

《微波技术基础》

Fundamentals of Microwave Technology

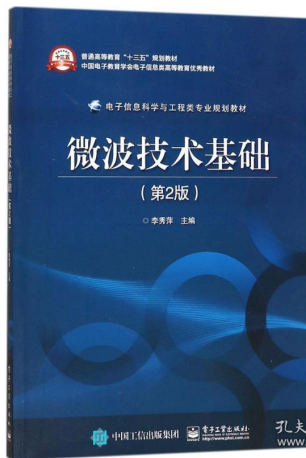
Yang Jing¹

¹School of Electronic Information and Electrical Engineering
Hefei Normal University

2022 年 11 月 9 日



《微波技术基础（第2版）》，李秀萍编，电子工业出版社，2017.7.



参考书目

-  R.E.Colin 著, 吕继尧译 (1981).
《微波工程基础》 [M].
人民邮电出版社.
-  吴明英, 毛秀华 (1995).
《微波技术》 [M].
西安电子科技大学出版社.
-  廖承恩 (1994).
《微波技术基础》 [M].
西安电子科技大学出版社.
-  梁昌洪.
国家级精品课程-《微波工程基础》网络视频.
西安电子科技大学.
-  赵春晖, 杨莘元 (2003).
《现代微波技术基础》 [M] (第二版).
哈尔滨工程大学出版社.



考核模式

- ① 平时成绩 100 分, 占总成绩 50%
 - ① 学习态度: 100 分, 占 20%(考勤 100 分, 占 100%)
 - ② 课堂参与: 100 分, 占 30%(课堂表现, 课堂回答问题积极性, 100 分, 占 100%)
 - ③ 平时作业: 100 分, 占 50%(书面作业 100 分, 占 100%)
- ② 期末考核 100 分, 占总成绩 50%(期末笔试 100 分, 占 100%)



① 第 5 章 微波网络理论与分析



第 5 章 微波网络基础

电磁场理论和网络理论代表着不同的两个方面：场是网络的内部原因，而网络则是场的外部表现。



1 第5章 微波网络理论与分析

- 微波网络概念及等效关系
- 微波网络参量
- 微波网络参量的性质
- 二端口微波网络的工作特性参量
- 微波网络的组合
- 二端口网络的等效电路
- 信号流图分析及其应用



微波网络概念及等效关系

微波网络由分布参数电路和集总参数网络组合而成。分布参数电路由组成微波电路或系统的规则导行系统等效而成，集总参数网络则由微波电路或系统中的不连续性等效而成。应用这种等效关系，许多微波问题，在电磁场理论分析基础上，或者在实验的基础上，便可以应用传输线理论和低频网络理论来处理。

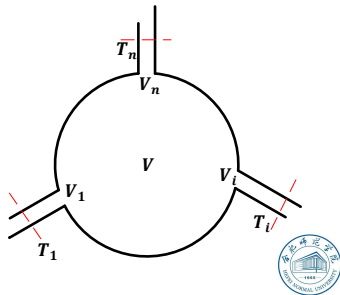


微波网络概念及等效关系

考虑一个不均匀区域：一个具有理想导体壁的 n 口波导结构，除了 n 个端口外，其余部分与外界没有场的联系，如图所示。若作一封闭面 S 将其包围起来，并将 S 和各波导垂直相交的截面选作参考面，且用 T_1, T_2, \dots, T_n 表示，则其结构内的电磁场应满足 *Maxwell* 方程组。最基本的方法：求解电磁场方程。但是在整个电路范围内求解电磁场方程非常复杂，难以工程应用。

微波网络方法：将射频电路分解为传输线和不连续性的组合，然后对传输线和不连续性分别建模。

网络方法的思想：化繁为简、各个击破，把复杂的三维电磁场问题变为一维电路问题。



微波网络概念及等效关系

- 传输线建模

把传输线等效为双线，用特征参数表征。单模传输线等效为一条双线， n 模传输线等效为 n 条传输线。

- 不连续性建模

可以采用等效电路模型，也可以采用网络矩阵表征。

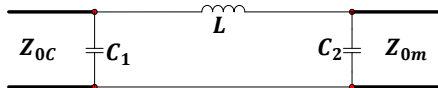
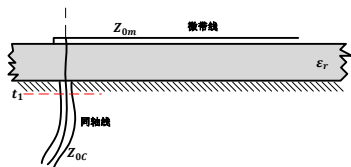
- 通过建模，射频电路等效为由传输线和不连续性网络构成的电路。射频电路就可以采用电路理论分析和设计，“场方法”转化为“路方法”。



微波网络概念及等效关系

当波从一传输线入射到一不连续性区域时，一部分反射会传输线，其余部分通过不连续性区域传输到其他传输线，同时在不连续性区域激发出高次模，这些高次模在传输线中为截止波，所以很快衰减掉。这样在不连续性附近就形成了一个能量存储区，相当于电抗元件。

以网络的观点，不连续性区域可以看作连接传输线的网络。在传输线上适当位置选取参考面 T ，不连续性区域就可以等效为多端口网络。



微波网络概念及等效关系

① 微波传输线等效为双线

- 等效阻抗: 等效电压和等效电流之比

$$Z(z) = \frac{V(z)}{I(z)}$$

- 归一化等效阻抗

$$z = \frac{Z(z)}{Z_0} = \frac{V(z)/\sqrt{Z_0}}{I(z)\sqrt{Z_0}} = \frac{1 + \Gamma(z)}{1 - \Gamma(z)}$$

归一化等效电压: $v(z) = V(z)/\sqrt{Z_0}$

归一化等效电流: $i(z) = I(z)\sqrt{Z_0}$

- 功率

$$P = \frac{1}{2} [V(z)/\sqrt{Z_0}] [I^*(z)\sqrt{Z_0}] = \frac{1}{2} v(z) i^*(z)$$



微波网络概念及等效关系

① 微波传输线等效为双线

- 等效双线上的电压和电流可以写成入射波和反射波之和，即：

$$\begin{cases} V(z) = V^+(z) + V^-(z) \\ I(z) = I^+(z) - I^-(z) = \frac{1}{Z_0} [V^+(z) - V^-(z)] \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \frac{V(z)}{\sqrt{Z_0}} &= \frac{V^+(z)}{\sqrt{Z_0}} + \frac{V^-(z)}{\sqrt{Z_0}} \\ I(z)\sqrt{Z_0} &= \frac{V^+(z)}{\sqrt{Z_0}} - \frac{V^-(z)}{\sqrt{Z_0}} \end{aligned}$$

\Downarrow

$$\begin{aligned} v(z) &= v^+(z) + v^-(z) \\ i(z) &= v^+(z) - v^-(z) \end{aligned}$$



微波网络概念及等效关系

① 微波传输线等效为双线

- 归一化入射波电压模的平方正比于入射波功率，即

$$P^+ = \frac{1}{2} |V^+(z)| |I^+(z)| = \frac{|V^+(z)|^2}{2Z_0} = \frac{1}{2} \left| \frac{V^+(z)}{\sqrt{Z_0}} \right|^2 = \frac{1}{2} |v^+(z)|^2$$

- 归一化反射波电压模的平方正比于入射波功率，即

$$P^- = \frac{1}{2} |V^-(z)| |I^-(z)| = \frac{|V^-(z)|^2}{2Z_0} = \frac{1}{2} \left| \frac{V^-(z)}{\sqrt{Z_0}} \right|^2 = \frac{1}{2} |v^-(z)|^2$$



微波网络概念及等效关系

② 不均匀区等效为网络

研究微波网络首先必须确定网络的参考面，参考面的位置可以任意选，但是必须考虑两点：

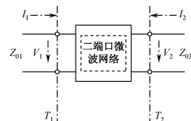
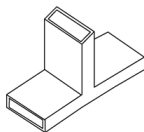
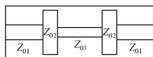
- 单模传输时，参考面的位置应该尽量选取在远离不连续区域，这样参考面上的高次模场强可以忽略，只需考虑主模的场强
- 选择参考面必须与传输方向相垂直，这样可使参考面上的电压和电流有着明确意义

网络参考面一旦确定后，所定义的微波网络就是由这些参考面所包围的区域，网络的参数也就唯一确定，如果参考面位置改变，则网络参数也随之改变。

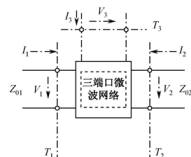


微波网络概念及等效关系

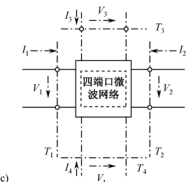
② 不均匀区等效为网络



(a)



(b)



(c)



1 第5章 微波网络理论与分析

- 微波网络概念及等效关系
- 微波网络参量
- 微波网络参量的性质
- 二端口微波网络的工作特性参量
- 微波网络的组合
- 二端口网络的等效电路
- 信号流图分析及其应用



微波网络参量

① 微波网络的电路参量

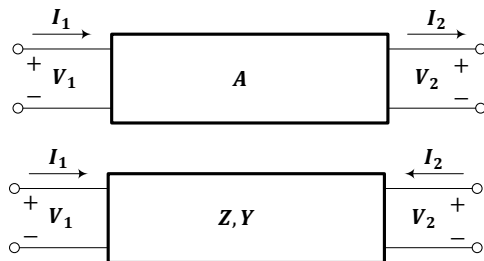


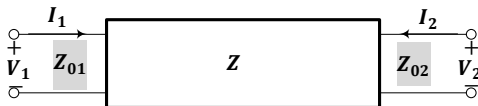
图 1.1: 用 Z, Y 和 A 参数表示的二端口网络示意图



微波网络参量

① 微波网络的电路参量

- 阻抗矩阵 $[Z]$: 反映电压、电流关系



$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

$$[V] = [Z][I] \quad (1.2)$$



微波网络参量

① 微波网络的电路参量

- 网络的“开路”参数：“自阻抗”和“转移阻抗”

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} V_1 &= Z_{11} \cdot I_1 + Z_{12} \cdot I_2 \\ V_2 &= Z_{21} \cdot I_1 + Z_{22} \cdot I_2 \end{aligned} \quad Z = \frac{V}{I}$$

$$\begin{aligned} Z_{11} &= \left. \frac{V_1}{I_1} \right|_{I_2=0} & Z_{21} &= \left. \frac{V_2}{I_1} \right|_{I_2=0} & \text{2端口开路} \\ Z_{22} &= \left. \frac{V_2}{I_2} \right|_{I_1=0} & Z_{12} &= \left. \frac{V_1}{I_2} \right|_{I_1=0} & \text{1端口开路} \end{aligned}$$



微波网络参量

① 微波网络的电路参量

- 归一化阻抗矩阵 $[z]$: 用 Z_{01}, Z_{02} 归一化

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{Z_{01}}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{Z_{02}}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{Z_{01}} & 0 \\ 0 & \sqrt{Z_{02}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

根据式 (1.1) 和式 (1.3),(1.4) 有

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{Z_{01}}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{Z_{02}}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{Z_{01}} & 0 \\ 0 & \sqrt{Z_{02}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix}$$



微波网络参量

① 微波网络的电路参量

- 归一化阻抗矩阵 $[z]$: 用 Z_{01}, Z_{02} 归一化

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{Z_{01}}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{Z_{02}}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{Z_{01}} & 0 \\ 0 & \sqrt{Z_{02}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Z_{11}}{Z_{01}} & \frac{Z_{12}}{\sqrt{Z_{01} \cdot Z_{02}}} \\ \frac{Z_{21}}{\sqrt{Z_{01} \cdot Z_{02}}} & \frac{Z_{22}}{Z_{02}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} \quad [v] = [z][i] \quad (1.6)$$



① 微波网络的电路参量

表 1.1: 阻抗矩阵单元物理意义

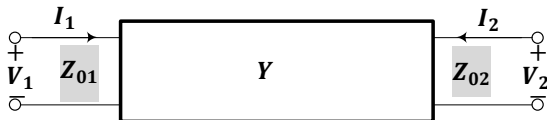
阻抗矩阵阵元	计算公式	物理意义
Z_{11}	$\frac{V_1}{I_1} \Big _{I_2=0}$	输出端口开路情况下的输入阻抗
Z_{12}	$\frac{V_1}{I_2} \Big _{I_1=0}$	输入端口开路情况下的反向传输阻抗
Z_{21}	$\frac{V_2}{I_1} \Big _{I_2=0}$	输出端口开路情况下的正向传输阻抗
Z_{22}	$\frac{V_2}{I_2} \Big _{I_1=0}$	输入端口开路情况下的输出阻抗



微波网络参量

① 微波网络的电路参量

- 导纳矩阵 $[Y]$



$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$
$$[I] = [Y][V]$$



① 微波网络的电路参量

- 网络的“短路”参数：“自导纳”和“转移导纳”

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

$$Y_{ij} = \left. \frac{I_i}{V_j} \right|_{V_k=0, k \neq j}$$

所有其他端口短路时，驱动端口 j 的电压为 V_j 时在端口 i 测得的短路电流来确定。

$$[i] = [y][v] \quad [y] = \begin{bmatrix} Y_{11}Z_{01} & Y_{12}\sqrt{Z_{01}Z_{02}} \\ Y_{21}\sqrt{Z_{01}Z_{02}} & Y_{22}Z_{02} \end{bmatrix}$$



① 微波网络的电路参量

表 1.2: 导纳矩阵单元物理意义

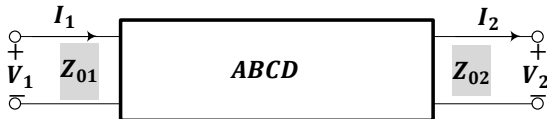
导纳矩阵阵元	计算公式	物理意义
Y_{11}	$\frac{I_1}{V_1} \Big _{V_2=0}$	输出端口短路情况下的输入导纳
Y_{12}	$\frac{I_1}{V_2} \Big _{V_1=0}$	输入端口短路情况下的反向传输导纳
Y_{21}	$\frac{I_2}{V_1} \Big _{V_2=0}$	输出端口短路情况下的正向传输导纳
Y_{22}	$\frac{I_2}{V_2} \Big _{V_1=0}$	输入端口短路情况下的输出导纳



微波网络参量

① 微波网络的电路参量

- 转移矩阵 $[A]$



$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{cases} V_1 = A \cdot V_2 + B \cdot I_2 \\ I_1 = C \cdot V_2 + D \cdot I_2 \end{cases}$$

$$A = \left. \frac{V_1}{V_2} \right|_{I_2=0} \quad C = \left. \frac{I_1}{V_2} \right|_{I_2=0} \quad \text{2端口开路}$$

$$B = \left. \frac{V_1}{I_2} \right|_{V_2=0} \quad D = \left. \frac{I_1}{I_2} \right|_{V_2=0} \quad \text{2端口短路}$$



① 微波网络的电路参量

表 1.3: 导纳矩阵单元物理意义

导纳矩阵阵元	计算公式	物理意义
A	$\left. \frac{V_1}{V_2} \right _{I_2=0}$	输出端口开路情况下的反向电压增益
B	$\left. \frac{V_1}{I_2} \right _{V_2=0}$	输出端口短路情况下的互阻抗
C	$\left. \frac{I_1}{V_2} \right _{I_2=0}$	输出端口开路情况下的互导纳
D	$\left. \frac{I_1}{I_2} \right _{V_2=0}$	输出端口短路情况下的反向电流增益



① 微波网络的电路参量

- 归一化转移矩阵 $[a]$

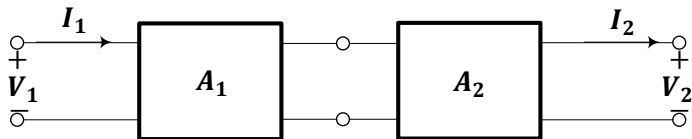
$$\begin{bmatrix} v_1 \\ i_1 \end{bmatrix} = [a] \begin{bmatrix} v_2 \\ i_2 \end{bmatrix} \quad [a] = \begin{bmatrix} A\sqrt{\frac{Z_{02}}{Z_{01}}} & \frac{B}{\sqrt{Z_{01}Z_{02}}} \\ C\sqrt{Z_{01}Z_{02}} & D\sqrt{\frac{Z_{01}}{Z_{02}}} \end{bmatrix}$$



微波网络参量

① 微波网络的电路参量

- 转移矩阵 $[A]$ 的用途——网络的级联 (Cascade)



$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix}$$
$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix}$$



微波网络参量

① 微波网络的电路参量

- 小结：“电路”参量——反映电压、电流关系

$$[V] = [Z][I] \quad [v] = [z][i]$$

$$[I] = [Y][V] \quad [i] = [y][v]$$

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} v_1 \\ i_1 \end{bmatrix} = [a] \begin{bmatrix} v_2 \\ i_2 \end{bmatrix}$$



1 第5章 微波网络理论与分析

- 微波网络概念及等效关系
- 微波网络参量
- 微波网络参量的性质
- 二端口微波网络的工作特性参量
- 微波网络的组合
- 二端口网络的等效电路
- 信号流图分析及其应用



微波网络参量的性质



1 第5章 微波网络理论与分析

- 微波网络概念及等效关系
- 微波网络参量
- 微波网络参量的性质
- 二端口微波网络的工作特性参量
- 微波网络的组合
- 二端口网络的等效电路
- 信号流图分析及其应用



二端口微波网络的工作特性参量



1 第5章 微波网络理论与分析

- 微波网络概念及等效关系
- 微波网络参量
- 微波网络参量的性质
- 二端口微波网络的工作特性参量
- **微波网络的组合**
- 二端口网络的等效电路
- 信号流图分析及其应用



微波网络的组合



1 第5章 微波网络理论与分析

- 微波网络概念及等效关系
- 微波网络参量
- 微波网络参量的性质
- 二端口微波网络的工作特性参量
- 微波网络的组合
- 二端口网络的等效电路
- 信号流图分析及其应用



二端口网络的等效电路



1 第5章 微波网络理论与分析

- 微波网络概念及等效关系
- 微波网络参量
- 微波网络参量的性质
- 二端口微波网络的工作特性参量
- 微波网络的组合
- 二端口网络的等效电路
- 信号流图分析及其应用



信号流图分析及其应用

