



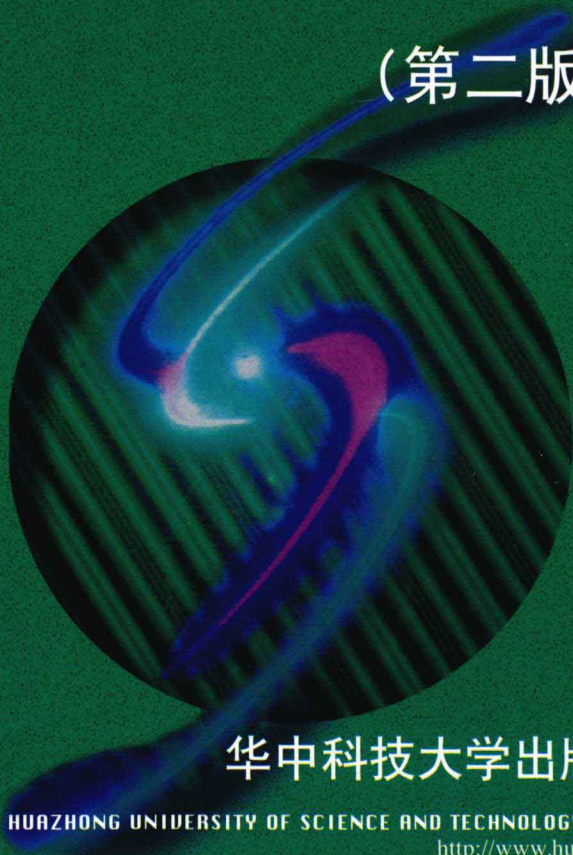
国家工科教学基地
21世纪电工电子系列教材

电路理论

——端口网络与均匀传输线

主编 颜秋容
编者 陈崇源

(第二版)



华中科技大学出版社

HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

<http://www.hustp.com>

21 世纪电工电子系列教材

电 路 理 论

——端口网络与均匀传输线

(第二版)

主 编 颜秋容

编 者 陈崇源

华中科技大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

电路理论——端口网络与均匀传输线(第二版)/颜秋容 主编
武汉:华中科技大学出版社,2006年12月
ISBN 7-5609-1896-4

I. 电…

II. ①颜… ②陈…

III. 电路理论-网络理论-电路端口传输

IV. TM. 13

电路理论——端口网络与均匀传输线(第二版)

颜秋容 主编

责任编辑:李 德

封面设计:潘 群

责任校对:朱 霞

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:武汉众心设计室

印 刷:湖北恒泰印务有限公司

开本:787×960 1/16

印张:12

字数:198 000

版次:2006年12月第2版

印次:2006年12月第6次印刷

定价:16.80元

ISBN 7-5609-1896-4/TM·75

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

内 容 提 要

本书是电路理论模块化教材的最后一部分,是从端口的角度来分析和研究具体网络的。全书共分四章:二端口网络,网络的状态变量分析法,均匀传输线的正弦稳态分析,无损耗均匀传输线的暂态分析。

本书除了在论述基本内容时,配置一定数量的例题以便读者自学和理解基本概念、基本原理、基本方法外,还在各章的最后编写了具有一定难度和综合性较强的例题,可以起到深化和进一步提高的作用。

本书各章都配有一定数量的习题,并在书末附有答案,可供读者检验。

本书最后还编有附录“磁路与含铁芯线圈”,可作磁路分析的参考资料。

本书内容丰富,立论严谨,通俗易懂,便于自学。可作为电类有关专业本科生电路理论课(端口网络与均匀传输线部分以及磁路)的教材,也可供有关电气工程技术人員参考。

总 序

电路理论是一门重要的技术基础课,是工科电类、电子、通信、控制以及电机一体化等学科必备的理论基础,对大学生总体课程的学习和今后的工作起着深远的影响。

本套教材自第一版问世以来,已历经了七年。在这世纪之交的七年中,随着教学改革不断深入,全国各高等院校均制定出面向 21 世纪新的培养计划,在加强基础、拓宽专业的指导思想下,电路理论的课时减少了,但其课程的重要地位没有改变,为适应新形势,对原教材进行了修订。

全书仍分为《电阻性网络》、《时域与频域分析》、《端口网络与均匀传输线》三个模块,形成电路理论课程的三个台阶。这样,可使学生在学习过程中具有明确的阶段性,发挥他们学习的自觉性、主动性和创造性,使他们沿着这三个台阶攀登,打下深厚、坚实的电路理论基础。

本套书在保留原有书的特色基础上,吸取了任课教师的合理建议,对教材的内容、结构进行了整合,使其结构更加完善合理,更有利于教学组织。

在每章后新增了“小结”,提纲挈领地归纳了一章的主要内容和学习中应注意的问题,有助于学生从整体上掌握一章的内容。

为了便于自学,在一些重点章节及难以理解的地方,论述得比较详尽,同时还编有丰富的具有一定深度和难度的颇具启发性的例题分析,以启迪学生的思路,扩大他们的视野。

习题是各章内容的延续,在新版中原书的绝大部分及难度较大可以激发学生思考,促使他们从更深的层面理解和掌握电路理论内容的习题全部保留,删除了计算繁杂及内容重复的部分习题,增加了综合性的习题。在习题的编排上按章节顺序从基本到综合重新进行了调整,新的编排更有利于学生自主学习和自我训练。各章习题都附有参考答案,供学生对照检查。

编写本教材的作者,都是从事电路理论课程教学多年的教授、副教授,具有丰富的教学经验。他们在教学过程中,力求在讲深讲透电路理论的基本概念、基本原理和基本分析方法的同时,加强对学生分析问题、解决问题的能力以及素质的培养。在本书的编写中,作者多少溶进了这方面的心血,具有一定的特色。书中有不少观点和提法是作者经过多年的教学总结和提炼出来的。

本书的内容具有一定的深度、广度和难度,在组织教学时可以根据不同的情况进行取舍。本书不仅可作为有关专业的电路理论课程的教材和硕士研究生入学考试的参考书,也可供有关的工程技术人员参考。

为了满足需要,本书以附录形式编写了“磁路与含铁芯的线圈”。

本书《电阻性网络》由谭丹副教授主编,《时域与频域分析》由杨泽富副教授主编,《端口网络与均匀传输线》由颜秋容副教授主编。

由于本书内容较多,范围较广,篇幅较大,可能会有一些考虑不周和错漏之处,恳请广大读者与同仁给予批评指正。

编者

2006 年 6 月于武汉华中科技大学

第二版序

本书是在初版使用了六年,并广泛征求使用者意见的基础上进行修订的,力求能更好地体现模块化的思想,更方便于自学,更好地服务于拓宽知识面、加强能力培养的教育理念。与初版相较,做了以下修改。

1. 将原来章末的例题精讲分散到整章,仅将综合题留在章末,便于自学。
2. 加入了术语的英文表述。
3. 增添了章末小结,起到学习指导作用。

4. 二端口网络一章中增加了转移函数、回转器、负阻抗变换器的内容,并将对称二端口网络的传播特性调到均匀传输线的正弦稳态分析中。

5. 在叙述方式上对部分内容进行了修改,适当调整了顺序,便于取舍。

6. 调整了部分习题。

全书修订工作由颜秋容完成。在本书修订期间,不少同志提出了许多宝贵的建议,修订工作亦得到华中科技大学出版社的大力支持,谨在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2006年3月

于华中科技大学

第一版序

本书是从网络端口的角度来分析和研究网络的有关问题的。

二端口网络理论是端口网络分析的理论基础,它是从网络的输入端口和输出端口来研究网络的,对应着单输入、单输出系统。主要内容包括二端口网络的方程、参数、二端口网络的等效电路及其连接、对称二端口网络的特性阻抗及传播特性等。

网络的状态变量分析法,是以状态变量来建立网络的一阶微分方程组,以状态变量和输入激励来表示输出变量的分析方法,是网络的动力学分析方法。

如果把状态变量所在的支路以及激励和输出变量所在的支路拉出去作为端口,那么状态方程和输出方程实际上就构成了混合变量形式的多端口电阻网络方程,它所对应的系统是多端口输入、输出系统。其主要内容为状态方程与输出方程的列写,以及状态方程的求解等。

均匀传输线是分布参数电路,它与集中参数电路不同,其电压与电流是时间 t 与空间 x 的函数,应着重理解时空波的概念,以及时空波在均匀传输线上的传播过程。

在正弦稳态情况下,可以把均匀传输线看作是一个二端口网络,也可以应用二端口网络的理论来理解和掌握均匀传输线的正弦稳态分析。其内容主要包括均匀传输线的原始参数和副参数,均匀传输线的电压、电流相量关系,无损耗线、无畸变线的特点,它们在工程技术上的应用,以及均匀传输线的入端阻抗和链式造型等值电路等。

无损耗均匀传输线的暂态过程是一个波过程,要注意理解波的反射和透射的概念,以及波在传播过程是需要时间的。若线路的长度为 l ,波的传播速度为 v ,当以线路始端作为空间坐标 x 的原点时,发出波从线路始端传播到线路某处 x 所需的时间为 x/v ;波从线路终端反射向线路始端传播到某处 x 所需的时间为 $(l-x)/v$ 。应结合波的传播过程来理解无损耗均匀传输线的暂态分析。其主要内容有损耗均匀传输线的波动方程及其解,无损耗均匀传输线上的发出波、反射波和透射波,求解波过程的“柏德生”法则,以及波在无损耗均匀传输线上的终端和始端的多次反射等。

无损耗均匀传输线的暂态过程分析,也可以通过拉普拉斯变换,用二端口网络的理论来进行认识和理解,这也是作者的初次尝试。

为了满足磁路分析的需要,本书最后以附录形式编写了“磁路与含铁芯的线圈”,主要内容有磁路及含铁芯线圈电路的分析和计算等。

本书第一章、第二章由颜秋容编写,第三章、第四章及附录由陈崇源编写。虽然在编写过程中作者力图融入多年的教学经验、认识和体会,但这只是一孔之得,必定存在局限性和不当之处,恳切希望广大读者和同仁提出宝贵的批评意见,以便作者进行修改和完善。

编者

1997 年 10 月于武昌

目 录

第 1 章 二端口网络	(1)
1-1 概述	(1)
1-1-1 二端口网络	(1)
1-1-2 松弛二端口网络与非松弛二端口网络	(2)
1-1-3 二端口网络的端口特性方程	(3)
1-2 二端口网络的阻抗参数	(3)
1-2-1 阻抗参数方程	(4)
1-2-2 阻抗参数的物理含义	(4)
1-2-3 阻抗参数的求法	(5)
1-2-4 二端口网络阻抗参数等效电路	(9)
1-3 二端口网络的导纳参数	(10)
1-3-1 导纳参数方程	(10)
1-3-2 导纳参数的物理含义	(10)
1-3-3 导纳参数的求法	(11)
1-3-4 二端口网络导纳参数等效电路	(12)
1-4 二端口网络的混合参数	(13)
1-4-1 H 参数	(13)
1-4-2 G 参数	(15)
1-5 二端口网络的传输参数	(15)
1-5-1 正向传输参数	(16)
1-5-2 反向传输参数	(18)
1-6 二端口网络各参数之间的关系	(19)
1-6-1 参数之间的互换关系	(19)
1-6-2 互易二端口网络 and 对称二端口网络的参数特点	(20)
1-7 二端口网络的相互连接	(21)
1-7-1 二端口网络的级联	(22)
1-7-2 二端口网络的串联	(23)
1-7-3 二端口网络的并联	(25)
1-8 有载二端口网络	(26)
1-8-1 有载二端口网络的分析	(26)
1-8-2 有载二端口网络的输入、输出阻抗	(29)

1-8-3 有载二端口网络的转移函数	(30)
1-9 回转器和负阻抗变换器	(31)
1-9-1 回转器	(31)
1-9-2 负阻抗变换器	(32)
小结	(35)
习题一	(36)
第2章 网络的状态变量分析法	(40)
2-1 基本概念	(40)
2-1-1 状态与状态变量	(40)
2-1-2 纯电容回路与纯电感割集对选取状态变量的影响	(41)
2-1-3 常态网络与非常态网络状态向量的维数	(41)
2-1-4 状态方程与输出方程	(42)
2-1-5 状态空间与状态轨迹	(44)
2-2 线性网络状态方程的观察法列写	(45)
2-2-1 常态网络状态方程的观察法列写	(45)
2-2-2 非常态网络状态方程的观察法列写	(48)
2-2-3 含受控源网络状态方程的观察法列写	(49)
2-2-4 含耦合电感元件网络状态方程的观察法列写	(51)
* 2-3 线性网络状态方程的直流叠加法列写	(52)
2-4 状态方程的系统法列写	(57)
2-4-1 规范化支路	(57)
2-4-2 导出状态方程	(58)
2-5 状态方程与输出方程的求解	(59)
2-5-1 状态方程的复频域解法	(59)
2-5-2 输出方程的解和转移函数矩阵	(61)
2-5-3 矩阵 A 的特征值与网络的固有频率	(62)
小结	(68)
习题二	(69)
第3章 均匀传输线的正弦稳态分析	(72)
3-1 均匀传输线的原始参数及其偏微分方程	(73)
3-1-1 原始参数	(73)
3-1-2 偏微分方程	(73)
3-2 均匀传输线的正弦稳态分析	(74)
3-2-1 偏微分方程相量解的一般形式	(74)
3-2-2 两种典型边界条件下的相量解	(75)
3-2-3 电压、电流的入射波分量与反射波分量	(76)

3-2-4 电压、电流的瞬时表达式——行波的概念	(78)
3-2-5 反射系数	(81)
3-2-6 均匀传输线的副参数	(81)
3-3 均匀传输线的对称二端口网络	(82)
3-3-1 对称二端口网络的特性阻抗与传播系数	(82)
3-3-2 均匀传输线的二端口网络方程	(84)
3-3-3 均匀传输线的入端阻抗	(85)
3-3-4 均匀传输线上电压及电流的有效值	(88)
3-3-5 均匀传输线的等效电路	(90)
3-3-6 均匀传输线的链式模型	(90)
3-3-7 均匀传输线原始参数的实验测定	(91)
3-4 无畸变线与无损耗线	(93)
3-4-1 无畸变线与无损耗线的定义	(93)
3-4-2 无损耗均匀传输线上的电压及电流	(94)
3-4-3 无损耗均匀传输线的入端阻抗	(97)
3-4-4 无损耗均匀传输线在工程技术上的应用	(98)
小结	(102)
习题三	(104)
第 4 章 无损耗均匀传输线的暂态分析	(106)
4-1 无损耗均匀传输线的波动方程及其解	(106)
4-1-1 无损耗均匀传输线的波动方程	(106)
4-1-2 波动方程的解	(107)
4-1-3 行波	(108)
4-2 无损耗均匀传输线上的发出波	(109)
4-2-1 无损耗均匀传输线接通直流电压源的发出波	(109)
4-2-2 非零状态下,终端接通负载电阻 R 的发出波	(110)
4-2-3 无损耗均匀传输线中间某处开断负载的发出波	(111)
4-3 无损耗均匀传输线的复频域解	(113)
4-4 终端负载的反射	(115)
4-4-1 终端接纯电阻负载的波过程	(115)
4-4-2 终端接感性负载的波过程	(116)
4-4-3 终端接容性负载的波过程	(118)
4-5 求解波过程的柏德生法则	(122)
4-5-1 柏德生法则	(122)
4-5-2 用柏德生法则求解波过程	(123)
4-5-3 无损耗均匀传输线连接处的反射和透射	(125)

4-5-4 透射系数	(129)
4-5-5 大气放电引起的波过程	(130)
4-6 波的多次反射	(133)
4-6-1 始端及终端阻抗不匹配时波动方程的解	(133)
4-6-2 波的多次反射的网格图分析法	(135)
小结	(138)
习题四	(138)
附录 A 磁路与含铁芯的线圈	(140)
A-1 磁路与铁磁材料	(140)
A-1-1 磁路的概念	(140)
A-1-2 铁磁材料的磁化特性	(140)
A-2 磁路的基本定律	(143)
A-2-1 磁路的欧姆定律	(144)
A-2-2 磁路的基尔霍夫磁通定律	(145)
A-2-3 磁路的基尔霍夫磁位差(磁压)定律	(146)
A-2-4 磁路与电路的对比	(146)
A-2-5 磁路与电感	(147)
A-3 磁路的计算	(149)
A-3-1 无分支磁路的计算	(149)
A-3-2 有分支磁路的计算	(154)
A-3-3 含有永久磁铁的简单磁路	(157)
A-4 磁场能量与磁场力	(160)
A-4-1 磁场能量	(160)
A-4-2 磁场力	(161)
A-5 磁饱和与磁滞对电压、电流及磁通波形的影响	(161)
A-5-1 磁饱和对电压、电流及磁通波形的影响	(161)
A-5-2 磁滞对电压、电流及磁通波形的影响	(163)
A-6 铁芯中的功率损耗	(164)
A-6-1 涡流和涡流损耗	(164)
A-6-2 磁滞损耗	(165)
A-6-3 铁磁损耗	(167)
A-7 有铁芯线圈的交流电路	(167)
习题 A	(169)
附录 B 习题答案	(173)

第 1 章 二端口网络

本章从端口的角度对网络进行分析和研究。在工程技术中,常常只需研究网络的输入端口与输出端口之间的电压、电流关系,对网络内部不作具体探讨。本章重点讨论内部不含独立电源、无原始储能的线性二端口网络的端口特性方程及其分析方法。

1-1 概述

1-1-1 二端口网络

在电网络中,如果任何时刻流入网络一个端子的电流等于流出另一个端子的电流,那么这样的两个端子就构成一个端口。如图 1-1 所示的网络,若满足

$$\begin{cases} i_1 = i_1' \\ i_2 = i_2' \end{cases}$$

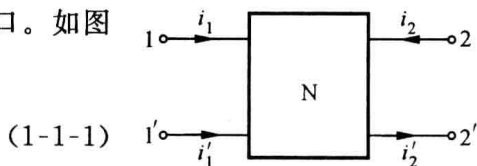


图 1-1 端口概念说明

则端子 1 与 1'、2 与 2' 分别构成一个端口。

只有两个端口的网络称为二端口网络(two-port network or two-ports)。图 1-1 所示网络就是一个二端口网络,1-1' 端口为输入端口,2-2' 端口为输出端口。图 1-2 所示为几个简单二端口网络的例子。

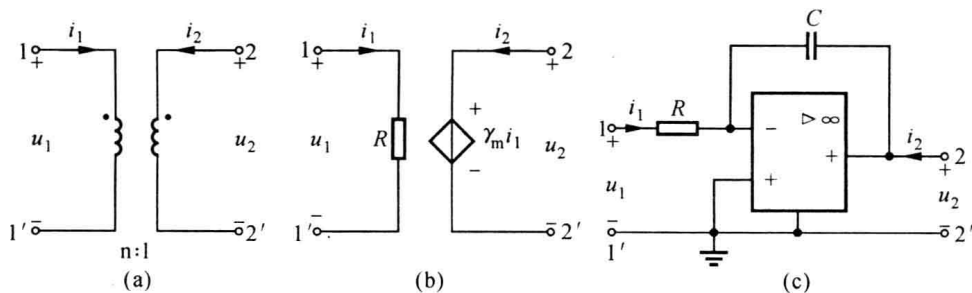


图 1-2 简单二端口网络

(a) 理想变压器; (b) 受控电源; (c) 积分器

二端口网络是具有四个端子的网络,但具有四个端子的网络并不一定是二端口网络。图 1-3(a)所示的网络具有四个端子,端子电流满足

$$i_1 + i_2 + i_3 + i_4 = 0 \quad (1-1-2)$$

但不一定能满足二端口网络的端口条件,这样的网络不能称为二端口网络,只能称之为四端网络。二端口网络是四端网络的特例。

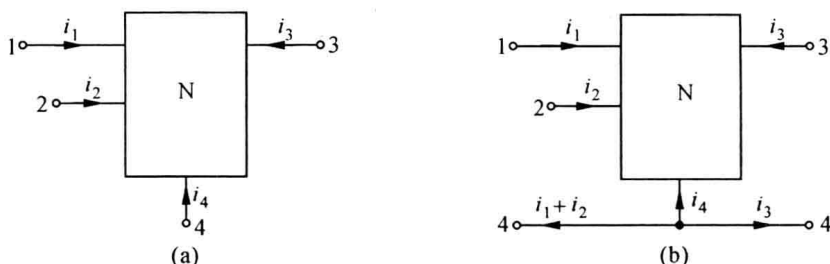


图 1-3 四端网络
(a) 四端网络; (b) 三端口网络

图 1-3(a)所示的四端网络,若以端子“4”作为公共端子,如图 1-3(b)所示,则端子 1-4、2-4、3-4 之间分别构成一个端口,该网络可视为三端口网络。一般而言,具有 n 个端子的网络,可以任意选择一个端子作为公共端子,构成 $n-1$ 个端口网络。

1-1-2 松弛二端口网络与非松弛二端口网络

内部不含独立电源、不含原始储能(原始储能可以等效为独立电源)的二端口网络称为松弛二端口网络,否则称为非松弛二端口网络。线性非松弛二端口网络可由相应的松弛二端口网络与独立电源构成的电路来等效。图 1-4(a)所示网络 N 为线性非松弛二端口网络,可以仿照戴维南定理的证明过程,即按替代、叠加、构造等效电路的步骤来得到线性非松弛二端口网络的等效电路。将 i_1 、 i_2 视为(或替代为)电流源,根据叠加定理,图 1-4(a)所示网络可以等效为图 1-4(b)和(c)所示

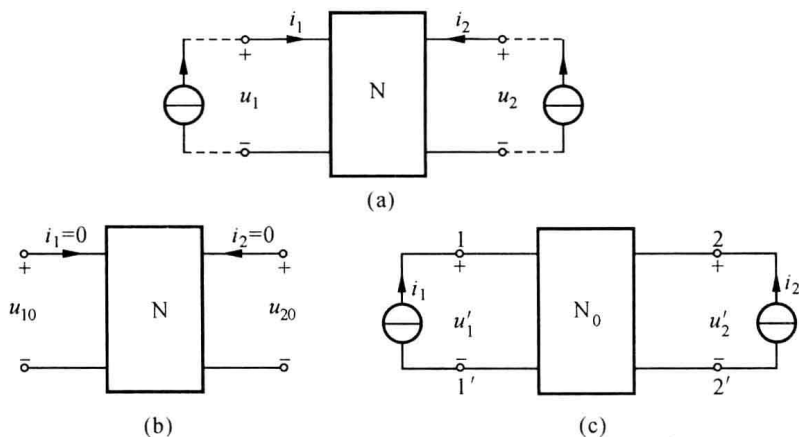


图 1-4 非松弛二端口网络

(a) 非松弛二端口网络; (b) 内部电源单独作用; (c) 端口电源单独作用

的叠加,其中 N_0 为将 N 内部独立电源和原始储能都置零后所得到的松弛二端口网络, u_{10} 、 u_{20} 为 N 的端口均开路时的端口电压。由此可得

$$\begin{cases} u_1 = u_{10} + u'_1 \\ u_2 = u_{20} + u'_2 \end{cases} \quad (1-1-3)$$

由式(1-1-3)可以构成如图 1-5(a)所示的等效电路。

同理,若将图 1-4(a)中端口电压 u_1 、 u_2 视为电压源,则可以得到如图 1-5(b)所示的等效电路,图中 i_{1s} 、 i_{2s} 为 N 的端口均短路时的端口电流。

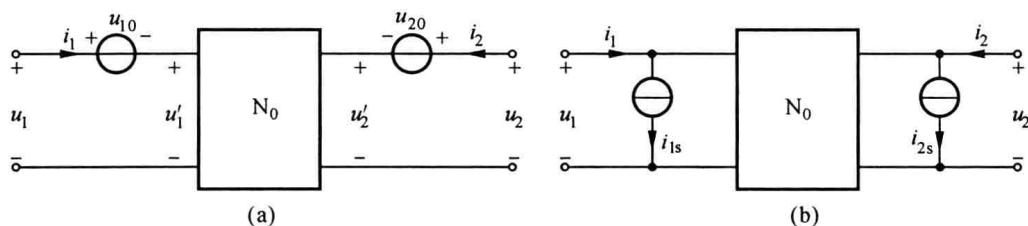


图 1-5 非松弛二端口网络等效电路

(a)非松弛二端口网络等效电路之一; (b)非松弛二端口网络等效电路之二

1-1-3 二端口网络的端口特性方程

二端口网络的概念是一端口网络概念的引申。一端口网络端口的电压、电流变量可以用一个方程将它们联系起来,这个方程就是一端口网络的端口伏安关系,也称为端口特性方程。二端口网络具有两个端口、四个端口变量(两个端口电压变量、两个端口电流变量),需要两个方程才能描述其端口特性。

在二端口网络的四个端口变量中,可以任意选择两个作为自变量(激励),另外两个作为因变量(响应),构成六组不同形式的方程,这六组方程均可用来描述二端口网络的端口特性,每一组方程对应于二端口网络的一种端口参数,因此,二端口网络可以用六种端口参数来表征。

由于线性非松弛二端口网络可用包含相应的松弛二端口网络与独立电源的电路来等效,因此松弛二端口网络的端口特性是讨论二端口网络端口特性的关键。本章以后所涉及的二端口网络,若没有特别说明是非松弛的,则皆指松弛二端口网络。

1-2 二端口网络的阻抗参数

对于松弛一端口网络,端口特性方程可以写成 $U(s) = Z(s)I(s)$ 或 $I(s) = Y(s) \times U(s)$ 的形式,这里的 $Z(s)$ 可看成是一端口网络的阻抗参数, $Y(s)$ 则是导纳参数。类似地,二端口网络也可以用阻抗参数或导纳参数来描述。

1-2-1 阻抗参数方程

图 1-6 所示为线性松弛二端口网络的运算电路模型。选择端口电流 $I_1(s)$ 、 $I_2(s)$ 为激励, 将 $I_1(s)$ 、 $I_2(s)$ 视为电流源, $U_1(s)$ 、 $U_2(s)$ 为在 $I_1(s)$ 、 $I_2(s)$ 共同作用

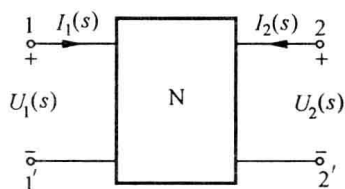


图 1-6 二端口网络的运算电路模型

下的响应, 线性网络的叠加定理为

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

式中, $Z_{11}(s)I_1(s)$ 、 $Z_{21}(s)I_1(s)$ 是由 $I_1(s)$ 单独作用下分别在两个端口产生的电压; $Z_{12}(s)I_2(s)$ 、 $Z_{22}(s)I_2(s)$ 是由 $I_2(s)$ 单独作用下分别在两个端口产生的电压。

式(1-2-1)称为二端口网络的阻抗参数方程, $Z_{11}(s)$ 、 $Z_{12}(s)$ 、 $Z_{21}(s)$ 、 $Z_{22}(s)$ 称为阻抗参数(impedance parameters)或称为 Z 参数。式(1-2-1)也可以写成矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} U_1(s) \\ U_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11}(s) & Z_{12}(s) \\ Z_{21}(s) & Z_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1(s) \\ I_2(s) \end{bmatrix} = \mathbf{Z}(s) \begin{bmatrix} I_1(s) \\ I_2(s) \end{bmatrix} \quad (1-2-2)$$

式中, $\mathbf{Z}(s)$ 称为阻抗参数矩阵或 Z 参数矩阵。

上面是从二端口网络的运算电路模型得出的阻抗参数方程, 阻抗参数是 s 的函数, 网络中不含动态元件时才为常数。阻抗参数方程也可以在正弦稳态电路模型下得出, 图 1-7 所示网络为正弦稳态下的二端口网络, 其阻抗参数方程为

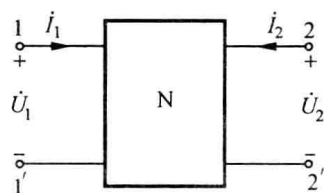


图 1-7 二端口网络的正弦稳态模型

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = Z_{11}(j\omega)\dot{I}_1 + Z_{12}(j\omega)\dot{I}_2 \\ \dot{U}_2 = Z_{21}(j\omega)\dot{I}_1 + Z_{22}(j\omega)\dot{I}_2 \end{cases} \quad (1-2-3)$$

式中, $Z_{11}(j\omega)$ 、 $Z_{12}(j\omega)$ 、 $Z_{21}(j\omega)$ 、 $Z_{22}(j\omega)$ 就是正弦稳态下的阻抗参数, 是 $j\omega$ 的函数, 网络中不含动态元件时为常数。

本章以后的论述均在二端口网络的运算电路模型上进行, 且为了方便书写, 将 $Z_{11}(s)$ 、 $Z_{12}(s)$ 、 $Z_{21}(s)$ 和 $Z_{22}(s)$ 写为 Z_{11} 、 Z_{12} 、 Z_{21} 和 Z_{22} 。对其他参数的讨论亦如此。

1-2-2 阻抗参数的物理含义

阻抗参数的物理含义可以从阻抗参数方程导出。令式(1-2-1)中的 $I_2(s)=0$, 即将图 1-6 中 2-2' 端口开路, 有

此为试读, 需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com