

邮 电 中 等 函 授 教 材

# 网络 与传输线

汤 钦 圣 编

陈 景 明 审 校

人 民 邮 电 出 版 社



## 内 容 提 要

本书介绍单端对网络、二端对网络的基本理论,并在此基础上进一步分析衰减器、滤波器和均衡器等实用网络的特性,讨论元件值的计算。对传输线的基本电特性以及串音和交叉也作了扼要介绍。

本书是邮电中等函授教材,也可供技工学校师生及各类有线通信人员学习参考。

邮电中等函授教材

### 网 络 与 传 输 线

汤钦圣 编

陈景明 审校

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

开本: 787×1092 1/32 1989 年 12 月 第 一 版

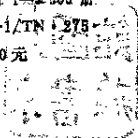
印张: 10 20/32 页数: 170 1989 年 12 月 河北 第 1 次 印刷

字数: 242 千字 印数: 1—2 500 册

ISBN7-115-04076-1/TN·275

定价: 1.90 元

030011



## 前 言

《网络与传输线》试用教材经过几年的使用，得到许多函授师生的支持和鼓励。现根据教学大纲的要求并结合学员反映意见，重新进行编写，使之更适合函授学员自学之用。在此次编写过程中，注意到避免繁琐的数学推导、理论联系实际，增补例题和各种类型习题；并根据与各专业课程间的关系，增删了部分内容。

第一章调整单端对网络内容并增加电抗网络的福斯特型和考尔型基本结构内容。

第二章二端对网络的特性阻抗、等效变换及电平测量等内容作了补充和修改，删去变量器内容。

第三章衰减器有关步位计内容作了修改和补充。

第四章滤波器修改部分内容并增加RC有源滤波器内容。

第五章均衡器作较大修改，删去可变衰减均衡器内容。

第六章传输线的特性参数和传输方程式作重大修改，增加传输线工作衰减、理想传输线及脉冲信号的传输等内容。

为了便于学员检查自学效果，判断解题是否正确，书末附有部分习题答案以供参考。

希望函授师生和读者提出宝贵意见。

汤钦圣，1988.12

# 目 录

结 论	( 1 )
第一章 单端对网络	( 3 )
第一节 单端对网络的概念	( 3 )
第二节 电抗单端对网络	( 4 )
第三节 单端对网络的等效	( 16 )
第四节 单端对网络的倒置	( 26 )
小结	( 33 )
问题与习题	( 34 )
第二章 二端对网络	( 37 )
第一节 二端对网络的概念	( 37 )
第二节 二端对网络的传输方程式	( 40 )
第三节 二端对网络的输入阻抗和特性阻抗	( 48 )
第四节 传输电平	( 55 )
第五节 二端对网络的固有传输常数	( 63 )
第六节 中分定理的应用	( 70 )
第七节 二端对网络的匹配链接	( 80 )
第八节 工作衰减和介入衰减	( 84 )
第九节 二端对网络的等效变换	( 90 )
第十节 电平的测量	( 104 )
小结	( 113 )
问题与习题	( 115 )
第三章 衰减器	( 119 )
第一节 固定衰减器	( 119 )

第二节	可变衰减器	( 132 )
第三节	衰减器的用途	( 140 )
小结		( 142 )
问题与习题		( 143 )
<b>第四章</b>	<b>滤波器</b>	( 145 )
第一节	滤波器的概念	( 145 )
第二节	梯型滤波器的传递条件	( 147 )
第三节	K型滤波器	( 155 )
第四节	M型滤波器	( 188 )
第五节	组合滤波器	( 218 )
第六节	滤波器电路实例分析	( 224 )
第七节	少电感不对称带通滤波器	( 232 )
第八节	元件损耗对滤波器衰减特性的影响	( 248 )
第九节	晶体滤波器的概念	( 249 )
第十节	滤波器的并联运用	( 251 )
第十一节	滤波器的故障检修	( 258 )
第十二节	RC有源滤波器	( 261 )
小结		( 270 )
问题与习题		( 272 )
<b>第五章</b>	<b>均衡器</b>	( 274 )
第一节	无畸变传输条件及均衡的概念	( 274 )
第二节	幅度均衡器	( 278 )
第三节	相位均衡器	( 286 )
小结		( 290 )
问题与习题		( 290 )
<b>第六章</b>	<b>传输线</b>	( 292 )
第一节	通信线路的概念	( 292 )

第二节	均匀传输线的一次参数	( 296 )
第三节	均匀传输线的二次参数	( 304 )
第四节	传输线的传输方程式	( 312 )
第五节	均匀传输线的工作参数	( 315 )
第六节	理想传输线	( 316 )
第七节	正弦波沿传输线的传播	( 317 )
第八节	均匀传输线上的脉冲信号传输	( 320 )
第九节	不均匀线的概念	( 321 )
第十节	传输线的串音与交叉	( 323 )
小结		( 328 )
问题与习题		( 329 )
部分习题答案		( 330 )

## 绪 论

电信就是利用电来传递信息，也就是把要传递的语音、文字及图象等信息变为电信号，然后通过媒介来传输。电信号随时间的变化规律，一般比较复杂。经数学分析，它包含许多频率成分的正弦波信号。就语音频率来说约自20Hz至20000Hz，在通信中如果传送整个频段则通路利用率低，不经济。另外，传送这样宽的频带对机械的要求也要高。在实际通话中一般只传送这个频段的一部分。当传送的频段愈宽，传输质量就愈高，语音就愈逼真，作为通话只要保证一定的可懂度和清晰度就够了。语音信号的能量集中在低频部分，在3kHz以上信号的能量小，因此去掉3kHz以上的频率成分，对原来的信号影响不大。低频信号虽然在500Hz以下能量还是很大，但人耳对300Hz以下很不灵敏，因此取300~3400Hz的频率作为传输语音信号的频带，已经足够满意了。如果要求稍低一些还可以取0.3~2.7kHz作为语音频带。对于音乐信号，频率还要宽一些，约占50~10000Hz的频带。

一般供钢线通话用 300~2000Hz

供短程载波用 300~2700Hz

供远程载波用 300~3400Hz

长途通信的任务就是要在—对线路上实现多路和长距离通信。如前所述，语音信号的频带约为0~4kHz，而传输线可以传输的最高传输频率则远远超过这个数值。如果将各路语音直接送到传输线上，则由于它们的频带都相同，就会混在一起而无法分开，实现不了多路通信，解决这个矛盾的方法是利用载波通信。

图0—1为三路载波电话单方向通信示意图，图中调制器的

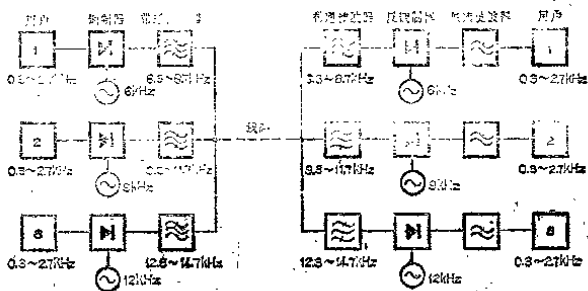


图 0-1

作用是将话音频率搬移到高频，称为高频调制信号。由于调制器是非线性器件，它除了产生有用频带之外，还会产生其他频率成分，如果传输出去会干扰其他话路的通话。所以在调制器后面接入一个具有选频作用的滤波器，让指定的信号频带通过，而除去不需要的频率成分。高频调制信号经线路传输到对方后，经过滤波器选出该通话路频带，再经反调制器将高频调制信号还原为原来的音频信号，传输到用户，完成通信任务。

为了延长通话距离和提高通信质量，载波机的部件要复杂得多，除了前述各部件外，还有各种放大器、衰减器、均衡器等等，上述各部件属于无源网络的将在本课程内讲述。

本课程的任务是：介绍电信网络和通信线路的传输原理、基本特性以及参数和元件值的计算。

本课程是在学完数学、电学后开设的，故学习本课程前必须复习这些课程的有关部分，特别是初等数学中的对数、复数及双曲线函数的一般知识，在网络特性分析及计算方面应用较多，要很好复习。



# 第一章 单端对网络

本章分析电抗单端对网络的电抗频率特性。单端对网络的等效与倒量。上述内容系电信网络的重要内容，熟悉这些内容为学好滤波器和衰减均衡器等内容打下基础。

## 第一节 单端对网络的概念

所谓网络是由一组元件联接起来的电气系统。单端对网络是一个具有一对外接端子的任何电气系统。最简单的单端对网络是由一个电阻、电感或电容构成的，如图1-1(a)所示；较复杂的单端对网络是由电阻、电感和电容串、并联构成，如图1-1(b)所示。一般形式的单端对网络如图1-1(c)所示。

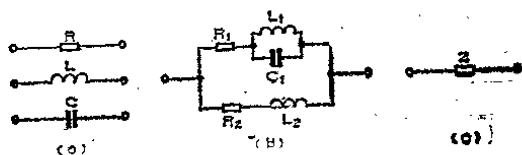


图 1-1

单端对网络可分下列三种：

- (1) 由电抗元件组成的电抗单端对网络；
- (2) 由电阻及电抗元件组成的有耗单端对网络；
- (3) 由电阻元件组成的电阻单端对网络。

## 第二节 电抗单端对网络

本节讨论电抗单端对网络的电抗频率特性，简称电抗曲线。在本节中电感电容元件是作为理想元件来分析的。我们从最简单的单元件电抗单端对网络的电抗曲线开始讨论，并以此为基础，进一步讨论二元件及多元件电抗单端对网络的电抗曲线。

### 一、单元件电抗网络

#### 1. 单元件电感网络

单元件电感网络如图1-2(a)所示，其阻抗 $Z_L$ 为：

$$Z_L = j\omega L = jX_L^*$$

式中  $X_L = \omega L$  (1)

由(1)式可知：

当 $\omega = 0$ 时， $X_L = 0$ ，

当 $\omega$ 增大时，感抗随频率\*\*的升高而线性增加，如图1-2

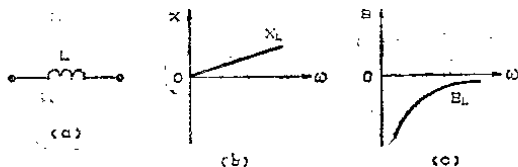


图 1-2

• 在本书中电抗 $X$ 电纳 $B$ 本身带正负号。

• • 频率 $f$ 在数学表达式及分析过程中均以角频率 $\omega = 2\pi f$ 形式出现。在本章及以后各章中，即称 $\omega$ 为频率，与实际的频率 $f$ 在用词上不再严加区分。

(b)所示,称为电抗曲线。

单元件电感网络的导纳 $Y_L$ 为:

$$Y_L = \frac{1}{Z_L} = -\frac{1}{j\omega L} = -j \frac{1}{\omega L} = jB_L$$

式中  $B_L = -\frac{1}{\omega L}$  (2)

由(2)式可知:

当 $\omega=0$ 时,  $B_L \rightarrow -\infty$ ,

当 $\omega \rightarrow \infty$ 时,  $B_L = 0$

单元件电感网络的电纳与频率的关系如图1-2(c)所示,称为电纳曲线。

(1)、(2)式说明,电抗元件的电抗和电纳的关系为 $B_L = -\frac{1}{X_L}$ ,电抗为正时电纳为负,在数值上互为倒数。例如,感抗 $X_L$ 从零变化至无限大时,感纳 $B_L$ 从负无限大变化到零,它们是负倒数关系。根据这种关系,我们很容易从电纳曲线得到电抗曲线,在利用图解法作出电抗网络的电抗曲线时,就要用到这种关系。

## 2. 单元件电容网络

单元件电容网络如图1-3(a)所示,其阻抗 $Z_C$ 为:

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} = -j \frac{1}{\omega C} = jX_C$$

式中  $X_C = -\frac{1}{\omega C}$  (3)

比较(2)、(3)式,可见 $X_C$ 与 $\omega$ 的关系和 $B_L$ 与 $\omega$ 的关系相

似，如图1-3(b)所示，称为单元件电容网络的电抗曲线。

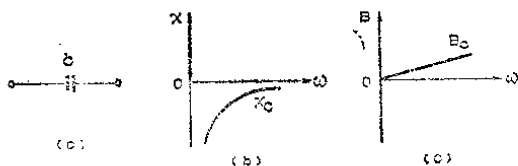


图 1-3

单元件电容网络的导纳 $Y_c$ 为：

$$Y_c = \frac{1}{Z_c} = j\omega C = jB_c$$

式中  $B_c = \omega C$  (4)

同样，比较(1)、(4)式可见 $B_c$ 与 $\omega$ 的关系和 $X_L$ 与 $\omega$ 的关系相似，如图1-3(c)所示。称为单元件电容网络的电纳曲线。比较(3)、(4)式可知电抗 $X_c$ 和电纳 $B_c$ 之间存在负倒数关系，即

$$X_c = -\frac{1}{B_c}$$

由于  $Y = \frac{1}{Z}$

即  $jB = \frac{1}{jX} = -j \cdot \frac{1}{X}$

所以  $B = -\frac{1}{X}$

或  $X = -\frac{1}{B}$

因此电抗单端对网络的电抗 $X$ 和电纳 $B$ 之间存在着负倒数关系。

从图1-2或图1-3可见，不论是电抗曲线还是电纳曲线其斜率均为正：

$$\frac{dX_L}{d\omega} = L > 0$$

$$\frac{dX_C}{d\omega} = \frac{d}{d\omega} \left( -\frac{1}{\omega C} \right) = \frac{1}{\omega^2 C} > 0$$

## 二、二元件电抗网络

二元件电抗单端对网络有 $LC$ 串联网络和 $LC$ 并联网络两种，分别讨论如下：

### 1. $LC$ 串联网络

$LC$ 串联网络如图1-4(a)所示，其阻抗为：

$$Z_1 = j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} = j\omega L_1 \left( 1 + \frac{1}{j\omega L_1 \cdot j\omega C_1} \right)$$

$$= j\omega L_1 \left( 1 - \frac{1}{\omega^2 L_1 C_1} \right)$$

$$= jL_1 \frac{\omega^2 - \omega_1^2}{\omega} = -jL_1 \frac{\omega_1^2 - \omega^2}{\omega} = jX_1$$

式中  $X_1 = -L_1 \frac{\omega_1^2 - \omega^2}{\omega}$  (5)

$$\omega_1^2 = \frac{1}{L_1 C_1}$$

$\omega_1$ 为 $LC$ 串联网络的谐振频率。

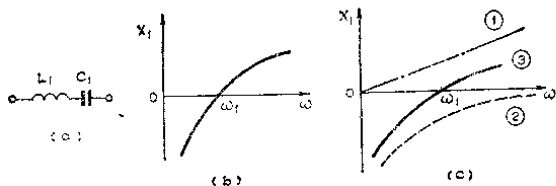


图 1-4

从⑤式可知：

当 $\omega=0$ 时， $X_1 \rightarrow -\infty$ ，电抗 $X_1$ 趋于无穷大；

当 $\omega < \omega_1$ 时，电抗 $X_1$ 为电容性；

当 $\omega = \omega_1$ 时， $X_1 = 0$ ，此时LC串联网络发生串联谐振，电抗为零；

当 $\omega > \omega_1$ 时，电抗 $X_1$ 为电感性。

因此，电抗 $X_1$ 与 $\omega$ 的关系如图1-4(b)所示。

LC串联网络的电抗曲线也可用图解法得到。图1-4(a)LC串联网络可看作由两个单元件电抗网络串联而成，而每一个单元件电感或电容网络的电抗曲线在前面已讨论过，我们将这两电抗曲线逐点相加便可得出二元件LC串联网络的电抗曲线，如图1-4(c)所示。图中曲线①系单元件电感的电抗曲线，曲线②系单元件电容的电抗曲线，逐点相加后得出曲线③，即为所求的电抗曲线。其结果与图1-4(b)相同。

逐点相加的方法是：

首先找出曲线①和曲线②绝对值相等处，如图1-4(c)的 $\omega_1$ 点，相加结果电抗为零；在 $0 \sim \omega_1$ 频段内曲线②的绝对值大于曲线①的绝对值，相加结果为负电抗；在 $\omega > \omega_1$ 时，正好相反，相加的结果得到正电抗，逐点相加，最后结果如图1-4(c)中曲线③所示。

## 2. LC并联网路

LC并联网路如图1-5(a)所示。

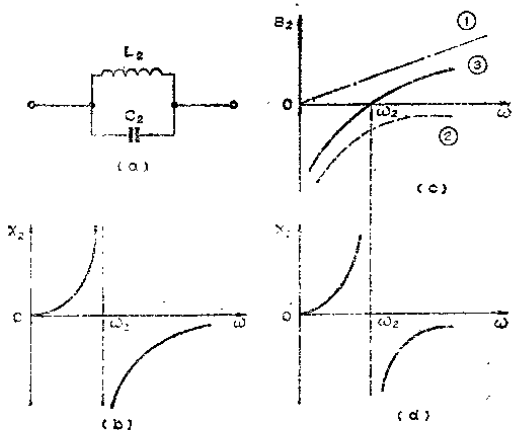


图 1-5

设LC并联网路的阻抗为 $Z_2$ ，导纳为 $Y_2$ ，电纳为 $B_2$ 。

电感 $L_2$ 的阻抗为 $Z_L$ ，导纳为 $Y_L$ ，电纳为 $B_L$ 。

电容 $C_2$ 的阻抗为 $Z_C$ ，导纳为 $Y_C$ ，电纳为 $B_C$ 。

$$\text{并联谐振频率 } \omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}$$

根据阻抗并联公式，LC并联网路的阻抗为：

$$\frac{1}{Z_2} = \frac{1}{Z_C} + \frac{1}{Z_L}$$

即

$$\begin{aligned}
 Y_2 &= Y_C + Y_L = j\omega C_2 + \frac{1}{j\omega L_2} \\
 &= j\omega C_2 \left( 1 + \frac{1}{j\omega C_2 j\omega L_2} \right) = j\omega C_2 \left( 1 - \frac{1}{\omega^2 L_2 C_2} \right) \\
 &= j\omega C_2 \left( 1 - \frac{\omega_2^2}{\omega^2} \right) = jC_2 \frac{\omega^2 - \omega_2^2}{\omega} = jB_2
 \end{aligned}$$

因此

$$Z_2 = \frac{1}{Y_2} = \frac{\omega}{jC_2(\omega^2 - \omega_2^2)} = -j \frac{\omega}{C_2(\omega^2 - \omega_2^2)} = jX_2 \quad (6)$$

或 
$$X_2 = -\frac{1}{B_2} = \frac{\omega}{C_2(\omega_2^2 - \omega^2)} \quad (7)$$

由(7)式可知:

当 $\omega=0$ 时,  $X_2=0$ ,

当 $\omega < \omega_2$ 时, 电抗 $X_2$ 为电感性(正电抗);  $X_2$ 随 $\omega$ 增大,

当 $\omega = \omega_2$ 时,  $X_2$ 趋于无限大, 此时 $LC$ 并联网络发生并联谐振; 并联谐振时电抗为无限大。

当 $\omega > \omega_2$ 时, 从(7)式可知 $X_2$ 为电容性(负电抗), 随 $\omega$ 增大, 其绝对值减少, 因此, 根据上述情形可绘出电抗曲线如图1-5(b)所示。

$LC$ 并联网络的电抗曲线也可用图解方法得到, 如上述,

$$Y_2 = \frac{1}{Z_2} = \frac{1}{Z_C} + \frac{1}{Z_L}$$

即 
$$B_2 = B_C + B_L$$

单元件电感、电容网络的电纳曲线如图1-2(c)及图1-3(c)所示, 我们可将其逐点相加得出总的电纳曲线, 见图1-5(c),



图中曲线①系电容 $C_2$ 的电纳曲线，曲线②系电感 $L_2$ 的电纳曲线，逐点相加得曲线③，即为LC并联网络的总电纳曲线。然后根据电纳与电抗互为负倒数关系即可得出所求电抗曲线如图1-5(d)所示。

怎样从电纳曲线得到电抗曲线呢？从图1-5(c)可见， $0 \sim \omega_2$ 频段间电纳为负其大小从 $-\infty$ 变化到零，因此，在此频段间相应的电抗应为正，其大小从零变化到 $\infty$ 。同理， $\omega > \omega_2$ 时电纳为正，电抗应为负，大小变化也是相反的，其结果与图1-5(b)所示电抗曲线完全相同。

如前述有几个问题值得注意：

(1) 二元件电抗网络的电抗曲线与单元件电抗网络的电抗曲线明显不同之处在于谐振频率之有无，单元件电抗网络无谐振频率，二元件电抗网络有一个谐振频率，就是说谐振频率数目与元件数有关，谐振频率数目比元件数少一个。

(2) 无论是哪一种电抗网络的电抗曲线的斜率均为正。

(3) 电抗曲线在谐振频率前后电抗性质改变，例如，在串联谐振前后电抗由电容性经过零变化为电感性(参见图1-4(c))。

### 三、多元件电抗网络

以三元件电抗网络为例，说明用图解方法得出多元件电抗网络的电抗曲线的方法。图1-6(a)所示三元件电抗网络可看作由两个电抗网络串联连接，一个是单元件 $L_2$ 电抗网络，另一个是 $L_1C_1$ 并联网络，其电抗曲线前面已讨论，将这两电抗曲线逐点相加，即得出总的电抗曲线如图1-6(b)所示。图中曲线①(点划线)系 $L_2$ 的电抗曲线；曲线②(虚线)系 $L_1C_1$ 并联网络的电抗曲线，两曲线逐点相加，在 $0 \sim \omega_1$ 频段内曲线①、②均为正电抗，相加后曲线③也是正电抗；在 $\omega = \omega_2$ 时，曲线①、