

陈景明 张筱华 编

邮电高等
函授教材

电信网络

人民邮电出版社

邮电高等函授教材

电 信 网 络

陈景明 张筱华 编

人民邮电出版社

内 容 提 要

本书介绍电信网络的基本理论。全书共分九章，第一、二、三、七章介绍单口网络、双口网络、特性参数滤波器和均衡器的理论和分析方法。第四、五、六章介绍网络综合和网络近似的理论。第八章介绍有源滤波器的设计方法。第九章介绍网络设计的优化方法。

本书的每一章都有学习要求、小结和习题，并附有习题答案。在编写上力求深入浅出，通俗易懂，便于自学。

本书可作为高等学校电信专业教学用书，也适合电信工程技术人员学习参考。

邮电高等函授教材

电 信 网 络

陈景明 张筱华 编

*

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

北京印刷一厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

*

开本：850×1168 1/32 1987年11月 第一版

印张：22 页数：352 1987年11月北京第1次印刷

字数：585千字 插页：1 印数：1-10 100册

ISBN 7115-03497-4/Z

定价：3.65 元

前 言

本书是根据邮电高等函授电信各专业的教学要求而编写的一门专业基础课教材，它介绍了电信网络的基本理论和分析方法。

在通信技术和其他工程技术中需要对电信号进行加工和处理，这一任务是由电网络来完成的。为了提高通信质量，满足各种不同的通信要求，需要对电网络理论进行研究。网络理论包括网络分析和网络综合两个方面。网络分析是在已知激励和网络结构的情况下确定网络的响应。网络综合是在已知激励和所要求的响应的情况下确定实现该响应的网络结构。本书的内容就是从这两方面进行安排的。第一章和第二章分别介绍单口网络和双口网络的基本概念和分析方法，是网络分析的基本理论。第三章运用双口网络的特性参数理论讨论滤波器的工作原理和特性分析，得出了特性参数滤波器的理论。第四章介绍有关网络综合的基础知识如复频率、网络函数、霍氏多项式和正实函数等，为网络综合作了必要的准备。第五章介绍网络综合实现的理论和方法。由于 LC 梯型网络的综合在理论上和应用上带有普遍性，所以本章讨论的是单口和双口 LC 梯型网络的综合方法。第六章介绍各种近似函数。近似理论是网络综合的一个重要内容。在进行网络综合实现以前，先要进行网络近似，即根据所要求的响应通过网络近似得到在物理上可实现的网络函数，然后再对网络函数进行综合实现网络结构。本章介绍了几种常用的衰减和时延的近似函数。第七章介绍了衰减均衡器和时延均衡器的工作原理和特性分析。网络均衡对于提高通信质量具有重要意义。随着通信技术的迅速发展，通信设备的小型化和集成化已成为人们关注的一个重要方面。有源滤波器由于省掉了电感元件，因而在这个方向上大大前进了一步，第八章对此做了比较详尽的介绍。第九章介绍网络设计的优化方法是一种新型的电网络设计方法，实际上是

计算机技术和数学中的“优化理论”在电网络设计方面的应用。

本书在写法上力求概念明确、深入浅出、通俗易懂，在内容上注意更新以适应通信技术发展的需要。各章均有内容简介、学习要求、小结、习题和答案等，以便于学生理解和掌握各章的内容。本书的第一章至第七章由陈景明编写、第八章和第九章由张筱华编写。本书经北京邮电学院王德隼教授、西安邮电学院潘顺启高级工程师审阅，在此谨向他们表示深切的谢意。鉴于编者水平有限，本书中有不妥之处敬请读者批评指正。

编者

一九八六年四月于北京邮电学院函授分院

目 录

第一章 单口网络	1
第一节 单口网络的概念和分类.....	1
第二节 电抗单口网络.....	3
第三节 单口网络的等效.....	22
第四节 单口网络的倒量.....	30
第五节 归一化.....	36
本章小结.....	43
习题.....	44
第二章 双口网络	50
第一节 双口网络的概念和分类.....	50
第二节 双口网络的传输方程式和参数.....	55
第三节 双口网络的联接.....	76
第四节 电平.....	91
第五节 双口网络的特性参数.....	100
第六节 双口网络的工作参数.....	118
第七节 双口网络的等效变换.....	132
本章小结.....	152
习题.....	154
第三章 特性参数滤波器	160
第一节 滤波器的概念和分类.....	161
第二节 滤波器的传通条件.....	163
第三节 K 式滤波器.....	171

第四节	m 式滤波器	187
第五节	复合滤波器	208
第六节	频率变换	215
第七节	滤波器的并联运用	232
本章小结		245
习题		248
第四章	网络综合基础	252
第一节	复频率与运算阻抗	253
第二节	网络函数	259
第三节	网络函数的实频率特性	270
第四节	网络函数的实部与虚部的关系	283
第五节	霍尔维茨多项式	293
第六节	正实函数	299
本章小结		313
习题		315
第五章	单口网络和双口网络的综合	318
第一节	LC 电抗单口网络的可实现条件和综合	318
第二节	无源双口网络的可实现条件	340
第三节	双口网络的转移函数	349
第四节	单端电阻负载 LC 梯型网络的综合	358
第五节	双口网络的工作传输函数、特征函数和反射函数的可实现条件	384
第六节	双端电阻负载 LC 梯型网络的综合	397
第七节	定阻网络的综合	413
本章小结		426
习题		428

第六章 滤波器的近似理论	431
第一节 近似方式.....	432
第二节 勃脱华兹近似.....	436
第三节 契比雪夫近似.....	451
第四节 椭圆函数近似.....	473
第五节 通用参数近似.....	475
第六节 贝塞尔近似.....	488
第七节 预畸概念.....	496
本章小结.....	501
习题.....	502
第七章 均衡器	504
第一节 衰减均衡器.....	504
第二节 群时延.....	512
第三节 时延均衡器.....	520
本章小结.....	539
习题.....	540
第八章 有源滤波器	543
第一节 运算放大器.....	544
第二节 双二次函数.....	554
第三节 有源滤波器的基本节电路(一).....	570
第四节 有源滤波器的基本节电路(二).....	589
第五节 灵敏度.....	608
本章小结.....	621
习题.....	622

第九章 网络设计的优化方法	626
第一节 概述.....	627
第二节 极值理论.....	640
第三节 最陡下降法.....	646
第四节 牛顿法.....	662
第五节 泰勒最小 p 阶方法.....	667
本章小结.....	671
习题.....	672
附录 1 特性参数滤波器的基本节图表.....	673
附录 2 中分定理的证明.....	677
附录 3 公式(3-7-3)的推导	681
附录 4 习题答案.....	683
附录 5 参考书目.....	693

第一章 单口网络

单口网络是构成复杂网络的基础。要分析复杂网络的特性，首先要对单口网络有所了解。由于电抗单口网络用得很广，所以本章讨论这种网络的特性。内容包括电抗单口网络的电抗角频率特性（简称电抗曲线）、典型结构和阻抗公式。此外还介绍了单口网络的等效和倒量的概念、归一化概念。这些内容都是基本的，在以后的学习中经常要用到。

通过本章的学习要求：

1. 搞清电抗单口网络的电抗角频率特性、典型结构和阻抗公式三者之间的关系，特别是电抗角频率特性和典型结构之间的对应关系要熟练掌握。
2. 了解单口网络等效的意义，学会等效网络的求法以及如何利用等效概念简化电抗单口网络。
3. 了解单口网络倒量的意义，学会倒量网络的求法。
4. 搞清归一化的意义，掌握归一化和反归一化的运算。

第一节

单口网络的概念和分类

一、概念

经过适当组合而成的一组元件，具有一定的电特性，这一元件

组称为网络。

凡是具有一对外接端口的网络称为单口网络(或称单端对网络、二端网络)。单口网络可以是简单的网络,例如单个电感、单个电容或单个电阻,如图 1-1-1(a)、(b)、(c)所示,也可以是复杂的网络,如图 1-1-2 所示。不管网络内部如何复杂,只要是只有一对外接端口的网络都称为单口网络。单口网络的一般表示形式如图 1-1-3 所示。

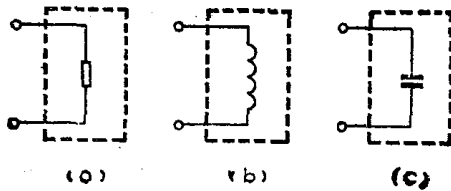


图 1-1-1

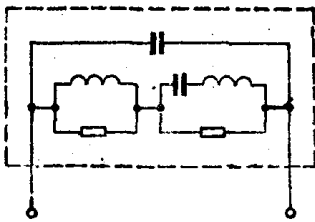


图 1-1-2

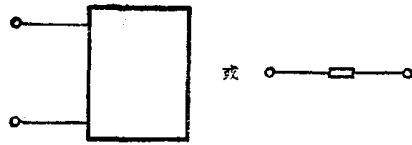


图 1-1-3

二、分类

单口网络可按不同的特征进行分类。

按网络元件的阻抗特性可分为:

1. 由电抗元件(电感或电容)组成的电抗单口网络。
2. 由电阻元件组成的电阻单口网络。
3. 由具有电阻的电抗元件组成的有耗单口网络。

按其内部有无电源可分为有源单口网络和无源单口网络。

按元件阻抗的直线性可分为线性单口网络和非线性单口网络。

第 二 节

电抗单口网络

由于电感和电容都是有损耗的，因此严格的说，由纯电感和纯电容所组成的单口网络是不存在的。但是当损耗很小时，可以认为是电抗单口网络。对于电抗单口网络主要是研究电抗随角频率变化的规律。

一、一元件电抗单口网络

1. 电抗曲线

一元件电抗单口网络由单个电感或单个电容组成，如图 1-2-1 (a)、(b)所示。它们的阻抗公式分别是：

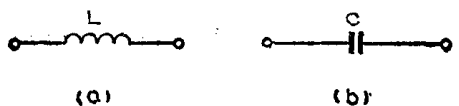


图 1-2-1

$$\begin{aligned} Z_L &= jX_L = j\omega L \\ X_L &= \omega L \end{aligned} \quad (1-2-1)$$

$$\begin{aligned} Z_C &= jX_C = j\frac{-1}{\omega C} \\ X_C &= -\frac{1}{\omega C} \end{aligned} \quad (1-2-2)$$

需说明的是：在本书中阻抗采用 $Z = R + jX$ 的形式，其中电抗 X 本身可以是正值也可以是负值。导纳采用 $Y = G + jB$ 的形式，其中电纳 B 本身可以是正值也可以是负值。网络阻抗(或导纳)等于零的角频率点(或频率点)称为零点，用符号“0”表示；阻抗(或导纳)等于无限大的角频率点(或频率点)称为极点。除了角频率(或频

率) 为零和无限大的零点或极点外, 其他有限角频率(或频率)的零点和极点称为内在零点和内在极点。

由式(1-2-1)可知, 感抗 X_L 与角频率 ω 成线性关系, 直线的斜率与电感 L 值的大小有关。由该式可知, 当 $\omega=0$ 时, $X_L=0$; 当 $\omega=\infty$ 时, $X_L=\infty$ 。感抗随角频率变化的规律和零点、极点的位置如图 1-2-2 所示。

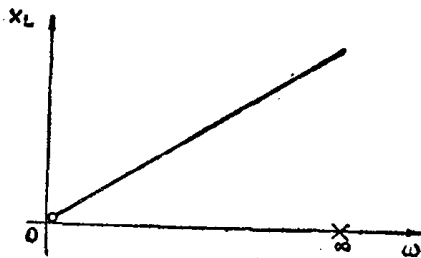


图 1-2-2

由式(1-2-2)可知, 容抗 X_C 与角频率 ω 成反比关系, 而且是负值。当 $\omega=0$ 时, $X_C=-\infty$; 当 $\omega=\infty$ 时, $X_C=0$ 。容抗随角频率变化的规律和零点、极点的位置如图 1-2-3 所示。

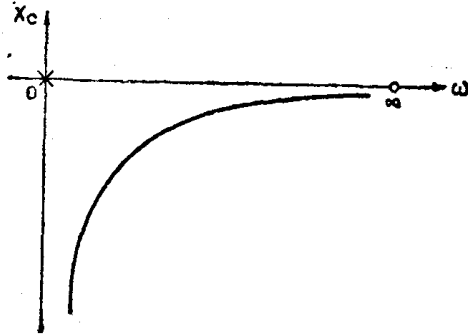


图 1-2-3

我们把数值为正的电阻称为感性电阻, 数值为负的电阻称为容性电阻。

2. 电纳曲线

为了便于讨论 LC 网络的并联情况, 需要讨论单个电感和单个电容的电纳曲线。它们的导纳公式分别是:

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

$$B_L = \frac{-1}{\omega L} = \frac{-1}{X_L} \quad (1-2-3)$$

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

$$B_C = \omega C = \frac{-1}{X_C} \quad (1-2-4)$$

由以上两式可知, 感纳与感抗成负倒数关系, 容纳与容抗成负倒数关系。简言之, 电纳与电抗之间互为负倒数关系, 即 $X = -\frac{1}{B}$ 或 $B = -\frac{1}{X}$ 。利用这种负倒数关系, 可以从感抗曲线求得感纳曲线或从容抗曲线求得容纳曲线。因此单个电感的电纳曲线和零点、极点的位置以及单个电容的容纳曲线和零点、极点的位置, 如图 1-2-4 (a)、(b) 所示。

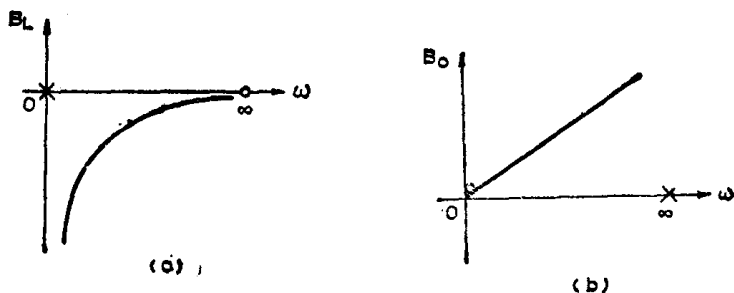


图 1-2-4

一元件电抗单口网络的电抗曲线或电纳曲线有一个共同的规律, 就是它们的斜率都是正值。这也可以从数学上加以证明:

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

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

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

$$\frac{dB_C}{d\omega} = \frac{d}{d\omega}(\omega C) = C > 0$$

二、二元件电抗单口网络

二元件电抗单口网络有两种形式，一种是电感和电容的串联，另一种是电感和电容的并联，如图 1-2-5 (a)、(b) 所示。现分别讨论它们的电抗曲线。

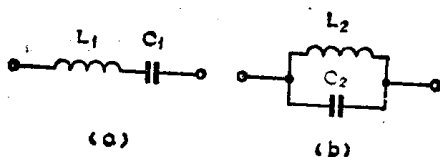


图 1-2-5

1. 电感和电容串联的单口网络

阻抗公式是：

$$Z = jX = j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} = jL_1 \left(\omega - \frac{1}{\omega L_1 C_1} \right) = jL_1 \left(\frac{\omega^2 - \omega_1^2}{\omega} \right)$$

$$X = L_1 \cdot \frac{\omega^2 - \omega_1^2}{\omega} \quad (1-2-5)$$

式中 $\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$ 是串联谐振角频率。

由式(1-2-5)可知，当 $\omega = \omega_1$ 时， $X = 0$ ；当 $\omega < \omega_1$ 时， X 为负值；当 $\omega > \omega_1$ 时， X 为正；当 $\omega = \infty$ 时， X 为正无限大；当 $\omega = 0$ 时， X 为负无限大。所以电抗曲线和零点、极点的位置如图 1-2-6

所示。

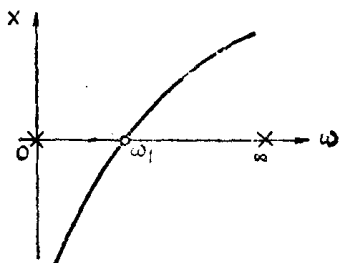


图 1-2-6

导纳公式是：

$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{1}{j\omega L_1} \cdot \frac{\omega^2}{\omega^2 - \omega_1^2} = j \frac{1}{\omega L_1} \cdot \frac{\omega^2}{\omega_1^2 - \omega^2} = jB$$

$$B = \frac{1}{\omega L_1} \cdot \frac{\omega^2}{\omega_1^2 - \omega^2} \quad (1-2-6)$$

由上式可知，当 $\omega=0$ 时， $B=0$ ；当 $\omega < \omega_1$ 时， B 为正值；当 $\omega \rightarrow \omega_{1-0}$ 时， $B \rightarrow +\infty$ ；当 $\omega \rightarrow \omega_{1+0}$ 时， $B \rightarrow -\infty$ ；当 $\omega > \omega_1$ 时， B 为负值；当 $\omega \rightarrow \infty$ 时， $B=0$ 。所以导纳曲线和零点、极点的位置如图 1-2-7 所示。利用电抗与电纳之间的负倒数关系，便可直接从电抗曲线求得电纳曲线。

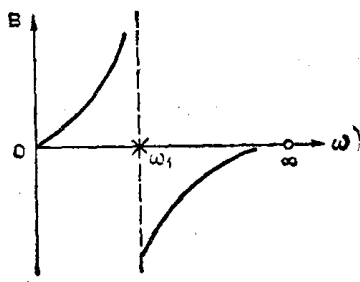


图 1-2-7

利用图 1-2-2 和图 1-2-3 的电抗曲线也可求得电感和电容串联网络的电抗曲线。由阻抗公式可知：

$$Z = jX = j\left[\omega L_1 + \left(-\frac{1}{\omega C_1}\right)\right] = j(X_L + X_C)$$

$$X = X_L + X_C \quad (1-2-7)$$

因此电感和电容串联网络的电抗曲线可以由单个电感的电抗曲线和单个电容的电抗曲线逐点相加得到，如图 1-2-8 所示。在 $0 < \omega < \omega_1$ 范围内， $|X_C| > |X_L|$ ，所以 X 为负。随着角频率的增长， $|X_C|$ 逐渐接近 $|X_L|$ 。当 $\omega = \omega_1$ 时， $|X_C| = |X_L|$ 而且符号相反，所以 $X = 0$ 。当 $\omega > \omega_1$ 后， $|X_L| > |X_C|$ ，所以 X 为正，而且随角频率的增长而增长。最后，当 $\omega = \infty$ 时， $X = +\infty$ 。可见从阻抗公式或从电抗曲线的相加两个方面都可以得到相同的结果。

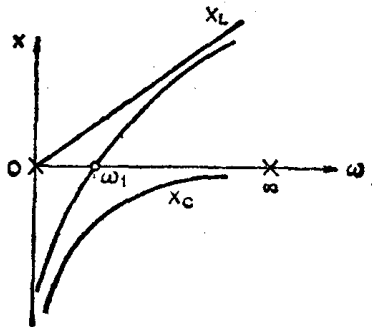


图 1-2-8

2. 电感和电容并联的单口网络

对于图 1-2-5(b)所示的并联网络，用导纳来分析比较方便。

导纳公式是：

$$\begin{aligned} Y = jB &= j\omega C_2 + \frac{1}{j\omega L_2} = j\omega C_2 \left(1 - \frac{1}{\omega^2 L_2 C_2}\right) \\ &= jC_2 \cdot \frac{\omega^2 - \omega_2^2}{\omega} \end{aligned}$$

$$B = C_2 \cdot \frac{\omega^2 - \omega_2^2}{\omega} \quad (1-2-8)$$