

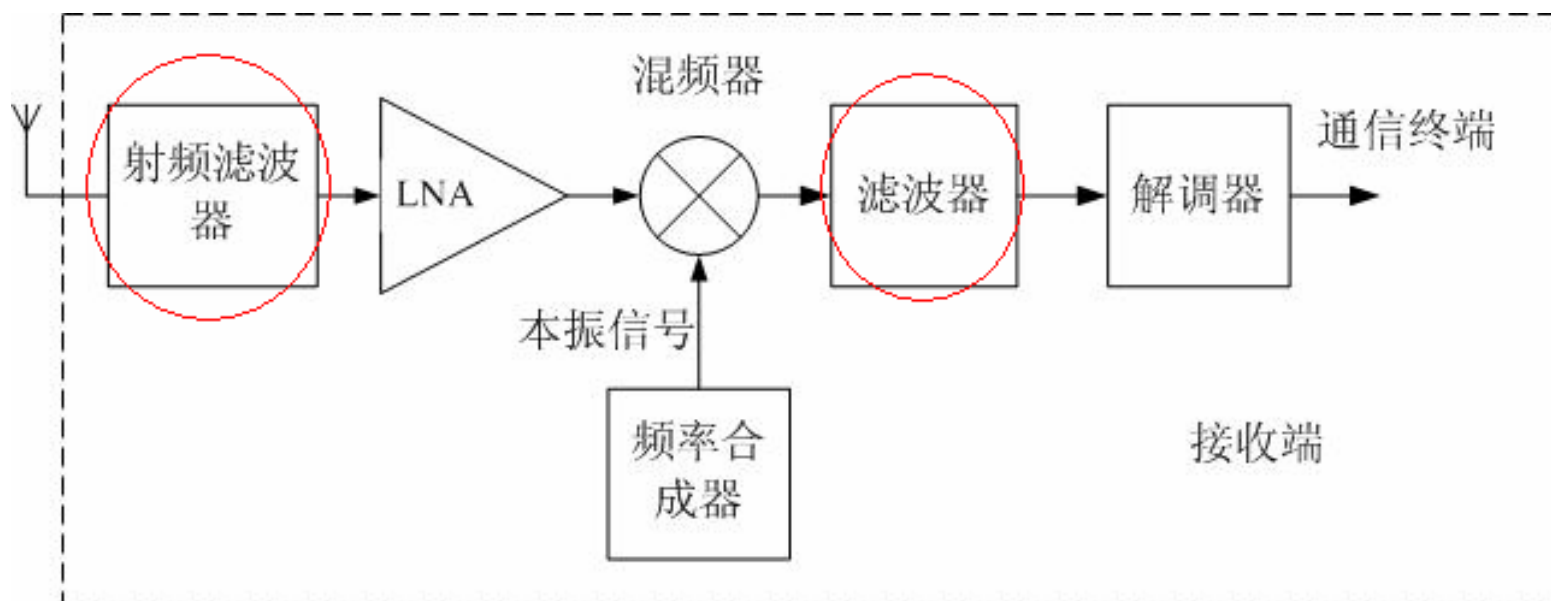
第2章 选频回路与阻抗变换

本章内容

- 信号的选频滤波 P.27
- LC谐振回路滤波器
- 无源阻抗变换网络
- 传输线变压器阻抗变换。

信号的选频滤波

- 通信系统中接收设备需要抑制和滤除一些无用信号和噪声干扰。通信中这一功能通常由一个重要部件“选频滤波器”来实现。
- 选频滤波器按实现功能可以分为预选滤波器与中频通道滤波器两种。



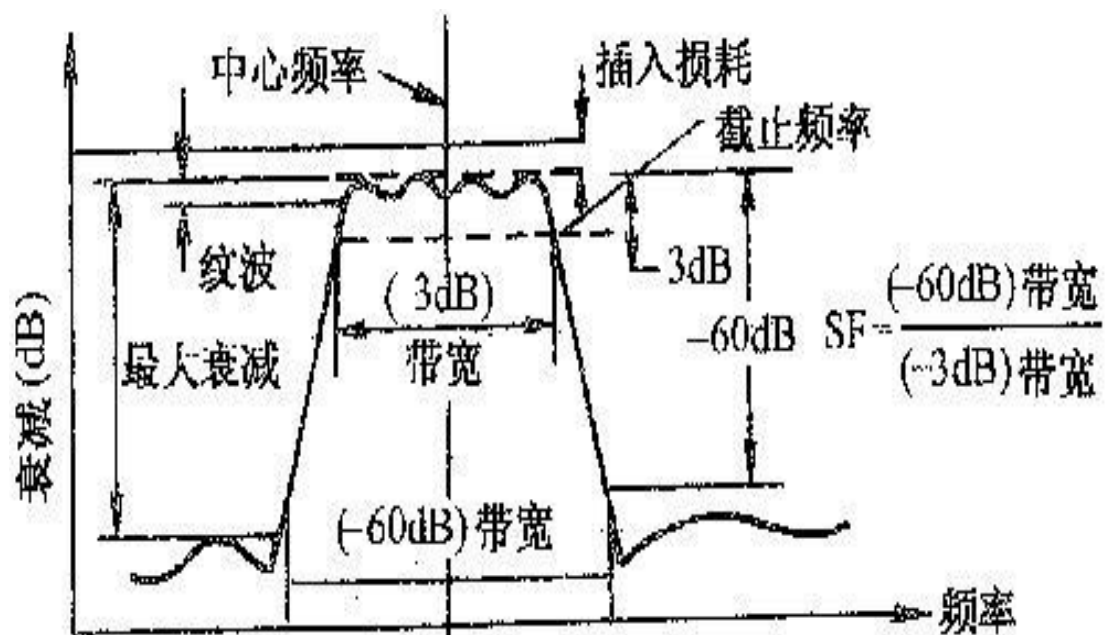
信号的选频滤波

- 按滤波器的组成结构分：

第一类是由储能元件电感和电容组成的**LC**谐振回路滤波器。

第二类是各种集中滤波器如**LC**集中滤波器、机械滤波器、晶体滤波器、陶瓷滤波器、声表面波(**SAW**)滤波器等。

信号的选频滤波



中心频率；

带内波动；

通频带 $BW_{-3\text{dB}}$ ；

选择性 SF；

插入损耗；

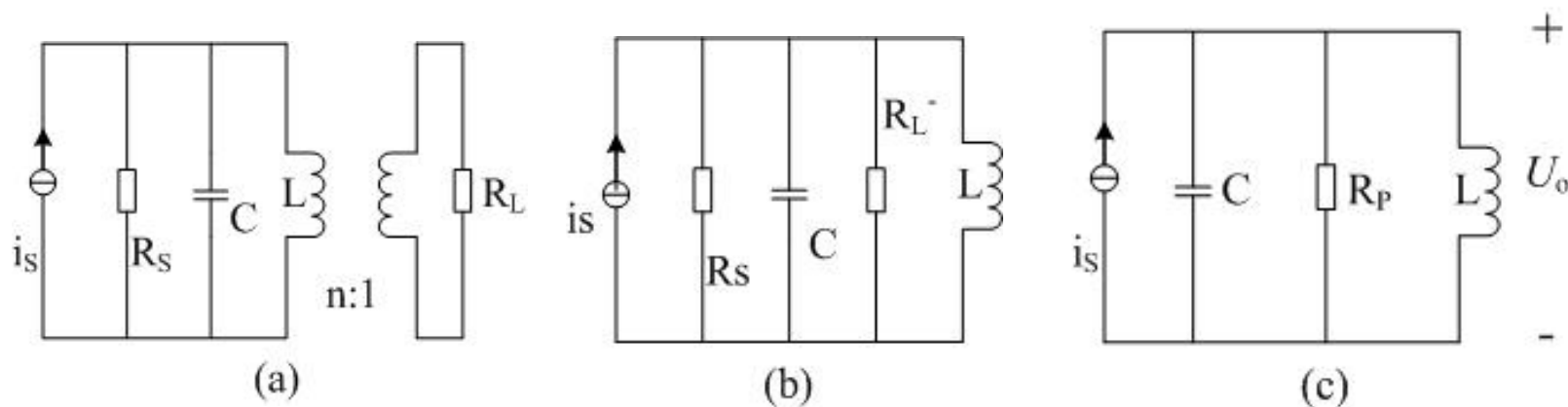
输入输出阻抗；

相频特性

本章内容

- 信号的选频滤波
- LC谐振回路滤波器
- 无源阻抗变换网络
- 传输线变压器阻抗变换

LC谐振回路滤波器



- 图 (c) 为典型的LC并联谐振回路，其并联阻抗可以表示为

$$Z(j\omega) = \frac{1}{\frac{1}{R_p} + j\omega C + \frac{1}{j\omega L}} = \frac{R_p}{1 + jQ_p \left(\frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega} \right)}$$

LC谐振回路滤波器

- **品质因数**:描述了回路的储能与它的耗能之比。

$$Q = 2\pi \frac{\text{谐振时回路总的储能}}{\text{谐振时回路一周内的耗能}}$$

$$Q = \frac{\omega_0 C}{G} = \frac{R}{\omega_0 L} = \frac{R}{\rho}$$

LC谐振回路滤波器

- 回路的谐振角频率为 $\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}}$
- 回路的品质因数为 $Q_P = \frac{R_P}{\omega_o L} = \frac{1}{2\xi}$ ，其中 $\xi = \frac{\omega_o L}{2R_P} = \frac{1}{2R_P} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1}{2R_P} \cdot \rho$
- ξ 称为回路的阻尼系数， ρ 为回路的特性阻抗 $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$
- 谐振回路的端电压 $\dot{U}_P = \dot{I}_S R_P$
- 回路的输出电压为 $\dot{U}_o = \dot{I}_S Z(j\omega) = \frac{\dot{I}_S R_P}{1 + jQ_P \left(\frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega} \right)}$

LC谐振回路滤波器

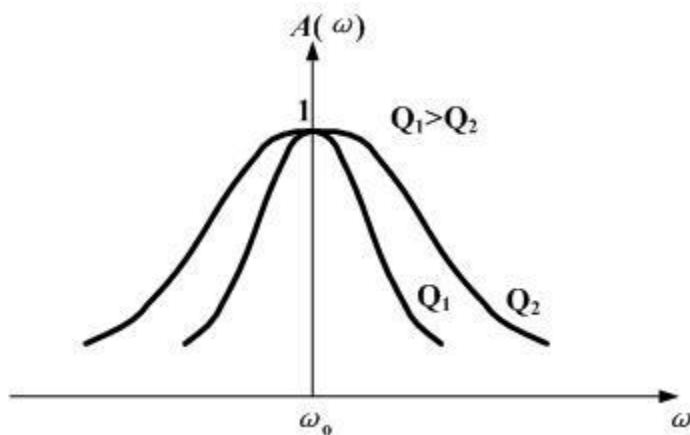
- 则有 $\frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_P} = \frac{1}{1 + jQ_P \left(\frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega} \right)}$
- 可以导出LC谐振回路的幅频特性和相频特性函数，并得出相应的曲线。

$$A(\omega) = \frac{V_{om}}{V_{pm}} = \frac{1}{\sqrt{1 + Q_P^2 \left(\frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega} \right)^2}}$$

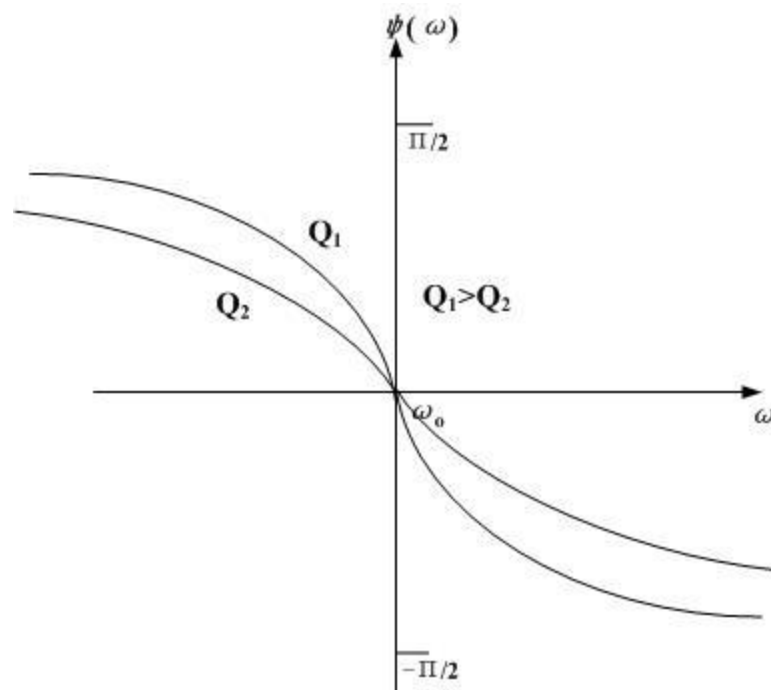
$$\varphi(\omega) = -\arctan Q_P \left(\frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega} \right)$$

LC谐振回路特性曲线

幅频特性曲线



相频特性曲线



LC谐振回路滤波器

- 经由观察函数的曲线可知LC回路的选频特性与带宽是相互矛盾的。选频特性越好，带宽越窄。在通常的通信系统的设计中，两者需要相互兼顾。
- 带宽与品质因数的关系可由如下关系式表示：

$$B = \frac{f_0}{Q_P} \quad \text{即幅频特性的-3dB衰减带宽，单位为Hz}$$

其中 $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ (单位为Hz) 是回路的固有谐振频率。

- 波形因数 SF 是衡量滤波器选频特性的重要参数，定义为-60dB带宽和-3dB带宽的比。

$$SF = (-60\text{dB})\text{带宽} / (-3\text{dB})\text{带宽}$$

例题

- 例1.8.1 设一个 LC 并联回路的谐振频率 $f_o=10.7\text{MHz}$ ，已知回路电容 $C=100\text{pF}$ ，则回路电感 L 是多少？若要求信号偏离 f_o 为 500kHz 处衰减为 20dB ，则回路的有载品质因数 Q_p 为多少？通频带 B 为多少？回路对三次谐波的衰减量是多少？

解：（1）可以求得回路的谐振角频率

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 2\pi f_o, \quad \text{可得: } L = \frac{1}{\omega_o^2 C} = \frac{1}{(2\pi f_o)^2 C} = 2.21(\mu\text{H})$$

例题

(2) 取正偏离 $f_1=11.2\text{MHz}$, $f_o=10.7\text{MHz}$ 。20dB 衰减即为幅度衰减10倍, 则

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + Q_P^2 \left(\frac{f_1}{f_o} - \frac{f_o}{f_1} \right)^2}} = 0.1 \quad \text{可求出 } Q_P=108.89。$$

$$(3) \quad B = \frac{f_o}{Q_P} = \frac{10.7 \times 10^6}{108.89} = 98.3 \times 10^3 = 98.3(\text{kHz})$$

例题

(4) 根据 n 次谐波的定义有 $\omega = n\omega_o$ (n 为大于1的自然数), 且 $Q_P^2 \left(n - \frac{1}{n}\right)^2 \gg 1$, 将 $n=3$ 带入有

$$\begin{aligned} \frac{U_{om}(n\omega_o)}{U_{pm}} &= \frac{1}{\sqrt{1 + Q_P^2 \left(n - \frac{1}{n}\right)^2}} \approx \frac{n}{Q_P(n^2 - 1)} = \frac{3}{8Q_P} \\ &= 3.44 \times 10^{-3} = -49.26(dB) \end{aligned}$$

微波常用单位

✓ **dBW(分贝瓦):**

✓ 定义: $P_1(\text{dBW}) = 10 \log_{10} (P_1(\text{W}))$

✓ **dBm(分贝毫瓦):**

✓ 定义: $P_1(\text{dBm}) = 10 \log_{10} (P_1(\text{mW}))$

✓ **dBmW(分贝微瓦):**

✓ 定义: $P_1(\text{dBmW}) = 10 \log_{10} (P_1 (\mu\text{W}))$

微波常用单位

dB(分贝): :描述功率相对增益或插损或相对功率, 若有功率 P_1 (输入)和 P_2 (输出)

$$N=10\log_{10}(P_1/P_2)$$

若 N 为正, 则可说 P_1 比 P_2 要高 N 分贝(dB)

若 N 为负, 则可说 P_1 比 P_2 要低 N 分贝(dB)

dB(分贝): 描述电压传输增益或插损或相对电平, 若有电压 V_1 (输入)和 V_2 (输出)

$$G_V(\text{dB}) = 20 \log_{10} (V_2/V_1)$$

微波常用单位

✓ mW 与 dBm 和 dBW 变换示例

✓ $P = 1 \text{ mW} \rightarrow P = 0 \text{ dBm}$

✓ $P = 10 \text{ mW} \rightarrow P = 10 \text{ dBm}$

✓ $P = 0.1 \text{ mW} \rightarrow P = -10 \text{ dBm}$

✓ $P = 1 \text{ mW} \rightarrow P (\text{dBW}) = -30 \text{ dBW}$

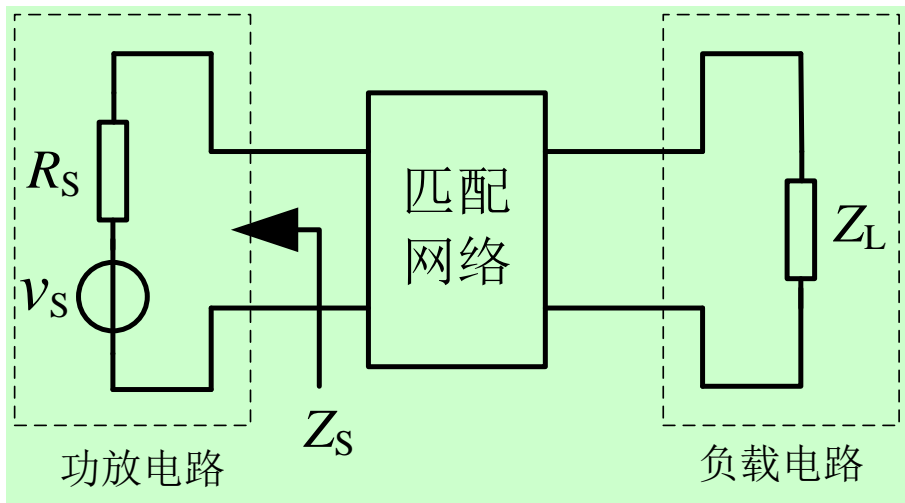
✓ $P = 10 \text{ mW} \rightarrow P (\text{dBW}) = -20 \text{ dBW}$

✓ $P = 0.1 \text{ mW} \rightarrow P (\text{dBW}) = -40 \text{ dBW}$

本章内容

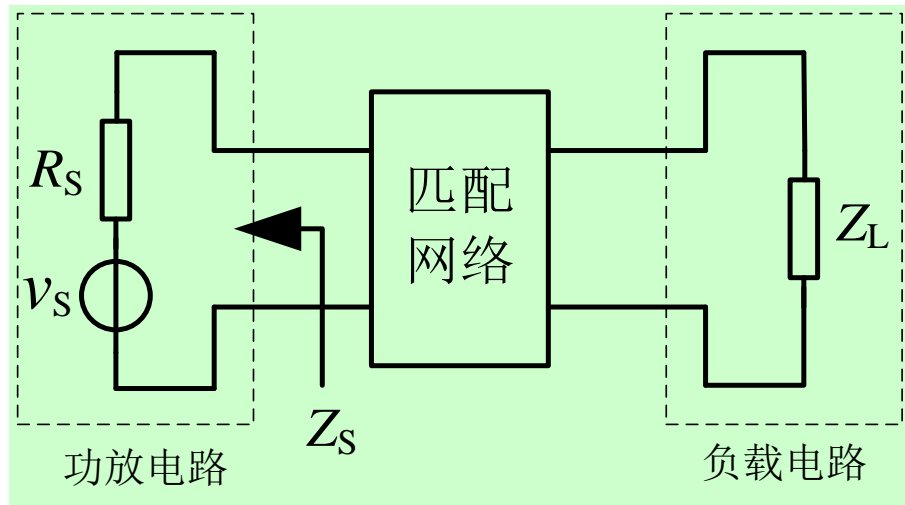
- 信号的选频滤波
- LC谐振回路滤波器
- 无源阻抗变换网络 P.111
- 传输线变压器阻抗变换

阻抗匹配网络



- ✓ 射频功率放大器中，阻抗匹配网络介于功率管和负载之间
- ✓ 设计功放目的是输出最大功率；
- ✓ 匹配目的是实现功放的级与级间的最佳能量传输，即意味着从功率源传递给负载提供最大的RF功率。

阻抗匹配网络



- 对匹配网络的要求：
 - ✓ 能实现阻抗变换，实现级间、输出端与负载之间匹配。
 - ✓ 具有滤波功能，实际它是一个滤波网络。
 - ✓ 插入损耗应尽可能小。

阻抗匹配条件

由电压源给负载传输功率的等效电路，负载上得到的功率为：

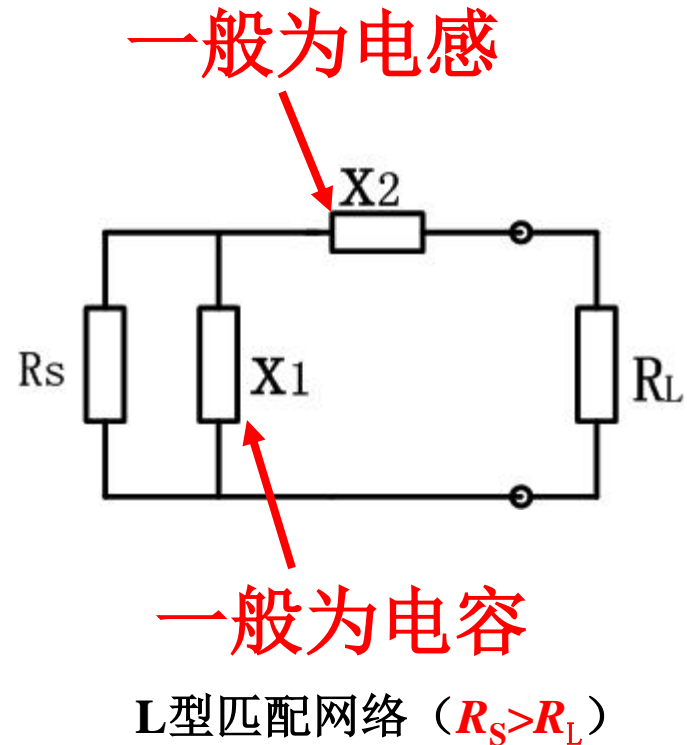
$$\begin{aligned} P_L &= \frac{1}{2} U_{Lm} R_e\left(\frac{1}{Z_L}\right) = \frac{1}{2} U_{sm}^2 \left| \frac{Z_L}{Z_S + Z_L} \right|^2 R_e\left(\frac{1}{Z_L}\right) \\ &= \frac{1}{2} U_{sm}^2 \frac{R_L}{(R_S + R_L)^2 + (X_S + X_L)^2} \end{aligned}$$

负载功率 P_L 最大时的阻抗匹配条件为：

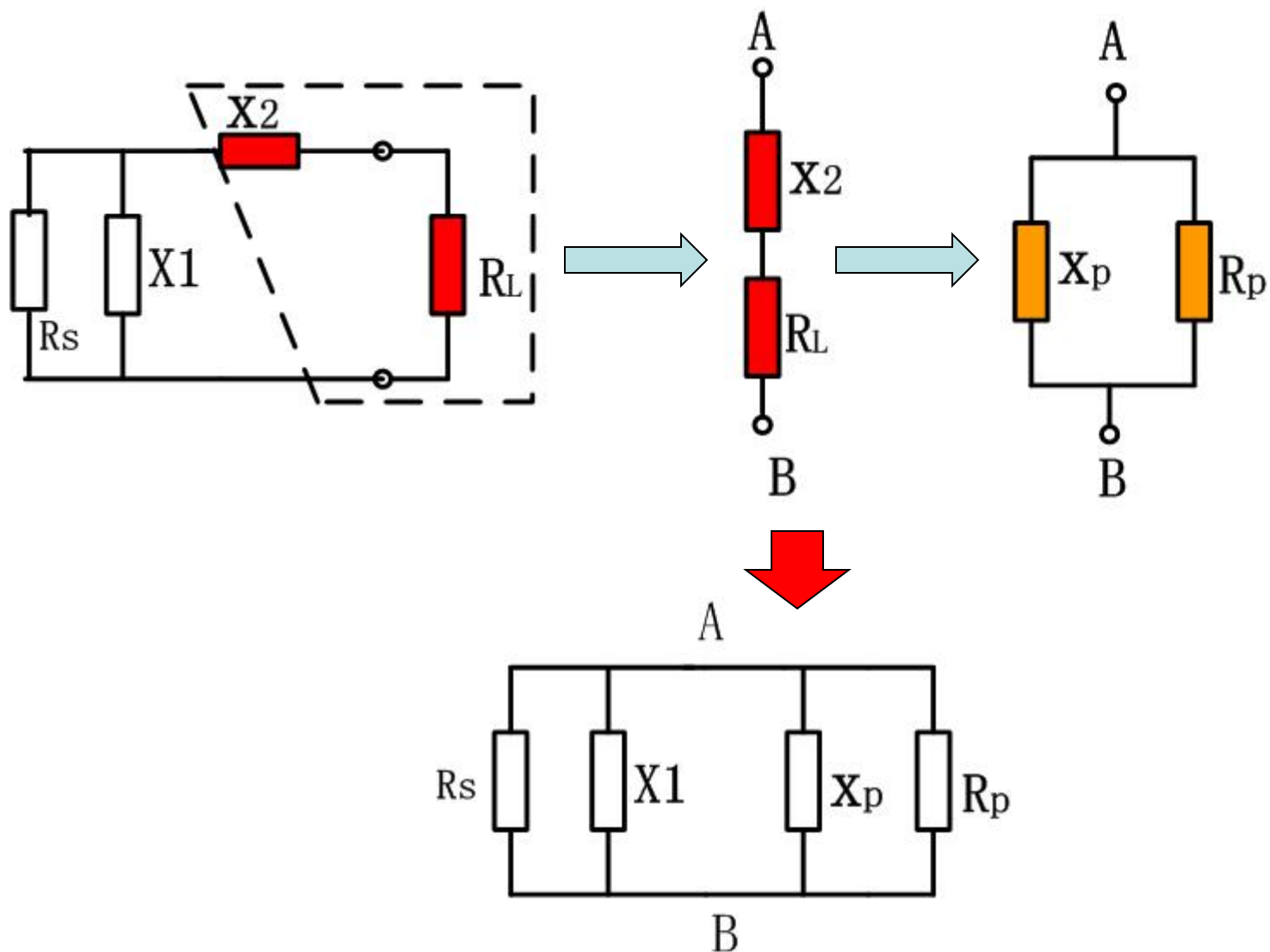
$$R_L = R_S \qquad X_L + X_S = 0$$

L匹配网络

- 阻抗匹配网络通常采用LC电抗元件组成的滤波网络，因此也能起选频滤波的作用。
- R_S --- 信号源内阻或前级放大器所要求的最佳负载。
- R_L --- 负载阻抗或天线阻抗。
- X_1, X_2 --- 匹配网络元件。



L匹配网络的等效变换 ($R_S > R_L$)



L匹配网络的等效变换 ($R_S > R_L$)

- 要使串并联网络等效，则两个网络阻抗(导纳)相等：


$$\frac{1}{R_L + jX_2} = \frac{1}{R_P} + \frac{1}{jX_P}$$

- 则转换关系如下：

$$R_P = \frac{R_L^2 + X_2^2}{R_L} = R_L (1 + Q_e^2)$$

$$X_P = \frac{R_L^2 + X_2^2}{X_2} = X_2 \left(1 + \frac{1}{Q_e^2}\right)$$

网络有载品质因数


$$Q_e = \frac{R_P}{X_P} = \frac{X_2}{R_L}$$

L型匹配网络的计算

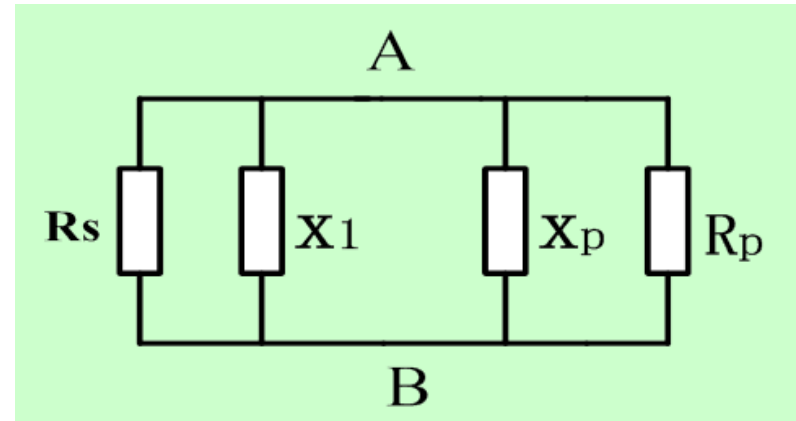
- 匹配条件（匹配滤波器）：
前级与负载为复共轭，即

$$R_s + jX_1 = R_p - jX_p$$

- 由匹配条件 $R_p = R_s$ 得：

$$R_s = R_p = R_L (1 + Q_e^2)$$

$$Q_e = \sqrt{\frac{R_s}{R_L} - 1}$$



L型匹配网络的计算

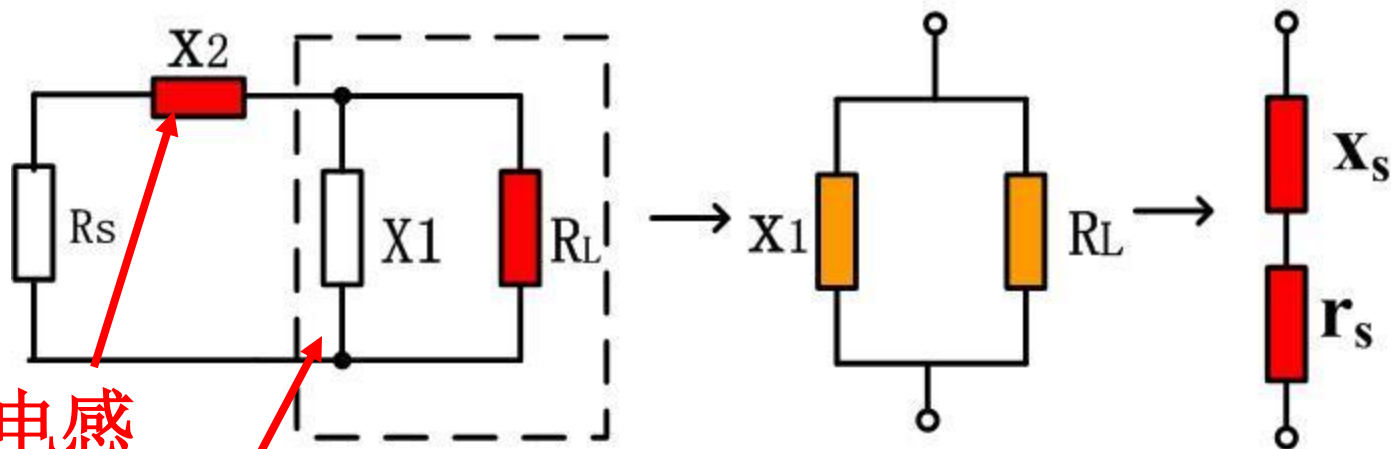
$$Q_e = \frac{R_P}{X_P} = \frac{X_2}{R_L}$$

- 由匹配条件 $X_1 + X_p = 0$, $R_s = R_p$ 得:

$$|X_1| = |X_P| = \frac{R_S}{Q_e} = R_S \sqrt{\frac{R_L}{R_S - R_L}} \quad \bullet \text{ 并联支路阻抗}$$

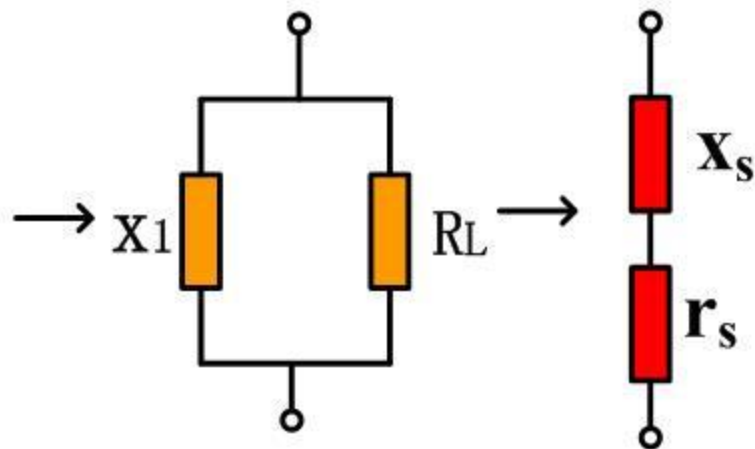
$$|X_2| = R_L Q_e = \sqrt{R_L (R_S - R_L)} \quad \bullet \text{ 串联支路阻抗}$$

L匹配网络的等效变换 ($R_S < R_L$)



一般为电感

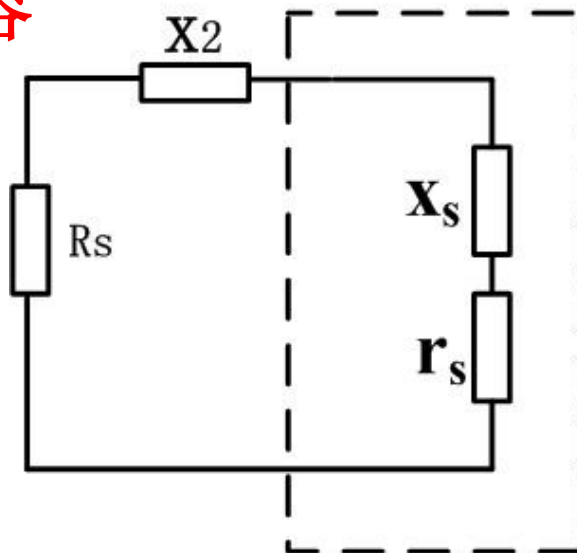
一般为电容



$$Q_e = \sqrt{\frac{R_L}{R_S} - 1}$$

$$|X_1| = R_L / Q_e$$

$$|X_2| = Q_e R_S$$



$$C = \frac{1}{\omega X_1} = \frac{1}{2\pi f X_1}$$

$$L = \frac{X_2}{\omega} = \frac{X_2}{2\pi f}$$

L型加载并联谐振回路的参数计算

- 频带宽度 $B = \frac{f_0}{Q}$

- 带外抑制因子（又称之滤波度）

$$\varphi_n = \frac{n}{Q(n^2 - 1)} \quad n \text{ 为谐波次数}$$

- 匹配网络的变换效率 η_k 由输入功率 P_i 和负载功率 P_L 决定。

$$\eta_k = \frac{P_L}{P_i} = 1 - \frac{Q}{Q_0} \quad \text{其中 } Q_0 \text{ 为固有品质因素}$$

本章内容

- 信号的选频滤波
- LC谐振回路滤波器
- 无源阻抗变换网络
- 传输线变压器阻抗变换 P.125

功率合成技术

- 在通信系统中，往往需要在很宽的频率范围内合成很大的输出功率
- 当需要输出的功率超过单个晶体管的输出功率时，可将多个功率管放大的功率叠加，这就是功率合成技术
- ✓ 功率合成一般依靠上限工作频率高达几千兆赫兹的传输线变压器来实现

传输线变压器的结构与性能

✓ 传输线变压器的结构

- 由绕在铁氧体磁环上的射频传输线构成
- 射频传输线经常用多股双绞线或双芯带状线
- 磁环一般采用镍锌高导磁率($\mu=100\sim400$)铁氧体磁环

◆ 工作原理：采用传输线原理和变压器原理的结合。

◆ 特点

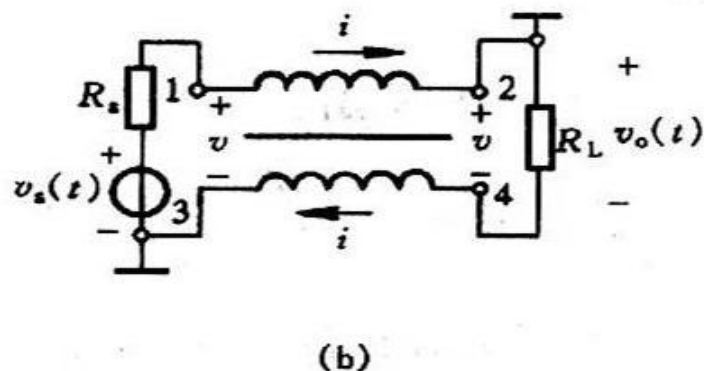
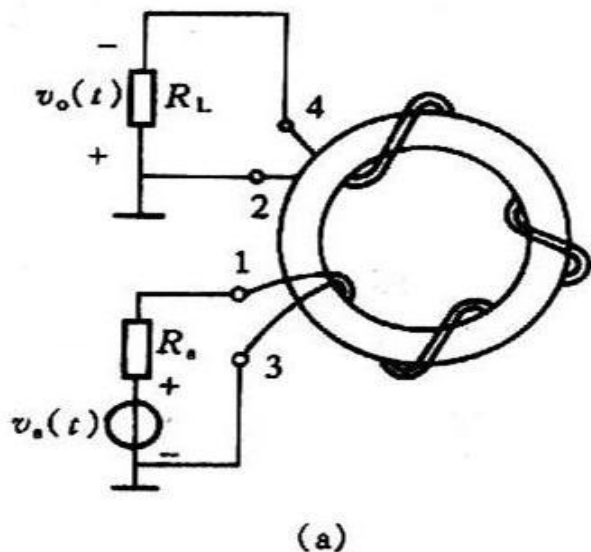
➤ 能量传输靠传输线。

➤ 线圈绕在磁芯上，因此有阻抗变换功能。

传输线

- 传输线是指连接信号源和负载的两根导线；
- 工作频率较高时，导线固有分布电感和电容影响不能忽略；
- 传输线上限频率与其长度 L 成反比；
- 只有传输线是无损、且其端阻抗是匹配情况下（ $R_S = R_L = Z_C$ ），在上限频率范围内，线上电压和电流处处相等。
- 此时 $L = (1/8 \sim 1/10) \lambda_{\min}$ （ λ_{\min} 为上限频率 f_H 对应的波长）

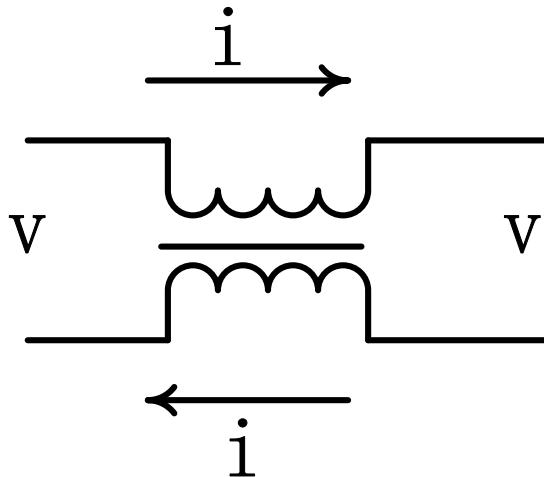
传输线变压器



- 传输线变压器上限频率取决于传输线长度;
- 下限频率取决于初级绕组电感量;
- 传输变压器的特征阻抗 $Z_C = v/i$

传输线变压器

- 符号

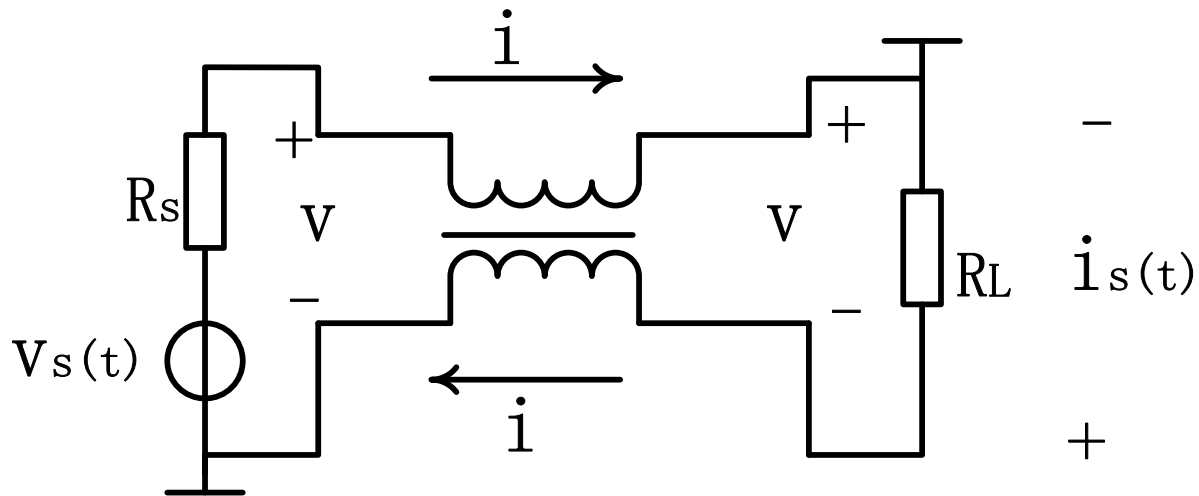


- 特性

- ✓ 传输线的长度 $l \leq \lambda_{\min}/8$ (λ_{\min} 为上限频率 f_H 对应的波长) 时, 可以认为线上电压和电流处处相等, 即均为 v 和 i
- ✓ 传输线变压器的特性阻抗 $Z_C = v/i$

传输线变压器

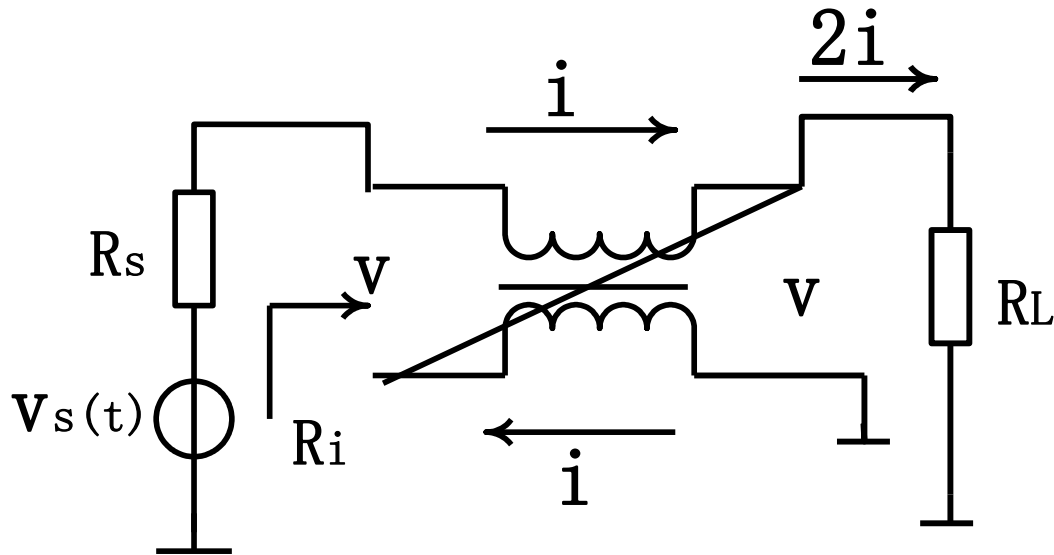
- 1:1倒相变压器



- $R_i = v/i = Z_c = R_L$
- $V_o(t) = -v$

传输线变压器

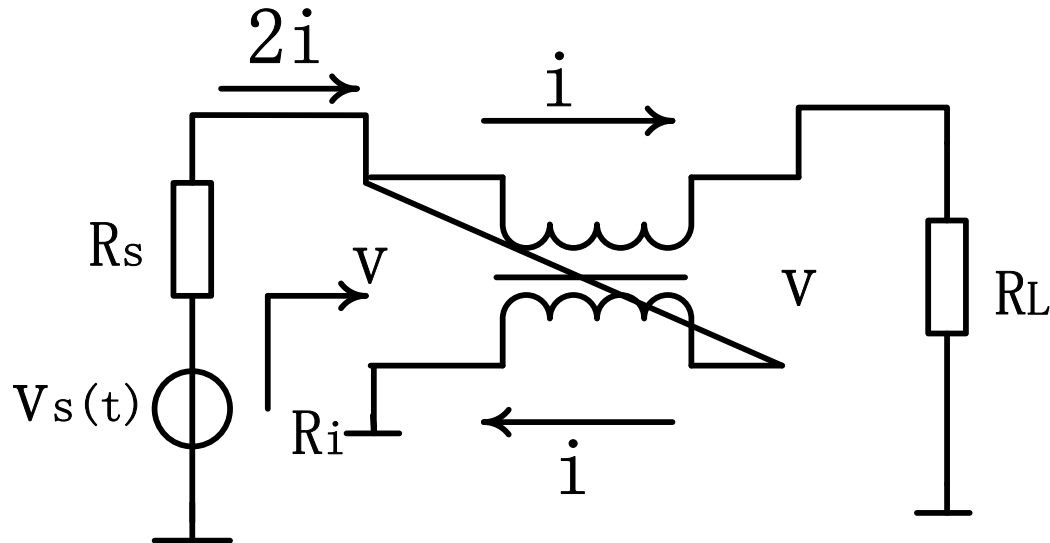
•4:1 传输变压器



- $R_i = 2v/i$, $R_L = v/2i$
- $R_i = 4R_L$, $Z_C = v/i = 2R_L$

传输线变压器

- 1:4传输变压器



- $R_i = V/2i$, $R_L = 2V/i$
- $R_i = R_L/4$, $Z_C = R_L/2$

本章小结

- 从众多的噪声和干扰中选取有用信号，必须采用选频滤波技术，滤波器是完成该功能的重要部件。
- LC并联谐振滤波器的带宽**B**和带外衰减性能均与回路的品质因素**Q_p**有关，且相互矛盾。**Q_p**增加，**B**减小，带外衰减变陡，即选择性变好。
- 阻抗匹配是复共轭阻抗匹配 $Z_L = Z_S^*$ 。
- L型匹配网络的带宽**B**，滤波度 φ_n 和 η_k 都与回路**Q**值有关。
- 理论和实践证明，传输线的长度 $l = \frac{1}{8}\lambda_{\min}$ 时，在上限频率范围内可近似认为，线上电压和电流处处相等，即传输线变压器的特性阻抗为 $Z_c = v/i$

习题

P.133

4.24 (b) (d)