

压 电 器 件

吴毅强 邓忠华 编著

电子工业出版社

内 容 简 介

本教材深入浅出地阐述了压电器件所涉及的基础理论知识,将压电振子、叉指换能器作为压电器件的二类基本结构单元予以讨论,集中简明地介绍了压电器件的主体材料及生产工艺。进而较为详细地讨论了几类压电器件的工作原理、主要特性及初步设计制作知识。

全书计划教学时数为80学时,其内容及课时分配为:绪言(1);压电器件网络、物理基础(25);常用压电材料(6);压电振子(6);叉指换能器(6);压电器件工艺基础(6);石英晶体器件(8);陶瓷滤波器(10);声表面波器件(8);其它压电器件(4)。

该书为中专“电子元件与材料”专业课程统编教材。亦可供大专院校、中等职业技术学校有关专业师生及工程技术人员参考。

压 电 器 件

吴毅强 邓忠华 编著

责任编辑:陈晓明

*

电子工业出版社出版

北京市海淀区万寿路173信箱(100036)

电子工业出版社发行 各地新华书店经销

北京科技印刷厂印刷

*

开本:787×1092毫米 1/16 印张:18 字数:436千字

1995年10月第一版 1995年10月北京第一次印刷

印数:1000册 定价:14.00元

ISBN 7-5053-2824-7/G·231

前 言

本书是中等专业学校“电子元件与材料”专业必修课程的统编教材,是根据机电部中专电子技术类专业教学指导委员会 1991 年 8 月审定的《压电器件》教学大纲组织编写的。

全书共分为十章,主要内容包括:压电器件网络、物理基础知识;常用压电材料;压电振子;叉指换能器;压电器件工艺基础;石英晶体器件;陶瓷滤波器;声表面波器件;其它压电器件等。

本书在编写中,针对该课程的基础理论知识涉及面广、压电器件种类繁多的特点,精选内容,以定性说明来简化公式推导,使基础理论知识的阐述,既有一定的系统性,又做到深入浅出。教材中将压电振子、叉指换能器内容作为压电器件的二类基本结构单元分别进行讨论,希望以此成为压电器件的“基石”,使学生能进一步去分析、研究其它种类的压电器件。常用压电材料多以表格的形式,列出各种压电材料的性能参数,以求简明扼要。对压电器件的各种生产工艺则集中到一章内分别予以介绍。在以上各章节内容的基础上,进而重点讨论了石英晶体谐振类器件、压电陶瓷滤波器、声表面波器件等几类压电器件的工作原理、主要技术特性及初步设计制作知识。

本书由南昌无线电工业学校吴毅强、**邓忠华**编写。其中绪言、第一、二、三、五章由**邓忠华**编写。第四、六、七、八、九、十章由吴毅强编写。最后由吴毅强对全书进行统稿。全书由上海第一仪表电子工业学校高级讲师杜魁元主审。在编写过程中,得到了陈鸣、王作谓、赵震初等同志的热情支持并提出了宝贵意见,编者对此表示衷心感谢。

限于水平与经验,疏漏与错误之处在所难免,恳切希望读者批评指正。

编 者

1994. 8

目 录

绪言

第一章 压电器件网络基础	(1)
§ 1-1 二端网络	(1)
§ 1-2 四端网络的传输方程和网络参数	(8)
§ 1-3 四端网络的输入阻抗和特性阻抗	(12)
§ 1-4 四端网络的传输常数	(16)
§ 1-5 四端网络的衰耗	(20)
§ 1-6 四端网络的联接	(24)
§ 1-7 四端网络的等效变换	(29)
§ 1-8 滤波器概述	(33)
§ 1-9 传输线的网络理论	(37)
习题一	(42)
第二章 压电器件物理基础	(46)
§ 2-1 晶体的宏观对称性	(46)
§ 2-2 压电体的介电性	(53)
§ 2-3 压电体的弹性	(57)
§ 2-4 压电体的压电性	(64)
§ 2-5 压电方程及其简化与变换	(67)
§ 2-6 压电体的其它物理性质	(75)
习题二	(79)
第三章 常用压电材料	(80)
§ 3-1 压电材料主要性能参数	(80)
§ 3-2 压电晶体	(82)
§ 3-3 压电陶瓷	(87)
§ 3-4 其它压电材料	(93)
习题三	(96)
第四章 压电振子	(97)
§ 4-1 压电振子的振动模式	(97)
§ 4-2 压电振子的等效电路	(104)
§ 4-3 压电振子的基本特性与主要参数	(110)
习题四	(119)
第五章 叉指换能器	(121)
§ 5-1 均匀叉指换能器	(121)
§ 5-2 叉指换能器的加权	(133)
§ 5-3 叉指换能器的二阶效应	(138)
习题五	(140)
第六章 压电器件工艺基础	(142)

§ 6-1 晶体加工工艺	(142)
§ 6-2 压电陶瓷制造工艺	(149)
§ 6-3 平面薄膜制造工艺	(154)
习题六	(159)
第七章 石英晶体器件	(161)
§ 7-1 石英谐振器	(161)
§ 7-2 分立式单节晶体滤波器	(166)
§ 7-3 单片晶体滤波器	(175)
§ 7-4 晶体振荡器	(182)
§ 7-5 其它石英晶体器件	(193)
习题七	(196)
第八章 陶瓷滤波器	(198)
§ 8-1 梯型带通滤波器	(198)
§ 8-2 桥型带通滤波器	(208)
§ 8-3 带通滤波器的设计制作	(213)
§ 8-4 带阻滤波器	(220)
§ 8-5 其它陶瓷滤波器	(227)
习题八	(232)
第九章 声表面波器件	(234)
§ 9-1 概述	(234)
§ 9-2 声表面波延迟线	(236)
§ 9-3 声表面波滤波器	(241)
§ 9-4 声表面波器件的设计	(248)
§ 9-5 其它声表面波器件	(258)
习题九	(263)
第十章 其它压电器件	(264)
§ 10-1 压电换能器	(264)
§ 10-2 压电变压器	(268)
§ 10-3 其它压电器件	(271)
习题十	(274)
主要参考文献	(275)

11/11/2014

第一章 压电器件网络基础

在电的系统中,由若干元件组成的用来使电信号按一定要求传输的电路或这种电路中的部分,称为电网络,简称网络。

网络类别很多。按网络内部是否含有电源,网络可分为有源网络与无源网络;按电路的电压、电流关系分类,网络又分为线性网络和非线性网络;按网络元件特性,有纯电阻网络、纯电抗网络及有耗网络之分;按网络所含元件个数,网络也分为单元件网络、二元件网络、三元件网络乃至更多元件网络;按网络端子数目分类,网络有二端网络、四端网络、六端网络等类别;按网络表示的物理内容,网络还可分为电网络、机电网络、电声网络等等。

网络类别不同,其性质和特点自然各异。例如,线性网络在下述几个方面就与非线性网络有明显的区别:

- (1)由理想电阻、电容、电感、变压器四种线性元件组成。
- (2)其电压和电流之间关系为线性关系,其阻抗或导纳与所加信号的大小和极性无关。
- (3)稳态情况下,其电压、电流均按正弦(或余弦)规律变化。
- (4)在传递单频信号时,其电压和电流频率总是一致的(其相位可以不同)。
- (5)满足叠加原理,即若网络在电压 u 作用下存在电流 i ,在电压 u' 作用下存在电流 i' ,则在电压 $u+u'$ 作用下有电流 $i+i'$ 。

压电器件在电路中常常用作滤波器、延迟线、换能器等,多属功能性电子器件,在其分析、设计、制造及应用过程中,网络理论是不可缺少的基础。为此,本章将较为系统地介绍与压电器件相关的一些无源线性网络的基础知识。

§ 1-1 二端网络

二端网络,指的是具有两个端点的网络,又称单口网络,如图 1-1 所示。

二端网络的基本特性一般用电阻抗(或电导纳)及其频率特性表示为

$$Z=R+jX \quad (1-1-1)$$

或

$$Y=G+jB \quad (1-1-2)$$

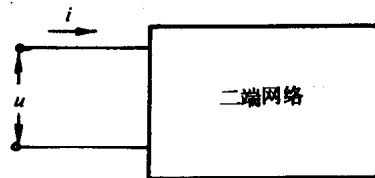


图 1-1 二端网络示意图

式中, Z 为电阻抗, R 为电阻, X 为电抗,单位均为欧姆(用 Ω 表示); Y 为电导纳, G 为电导, B 为电纳,单位均为西门子(用 S 表示)。

同一网络,其阻抗与导纳互为倒数,即

$$Z = \frac{1}{Y} \quad (1-1-3)$$

不同的二端网络,其阻抗特性各异。本节介绍一些典型二端网络。

一、单元件二端网络

由单个元件组成的无源线性二端网络,有三种基本类型,分述于下。

1. 纯电阻二端网络

单个线性纯电阻元件上电压、电流满足下述关系:

$$u = iR$$

和

$$\dot{U} = IR$$

因此,单个线性纯电阻元件组成的二端网络的电阻抗和电导纳恒分别为

$$Z = R \quad (1-1-4)$$

$$Y = \frac{1}{R} = G \quad (1-1-5)$$

其特点是:电阻抗有阻无抗;电导纳有导无纳;阻抗或导纳值均与信号无关。

2. 纯电容二端网络

单个线性纯电容元件上电压、电流满足关系式

$$u = \frac{1}{C} \int i \, dt$$

稳态情况下,则有

$$\dot{U} = \frac{1}{j\omega C} I$$

显然,单个线性纯电容元件组成的二端网络的电阻抗和电导纳分别为

$$Z = \frac{1}{j\omega C} \quad (1-1-6)$$

$$Y = j\omega C \quad (1-1-7)$$

其特点是:电阻抗有抗无阻,其电抗称为容抗;电导纳有纳无导,其电纳称为容纳;容抗随信号频率升高而减小,作反比变化,且抗值恒为负值(据此,在网络分析中,带负号的电抗称为容性抗,简称容抗);而容纳值随频率作正比变化,且恒为正值(同理,网络分析中,取正值的电纳称容性纳)。

3. 纯电感二端网络

单个线性纯电感元件上电压、电流满足关系式

$$u = L \frac{di}{dt}$$

稳态情况下,则有

$$\dot{U} = j\omega L I$$

可见,单个线性纯电感元件组成的二端网络的电阻抗和电导纳分别为

$$Z = j\omega L \quad (1-1-8)$$

$$Y = \frac{1}{j\omega L} \quad (1-1-9)$$

其特点是：电阻抗有抗无阻，其抗称为感抗；电导纳有纳无导，其电纳称为感纳，感抗随信号频率升高而增大，作正比变化，且抗值恒取正值（故带正号的电抗称为感性抗，简称感抗）；感纳值则随频率呈反比变化，且恒为负值（故取负值的电纳称为感性纳，简称感纳）。

三种单元件二端网络及其阻抗和导纳的频率特性曲线如图 1-2 所示。

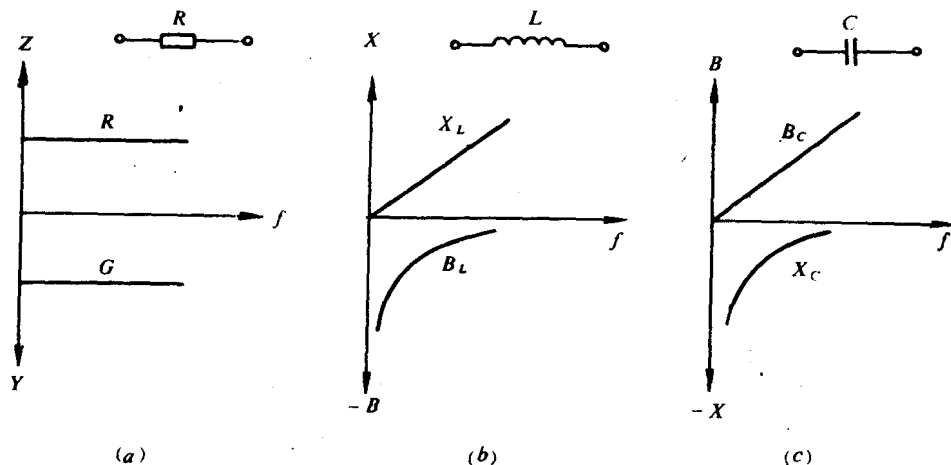


图 1-2 二端网络及阻抗导纳频率特性曲线

二、二元件电抗二端网络

二元件电抗二端网络由电感和电容并联或串联组成，只有二种基本的结构形式。

1. LC 串联二端网络

LC 串联二端网络由单个纯电感元件和单个纯电容元件串接组成，如图 1-3(a)所示。

设 LC 串联二端网络的阻抗为 Z_a ，则

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

由式可知，网络阻抗是频率的函数，且存在感抗与容抗相等并相互抵消的频率。用 ω_s 表示这一角频率。则

$$\omega_s = \sqrt{\frac{1}{L_1 C_1}} \quad (1-1-10)$$

在 ω_s 点，网络的阻抗为零，电流最大，元件两端电压取极大值。 ω_s 称串联谐振角频率，又称零点角频率。

由此，LC 串联二端网络的阻抗可表示为

$$Z_a = j\left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}\right) = jL_1 \frac{\omega^2 - \omega_s^2}{\omega} = \frac{L_1 \omega_s^2 - \omega^2}{j\omega} \quad (1-1-11)$$

由式可见，当信号角频率低于网络串联谐振角频率时，网络阻抗呈容性；在 ω_s 点，则阻抗为零；当信号角频率高于网络串联谐振角频率时，网络阻抗呈感性。

这个网络的导纳是其阻抗的倒数。即

$$Y_a = \frac{1}{Z_a} = \frac{j\omega}{L_1(\omega_s^2 - \omega^2)}$$

LC 串联二端网络阻抗和导纳频率特性示于图 1-3(a)。

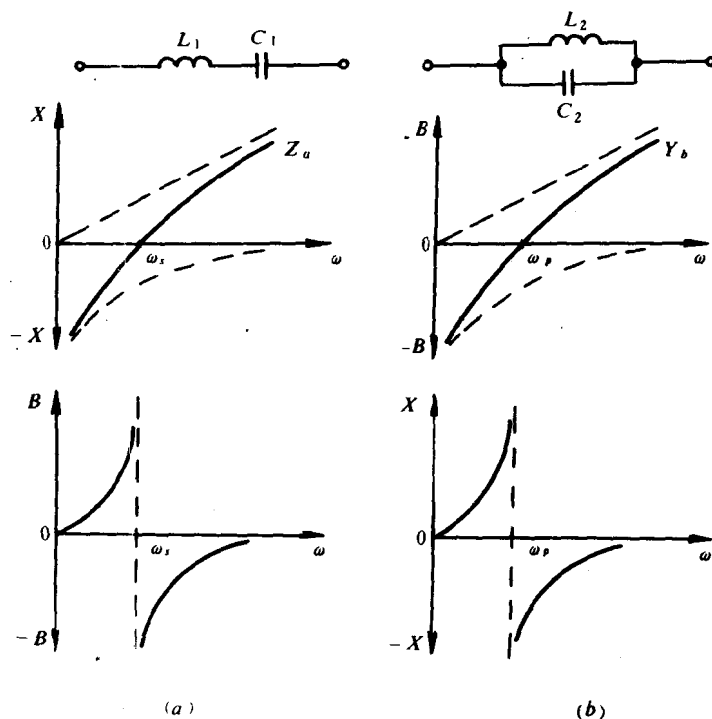


图 1-3 LC 串、并联二端网络阻抗导纳频率特性

2. LC 并联二端网络

LC 并联二端网络如图 1-3(b)所示。

设 LC 并联二端网络导纳为 Y_b 。则

$$Y_b = j\omega C_2 + \frac{1}{j\omega L_2} = j(\omega C_2 - \frac{1}{\omega L_2})$$

由式可知，网络导纳存在容纳和感纳相等并相互抵消的频率，用 ω_p 表示这一角频率。则

$$\omega_p = \sqrt{\frac{1}{L_2 C_2}} \quad (1-1-12)$$

在 ω_p 点，网络导纳为零（阻抗为无穷大），支路电流取极大值。 ω_p 称并联谐振角频率，也称极点角频率。

这样，LC 并联二端网络导纳可表示为

$$Y_b = j(\omega C_2 - \frac{1}{\omega L_2}) = jC_2 \frac{\omega^2 - \omega_p^2}{\omega} = \frac{C_2 \omega_p^2 - \omega^2}{j\omega}$$

由式可知，当信号角频率低于网络并联谐振角频率时，网络导纳呈感性；在 ω_p 点，则导纳为零；当信号角频率高于并联谐振角频率时，网络导纳呈容性。

这个网络的阻抗则是其导纳的倒数，即

$$Z_b = \frac{1}{Y_b} = \frac{j\omega}{C_2\omega_p^2 - \omega^2}$$

LC 并联二端网络阻抗和导纳频率特性示于图 1-3(b)。

三、三元件电抗二端网络

由三个纯电抗元件组成二端网络,共有四种基本结构,如图 1-4 所示。下面以图 1-4(c)为例,讨论其基本特性。

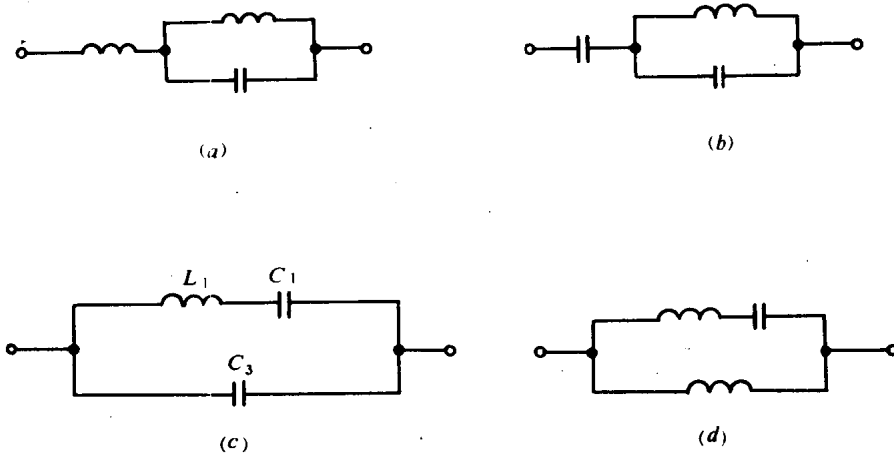


图 1-4 二端网络的几种基本结构

设图 1-4(c)所示三元件电抗二端网络的电导纳为 Y_c 。则

$$Y_c = j\omega C_3 + \frac{1}{j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1}} = j\omega C_3 + \frac{j\omega}{L_1(\omega_p^2 - \omega^2)} \quad (1-1-13)$$

式中, $\omega_s = \sqrt{\frac{1}{L_1 C_1}}$ 为串联支路串联谐振角频率。令上式等于零,可得

$$\omega_{cp} = \sqrt{\frac{C_1 + C_3}{L_1 C_1 C_3}} \quad (1-1-14)$$

ω_{cp} 为两支路导纳值相等且相互抵消的频率,即图 1-4(c) 并联电路电流谐振角频率。将 ω_{cp} 代入 (1-1-13) 式并加以整理后可得

$$Y_c = j\omega C_3 \frac{\omega_{cp}^2 - \omega^2}{\omega_s^2 - \omega^2} \quad (1-1-15)$$

这个二端网络的阻抗为

$$Z_c = \frac{1}{Y_c} = \frac{-j\omega_s^2 - \omega^2}{\omega C_3 \omega_{cp}^2 - \omega^2} \quad (1-1-16)$$

其阻抗频率特性曲线示于图 1-5。

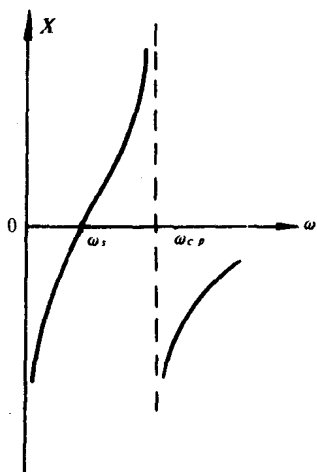


图 1-5 二端网络阻抗频率特性

由上述结果可知,图 1-4(c)所示三元件电抗二端网络存在二个谐振频率,一为串联谐振角频率 ω_s (零点角频率),一为并联谐振角频率 ω_{cp} (极点角频率)。在信号角频率低于 ω_s 时,网络阻抗呈容性;当信号角频率高于 ω_{cp} 时,网络阻抗也呈容性;当信号角频率高于 ω_s 而低于 ω_{cp} 时,网络阻抗为感性。图 1-4 中其它三种结构的特性,读者可仿此自行分析。二端网络类型举不胜数,不再一一例举。一般而言,电抗二端网络总具有以下几个基本特点。

(1)独立元件数目愈多,谐振频率也愈多。二个不同性质的独立元件产生一个谐振点,谐振频率的数目比独立元件数目少一。

(2)电抗曲线的斜率永远为正,阻抗函数单调上升,二端电抗网络的零点和极点总是相互错开的。

(3)在谐振点两侧,电抗性质不同。随着频率的升高,过零点时电抗由电容性变为电感性,过极点时电抗由电感性变为电容性。当频率为零时,电抗只能等于零或 $-\infty$,频率趋于无穷大时,电抗只能等于零或 $+\infty$ 。

上述规律,适用于各种多元件复杂电抗二端网络。由此,我们可以由给定的二端电抗网络结构预知其阻抗频率特性。

四、实际电抗元件的等效电路

实际的电感器和电容器都存在程度不同的损耗,而不是纯电抗元件。它们的性能一般必须用一个有耗二端网络表示,并且采用品质因数这一参数辅助表示其特点。

电抗元件的品质因数定义为该元件在一周内储存能量与消耗能量之比(乘以 2π),用 Q 表示。对于单个电感器或单个电容器,其抗和纳代表了储存能量部分,阻和导则代表了消耗能量部分。即有

$$Q = \frac{|X|}{R} = \frac{|B|}{G} \quad (1-1-17)$$

下面简单介绍电感器和电容器的常用等效电路。

1. 实际电感器的等效电路

实际电感器不仅有电感特性,而且有绕线电阻、介质损耗、匝间分布电容等。因此,它的特性必须用一有耗二端网络表示。

低频时,电感器损耗主要由绕线电阻决定。因此,它的等效电路如图 1-6(a)所示。其阻抗为

$$Z = r_1 + j\omega L \quad (1-1-18)$$

式中, r_1 为绕线电阻,是一个与信号频率无关的常数;它的品质因数

$$Q = \frac{\omega L}{r_1} \quad (1-1-19)$$

Q 随频率作正比变化。

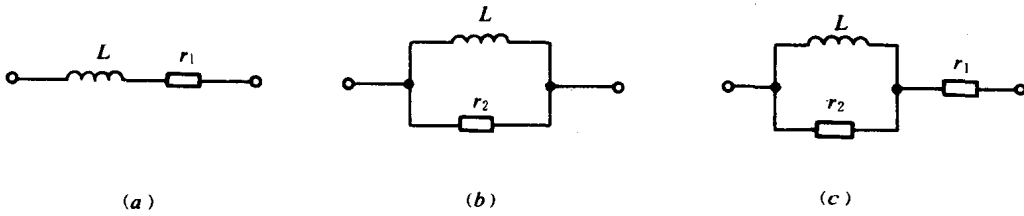


图 1-6 电感等效电路

高频时,电感器损耗主要以绕线电阻趋肤效应和介质损耗为主,其损耗是频率的函数,且随频率升高而增大, Q 则随频率升高而下降。为此,采用图 1-6(b)描述其特性,其导纳为

$$Y = \frac{1}{r_2} + \frac{1}{j\omega L} \quad (1-1-20)$$

其品质因数则为

$$Q = \frac{r_2}{\omega L} \quad (1-1-21)$$

在较宽频率范围内,实际电感器则可用图 1-6(c)所示的等效电路表示其特性。在 $Q \gg 1$ (一般均能满足)时,其阻抗

$$Z \approx r_1 + \frac{\omega^2 L^2}{r_2} + j\omega L \quad (1-1-22)$$

其品质因数

$$Q \approx \frac{\omega L r_2}{r_1 r_2 + \omega^2 L^2} \quad (1-1-23)$$

电感器在较高频率范围时,还必须计及分布电容,这里不再详述。

2. 实际电容器的等效电路

实际电容器也存在损耗,且损耗随频率变化而变化,其等效电路有图 1-7 所示的两种形式。其中 r 均为频率的函数。

电容器损耗一般采用损耗角 δ 表示,它与品质因数的关系为

$$Q = \frac{1}{\text{tg}\delta} \quad (1-1-24)$$

可以证明,在 $Q \gg 1$ 时,实际电容器的阻抗可表示为

$$Z = \frac{1}{j\omega C} e^{j\delta} \quad (1-1-25)$$

实用上,多采用图 1-7(b)所示电路作为实际电容器的等效电路。

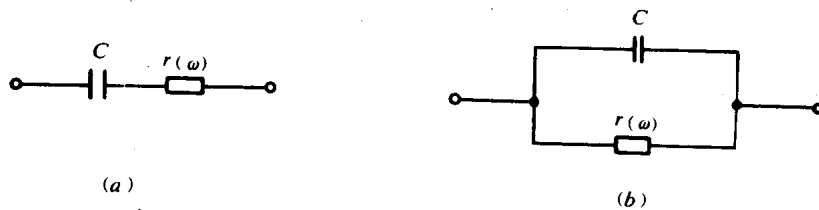


图 1-7 电容的等效电路

§ 1-2 四端网络的传输方程和网络参数

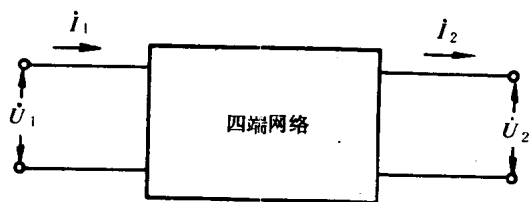


图 1-8 四端网络示意图

具有两个端对的电路称为四端网络,又称双口网络,图 1-8 所示。通常,网络左边的端口与信号源连接,称为输入端;右边的端口与负载相连,称为输出端。

压电器件一般都采用四端网络模拟其特性,四端网络理论是分析压电器件的基本工具。本章将分节介绍无源

线性四端网络基础理论知识。本节主要介绍四端网络的传输方程及网络参数。

一、四端网络的基本结构类型

无源线性四端网络的基本结构类型有 Γ 型(又称 L 型或倒 L 型)、T 型、 Π 型、桥型(又称 X 型)、桥 T 型等,如图 1-9 所示。

图中,沿电流传输方向的支路称为串臂;具有分流作用、跨接在串臂之间的支路称为并臂;桥型电路中的并臂则称为对角臂或斜格臂。

四端网络的臂都是二端网络。这些二端网络可以是单元件的简单网络,也可以是多元件的复杂网络;可以是阻抗性质的,也可以是纯电阻或纯电抗性质的。

具有串臂和并臂的四端网络称完全四端网络;仅具有串臂或并臂的则称为不完全四端网络。图 1-9 中所示网络均属完全四端网络。而在压电器件中常用于阻抗匹配的单个调谐电感,则不论串联应用还是并联应用,都属于不完全四端网络。

如果四端网络的左右两半互成镜像,则称为对称四端网络;如果四端网络的上下两半互成镜像,则称为平衡四端网络;如果四端网络上下左右都成镜像,则称为平衡对称四端网络。

例如,图 1-9 中的 T 型网络,当 $Z_1 = Z_3$ 时,属于对称网络,当 $Z_1 \neq Z_3$ 时则属于不对称网络;图 1-9 中的桥型网络,当 $Z_1 = Z_3$ 时,属于平衡网络,当 $Z_1 \neq Z_3$ 时,则属于非平衡网络;当上述桥型网络中 $Z_2 = Z_4$ 、且 $Z_1 = Z_3$ 时,该网络则为平衡对称四端网络。

二、四端网络的传输方程

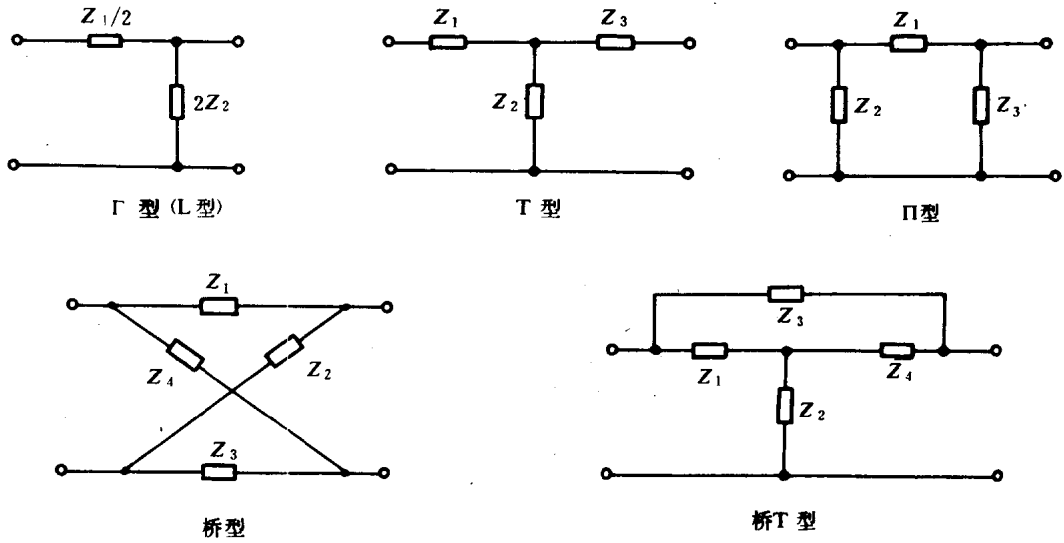


图 1-9 四端网络基本结构类型

四端网络的传输方程,是指四端网络的输入端电压 U_1 、输入端电流 I_1 ,与输出端电压 U_2 、输出端电流 I_2 之间关系的基本方程式。

下面以不对称 T 型网络为例建立其传输方程。为讨论明确起见,设网络参考电压、电流如图 1-10 所示。

由克希荷夫第一定律,在图中 A 点有

$$I_1 = I_2 + I_3 \quad (1-2-1)$$

沿网络外回路,由克希荷夫第二定律有

$$U_1 = I_1 Z_1 + I_2 Z_3 + U_2 \quad (1-2-2)$$

由欧姆定律有

$$I_3 = \frac{U_{AB}}{Z_2} = \frac{I_2 Z_3 + U_2}{Z_2} \quad (1-2-3)$$

将(1-2-3)式代入(1-2-1)式,变换后有

$$I_1 = \frac{U_2}{Z_2} + \left(1 + \frac{Z_3}{Z_2}\right) I_2 \quad (1-2-4)$$

将(1-2-4)式代入(1-2-2)式,有

$$U_1 = \left(1 + \frac{Z_1}{Z_2}\right) U_2 + \left(Z_1 + Z_3 + \frac{Z_1 Z_3}{Z_2}\right) I_2 \quad (1-2-5)$$

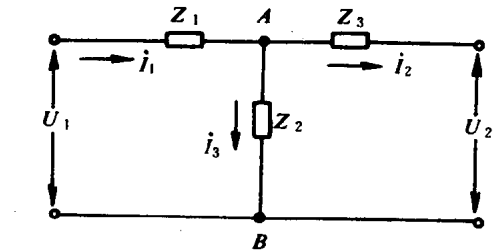


图 1-10 四端网络参考电压电流及方向

令

$$\left. \begin{aligned} A_{11} &= 1 + \frac{Z_1}{Z_2}, & A_{12} &= Z_1 + Z_2 + \frac{Z_1 Z_3}{Z_2} \\ A_{21} &= \frac{1}{Z_2}, & A_{22} &= 1 + \frac{Z_3}{Z_2} \end{aligned} \right\} \quad (1-2-6)$$

并代入(1-2-4)式和(1-2-5)式,可得

$$\begin{cases} U_1 = A_{11}U_2 + A_{12}I_2 \\ I_1 = A_{21}U_2 + A_{22}I_2 \end{cases} \quad (1-2-7a)$$

此即图 1-10 所示不对称 T 型四端网络的传输方程。

(1-2-7a)式的传输方程也可用矩阵形式表示为

$$\begin{pmatrix} U_1 \\ I_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_2 \\ I_2 \end{pmatrix} \quad (1-2-7b)$$

式中,矩阵 $\begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix}$ 中各元素,由(1-2-6)式可知它们仅由网络元件性质及其连接方式决定,与信号源和负载无关,是反映网络自身性质的参数,故该矩阵称为网络的 A 参数矩阵。而(1-2-7)式则称为网络 A 参数传输方程。

采用类似的方法,可以得到其它各种无源线性四端网络的 A 参数方程,其形式完全与(1-2-7)式一样。不同的仅仅是网络参数计算公式有别于(1-2-6)式。因此,(1-2-7)式是无源线性四端网络 A 参数方程的一般形式。网络参数矩阵则是描述网络自身特性的基本参数。

当改变一个四端网络的信号传输方向,即在网络右端口连接信号源作输入端,左端口接负载作输出端时,网络传输方程也具有(1-2-7)式相同的形式,唯一不同之处是 A_{11} 和 A_{22} 互换了位置。

当四端网络对称时, $A_{11} = A_{22}$, 网络左右传输特性相同。

三、四端网络的参数矩阵

由于四端网络工作状态参量有 U_1, U_2, I_1, I_2 四个,以其任意两个量为自变量,另两个量为因变量组成传输方程的方式可有多种。在压电器件分析中,除上面给出的以 U_2, I_2 为自变量的 A 参数方程外,常常使用的还有以 I_1, I_2 为自变量的 Z 参数方程

$$\begin{cases} U_1 = Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2 \\ U_2 = Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2 \end{cases} \quad (1-2-8a)$$

或

$$\begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} \quad (1-2-8b)$$

和以 U_1, U_2 为自变量的 Y 参数方程

$$\begin{cases} I_1 = Y_{11}U_1 + Y_{12}U_2 \\ I_2 = Y_{21}U_1 + Y_{22}U_2 \end{cases} \quad (1-2-9a)$$

或

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \end{pmatrix} \quad (1-2-9b)$$

四端网络 A 参数、Z 参数、Y 参数的定义及其物理意义见表 1-1。

表 1-1 网络参数定义及物理意义

类 型	定义式	名称及物理意义
A 参 数	$A_{11} = \left(\frac{U_1}{U_2} \right)_{I_2=0}$	输出开路时电压传输系数的倒数
	$A_{12} = \left(\frac{U_1}{I_2} \right)_{U_2=0}$	输出短路时正向转移阻抗
	$A_{21} = \left(\frac{I_1}{U_2} \right)_{I_2=0}$	输出开路时正向转移导纳
	$A_{22} = \left(\frac{I_1}{I_2} \right)_{U_2=0}$	输出短路时电流传输系数的倒数
Z 参 数	$Z_{11} = \left(\frac{U_1}{I_1} \right)_{I_2=0}$	输出开路时输入阻抗
	$Z_{12} = \left(\frac{U_1}{I_2} \right)_{I_1=0}$	输入开路时反向转移阻抗
	$Z_{21} = \left(\frac{U_2}{I_1} \right)_{I_2=0}$	输出开路时正向转移阻抗
	$Z_{22} = \left(\frac{U_2}{I_2} \right)_{I_1=0}$	输入开路时输出阻抗
Y 参 数	$Y_{11} = \left(\frac{I_1}{U_1} \right)_{U_2=0}$	输出短路时输入导纳
	$Y_{12} = \left(\frac{I_1}{U_2} \right)_{U_1=0}$	输入短路时反向转移导纳
	$Y_{21} = \left(\frac{I_2}{U_1} \right)_{U_2=0}$	输出短路时正向转移导纳
	$Y_{22} = \left(\frac{I_2}{U_2} \right)_{U_1=0}$	输入短路时输出导纳

由于三种网络参数表示的是同一网络的特性,故各参数之间必然存在着相互联系。表 1-2 给出了各参数之间的转换关系。

表 1-2 网络参数转换关系

	用 A 参数表示	用 Z 参数表示	用 Y 参数表示
[A]	$\begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix}$	$\frac{1}{Z_{21}} \begin{pmatrix} Z_{11} & - Z \\ 1 & -Z_{22} \end{pmatrix}$	$\frac{1}{Y_{21}} \begin{pmatrix} -Y_{22} & 1 \\ - Y & Y_{11} \end{pmatrix}$
[Z]	$\frac{1}{A_{21}} \begin{pmatrix} A_{11} & -1 \\ 1 & -A_{22} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix}$	$\frac{1}{ Y } \begin{pmatrix} Y_{22} & -Y_{12} \\ -Y_{21} & Y_{11} \end{pmatrix}$
[Y]	$\frac{1}{A_{12}} \begin{pmatrix} A_{22} & -1 \\ 1 & -A_{11} \end{pmatrix}$	$\frac{1}{ Z } \begin{pmatrix} Z_{22} & -Z_{12} \\ -Z_{21} & Z_{11} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{pmatrix}$

注: 1. 本表参数, 电流 I_0 正方向为流出。若 I_2 正方向为流入, 则与 I_2 有关的参数相差一负号。

2. 表中: $|A| = A_{11}A_{22} - A_{12}A_{21} = -\frac{Z_{12}}{Z_{21}} = -\frac{Y_{12}}{Y_{21}}$;

$|Z| = Z_{11}Z_{22} - Z_{12}Z_{21} = \frac{1}{|Y|} = -\frac{A_{12}}{A_{21}}$;

$|Y| = Y_{11}Y_{22} - Y_{12}Y_{21} = \frac{1}{|Z|} = -\frac{A_{21}}{A_{12}}$ 。

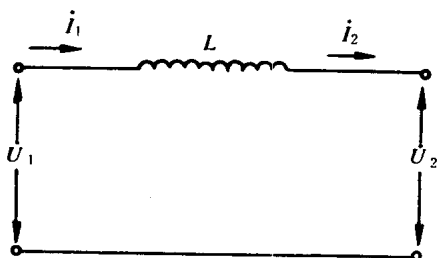


图 1-11 调谐电感组成的匹配网络

$\therefore [A] = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & j\omega L \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$

$\therefore A_{11} = \left(\frac{U_1}{U_2}\right)_{I_2=0} = 1$

$\therefore \left(\frac{U_2}{U_1}\right)_{I_2=0} = \frac{1}{A_{11}} = 1$

表 1-3 给出了几种常用基本网络的参数矩阵, 可供练习和查用。

§ 1-3 四端网络的输入阻抗和特性阻抗

在电路中, 阻抗匹配是个重要问题。其原因, 一方面是为了最大限度地使前一级信号能量传输给后一级, 另一方面也是为了减小信号在级间传输时的畸变。压电器件一般用作换能器、滤波器等, 阻抗匹配同样是个重要问题。由于压电器件多为高频器件, 所以它不仅存在网络的级间匹配问题, 而且必须考虑网络与前后传输线的匹配问题。

本节介绍在电路分析和换能器件分析中非常重要的输入阻抗、输出阻抗和特性阻抗。

利用表 1-1 和表 1-2, 只要知道了四端网络的内部结构, 就可计算出网络参数, 从而可以知道网络的一些基本电学特性。

例: 图 1-11 所示为串联调谐电感组成的匹配网络, 试计算其输出开路时的电压传输系数

$\left(\frac{U_2}{U_1}\right)_{I_2=0}$

解: 由图可列出其 A 参数方程为

$$\begin{cases} U_1 = U_2 + j\omega L I_2 \\ I_1 = I_2 \end{cases}$$