

第1章 均匀传输线理论

1.1 均匀传输线方程及其解

1.2 传输线阻抗与状态参量

1.3 无耗传输线的状态分析

1.4 传输线的传输功率、效率与损耗

1.5 阻抗匹配

1.6 史密斯原图及其应用

1.7 同轴线的特性阻抗

1.4 传输线的传输功率、效率和损耗

一、传输功率与效率(Transmitted Power and Transmission Efficiency)

◆(1)设传输线均匀且 $\gamma=\alpha+j\beta(\alpha\neq0)$, 则沿线电压、 电流的解为

$$\begin{cases} U(z) = A_1 [e^{\alpha z} e^{j\beta z} + \Gamma_1 e^{-\alpha z} e^{-j\beta z}] \\ I(z) = \frac{A_1}{Z_0} [e^{\alpha z} e^{j\beta z} - \Gamma_1 e^{-\alpha z} e^{-j\beta z}] \end{cases} \quad (1-4-1)$$



图1-8 功率传输示意图

◆(2)假设 Z_0 为实数, $\Gamma_1=|\Gamma_1|e^{j\varphi_1}$, 由电路理论可知, 传输线上任一点 z 处的传输功率为

$$\begin{aligned} P_t(z) &= \frac{1}{2} \text{Re}[U(z) I^*(z)] \\ &= \frac{|A_1|^2}{2Z_0} e^{2\alpha z} [1 - |\Gamma_1|^2 e^{-4\alpha z}] \\ &= P_{in}(z) - P_r(z) \quad (1-4-2) \end{aligned}$$

结论:无耗线上负载吸收的功率与传输线的位置无关。

$P_{in}(z)$ 为入射波功率
 $P_r(z)$ 为反射波功率

$$\begin{aligned}
P_t(Z) &= \frac{1}{2} \operatorname{Re}[U(z) I^*(z)] \\
&= \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ A_1 \left[e^{\alpha z} e^{j\beta z} + \Gamma_1 e^{-\alpha z} e^{-j\beta z} \right] \frac{A_1^*}{Z_0} \left[e^{\alpha z} e^{-j\beta z} - \Gamma_1^* e^{-\alpha z} e^{j\beta z} \right] \right\} \\
&= \frac{|A_1|^2}{2Z_0} \operatorname{Re} \left[e^{2\alpha z} - \Gamma_1^* e^{j2\beta z} + \Gamma_1 e^{-j2\beta z} - |\Gamma_1|^2 e^{-2\alpha z} \right] \\
&= \frac{|A_1|^2}{2Z_0} \operatorname{Re} \left[e^{2\alpha z} - |\Gamma_1| e^{j(2\beta z - \phi_l)} + |\Gamma_1| e^{-j(2\beta z - \phi_l)} - |\Gamma_1|^2 e^{-2\alpha z} \right] \\
&= \frac{|A_1|^2}{2Z_0} \operatorname{Re} \left[\left(1 - |\Gamma_1|^2 \right) e^{2\alpha z} - j |\Gamma_1| \sin(2\beta z - \phi_l) \right] \\
&= \operatorname{Re} \left[\mathbf{P}_l - j2\omega (\mathbf{W}_m - \mathbf{W}_e) \right] \\
&= \frac{|A_1|^2}{2Z_0} e^{2\alpha z} [1 - |\Gamma_1|^2 e^{-4\alpha z}] \\
&= P_{\text{in}}(z) - P_r(z)
\end{aligned}
\quad \begin{cases} U(z) = A_1 \left[e^{\alpha z} e^{j\beta z} + \Gamma_1 e^{-\alpha z} e^{-j\beta z} \right] \\ I(z) = \frac{A_1}{Z_0} \left[e^{\alpha z} e^{j\beta z} - \Gamma_1 e^{-\alpha z} e^{-j\beta z} \right] \end{cases}$$

1.4 传输线的传输功率、效率和损耗

一、传输功率与效率(Transmitted Power and Transmission Efficiency)

◆(3)入射波功率、反射波功率和传输功率可直接由下式计算

$$P_{in}(z) = \frac{|U_+(z)|^2}{2Z_0} \quad (1-4-3)$$

$$P_r(z) = \frac{|U_-(z)|^2}{2Z_0} = \frac{|U_+(z)|^2 |\Gamma_l|^2 e^{-4\alpha z}}{2Z_0} = |\Gamma_l|^2 e^{-4\alpha z} P_{in}(z) \quad (1-4-4)$$

$$P_t(z) = P_{in}(z) - P_r(z) = (1 - |\Gamma_l|^2 e^{-4\alpha z}) P_{in}(z) \quad (1-4-5)$$

1.4 传输线的传输功率、效率和损耗

一、传输功率与效率(Transmitted Power and Transmission Efficiency)

◆(4)设传输线总长为 l , 将 $z=l$ 代入式 (1-4-2), 则始端传输功率为

$$P_t(l) = \frac{|A_1|^2}{2Z_0} e^{2al} [1 - |\Gamma_l|^2 e^{-4al}] \quad (1-4-6)$$

◆(5)终端负载在 $z=0$ 处, 故负载吸收功率为

$$P_t(0) = \frac{|A_1|^2}{2Z_0} [1 - |\Gamma_l|^2] \quad (1-4-7)$$

$$\begin{aligned} P_t(z) &= \frac{1}{2} \operatorname{Re}[U(z)I^*(z)] \\ &= \frac{|A_1|^2}{2Z_0} e^{2az} [1 - |\Gamma_1|^2 e^{-4az}] \\ &= P_{in}(z) - P_r(z) \quad (1-4-2) \end{aligned}$$

◆(6)可得传输线的传输效率为

$$\eta = \frac{\text{负载吸收功率 } P_t(0)}{\text{始端传输功率 } P_t(l)} = \frac{1 - |\Gamma_l|^2}{e^{2al} [1 - |\Gamma_l|^2 e^{-4al}]} \quad (1-4-8)$$

1.4 传输线的传输功率、效率和损耗

一、传输功率与效率(Transmitted Power and Transmission Efficiency)

◆(6)可得传输线的传输效率为

$$\eta = \frac{\text{负载吸收功率 } P_t(0)}{\text{始端传输功率 } P_t(l)} = \frac{1 - |\Gamma_l|^2}{e^{2\alpha l} [1 - |\Gamma_l|^2 e^{-4\alpha l}]} \quad (1-4-8)$$

⊕当负载与传输线阻抗匹配时, 即 $|\Gamma_l|=0$, 此时传输效率最高, 其值为

$$\eta_{max} = e^{-2\alpha l} \quad (1-4-9)$$

⊕传输效率取决于传输线的损耗和终端匹配情况

⊕对于无耗匹配传输线 $\eta = 1$

1.4 传输线的传输功率、效率和损耗

一、传输功率与效率(Transmitted Power and Transmission Efficiency)

◆(7)工程上，功率值常用分贝来表示，常用的参考单位有**1 mW**和**1 W**。

⊕如果用**1mW**作参考，则分贝表示为 $P(dBm) = 10\lg P(mW)$

1mW=0dBm, 10mW=10dBm, 1W=30dBm, 0.1mW=-10dBm

⊕如果用**1W**作参考，则分贝表示为 $P(dBW) = 10\lg P(W)$

1W=0dBW, 10 W=10dBW, 0.1 W=-10 dBW

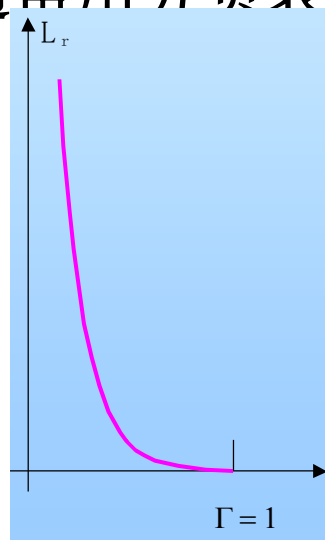
$$P_r(z) = \frac{|U_-(z)|^2}{2Z_0} = \frac{|U_+(z)|^2 |\Gamma_1|^2 e^{-4\alpha z}}{2Z_0} = |\Gamma_1|^2 e^{-4\alpha z} P_{in}(z) \quad (1-4-4)$$

二、回波损耗和插入损耗(Return Loss and Insertion Loss)

◆1、回波损耗

⊕①定义为入射波功率与反射波功率之比，通常用分贝表示

$$L_r(z) = 10 \lg \frac{P_{in}}{P_r} \text{ dB} \quad (1-4-10)$$



⊕②由式 (1-4-4) 得

$$L_r(z) = 10 \lg \frac{1}{|\Gamma_l|^2 e^{-4\alpha z}} = -20 \lg |\Gamma_l| + 2(8.686 \alpha z) \text{ dB} \quad (1-4-11)$$

⊕③对于无耗线, $\alpha=0$, L_r 与 z 无关, 即 $L_r(z) = -20 \lg |\Gamma_l| \text{ dB} \quad (1-4-12)$

⊕④若负载匹配, 则 $|\Gamma_l|=0$, $L_r \rightarrow \infty$, 表示无反射波功率。

1.4 传输线的传输功率、效率和损耗

二、回波损耗和插入损耗(Return Loss and Insertion Loss)

◆2、插入损耗（或反射损耗Reflection Loss）（功率失配的度量）

⊕①定义入射波功率与传输功率之比，通常用分贝表示

$$L_i = 10 \lg \frac{P_{in}}{P_t} \text{ dB} \quad (1-4-13)$$

包括：输入和输出失配损耗和其他电路损耗(导体损耗、介质损耗、辐射损耗)。

⊕②由式(1-4-5)得

$$L_i = 10 \lg \frac{1}{1 - |\Gamma_l|^2 e^{-4\alpha z}} \quad (1-4-14)$$

式中， ρ 为传输线上驻波系数。此时，由于插入损耗仅取决于失配情况，故又称为失配损耗。

⊕③不考虑其他损耗，即 $\alpha=0$ ，则

$$L_i = 10 \lg \frac{1}{1 - |\Gamma_l|^2} = 20 \lg \frac{\rho + 1}{2\sqrt{\rho}} \quad (1-4-15)$$

$$P_t(z) = P_{in}(z) - P_r(z) = (1 - |\Gamma_l|^2 e^{-4\alpha z}) P_{in}(z) \quad (1-4-5)$$

1.4 传输线的传输功率、效率和损耗

二、回波损耗和插入损耗(Return Loss and Insertion Loss)

◆3、回波损耗与插入损耗的比较

◆回波损耗和插入损耗虽然都与反射信号即反射系数有关。

⊕回波损耗取决于反射信号本身的损耗， $|\Gamma_l|$ 越大，则 $|L_r|$ 越小；

⊕插入损耗 $|L_i|$ 则表示反射信号引起的负载功率的减小(失配)， $|\Gamma_l|$ 越大，则 $|L_i|$ 也越大。

⊕图1-9是回波损耗 $|L_r|$ 和插入损耗 $|L_i|$ 随反射系数的变化曲线。

$$L_r(z) = 10 \lg \frac{1}{|\Gamma_l|^2 e^{-4\alpha z}} = -20 \lg |\Gamma_l| + 2(8.686 \alpha z) \text{ dB} \quad (1-4-11)$$

$$L_i = 10 \lg \frac{1}{1 - |\Gamma_l|^2 e^{-4\alpha z}} \quad (1-4-14)$$

1.4 传输线的传输功率、效率和损耗

二、回波损耗和插入损耗(Return Loss and Insertion Loss)

◆3、回波损耗与插入损耗的比较

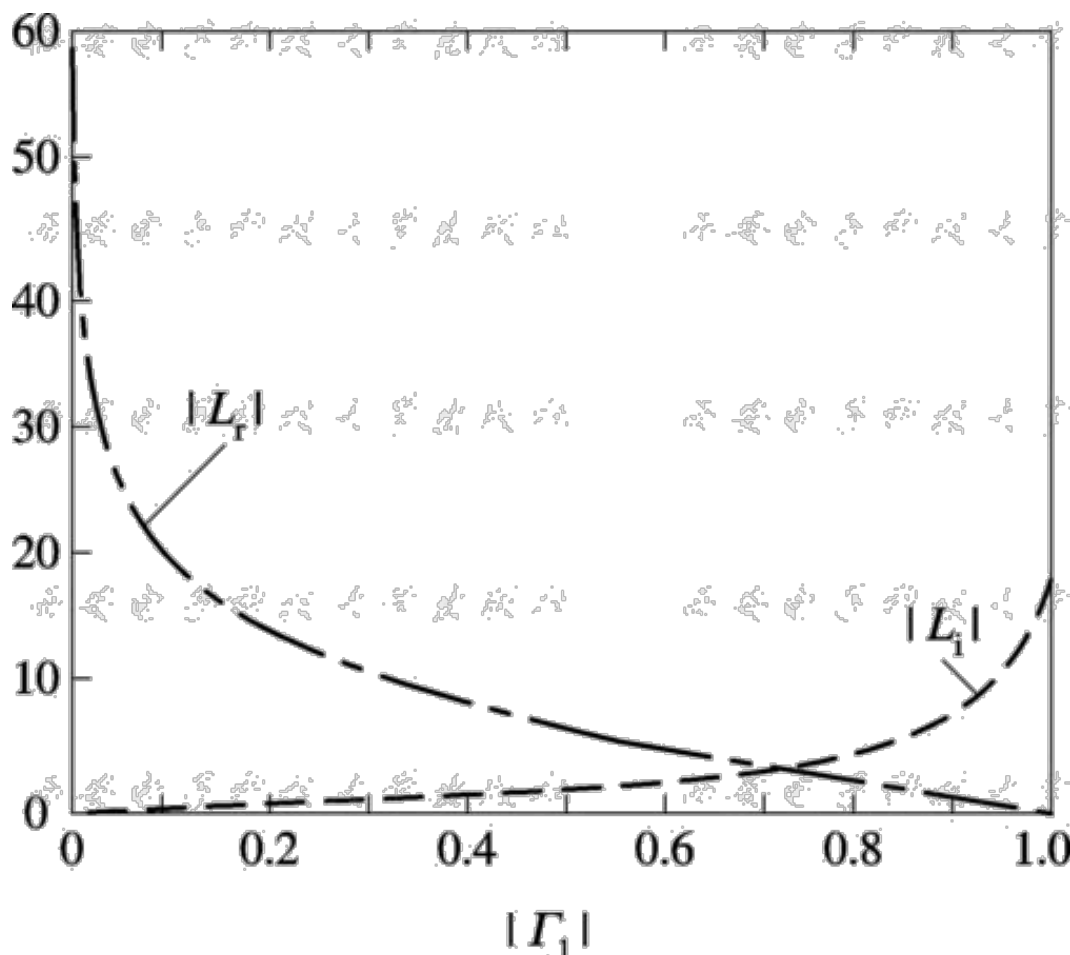


图 1-9 $|L_r|$ 、 $|L_i|$ 随反射系数的变化曲线

1.4 传输线的传输功率、效率和损耗

[例1-4]现有同轴型三路功率分配器，如图1-10所示，设该功分器在**2.5GHz-5.5GHz**频率范围内其输入端的输入驻波比均 ≤ 1.5 ，插入损耗为**0.5dB**，设输入功率被平均地分配到各个输出端口，试计算：

- (1)输入端的回波损耗（用分贝表示）；
- (2)每个输出端口得到输出功率与输入端总输入功率的比值（用百分比表示）。

◆解:(1)由于驻波比为**1.5**，因而反射系数的大小为

$$|\Gamma_1| = \frac{\rho - 1}{\rho + 1} = 0.2$$

故输入端的回波损耗为

$$L_r = 10 \lg \frac{P_{in}}{P_r} = -20 \lg |\Gamma_l| = 13.98(\text{dB})$$

于是

$$P_r = 0.04 P_{in}$$

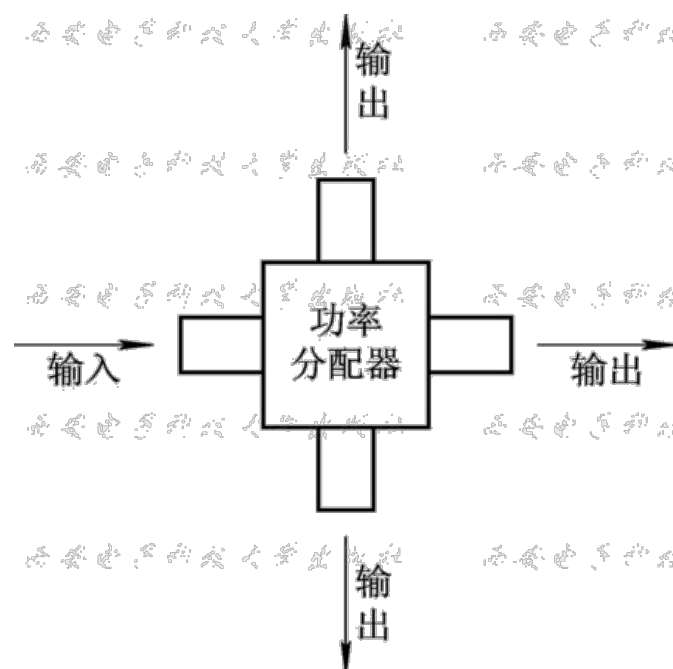


图1-10 三路功率分配示意图

1.4 传输线的传输功率、效率和损耗

[例1-4]现有同轴型三路功率分配器，如图1-10所示，设该功分器在**2.5GHz-5.5GHz**频率范围内其输入端的输入驻波比均小于等于**1.5**，插入损耗为**0.5dB**，设输入功率被平均地分配到各个输出端口，试计算：

(2)每个输出端口得到输出功率与输入端总输入功率的比值（用百分比表示）。

◆解：**(2)**设传输功率为 P_t ，由于插入损耗为**0.5dB**，故

$$L_i = 10 \lg \frac{P_{in}}{P_t} = 0.5$$

有

$$P_t = 0.89 P_{in}$$

该功率均匀分配到三个端口，则每个输出端口得到输出功率与输入端口总输入功率的比值应为

$$\frac{P_{out}}{P_{in}} = 29.7\%$$

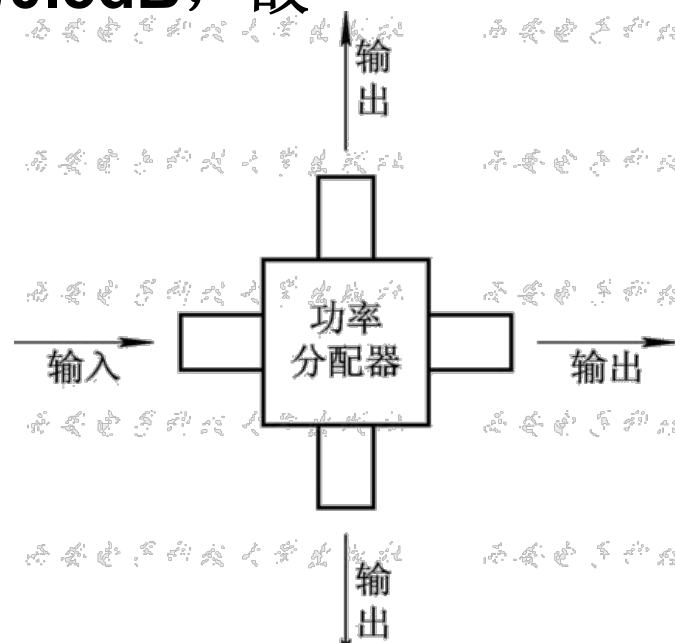


图1-10 三路功率分配示意图

1.4 传输线的传输功率、效率和损耗

[例1-4]现有同轴型三路功率分配器，如图1-10所示，设该功分器在**2.5GHz-5.5GHz**频率范围内其输入端的输入驻波比均小于等于**1.5**，插入损耗为，设输入功率被平均地分配到各个输出端口，试计算：

- (1)输入端的回波损耗（用分贝表示）；
- (2)每个输出端口得到输出功率与输入端总输入功率的比值（用百分比表示）。

◆解:因此有

$$P_{in} = P_r + 3P_{out} + P_i$$

可见，输入功分器的功率分可分为反射功率，输出功率和损耗功率三部分。

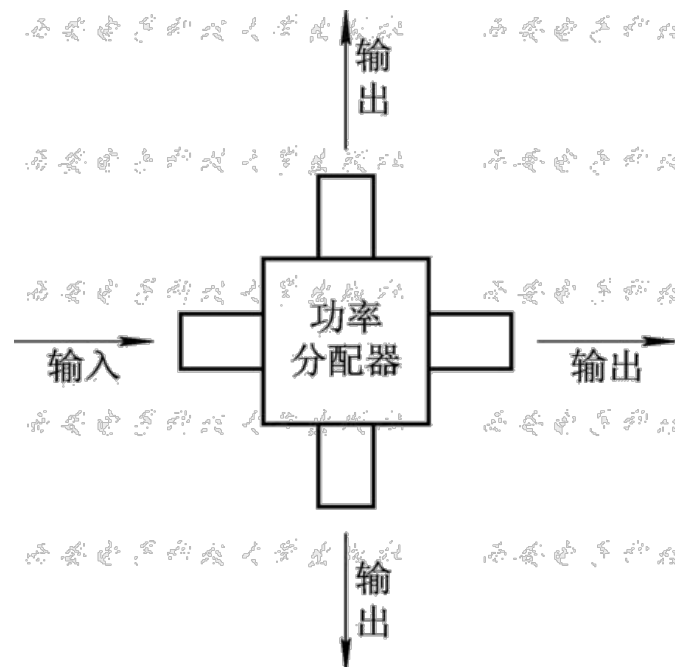


图1-10 三路功率分配示意图

1.4 传输线的传输功率、效率和损耗

作业： 1.8, 1.9