:GOSUB 710
290 PRINT"Ref.Coef.="GA;"exp("T*180/PI;")":GOTO 720
300 CLS:PRINT" Ref.Coef.-Z INTERCHANGES":PRINT
310 INPUT"Ref, coef.(MOL,phase)=";G,H
320 FI=PI*H/180:R=-G*COS(FI):X=-G*SIN(FI)
330 GOSUB 810:R=-P: X=-Q:GOSUB 710
340 PRINT" Z="R;" +j("X;")":GOTO 720
350 CLS:LOCATE 8,4:PRINT" VSWR,Dmin-Z INTERCHANGES":PRINT
370 INPUT"VSWR,Dmin=";S,L:H=1/S:G=0:L=-L:GOSUB 910:GOSUB 710
380 PRINT" ZL="R;" +j("X;")":GOTO 720
400 CLS:LOCATE 8,4:PRINT" Z-VSWR,Dmin INTERCHANGES":PRINT
410 GOSUB 700:R=H:X=G:GOSUB 810:GOSUB 710
420 PRINT"VSWR="S, "Dmin=";L:GOTO 720
430 CLS:LOCATE 2,4:PRINT" SHUNT SINGLE-STUB MATCHING":PRINT
440 GOSUB 950:S1=SQR(S):GOSUB 955:S2=S1/(1-S):GOSUB 970:GOTO 720
450 CLS:LOCATE 2,4:PRINT" SERIES SINGLE-STUB MATCHING":PRINT
460 GOSUB 950 :S1=1/SQR(S):GOSUB 955:S2=(1-S)*S1:GOSUB 970:GOTO 720
600 CLS:LOCATE 4,4:PRINT"DOUBLE-STUB MATCHINGS":PRINT
605 LOCATE 8,4 :INPUT"ZL=RC+jXL=";HG:PRINT
610 INPUT" d1,d2=";L,D2:EE=2*PI*D2:S=1/(SIN(EE))^2
615 GOSUB= 910:H=R:G=X:GOSUB 800:E=TAN(EE)
620 IF R>=S THEN CLS:LOCATE 10,6:PRINT"NO SOLUTION!":GOTO 720
625 A1=(1-X* E)^2-R+E*E*(R-1)*R:B=2*(1-X*E)*E:C=E*E
630 A=SQR(B*B-4*A *C):Y1=- (B+A)/(2*A1):Y11=- (BA)/(2*A1)
640 DO1=ATN(Y1)/2/PI:DO2=ATN(Y11)/ 2/PI:GOSUB 960:L1=DO1:L11=DO2
660 Q1=1+E/Y1-X*E:Q2=X-1/Y1+E:D11=1+E/Y11-X*E:D22=X-1/Y11+E
665 Y2=(Q1^ 2+R*R*E*E)/(Q1*Q2-R*R*E)
670 Y22=(D11^2+R*R*E*E)/(D11*D22-R*R*E)

```

```

675 DO1=ATN(Y2)/2/PI:DO2=ATN(Y22)/2/PI:GOSUB 960:L2=DO1:L22=DO2
690 GOSUB 710:PRINT" L1=";L1;" L2="; L2:PRINT
695 PRINT" L1'=";L11;" L2'=";L22:GOTO 720
700 INPUT"Z(Y)=R(G)+jX(B)=";H,G:RETURN
710 LOCATE 15,5:PRINT" RESULTS:":PRINT:RETURN
720 LOCATE 22,1:INPUT" PRESS 1OR 0 TO CONTINUE OR NOT. ";I
730 ON I+1 GOTO 1000,20
800 C=H*H+G* G:R=H/C:X=-G/C
810 P=(R*X+X*X-1)/((R+1)^2+X*X):Q=2*X/( (R+1)^2+X*X)
820 GA=SQR(P*P+Q*Q):S=(1+GA)/(1-GA):K=(1-S*R)/ X
830 LL=ATN(K):IF K<0 THEN LL=LL+PI:L=LL/2/PI
832 L=LL/2/PI
840 IF Q=0 AND P=0 THEN T=0:GOTO 900
850 IF Q=0 THEN IF P>0 THEN T=0 ELSE T=PI:GOTO 900
860 IF P=0 THEN IF Q>0 THEN T=PI/2 ELSE T=PI:GOTO 900
870 T=ATN(Q/P)
880 IF Q>0 THEN T<0 THEN T=T+PI ELSE T=T:GOTO 900
890 IF Q<0 THEN IF T>0 THEN T=T+PI ELSE T=3*PI/2:GOTO 900
900 RETURN
910 IF L>1 THEN L=L-1:GOTO 910
920 E=TAN(2*PI *L):C=(1-G*E)^2+H*H*E*E:A=H*(1-G*E)+H*E*(G+E)
930 B=( 1-G*E)*(G+E)-H*H*E:R=A/C:X=B/C
940 RETURN
950 GOSUB 700:R=H:X=G:GOSUB 810:RETURN
955 D0 =ATN(1/S1)/2/PI:D01=D0+L:D02=-D0+L
960 IF D01>.5 THEN D01=D01-.5
963 IF D01<0 THEN D01=D01+.5
695 IF D02>.5 THEN D02=D02-.5
968 IF D02<0 THEN D02=D02+.5:RETURN
970 L0=ATN(S2)/2/PI:L01=L0+.5:L02=-L0:GOSUB 710
975 IF L01>.5 THEN L01=L01-.5
978 IF L01<0 THEN L01=L01+.5
980 IF L02>.5 THEN L02=L02-.5
983 IF L02<0 THEN L02=L02+.5
985 PRINT"D11=";D01;" L11=";L01:PRINT
990 PRINT"D12=";D02;"L12=";L02:RETURN
1000 END

```