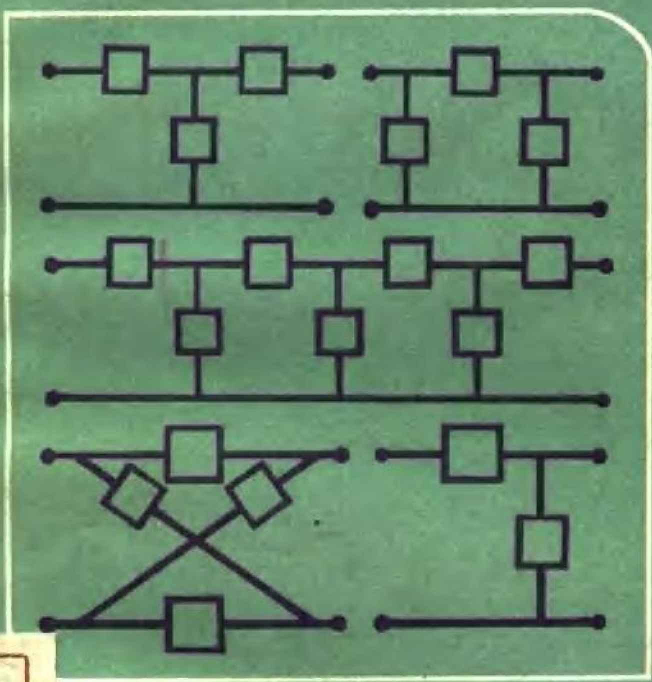
无线电技术与通信专题介绍丛书

〔英〕F. R. 康纳 著

网络



科学出版社

内 容 简 介

本书是 F. R. 康纳撰写的“无线电技术与通信专题介绍”丛书之二，是专门介绍网络的专业性普及读物. 书中扼要介绍了网络的基本概念及网络分析的方法，还介绍了滤波器及滤波器设计中一种比较先进的合成方法. 为了帮助读者理解概念，列举了不少例题并给出了一定数量的习题. 这些题目大都是从英国的有关考卷中选取的.

本书内容浅显、概念清楚、通俗易懂，适合于自学无线电技术和无线电通信等课程的读者阅读，亦可作为无线电类大、中专学生和工程技术人员的自学参考书.

F. R. Connor

NETWORKS

Edward Arnold, 1979

网 络

〔英〕F. R. 康纳 著

秦梅芳 译

禾 民 校

责任编辑 魏玲 李立

科学出版社 出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1982 年 10 月第 一 版 开本：787×1092 1/32

1982 年 10 月第一次印刷 印张：3 3/4

印数：0001—16,600 字数：82,000

统一书号：15031·439

本社书号：2755·15—7

定价： 0.50 元

前　　言

本书是介绍“网络”这一重要课题的著作。网络已广泛使用于电子技术和电信领域。本书力图简洁而有条理地介绍有关基本概念。另外，为了帮助读者掌握这些基本概念，书中还提供了许多从过去试卷中选取的成功的例题，来清楚地说明有关基础理论的应用。

本书第一章主要分析各种单端和双端网络，重点放在它们特性的分析上。随后各章具体阐述滤波器这类重要的网络，并对滤波器设计的实际问题作了考虑。书中最后一章介绍应用于滤波器设计领域的近代合成法，从而完成对“网络”这一极有用课题的概括而全面的论述。

本书对于下列学生十分有用：他们或者准备通过伦敦大学的考试，或者准备考取全国学术评选委员会颁发的学位，或者准备通过工程学会委员会的考试，或者准备取得其他证书，诸如全国通用的高级执照，全国有效的高级学位证书，以及伦敦协会金融中心当局和商会的某些考试合格证。本书也适用于工业界那些需要一本基础知识常用书以帮助其实际工作的工程师。

F. R. 康纳

本丛书的另外几册是：

1. 信号
3. 波的传输
4. 天线
5. 调制
6. 噪声

本书使用的符号

ω	角频率
ω_r 或 ω_0	谐振频率
Y	导纳
Z	阻抗 $\begin{cases} Z_0 & \text{特性阻抗} \\ \left.\begin{array}{l} Z_{0T} \\ Z_{0\pi} \end{array}\right\} & \text{T 型节或 } \pi \text{ 型节特性阻抗} \end{cases}$
X	电抗
f_c	截止频率
f_∞	衰减为无限大的频率
g	电导参数
y	导纳参数
Q_0	Q 因子
α	衰减系数
β	相移系数
γ	传输系数

本书使用的缩写词

I. E. E.	电气工程师学会
L. U. BSc (Eng.) Tels	伦敦大学(工程)学士电信考试第三部分

目　　录

第一章 绪 论

网络已广泛应用在电信电路中，并且成为传输线或组合滤波器的基本结构.

目前，用途最广的网络是不包含任何内部电源的无源网络. 一个无源网络是由一些元件如电阻、电感或电容等以一种物理结构形式组成的. 网络可以有各种类型的结构，每种都有它自己独特的性质和用途.

然而在最近，由于有源网络，即包含电子管或晶体管器件的网络与通常的无源网络相比具有某些优点，因而已得到了更广泛的应用.

1-1 无 源 网 络

无源网络的两种最基本的结构是图 1 所示的单端口网络和双端口网络. 一个单端口网络仅有一对端子，而一个双端口网络有两个输入端和两个输出端.

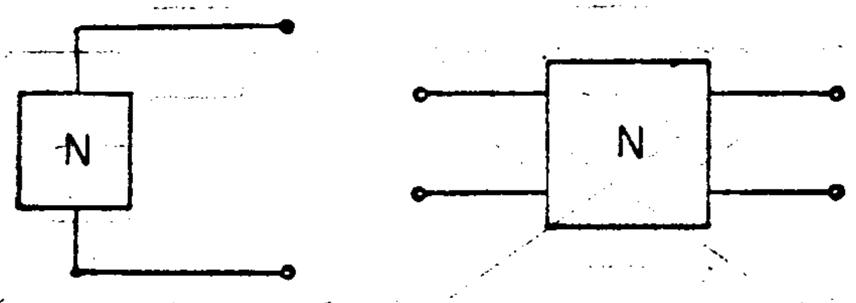


图 1 单端口网络(左)和双端口网络

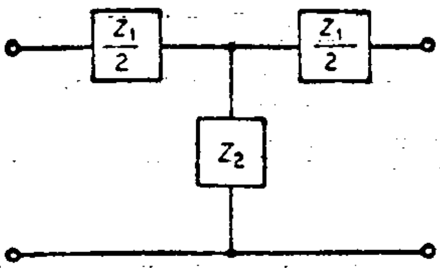
人们习惯于把这种网络看成是一个“黑盒子”，在它的上面附有适当的端子并以这种“黑盒子”为基本结构来进行

分析.

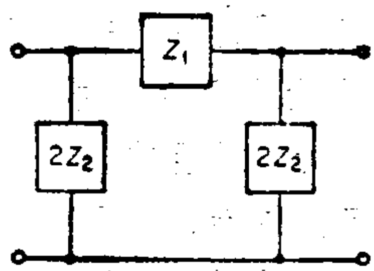
1-2 网络举例

在通信系统中采用的典型网络的方框图如图 2 所示.

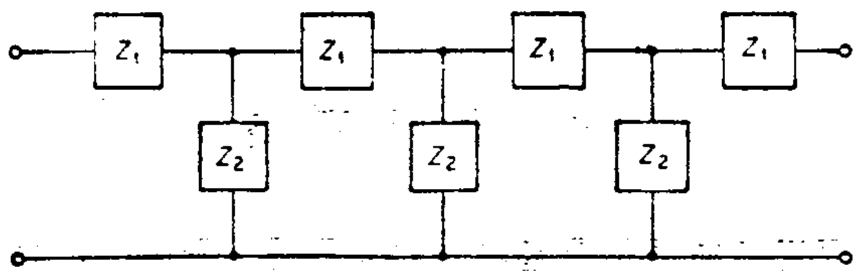
网络通常可分为对称网络和非对称网络，它们可以是平



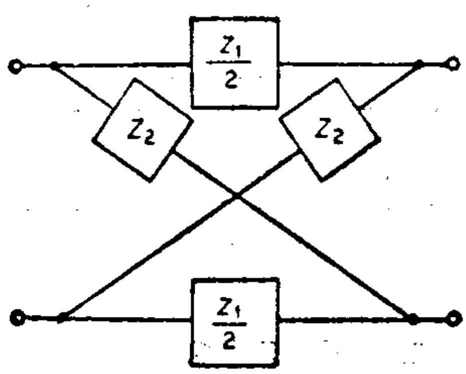
T 形网络



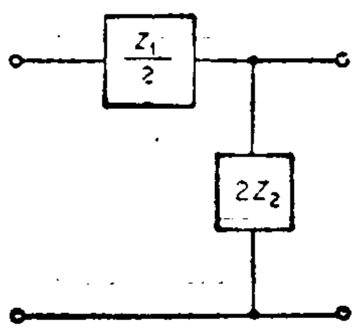
π 形网络



梯形网络



格型网络



L 形网络

图 2

衡的也可以是不平衡的. 当输入端和输出端交换位置时，对称网络没有变化而非对称网络则不然. 当网络中的元件相对于“地平面”被正确地配置，使得杂散电容得到平衡，从而使电路间的干扰或“串话”减小时，这种网络称之为“平衡的”网络.

1-3 网络特性

网络的传输特性最好用网络的衰减系数和相移系数来描述，这两者都是频率的函数. 另外，还需更详细地研究网络的阻抗，它对网络的传输特性有很大的影响. 因为，通常电信网络是由阻抗随频率而改变的电感和电容组成的. 因而，网络可由其累接阻抗和影象阻抗（这两者一般不相等）来表征，前者对于一个网络跟另一个网络的“匹配”是重要的，而后者决定了通过网络的最大的传输功率.

1-4 网络分析

假设网络包含线性无源元件，可以通过考察网络的电压和电流或者它的阻抗来对网络进行分析. 在这些量之间可建立一组方程式并导出在动力电路与晶体管电路中熟知的基本的 A, B, C, D 参数[1].

可是，在电信电路中更为关注的是作为频率函数的网络传输特性. 因此，通常在网络分析中，要采用阐明这些特性的办法来论述网络. 对于无损耗单端口网络，根据福斯特电抗定理考察网络的极点和零点可以实现这一点. 对于双端口网络，仍然使用通常的代数方法进行分析，虽然先进的技术

---

1) 见附录 C.

也利用极点和零点的概念而形成了近代网络理论．我们将在第六章中讨论将近代网络理论应用于滤波器的问题．

1-5 有源网络

如前所述，这类网络在某些场合，尤其在较低频率条件下使用得比较多．它们的一个优点是可以省去笨重和昂贵的电感，而借助于使用运算放大器、回转器或负阻变换器等，用RC网络来取代它．并且，应用有源器件（例如晶体管）除了可以得到所希望的响应特性外，还可以补偿通过网络的插入损耗．

研究这种网络是一个特有的问题，将在第六章里简要地讨论．

第二章 单端口网络

单端口网络的两个最重要的例子是串联调谐回路和并联调谐回路.

2-1 串联调谐回路

令Z为由 R，L和C组成的串联回路的输入阻抗，它和一个可变频率的发生器相连，如图3所示. 我们有

$$Z = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = \frac{\omega CR + j(\omega^2 LC - 1)}{\omega C} \quad (1)$$

谐振时，$\omega = \omega_r$，因此，

$$\omega_r L = \frac{1}{\omega_r C}$$

或

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

当$\omega = \omega_r$时，从方程式(1)和(2)我们得到$Z = R$，即谐振时的阻抗是一个纯电阻.

通常，方程式(1)可写作:

$$Z = \frac{\omega CR + jLC[\omega^2 - (1/LC)]}{\omega C} = R + j\frac{L}{\omega}(\omega^2 - \omega_r^2)$$

$$\left(因为\ \omega_r^2 = \frac{1}{LC}\right)$$

对于无损耗的网络，$R=0$，得出：

$$Z=j\frac{L}{\omega}\left(\omega^2-\omega_r^2\right) \tag{3}$$

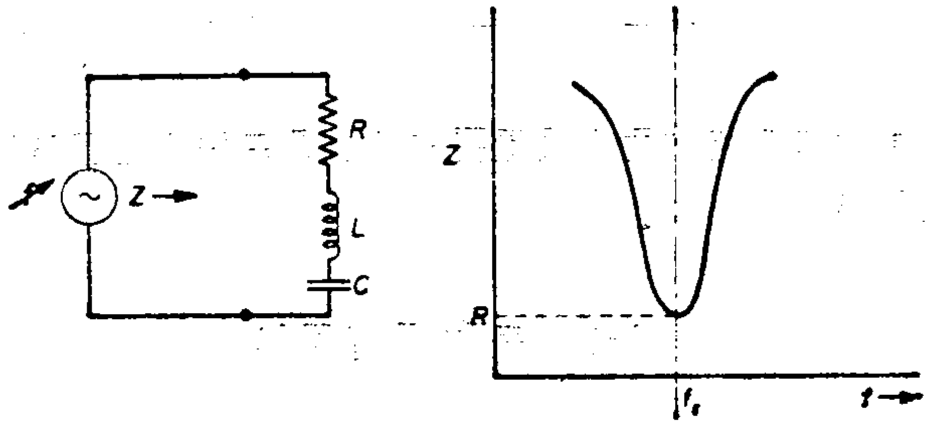


图 3

2-2 并联调谐回路

令 Z 为由 L,R 和 C 组成的并联回路的输入阻抗，其中 R 与线圈串联，如图 4 所示.

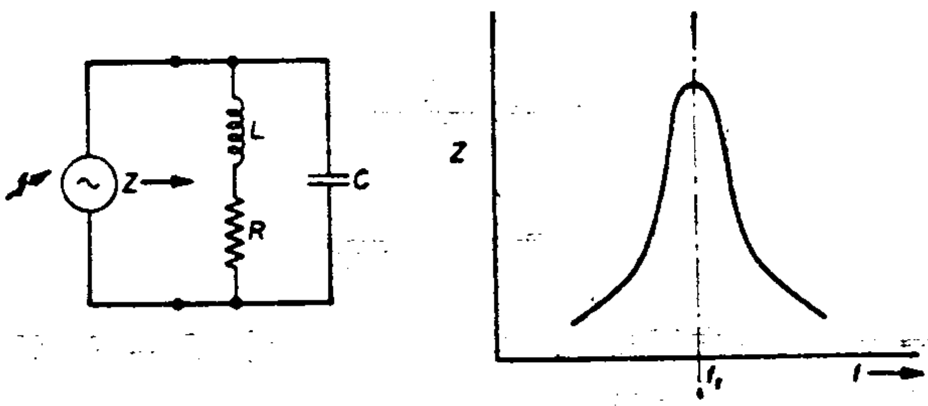


图 4

我们有

$$Z=\frac{(R+j\omega L)[-j(1/\omega C)]}{R+j[\omega L-(1/\omega C)]}=\frac{R+j\omega L}{j\omega CR+(1-\omega^2LC)}$$

通常，如果线圈回路的 Q 值很高，则 $\omega L\gg R$，这里，

$$Q = \frac{\omega L}{R}$$

因此

$$Z = \frac{j\omega L}{j\omega CR + (1 - \omega^2 LC)} \tag{4}$$

谐振时，$\omega = \omega_r$，且

$$\omega_r L = \frac{1}{\omega_r C}$$

或

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

由此得

$$Z = \frac{j\omega_r L}{j\omega_r CR} = \frac{L}{CR} = Z_d \tag{5}$$

这被称作回路的动态阻抗，并且是一个纯电阻.

通常，方程式(4)可写作:

$$Z = \frac{j\omega L}{j\omega CR + LC\left(\frac{1}{LC} - \omega^2\right)} = \frac{j\omega L}{j\omega CR + LC(\omega_r^2 - \omega^2)}$$

对于无损耗的网络，$R = 0$，得出:

$$Z = \frac{j\omega L}{LC(\omega_r^2 - \omega^2)} = \frac{j\omega}{C}\left[\frac{1}{\omega_r^2 - \omega^2}\right]$$

或

$$Z = \frac{\omega}{jC}\left[\frac{1}{\omega^2 - \omega_r^2}\right] \tag{6}$$

又，从方程式(4)我们有

$$Z = \frac{j\omega L}{j\omega CR + (1 - \omega^2 LC)}$$

$$= \frac{j\omega L}{j\omega CR\left[1+\frac{LC}{j\omega CR}\left(\frac{1}{LC}-\omega^2\right)\right]} = \frac{\frac{L}{CR}}{\left[1+\frac{LC}{j\omega CR}\left(\frac{1}{LC}-\omega^2\right)\right]}$$

因为

$$Q \approx \frac{\omega L}{R} \approx \frac{1}{\omega CR}$$

当 ω 接近 ω_r 时有

$$LC \approx \frac{1}{\omega_r^2}$$

由此可得:

$$Z = \frac{L/CR}{1+(Q/j\omega_r^2)(\omega_r^2-\omega^2)} = \frac{Z_d}{1+j(Q/\omega_r^2)(\omega^2-\omega_r^2)}$$

现有 $\omega^2 = (\omega_r \pm \delta\omega)^2 \approx \omega_r^2 \pm 2\omega_r\delta\omega$（因为 ω 接近谐振值时，$(\delta\omega)^2$ 是个很小的值），因此，$(\omega^2-\omega_r^2) = 2\omega_r\delta\omega$（取正值），以及

$$Z = \frac{Z_d}{1+2j\frac{Q\delta\omega}{\omega_r}} = \frac{Z_d}{1+2jQ\delta}$$

其中

$$\delta = \frac{\delta\omega}{\omega_r} = \frac{\delta f}{f_r}$$

或

$$|Z| = \frac{Z_d}{\sqrt{1+4Q^2\delta^2}} = \frac{L/CR}{\sqrt{1+4Q^2\delta^2}}$$

上式给出以 Z_d，Q 和 δ 表示的接近于谐振时的一般阻抗 Z。

例 1 一个恒压发生器跟一个由电感量为 250μH、电阻为 12.5Ω 的线圈和一个可变电容器组成的并联调谐回路相连，如果回路在 1MHz 的频率上谐振，计算回路在 4kHz 失谐

时的阻抗。

解 我们有

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

或

$$C = \frac{1}{4\pi^2 L f_r^2} = \frac{1}{4\pi^2 \times 250 \times 10^{-6} \times 10^{12}} \approx 100\text{pF}$$

于是

$$Q = \omega_r \frac{L}{R} = \frac{2\pi \times 10^6 \times 250 \times 10^{-6}}{12.5} = 40\pi \approx 125$$

$$Z_d = \frac{L}{CR} = \frac{250 \times 10^{-6}}{100 \times 10^{-12} \times 12.5} = 200\text{k}\Omega$$

$$Z = \frac{Z_d}{\sqrt{1 + 4Q^2\delta^2}}$$

其中

$$\delta = \frac{\delta\omega_r}{\omega_r} = \frac{\delta f_r}{f_r} = \frac{4000}{10^6} = \frac{1}{250}$$

现在

$$\sqrt{1 + 4Q^2\delta^2} = \sqrt{1 + 4 \times (125)^2 \times \frac{1}{(250)^2}} = \sqrt{2}$$

由此得

$$Z = \frac{200\text{k}\Omega}{\sqrt{2}}$$

或

$$Z = 141\text{k}\Omega$$

2-3 无损耗网络

单端口无损耗网络的输入阻抗 Z 可以采取方程式(3)和(6)所给出的形式，可以把它们结合起来，以得到适用于这类

网络的任意组合的通用表达式，其输入阻抗具有以下形式：

$$Z = A\left[\frac{(\omega^2-\omega_1^2)(\omega^2-\omega_3^2)\cdots}{(\omega^2-\omega_2^2)(\omega^2-\omega_4^2)\cdots}\right] \tag{7}$$

其中，$A = j\omega H$ 或 $H/j\omega$，H是比例因子.

代入 $s=\sigma+j\omega$ 可以得出 Z 的另一种形式，对于无损耗网络可以令 $\sigma=0$. 因此，我们得到：

$$Z = A\left[\frac{(s^2+\omega_1^2)(s^2+\omega_3^2)\cdots}{(s^2+\omega_2^2)(s^2+\omega_4^2)\cdots}\right] \tag{8}$$

其中，$A = sH$ 或 H/s，H 是比例因子.

2-4 极点和零点

在方程式(7)中使 $Z=0$ 的 ω 值，如 ω_1，ω_3 等称为 Z 的零点，并用一个小的圆圈‘○’来表示；同样，使 $Z=\infty$ 的 ω 值，如 ω_2，ω_4 等等则称为 Z 的极点，并且用一个‘×’号来表示.

极点和零点可以在 ω 平面沿 X 轴画出来，其 Y 轴表示电抗 $\pm jX$，或者在 s 复平面上表示出来，如图 5 所示. 极点和零

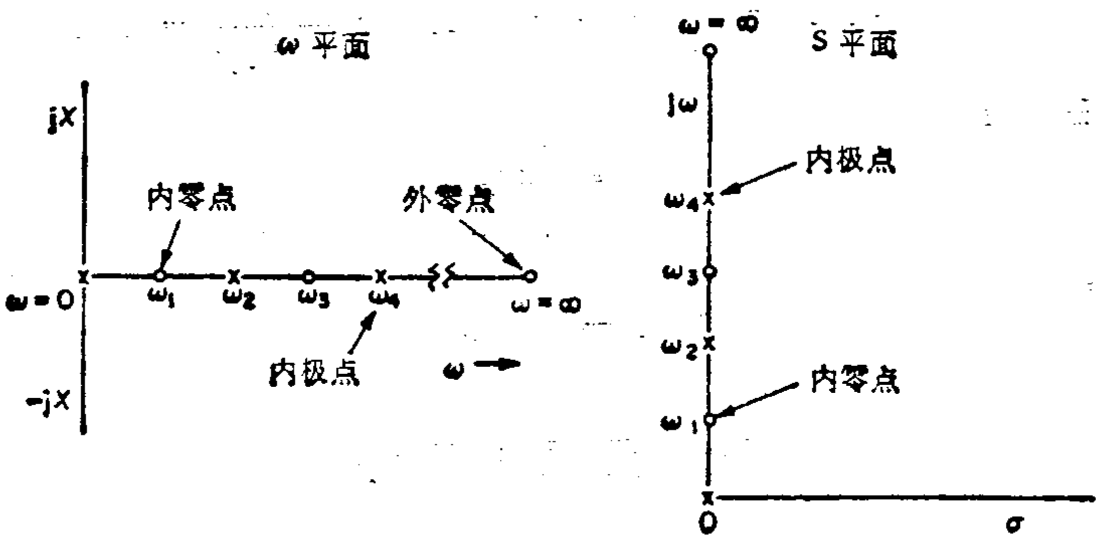


图 5

点的概念在近代网络理论和控制工程领域中是非常重要的.

2-5 福斯特电抗定理[1-2]

无损耗网络的很多性能可以通过研究它的极点和零点得出，这可由下述的福斯特电抗定理扼要地表达出来.

【定理】 任何单端口无损耗网络的输入阻抗完全可以由在实频率处的它的内极点和内零点以及一个实常数的比例因子H来确定.

根据这个定理，可以得出两个有用的规则:

规则 1 一个单端口无损耗网络的极点和零点必定是沿着频率轴交替出现的. 这称作间隔特性.

规则 2 对于一个无损耗单端口网络可以得到四类电抗曲线.

【说明】

(1) 在图 5 中，$\omega=0$ 称作一个外极点；$\omega=\infty$ 称作一个外零点.

(2) ω_1, ω_2, ω_3, $\cdots$等等是内极点和内零点，根据上述规则 1 的间隔特性，意味着 $\omega_1<\omega_2<\omega_3$ 等等.

(3) 福斯特电抗定理不适合于外极点和外零点. 然而，在画电抗曲线时，可以首先考虑它们.

(a) 福斯特网络

可能有的四种类型的电抗曲线取决于沿着频率轴的极点和零点的位置(见图 6 和图 7).

A 型

$$Z=j\omega H\left[\frac{(\omega^2-\omega_2^2)(\omega^2-\omega_4^2)\cdots(\omega^2-\omega_{2z}^2)}{(\omega^2-\omega_1^2)(\omega^2-\omega_3^2)\cdots(\omega^2-\omega_{2z+1}^2)}\right]$$

其中，z 是一个实数.