

第二章 微波网络

- ◆ § 2.1 微波网络的概念
- ◆ § 2.2 二端口网络及其网络参量



§ 2.1 微波网络的概念

一、网络的基本概念

1、微波系统的研究方法

任何一个微波系统,都是由**各种微波元件和微波传输线组成**。微波传输线的特性可以用广义传输线方程来描写,微波元件的特性可以用类似于低频网络的等效电路来描述。因此**任何一个复杂的微波系统都可以用电磁场理论和低频网络理论相结合的方法来求解**,这种理论称为**微波网络理论**。

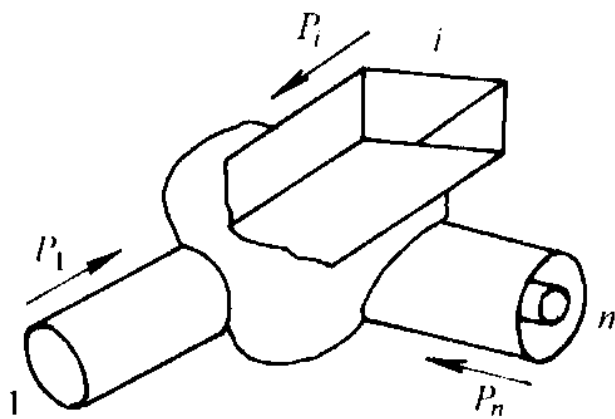
一般的微波元件都可以用路的方法分析,但是有一些元件只能用场的分析方法,本章主要讨论将微波元件等效为**路**的分析方法。

§ 2.1 微波网络的概念

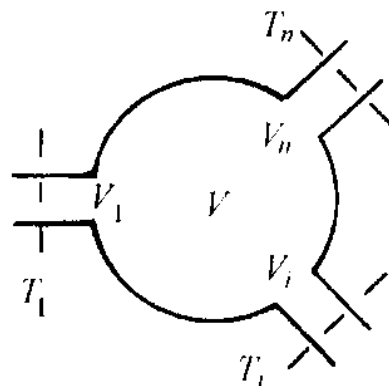
2、端口与网络参考面的选择

每个微波元件可能和若干个微波传输线相连接，如图所示。这些传输线既将元件与系统沟通，又为电磁波进出不均匀区提供接口通路，称这些连接口为**端口**。

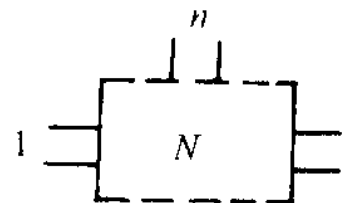
若各均匀传输线是**单模**工作，则微波元件的**电气端口**数与**几何端口**数相同，并按端口数目的多少将微波元件分为单端口、双端口、... ..、 n 端口元件，相应的等效网络也分别称为单端口、双端口或 n 端口网络；若传输线内是多模传输，则电气端口数为各传输波形的总和。本章只研究单模传输的情况。



(a) n 端口微波元件



(b) 简化表示法



(c) 网络示意图

§ 2.1 微波网络的概念

在每根均匀传输线中，远离不均匀区处，一定有这样一个位置，其上截止波的场已衰减到非常小，可以忽略不计，而只剩下传输波的场，该位置就取作该端口的**参考面**，并用 T_1, T_2, \dots, T_n 表示。

每个端口的参考面都选得离不均匀区较远，使得参考面上只有主模的入射波和反射波。

参考面把复杂的微波元件分成两个部分：一部分是各参考面所包围的不均匀或不连续性区域；另一部分是参考面外的均匀传输线。

§ 2.1 微波网络的概念

根据电磁场边值解的惟一性定理：在一个封闭区域内的边界上，切向电场（或磁场）如果是确定的，那么封闭区域内的电磁场也就被惟一地确定。

由于不均匀区域的边界是理想导体和各端口的参考面，而参考面上的模式电压和电流是与横向电磁场 E_t 、 H_t 有关的，所以只要参考面的模式电压确定，则这些参考面上的电流也就完全确定了，反之亦然。

利用参考面上的电压与电流就可将不均匀区域等效为一网络，而均匀传输线则等效为微波双线。由于微波网络的参数是由参考面上的电压与电流确定的，所以参考面的选取始终是决定微波网络特性的关键因素之一。

§ 2.1 微波网络的概念

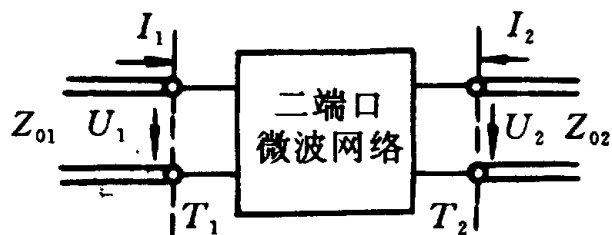
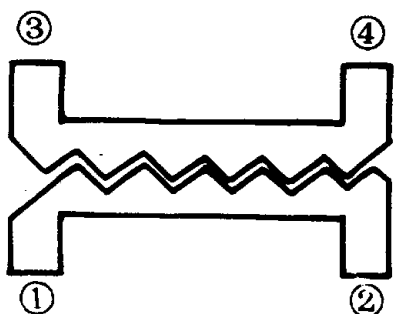
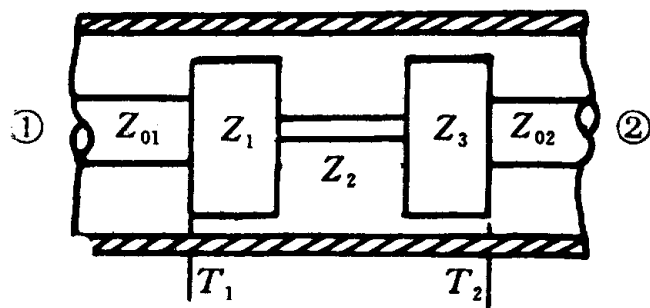
综上所述，为了把微波元件等效为微波网络，要解决如下三个问题：

- 1、确定微波元件的参考面；
- 2、由横向电磁场定义等效电压、等效电流和等效阻抗，把均匀传输线等效为双线传输线；
- 3、确定网络参数、建立网络方程，将不均匀区域等效为网络。

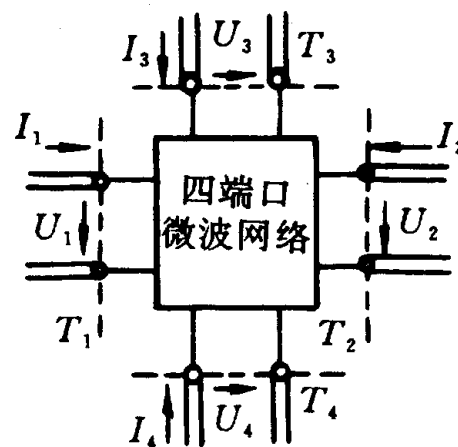
§ 2.1 微波网络的概念

如图所示：其中图(a)为同轴线低通滤波器，外接传输线为两路，其参考面有两个，故称为两端口网络。

图(b)为微带定向耦合器，它是四端口网络。



(a)



(b)

§ 2.1 微波网络的概念

3、网络分析和网络综合。

网络分析的是对已知的微波元件或微波结构，应用网络或等效电路的方法进行分析，求得其特性，然后用许多这样的基本结构组合起来，以实现所需要的微波元件的设计；----该方法所应用的元件不是最少，设计也不是最佳。

网络综合的任务是根据预定的工作特性要求，应用数学最优化方法,求出物理上可实现的网络结构，并用微波电路实现，从而得到所需设计的微波元件。---该方法是最佳设计。

低频网络是微波网络的基础,因此低频网络的一些定律定理概念方法等,可以移植过来使用,如克希霍夫定律回路电流法节电位法叠加原理互易定理戴维宁定理等都可以用来决微波电路问题。

§ 2.1 微波网络的概念

4、网络的分类

微波网络的种类很多,可以按各种不同的角度将网络进行分类。若按网络的特性进行分类,则可分为下列几种。

(1) 线性与非线性网络

若微波网络参考面上的模式电压与模式电流呈线性关系,则描写网络特性的网络方程为线性代数方程。这种微波网络称为线性网络。

(2) 可逆和不可逆网络

若网络内只含有各向同性媒质,则网络参考面上的场量呈可逆状态,这种网络称为可逆网络,反之称为不可逆网络。一般非铁氧体的无源微波元件都可等效为可逆微波网络,而铁氧体微波元件和有源微波电路,则可等效为不可逆的微波网络。可逆与不可逆网络又可称为互易网络和非互易网络。

§ 2.1 微波网络的概念

(3) 无耗和有耗网络

若网络内部为无耗媒质,且导体是理想导体,即网络的输入功率等于网络的输出功率。这种网络称为无耗网络,反之称为有耗网络。

(4) 对称和非对称网络

如果微波元件的结构具有对称性,则与它相对应的微波网络称为对称网络。反之称为非对称网络。

§ 2.1 微波网络的概念

二、微波元件等效为网络

1、微波传输线等效成为双线

在微波测量技术中，功率是能够测量的基本参量之一，因此可以通过功率关系确定波导与双线之间的等效关系。

只要双线上的电压电流用波导的模式电压电流代替，就可以将波导等效为双线，因为两者传输的功率是一样的。

为了定义任意截面沿z方向单模传输的均匀波导参考面上的模式电压与模式电流，一般作如下规定：

(1)使模式电压 $U(z)$ 正比于横向电场 E_t ；模式电流 $I(z)$ 正比于横向磁场 H_t ；

(2)模式电压与模式电流的共轭乘积的实部等于平均传输功率，即

$$P = \frac{1}{2} \operatorname{Re}[U(z) I^*(z)]$$

§ 2.1 微波网络的概念

(3)模式电压与模式电流之比等于模式特性阻抗。

由此可见,任何一段均匀传输线均可以看成等效双线,并可应用传输线理论来进行分析。但必须指出:双线中**电压和电流是唯一可以确定的**,而等效双线中模式电压和模式电流不能唯一确定,这主要是由于阻抗的不确定性引起的,为了消除这种不确定性,必须引进归一化阻抗的概念,即

$$\tilde{Z} = \frac{Z}{Z_0} = \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma}$$

§ 2.1 微波网络的概念

式中电压反射系数 Γ 可以直接测量,故归一化阻抗可以唯一确定,其中 Z_0 是等效双线的模式特性阻抗,即波导的等效阻抗或波阻抗。

根据归一化阻抗概念可以导出归一化电压与归一化电流的定义

$$\tilde{Z} = \frac{Z}{Z_0} = \frac{\frac{U(z)}{I(z)}}{Z_0} = \frac{\frac{U(z)}{\sqrt{Z_0}}}{I(z)\sqrt{Z_0}} = \frac{\tilde{U}(z)}{\tilde{I}(z)}$$

故归一化电压和归一化电流的定义为

$$\begin{cases} \tilde{U}(z) = \frac{U(z)}{\sqrt{Z_0}} \\ \tilde{I}(z) = I(z)\sqrt{Z_0} \end{cases}$$

§ 2.1 微波网络的概念

同样归一化入射波和归一化反射波定义为:

$$\begin{cases} \tilde{U}_i(z) = \frac{U_i(z)}{\sqrt{Z_0}} & \tilde{U}_r(z) = \frac{U_r(z)}{\sqrt{Z_0}} \\ \tilde{I}_i(z) = \frac{U_i(z)}{\sqrt{Z_0}} = \tilde{U}_i(z) & \tilde{I}_r(z) = -\frac{U_r(z)}{\sqrt{Z_0}} = -\tilde{U}_r(z) \end{cases}$$

于是入射波功率和反射波功率可表示为

$$\begin{cases} P_i = \frac{1}{2} \operatorname{Re}[\tilde{U}_i \tilde{I}_i^*(z)] = \frac{1}{2} |\tilde{U}_i(z)|^2 \\ P_r = \frac{1}{2} \operatorname{Re}[\tilde{U}_r \tilde{I}_r^*(z)] = \frac{1}{2} |\tilde{U}_r(z)|^2 \end{cases}$$

则传输的有功功率为

$$\begin{aligned} P &= P_i - P_r = \frac{1}{2} |\tilde{U}_i(z)|^2 - \frac{1}{2} |\tilde{U}_r(z)|^2 \\ &= \frac{1}{2} |\tilde{U}_i(z)|^2 (1 - |\Gamma|^2) \end{aligned}$$

§ 2.1 微波网络的概念

2、不均匀区域等效为微波网络的原理

电磁场唯一性定理指出,如果一个封闭曲面上的切向电场(或切向磁场)给定,或者一部分封闭面上给定切向电场,另一部分封闭面上给定切向磁场,那么这个封闭面内的电磁场就被唯一确定。微波网络的边界是由理想导体和网络参考面所组成,而理想导体的边界条件为切向电场均等于零,因此只要给定参考面上切向电场(或切向磁场),或者一部分参考面上给定切向电场,另一部分参考面上给定切向磁场,则区域内的电磁场也被唯一确定。



§ 2.1 微波网络的概念

如果网络内部的媒质是线性媒质,则描写网络内部电磁场的麦克斯韦方程为一组线性微分方程。同理,描写各个参考面上的模式电压和模式电流之间的关系的方程也是线性方程。这个网络称为线性网络。对于n端口线性网络,如果各个参考面上都有电流作用时,应用叠加原理,则任意参考面上的电压为各个参考面上的电流单独作用时在该参考面上,引起的电压响应之和,即

$$\begin{cases} U_1 = Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2 + \cdots + Z_{1n}I_n \\ U_2 = Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2 + \cdots + Z_{2n}I_n \\ \cdots \cdots \cdots \\ U_n = Z_{n1}I_1 + Z_{n2}I_2 + \cdots + Z_{nn}I_n \end{cases}$$

§ 2.1 微波网络的概念

式中 Z_{mn} 为阻抗参量,若 $m=n$ 称它为**自阻抗**,若 $m \neq n$ 称它为**转移阻抗**。

同样,如果 n 端口网络的各个参考面上同时有电压作用时,则在任意参考面上的电流为各个参考面上电压单独作用时,在该参考面上的电流响应之和,即

$$\begin{cases} I_1 = Y_{11}U_1 + Y_{12}U_2 + \cdots + Y_{1n}U_n \\ I_2 = Y_{21}U_1 + Y_{22}U_2 + \cdots + Y_{2n}U_n \\ \dots\dots\dots \\ I_n = Y_{n1}U_1 + Y_{n2}U_2 + \cdots + Y_{nn}U_n \end{cases}$$

式中 Y_{mn} 为导纳参量,若 $m=n$ 称它为**自导纳**,若 $m \neq n$ 称它为**转移导纳**。

§ 2.1 微波网络的概念

以上两式即为网络方程分别写成下列矩阵方程

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & \cdots & Z_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ Z_{n1} & \cdots & Z_{nn} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \quad \text{简写为: } [U] = [Z][I]$$

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ Y_{n1} & \cdots & Y_{nn} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix} \quad \text{简写为: } [I] = [Y][U]$$

其中 $[Z]$ 为阻抗矩阵, $[Y]$ 为导纳矩阵。

由此可见,任何一个微波系统的不均匀性问题都可以用网络观点来解决,网络的特性可以用网络参量来描写。

§ 2.1 微波网络的概念

3、微波网络的特性

根据电磁场能量守恒定律和能量转换定理,可以导出网络特性与网络参量之间的关系。

(1)对于无耗网络,网络的全部阻抗参量与导纳参量均为纯虚数,即有

$$Z_{ij}=jX_{ij}, Y_{ij}=jB_{ij} \quad (i, j=1, 2, \dots, n)$$

(2)对于可逆网络,则有下列互易特性:

$$Z_{ij}=Z_{ji}, Y_{ij}=Y_{ji} \quad (i \neq j; i, j=1, 2, \dots, n)$$

(3)对于对称网络,则有:

$$Z_{ii}=Z_{jj}, Y_{ii}=Y_{jj} \quad (i \neq j)$$

§ 2.1 微波网络的概念

三、二端口微波网络

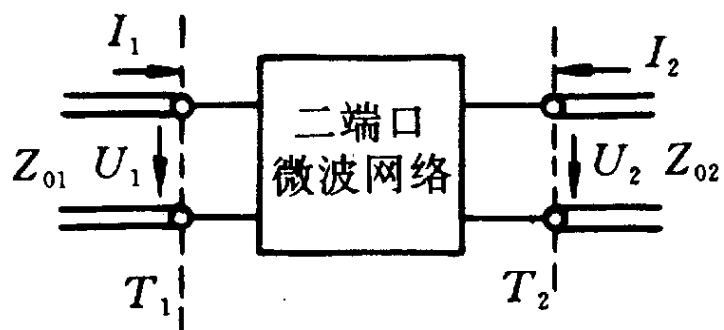
在微波网络中，二端口微波网络是最基本的，例如：衰减器、移相器、阻抗变换器和滤波器等均属于二端口微波网络。对于一个线性二端口微波网络，应用叠加原理，可以得到表征网络特性的线性方程组。

表征二端口微波网络的特性的参量可分为两大类：

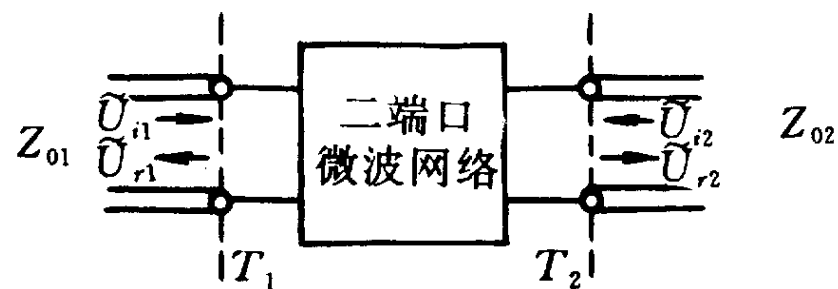
一类为反映参考面上**电压与电流**之间关系的参量，其电压和电流的方向如图(a)所示。

另一类网络参量是反映参考面上**入射波电压与反射波电压**之间的关系的参量，如图(b)所示。

§ 2.1 微波网络的概念



(a)



(b)

§ 2.2 二端口网络及其网络参量

二、网络参量

(一) 阻抗参量 导纳参量和转移参量

如图 (a)所示的二端口微波网络,参考面 T_1 和 T_2 选得远离不连续性区域,故只需要考虑主模的作用,应用叠加原理可以写出两个参考面上电压和电流之间三种不同的组合形式的线性方程组,从而可以得到三个网络参量。

1、阻抗参量

用 T_1 和 T_2 两个参考面上的电流表示两个参考面上的

电压的网络方程为

$$\begin{cases} U_1 = Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2 \\ U_2 = Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2 \end{cases}$$

$$[U] = [Z][I]$$

§ 2.2 二端口网络及其网络参量

在网络分析中,为了使理论分析具有普遍性,常把各参考面上的电压电流对所接传输线的特性阻抗归一化。如果 T_1 和 T_2 参考面处所接的特性阻抗分别为 Z_{01} 和 Z_{02} ,则 T_1 和 T_2 参考面上的归一化电压及归一化电流分别为

$$\begin{cases} \tilde{U}_1 = \frac{U_1}{\sqrt{Z_{01}}} & \tilde{I}_1 = I_1 \sqrt{Z_{01}} \\ \tilde{U}_2 = \frac{U_2}{\sqrt{Z_{02}}} & \tilde{I}_2 = I_2 \sqrt{Z_{02}} \end{cases}$$

§ 2.2 二端口网络及其网络参量

为了使归一化电压电流的关系式和未归一化的电压电流关系式保持不变,则归一化阻抗参量与未归一化阻抗参量之间的关系为

$$\begin{cases} \tilde{Z}_{11} = \frac{Z_{11}}{Z_{01}} & \tilde{Z}_{12} = \frac{Z_{12}}{\sqrt{Z_{01}Z_{02}}} \\ \tilde{Z}_{22} = \frac{Z_{22}}{Z_{02}} & \tilde{Z}_{21} = \frac{Z_{21}}{\sqrt{Z_{01}Z_{02}}} \end{cases}$$

于是归一化电压电流的关系式为

$$\begin{cases} \tilde{U}_1 = \tilde{Z}_{11}\tilde{I}_1 + \tilde{Z}_{12}\tilde{I}_2 \\ \tilde{U}_2 = \tilde{Z}_{21}\tilde{I}_1 + \tilde{Z}_{22}\tilde{I}_2 \end{cases}$$

§ 2.2 二端口网络及其网络参量

上式可以写成矩阵形式

$$\begin{bmatrix} \tilde{U}_1 \\ \tilde{U}_2 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{Z}_{11} & \tilde{Z}_{12} \\ \tilde{Z}_{21} & \tilde{Z}_{22} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{I}_1 \\ \tilde{I}_2 \end{bmatrix}$$

2、导纳参量

用 T_1 和 T_2 两参考面的电压表示两参考面上的电流的网络方程为

$$\begin{cases} I_1 = Y_{11}U_1 + Y_{12}U_2 \\ I_2 = Y_{21}U_1 + Y_{22}U_2 \end{cases}$$
$$[I] = [Y][U]$$