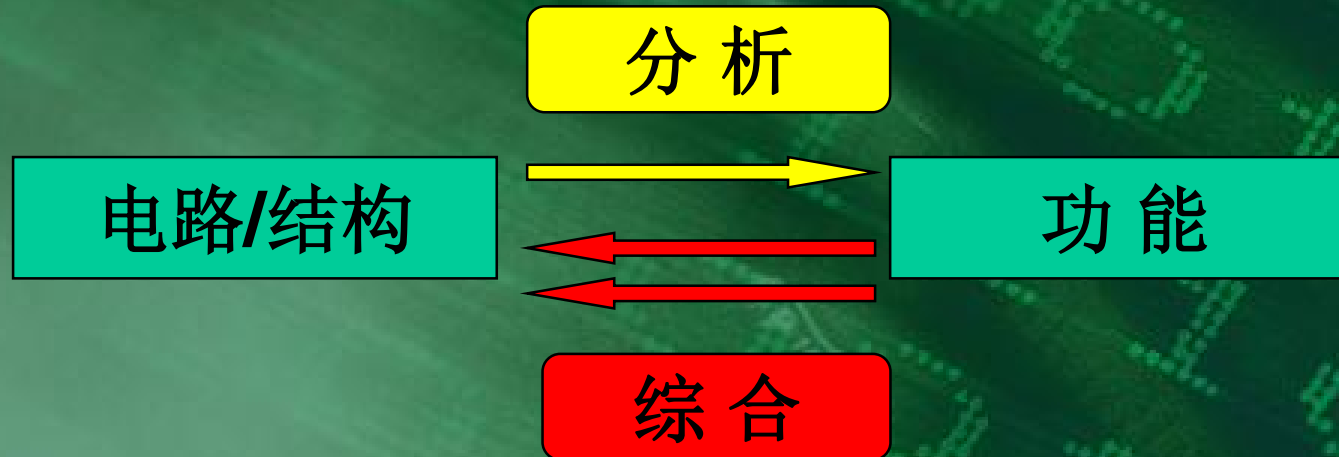


# 13. 网络综合

西安电子科技大学，电子工程学院  
苏 涛

## 13. 网络综合

分析和综合



由功能要求，或者性能参数，得到网络实现的过程，称为综合。综合的结果是非唯一的，等效网络均可。

# 13. 网络综合

- 一、电路理论基础
- 二、滤波电路综合目标
- 三、综合的几个问题
- 四、综合的一般步骤

# 13. 网络综合

一、电路理论基础

二、滤波电路综合目标

三、综合的几个问题

四、综合的一般步骤



线性系统:

$$f(t) \rightarrow r(t)$$

$$kf(t) \rightarrow kr(t)$$

$$f_1(t) \rightarrow r_1(t)$$

$$f_2(t) \rightarrow r_2(t)$$

$$f_1(t) + f_2(t) \rightarrow r_1(t) + r_2(t)$$

$$a_1 f_1(t) + a_2 f_2(t) \rightarrow a_1 r_1(t) + a_2 r_2(t)$$

# 电路集总元件

	电阻 R	电感 L	电容 C
电流 i	$v = iR$	$v = L \frac{di}{dt}$	$v = \frac{1}{C} \int i dt$
电压 v	$i = \frac{v}{R}$	$i = \frac{1}{L} \int v dt$	$i = C \frac{dv}{dt}$

## 线性、集总、非时变系统——时域分析

$$iR + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt = v(t)$$

$$L \frac{d^2 i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} i(t) = \frac{dv(t)}{dt}$$

一般形式方程

$$a_m \frac{d^m i}{dt^m} + a_{m-1} \frac{d^{m-1} i}{dt^{m-1}} + \mathbf{L} + a_1 \frac{di}{dt} + a_0 i(t)$$

$$= b_n \frac{d^n f}{dt^n} + b_{n-1} \frac{d^{n-1} f}{dt^{n-1}} + \mathbf{L} + b_1 \frac{df}{dt} + b_0 f(t)$$



## 改写为算子方程

$$p \equiv \frac{d}{dt}, pf(t) = \frac{df(t)}{dt}, \mathbf{L}, p^m f(t) = \frac{d^m f}{dt^m}$$

$$\frac{1}{p} f(t) = \int f(t) dt, \mathbf{L}$$

$$\begin{aligned} & (a_m p^m + a_{m-1} p^{m-1} + \mathbf{L} + a_1 p + a_0) i(t) \\ & = (b_n p^n + b_{n-1} p^{n-1} + \mathbf{L} + b_1 p + b_0) f(t) \end{aligned}$$

$$i(t) = h_1 f(t) + h_2 \frac{df}{dt} + \mathbf{L} + h_{r+1} \frac{d^r f}{dt^r}$$



## 线性、集总、非时变系统——频域分析

$$f(t) = e^{st}$$

$$i(t) = he^{st}$$

$$i(t) = hf(t)$$

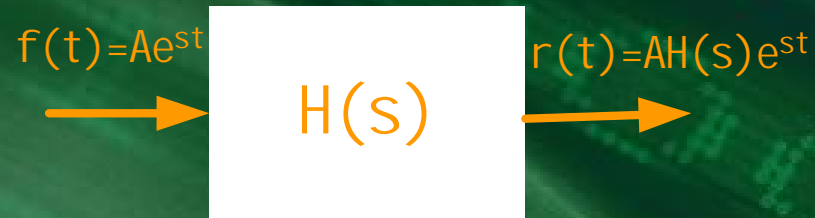
$$\begin{aligned} & (a_m p^m + a_{m-1} p^{m-1} + \mathbf{L} + a_1 p + a_0) h e^{st} \\ & = (b_n p^n + b_{n-1} p^{n-1} + \mathbf{L} + b_1 p + b_0) e^{st} \end{aligned}$$

## 频域微分运算

$$pe^{st} = \frac{d}{dt} e^{st} = se^{st} \quad p^r e^{st} = s^r e^{st}$$

$$\begin{aligned} & (a_m s^m + a_{m-1} s^{m-1} + \mathbf{L} + a_1 s + a_0) h \\ & = (b_n s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \mathbf{L} + b_1 s + b_0) \end{aligned}$$

$$h = \frac{b_n s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \mathbf{L} + b_1 s + b_0}{a_m s^m + a_{m-1} s^{m-1} + \mathbf{L} + a_1 s + a_0}$$



$$H(s) = \frac{\text{response function}}{\text{driving function}}$$

$$H(s) = \frac{b_n s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \mathbf{L} + b_1 s + b_0}{a_m s^m + a_{m-1} s^{m-1} + \mathbf{L} + a_1 s + a_0}$$
$$= \frac{n(s)}{d(s)}$$

## 网络的可实现性——正实函数特性：

1、阻抗函数和导纳函数具有有理分式的形式；分子和分母多项式的系数是有理数，实的和正的；

阻抗函数当 $s$ 是实数时是实的；

阻抗函数复的零点和极点以共轭成对出现；

2、阻抗函数的零点和极点实部为零或者负的；

3、阻抗函数的极点，位于虚轴上时，必须是简单的，其残差必须是正的实数；

4、阻抗函数分子和分母阶数不同，即零点和极点数量不同，其零点和极点不在原点。

# 13. 网络综合

一、电路理论基础

二、滤波电路综合目标

三、综合的几个问题

四、综合的一般步骤

逼近

提出预想的理想响应，  
并用可实现的函数逼近

原理电路实现

设法实现具有逼近函数  
特性的原理电路

物理电路实现

集总元件、分布元件  
(电感、腔体、波导、微带等)

滤波电路是通信系统中常用的电路，也就是频率选择性网络。一般地，网络增益随频率不同。

根据增益随频率变化的不同特点，滤波网络可以分为低通、带通、高通和带阻等类型。



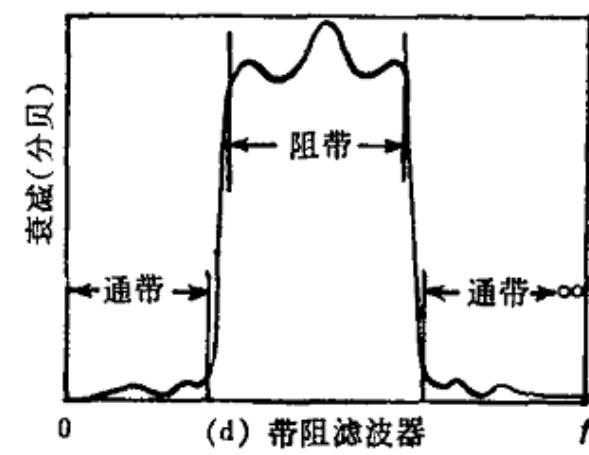
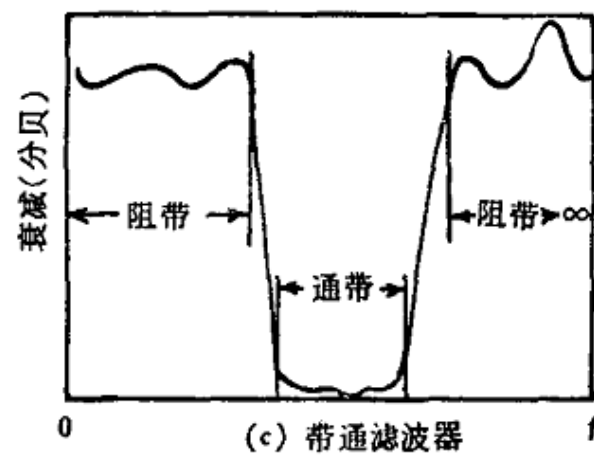
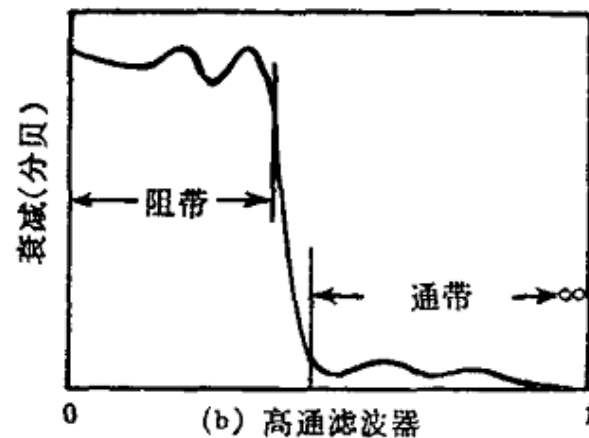
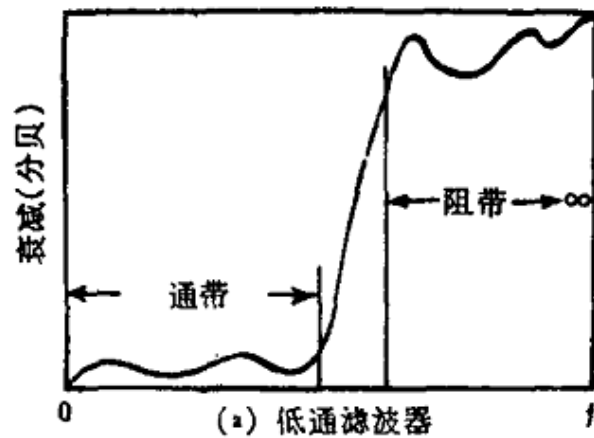


图 1.5-1 滤波器特性的四个普通形式

网络综合的重要思想之一，即滤波网络设计可以变换为低通网络设计，再经过频率变换，得到其他各种类型的滤波网络。

低通

高通

带通

带阻

低通综合

频率变换

滤波网络综合的首要目标就是：低通网络。

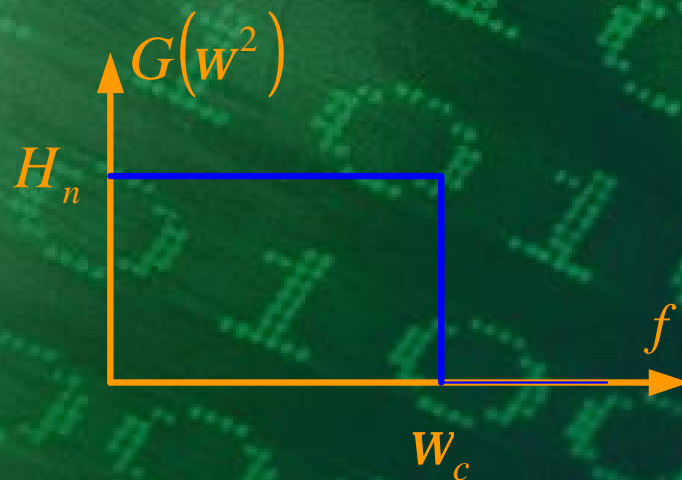


网络的幅值特性常用增益  $G$  和截止频率  $w_c$  加以表示。

增益  $G$  表示端口2负载所吸收的功率  $P_L$   
与端口1信号源所能提供的最大可用功率  $P_0$  之比

$$G(w^2) = \frac{P_L}{P_0}$$

理想低通响应



上图就是理想低通响应，有时称为“砖墙响应”

$0 - w_c$       信号通过，通带；

$w_c - \infty$       信号截止，阻带；

$$G(w^2) = \begin{cases} H_n & 0 \leq w \leq w_c \\ 0 & w > w_c \end{cases}$$

$w_c$     称为截止频率

$H_n$     称为直流增益       $0 \leq H_n \leq 1$

# 13. 网络综合

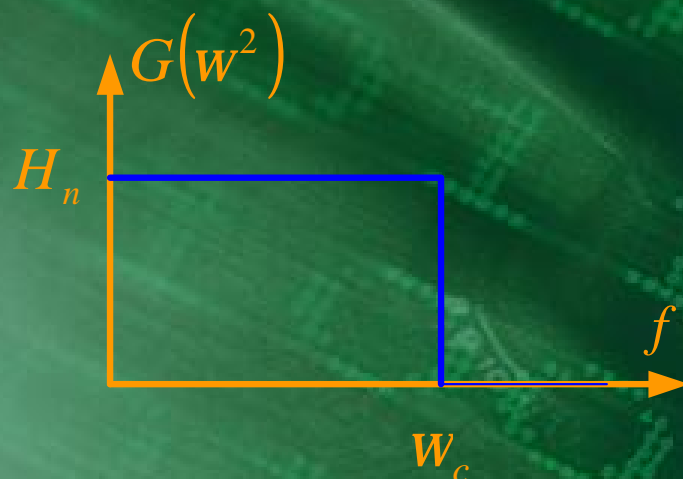
一、电路理论基础

二、滤波电路综合目标

三、综合的几个问题

四、综合的一般步骤

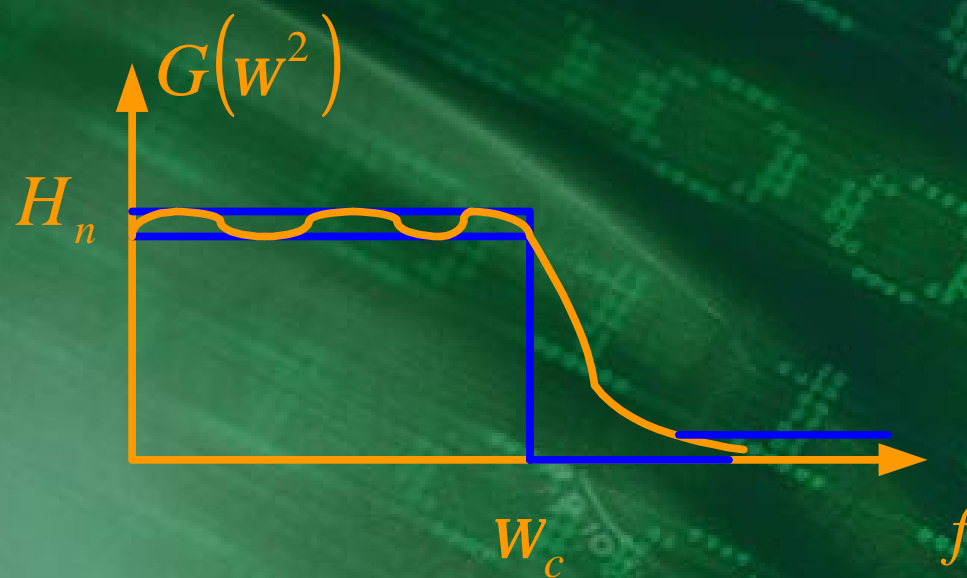
## 2.1 可实现性



理想低通响应是无法实现的，或者说实现砖墙响应理论上需要无穷多个元件。

阻抗函数的正实特性。





通常，采用可实现的函数逼近理想响应，并最终实现该响应。

**Butterworth、Chebyshev函数综合**

## 2.2 复延拓

网络综合中，通常需要将频率进行复延拓，即

$$W \rightarrow s = S + jW$$

注：延拓，或者开拓，必须保证在原空间与未开拓时特性一致；而在其余区域则可带有一定的任意性，当然开拓后会带来某些方便。

频率复延拓后，增益函数在 $s$ 域表示为

$$G(-s^2) = S_{21}(s)S_{21}(-s)$$

Herwitz共轭

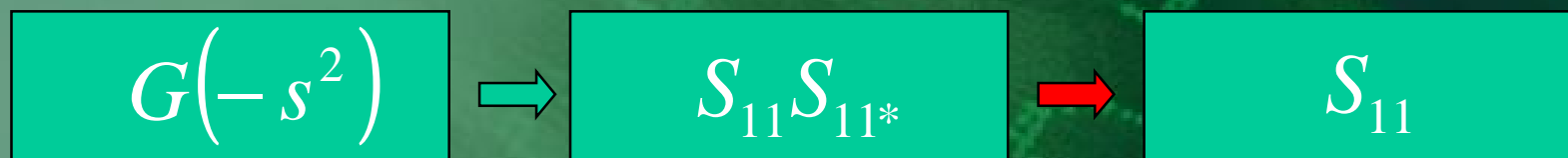
$$S_{21}^*(s) = S_{21}(-s)$$

则

$$G(-s^2) = S_{21}(s)S_{21}^*(s)$$

- 共轭，Herwitz共轭，两者在频率空间相同；
- 无耗网络中

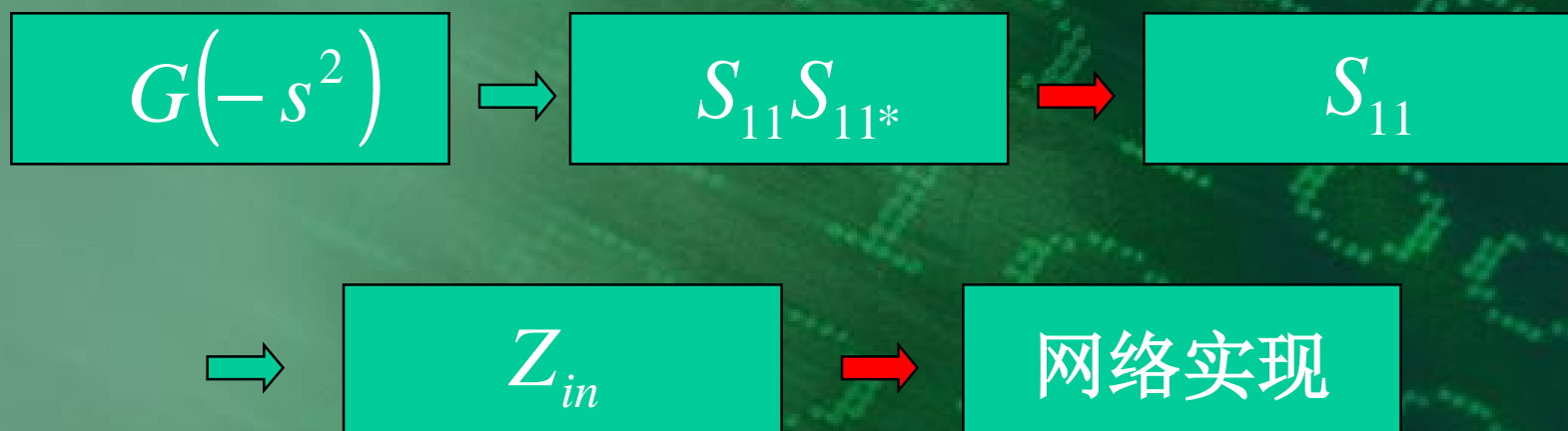
$$\begin{aligned} S_{11}(s)S_{11}^*(s) &= 1 - S_{21}(s)S_{21}^*(s) \\ &= 1 - G(-s^2) \end{aligned}$$



注： $S_{11}$ 的分解并不是唯一的， $S_{11}$ 必须在 $s$ 右半平面解析

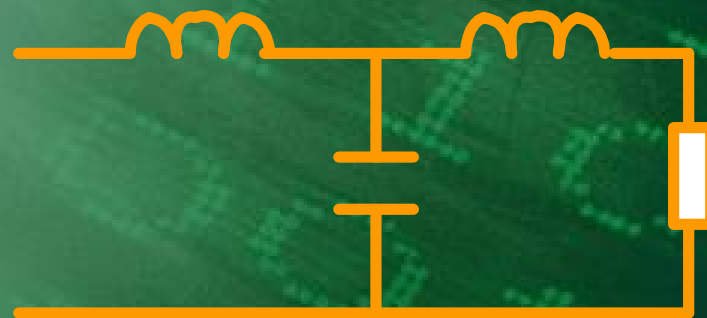
## 2.3 阻抗函数辗转相除法

$$Z_{in}(s) = Z_0 \frac{1 \pm S_{11}(s)}{1 \mp S_{11}(s)}$$



例：已知网络输入阻抗函数，求该网络

$$Z_{in}(s) = \frac{2s^3 + 2s^2 + 2s + 1}{2s^2 + 2s + 1}$$



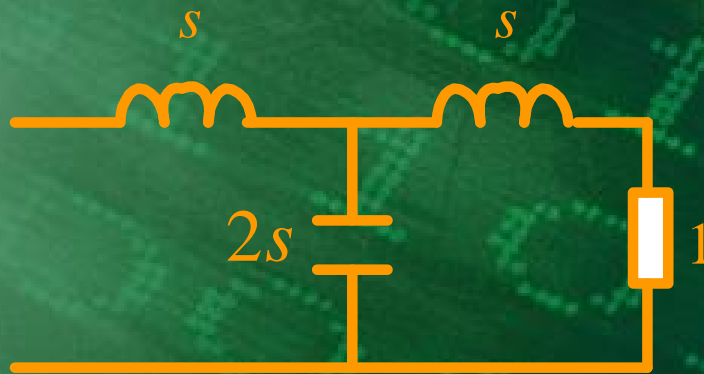
$$Z_{in}(s) = \frac{2s^3 + 2s^2 + 2s + 1}{2s^2 + 2s + 1}$$

$$\begin{array}{r}
 2s^2 + 2s + 1 \overline{) 2s^3 + 2s^2 + 2s + 1} \quad | \quad s \\
 \underline{2s^3 + 2s^2 + s} \phantom{+ 1} \\
 s + 1 \overline{) 2s^2 + 2s + 1} \quad | \quad 2s \\
 \underline{2s^2 + 2s} \phantom{+ 1} \\
 1 \overline{) s + 1} \quad | \quad s \\
 \underline{s} \\
 1
 \end{array}$$



$$\begin{aligned}
Z_{in}(s) &= \frac{2s^3 + 2s^2 + 2s + 1}{2s^2 + 2s + 1} \\
&= \frac{s(2s^2 + 2s + 1) + (s + 1)}{2s^2 + 2s + 1} \\
&= s + \frac{1}{2s^2 + 2s + 1} \\
&= \mathbf{KK} \\
&= s + \frac{1}{2s + \frac{1}{s+1}}
\end{aligned}$$

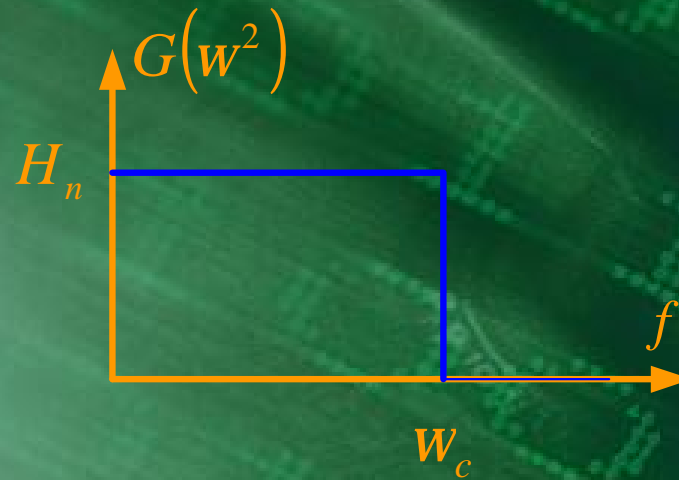
$$\begin{aligned} Z_{in}(s) &= \frac{2s^3 + 2s^2 + 2s + 1}{2s^2 + 2s + 1} \\ &= s + \frac{1}{2s + \frac{1}{s+1}} \end{aligned}$$



$$Z_{in}(s) = L_1s + \frac{1}{C_2s + \frac{1}{L_3s + \frac{1}{M}}}$$

输入阻抗辗转相除法的实质是阶梯电抗网络的连接。

## 2.4 $H_n$ 的约束



直流增益  $H_n$ ，即频率为零时的增益。

无耗电抗网络（滤波网络）综合时，直流相当于源和负载直接相连，即



$$G(0) = \frac{P_L}{P_0} = \frac{\frac{1}{2} \frac{E_g^2 R_l}{(R_l + R_g)^2}}{\frac{E_g^2}{8R_g}} = \frac{4R_g R_l}{(R_g + R_l)^2} = H_n$$

根据不等式关系，有

$$\frac{4R_g R_l}{(R_g + R_l)^2} \leq 1$$

即，

$$H_n \leq 1$$

## 2.4 归一化

频率归一

$$\bar{W} = \frac{W}{W_c}$$

$$\bar{S} = \frac{S}{W_c}$$

阻抗归一

$$\bar{Z} = \frac{Z}{Z_0}$$



# 13. 网络综合

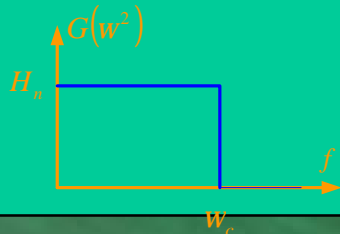
一、电路理论基础

二、滤波电路综合目标

三、综合的几个问题

四、综合的一般步骤

理想响应



逼近函数

$$G(-s^2) = S_{21}(s)S_{21}(-s)$$

网络无耗

$$S_{11}(s)S_{11}^*(s) = 1 - G(-s^2)$$

分解反射函数  
非唯一，可实现性

$$S_{11}(s)$$

阻抗函数

$$Z_{in}(s) = Z_0 \frac{1 \pm S_{11}(s)}{1 \mp S_{11}(s)}$$

阶梯电抗网络

