

网络分析与综合  
B. D. O. 安德森 等著

B. D. O. 安德森 等著

# 网络分析与综合

一种现代系统理论研究法

董达生 盛剑桓 译 周沛平 校

人民教育出版社

人  
X  
942  
352

# 网络分析与综合

一种现代系统理论研究法

B. D. O. 安德森 等著

董达生 盛剑桓 译

周沛平 校

人民教育出版社

## 内 容 简 介

本书将网络理论与系统理论有机地结合在一起,系统地 and 深入地阐述了网络分析与综合的基本理论,别具一格。全书共分六个部分,即引论、网络与状态空间方程的基础知识、网络分析、无源性和互易性的状态空间描述、网络综合以及有源  $RC$  网络。其中共分十三章。本书的着重点放在网络综合方面,特别对正实矩阵和正实引理作了详细的论述,并在此基础上阐述网络综合的方法;这种方法在现有的网络分析与综合的教材中尚不多见。

本书可作为高等工科院校电气、无线电、自动化等专业的研究生、高年级学生的参考书,对于综合性大学数学系学生和有关专业的教师和科技人员均有一定的参考价值。

Brian D. O. Anderson and Sumeth Vongpanitlerd  
**NETWORK ANALYSIS AND SYNTHESIS**  
A Modern Systems Theory Approach  
Prentice-Hall, Inc., 1973.

372259

## 网络分析与综合

一种现代系统理论研究法

B. D. O. 安德森 等著

董达生 盛剑桓 译

周沛平 校

\*

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

人民教育出版社印刷厂印装

\*

开本 787×1092 1/16 印张 24.75 字数 540,000

1981年11月第1版 1982年12月第1次印刷

印数 00,001—7,500

书号 15012·0378 定价 2.70 元

## 译 序

网络理论就是研究网络的普遍定律及其计算方法的理论，是一门较成熟的学科。网络理论研究两方面的问题，即网络分析与综合。本书着重于网络综合，而网络综合主要包括三个方面的问题，第一是逼近理论，第二是实现理论，第三是等效理论。本书的重点放在实现理论，主要研究一个物理可实现网络所必须满足的条件和能够求出网络结构及元件数值的充分条件。换句话说，也就是根据所要求的网络特性来设计网络结构和确定网络参数。近年来，由于高速数字计算机的出现与发展，给予网络的分析与综合带来了巨大的变革；应用最优化的方法，使得以往的传统方法显得陈旧。在这种情况下，网络理论与系统理论这两个重要领域互相结合，互相渗透，在网络理论中引入了现代系统理论的基本成果，例如，状态、状态方程、等效性、脉冲与卷积、李雅普诺夫理论、大量地应用矩阵代数描述等等，本书就充分地显示了这种特色，立论较为严谨，独具一格。由此可见，网络理论在内容、方法和风格上经常受到时代的影响而变化着，它与系统理论具有密切的、深刻的联系。从某种意义上讲，网络理论可以认为是受基尔霍夫基本定律约束的系统理论的子学科，本书就是以网络作为典型系统的示例，导出线性系统模型。

随着电子技术的急速发展，本书一方面对于无耗与有耗电抗电路给予一定的重视。另一方面，由于价廉的运算放大器的出现，有源  $R-C$  电路具有实用意义，本书对此亦另辟专章加以论述。目前关心的不仅是设计出能够运行的系统，而且要设计出卓有成效的系统，网络综合也是这样。因此，本书除了阐述了经典理论中分析和设计所使用的传递函数——输入-输出描述之外，主要是论述了现代系统理论的状态空间描述，这种状态空间方法给出有利于数字计算机来计算的范式方程（对于非线性与时变网络更必须使用这种分析方法），考虑了网络（即受控系统）的许多原则问题，如可观测性、可控性和稳定性的问题，根据设计要求求得最优控制的规律问题，还介绍了传递函数和状态空间描述之间的关系。本书的作者有意图将经典的与现代的线性系统理论的概念和方法相互沟通。目前，已有一种新的趋向，创立一种新的、统一的、对两者的优点兼而有之的现代线性系统理论。本书作者就提出了这种创新的、具有推动力的网络理论。

本书详细论述了正实矩阵与正实引理及其有关推论。有很多内容就是本书作者（特别是安德森教授）所发表的论文和专著的概括和总结。在当前的国内外的有关教材中，很少做这样详细的阐述。在正实引理中所叙述的施加在状态空间实现矩阵的条件，对保证正实性质是必要的。本书的作者从各个不同的观点出发来处理这些问题。其中基于变分的问题，就是典型的二次型调节器中最优性能指标的计算问题和求解矩阵形式的黎卡提(Riccati)方程问题。本书将正实引理当做网络综合的手段，此外，还讨论了有界实矩阵，并对有界实矩阵提供一个代数判据。还提出了传递函数矩阵的最小状态空间实现的条件，并将这些结果用于网络综合。全书自始至终一直用状态空间的观点来研究网络问题的，这种独特的风格在现有的教材中是不多见的。

为了了解和研究国外有关课程的情况,为有关课程的教材建设提供资料,我们结合学习和研究国外教材,遂译出这本美国研究生用的教科书。在本书翻译过程中,承蒙周沛平同志对全部译稿进行仔细校订,提出了宝贵的修改意见,特致以衷心地感谢。由于时间仓促,译者水平所限,希望读者对书中不妥与错误之处给予批评指正,不胜感谢。

董达生 盛剑桓

1981年4月

## 序 言

多年来,网络理论已成为电气工程领域中更多地从数学上加以发展的学科之一。最近,它与诸如控制理论及通讯系统理论等学科都具有这种特点。所以,目前人们把它和这些理论都看成是现代系统理论的一个分支。然而,现代系统理论中的一个关键性概念——状态概念,在网络综合中几乎没有给予注意,在网络分析中也只是在最近期间才加以强调。本书的目的是想消除我们所看到的这种不幸情况,把网络分析和综合两个方面的理论都断然置于现代系统理论的范围之中。这是通过强调分析和综合的状态变量研究来达到的。

姑且不谈在现有的文献中缺乏这方面的内容,我们看到许多重要的理由,足以证明这本书中提供的材料是有道理的。首先,用计算机求解网络问题时,经验证明经常以状态变量方法为基础来编写程序,要比诸如以拉普拉斯方法为基础来编写程序要容易和更多使用。第二,状态概念是强调描述一个系统的内部结构,因此,在解决寻求由一个特定阻抗综合出来的所有网络这一类问题时,它是作用显著的方法。这些问题以及许多其他内部结构问题不是经典网络理论力所能及的。第三,本书以相当长的篇幅进行讨论的无源性的状态空间描述,可适用于各种领域,如波波夫稳定性理论、逆最优控制等问题、控制系统中灵敏度降低问题,以及卡尔曼-浦西或维纳滤波(这类广泛应用的课题在教科书范围中必然要加以论述)。第四,对主修系统科学的研究生来讲,用一个共同的研究方法来处理系统科学中的不同分支,要比用不同方法而没有共同基础的那种多重性要好得多。因此,从教学法观点来看,将状态变量引入网络分析与综合中,将会和近来已将状态变量引入通讯系统中那样,同样受到欢迎。

本书中,对无源网络比对有源网络更加强调,这是部分地由于作者个人爱好的反映,同时也部分地由于他们认为,主修系统科学的研究生重视无源系统理论这样一种课题的观点的反映。当然,可以略去带星号的材料而不影响连续性的做法,给讲授者选择以本门做为基础的课程的重点,提供了很大的自由度。只要讲授者愿意,这门课程可以不更多地着重网络方面,而主要讲授一般系统理论,包括无源系统理论。同样地,这门课程也可以着重强调有源网络方面而去掉无源网络综合的许多内容。

本书是给一年级研究生使用的,然而在一定程度上可用作水平高的本科学生或高年级研究生教材。本书要求的基础是具有线性系统导论、大学本科课程中的基本网络知识和能掌握矩阵运算的能力。按照正常的安排,全书可于半学年内完成。如果略去带有星号标志的材料,可以在半学年内较为轻松地学完。作为两个季度的课程,本书可以充裕地完成,特别对一些基础好的学生来说,在一个季度内,适当地选择内容仍可作为一门完整的课程。

# 目 录

译序	1
序言	3

## 第一部分 引 论

第一章 引论	2	1.3 本书的概述	4
1.1 分析与综合	2	参考文献	4
1.2 经典研究法与现代研究法	2		

## 第二部分 网络与状态空间方程的基础知识

第二章 $m$ 端口网络及其端口描述	6	第三章 状态空间方程与传递函数矩阵	42
2.1 引言	6	3.1 集总系统的描述	42
2.2 $m$ 端口网络和电路元件	6	3.2 求解状态空间方程	45
2.3 特勒根定理·无源与无耗网络	12	3.3 状态空间实现的性质	56
2.4 网络的阻抗、导纳、混合与散射描述	16	3.4 最小实现	68
2.5 网络的相互联接	20	3.5 从传递函数矩阵构成状态空间方程	73
2.6 有界实性质	25	3.6 有理传递函数矩阵的次数	82
2.7 正实性质	32	3.7 稳定性	90
2.8 互易 $m$ 端口	38	参考文献	98
参考文献	41		

## 第三部分 网 络 分 析

第四章 用状态空间方程的网络分析	102	4.4 通过电抗移出的状态空间方程——普遍情况	119
4.1 引言	102	4.5 有源网络的状态空间方程	140
4.2 简单网络的状态空间方程	103	参考文献	146
4.3 通过电抗移出的状态空间方程——简单形式	110		

## 第四部分 无源性和互易性的状态空间描述

第五章 正实矩阵和正实引理	150	5.5 正实引理必要条件的证明——基于谱因式分解	170
5.1 引言	150	5.6 正实引理: 其他证明和应用	182
5.2 正实引理的陈述及其充分条件的证明	152	参考文献	186
5.3 正实引理必要条件的证明——基于网络理论成果	156	第六章 正实引理方程组解的计算	189
5.4 正实引理必要条件的证明——基于变分问题	160	6.1 引言	189
		6.2 通过黎卡提方程和二次型矩阵方程的求	

解计算 .....	191
6.3 求解黎卡提方程 .....	193
6.4 求解二次型矩阵方程 .....	196
6.5 通过谱因式分解的求解计算 .....	201
6.6 求正实引理方程的全部解 .....	208
参考文献 .....	218

<b>第七章 有界实矩阵与有界实引理·互易性的状态空间描述</b> .....	220
7.1 引言 .....	220
7.2 有界实引理 .....	221
7.3 有界实引理方程的解 .....	225
7.4 用状态空间术语叙述的互易性 .....	229
参考文献 .....	233

## 第五部分 网络综合

<b>第八章 状态空间综合问题的系统阐述</b> .....	236
8.1 综合问题引言 .....	236
8.2 基本的阻抗综合问题 .....	236
8.3 基本的散射矩阵综合问题 .....	242
8.4 用无耗移出的前序简化步骤 .....	248
参考文献 .....	261
<b>第九章 阻抗综合</b> .....	262
9.1 引言 .....	262
9.2 电抗移出综合 .....	264
9.3 电阻移出综合 .....	273
9.4 互易(非最少电阻数和最少电抗数)阻抗综合 .....	279
参考文献 .....	287
<b>第十章 互易阻抗综合</b> .....	288
10.1 引言 .....	288
10.2 互易无耗综合 .....	288

10.3 通过电抗移出的互易综合 .....	290
10.4 通过电阻移出的互易综合 .....	297
10.5 状态空间的倍亚德综合 .....	303
参考文献 .....	313
<b>第十一章 散射矩阵综合</b> .....	314
11.1 引言 .....	314
11.2 非互易网络的电抗移出综合 .....	315
11.3 互易网络的电抗移出综合 .....	322
11.4 电阻移出的散射矩阵综合 .....	328
参考文献 .....	335
<b>第十二章 传递函数综合</b> .....	337
12.1 引言 .....	337
12.2 非互易传递函数综合 .....	340
12.3 互易传递函数综合 .....	348
12.4 接有规定负载的传递函数综合 .....	353
参考文献 .....	360

## 第六部分 有源RC网络

<b>第十三章 有源状态空间综合</b> .....	364
13.1 有源RC综合引言 .....	364
13.2 作为电路元件的运算放大器 .....	365
13.3 用加法器与积分器所作的传递函数	

综合 .....	369
13.4 双二次电路 .....	373
13.5 有源RC综合的其他研究方法 .....	376
参考文献 .....	378

后记 未来展望 .....	380
汉英名词对照 .....	381



# 第一部分

## 引 论

什么是网络分析与综合的现代系统理论的研究法？在这部分中，开始回答这个问题。

# 第一章 引 论

## 1.1 分析与综合

工程师的两个互为补充的任务就是分析与综合。在分析问题中,一般是对已知的实际系统的描述,也就是,已经知道系统有什么样的器件和如何组成的,以及支配每一器件的性状的物理定律。一般是要求进行一些运算,以预见系统的性状,比如,对某一规定的输入,可预见其响应。而综合问题却与此相反。一般是已知系统应有的运行特性,要求设计一个系统来达到这个指定的运行特性。

在本书中,我们对网络分析与综合都予以考虑。更明确地说,这种网络就是电网络,而且一直假定为:(1)线性;(2)非时变;(3)包含有限数目的集总元件。通常,这种网络也假定为无源的。我们还设想读者已了解网络的线性与非时变的涵义。在第二章中,我们将更精确地定义那些涉及到的元件的类别以及无源性的概念。

在本书范围内,分析问题变成这样一种问题,即了解组成网络的元件的集合、这些元件的相互连接方式、与储能元件相联系的初始条件的集合、以及外接电压源与电流源所提供的激励的集合。问题就是求出该网络的响应,即求出与网络元件相关联的电压和电流的最终结果的集合。

与此相反,处理综合问题,要求我们从什么响应是由什么样的激励所引起的陈述开始,而后要求我们确定一个网络,即确定一组网络元件的集合及其相互连接的设计图,该网络将提供所要求的激励响应特性。自然,在适当时候,我们将以更显明的字句来同时阐明综合问题与分析问题这两个方面。读者一定认为上面的说明是粗略的,但暂时只能满足于此。

## 1.2 经典研究法与现代研究法

控制理论与网络理论在历史上就是紧密地联系在一起,因为在这两个领域中所使用的研究问题的方法经常是很相似的,或者是相同的。然而,控制理论的最近发展有超过网络理论发展的趋势。控制理论发展的广度及其重要性,甚至对在这个领域里的大量知识都要附加上“经典的”与“现代的”标记。与现代控制理论相平行发展起来的网络理论却显得贫乏,本书所论及的就是这种网络理论。

现代控制理论与经典控制理论之间的差异在许多方面是模糊不清的。尚不能准确地把它们的分界线画出来,如果说频域法(包括拉氏变换)属于经典控制理论,而状态空间法属于现代控制理论,这种说法是合理的。在控制领域内给出了这样的划分,将这种划分转用到网络理论的领域,似乎是可以理解的。所以,可以认为经典网络理论包括了频域法,现代网络理论包括了状态空间法。

在本书中,我们的目的是强调应用状态的概念,并通过状态变量方程对系统进行描述的方法

来研究网络。用这种方法,我们将考虑分析与综合两个方面的问题。

正如上面指出的那样,现代理论着眼于状态空间描述,而经典理论则趋于注重拉氏变换的描述。这种不同所导致的结果是什么?它们是多方面的,有些如下所述。

首先,也是最重要的,就是网络或系统的状态变量描述方法都强调该系统的内部结构和系统的输入-输出特性。这与网络或系统的拉氏变换描述法(包括传递函数及其他)只强调输入-输出的特性是不同的。在处理很多重要问题时,必须考虑网络的内部结构。比如,对于规定的一对激励-响应进行综合的网络中,使电抗元件数目最小化,就是一个包含研究网络内部结构的细节的问题。另外一些贴切的例子是,使网络的总电阻最小化,研究储能元件或电抗元件的非零初始条件对网络的外部可观性能所产生的影响,以及分析由于器件值的变动而涉及的电路外部可观性能的灵敏度。试图用经典网络理论作为工具来解决所有这些问题是不合逻辑的(尽管肯定地对某些问题会取得一些进展)。但另一方面,藉助于现代网络理论和状态变量法来研究这些问题,那将是很自然的。

经典的与现代的研究方法另一些重要区别,简要地概括如下:

1. 经典的综合研究法通常依赖于应用巧妙地设计出来的算法来完成综合,其基本综合结构能变动的数目常常受到严格的限制。而现代的综合研究法通常依靠求解一种思路正确、易于列出公式的问题,而不需藉助于太多的求解技巧或机敏的技术手段。同时,现代研究法经常允许直接求出网络综合问题的无限多个解。

2. 网络分析的现代研究法很理想地适合于应用数字计算机。状态空间微分方程的时域积分,比起拉氏正变换与逆变换的运算,一般是较易完成的。

3. 现代研究法强调网络描述的代数形式,并用矩阵代数求解综合问题。而经典研究法更愿意使用复变分析这个工具。

现代研究法并不是在一切方面都优于经典研究法。比如,在经典法中的伯德图和零极点图所提供的直观的图形,在现代研究法中都消失了。当然,有些人要说,现代研究法就包括经典研究法在内。而现代研究法现在还有待实现它的全部诺言。上面,我们已列出了一些能合乎逻辑地应用现代研究法的问题,其中有一些问题尚待解决。因此,在网络分析与综合的现代系统理论研究法的目前发展阶段,我们认为经典的与现代的两种研究方法最好被看作是相辅相成的。这本书包括经典法非常少这一事实,可能要受到质问。但为回答这个质问,我们提供了网络分析与综合方面的一批参考书[1—4],这些书至少在综合方面大量地介绍经典研究法,有时却略去现代研究法。

网络分析与综合的经典研究法已经发展了好多年。实质上,所有分析问题都已经解决了,而综合问题研究的衰落,是由于大部分能解决的综合问题可以说都已经解决了。有实际意义的成果出现了很多,但却留下许多实用问题迄今不能解决。正如上面所指出的,现代研究法还没有解决全部期待解决的问题;特别是解决实用问题是很少的,虽然在一些单独问题上,比如第十三章讨论的有源网络综合问题,取得了引人注目的结果。当前还缺乏确实的成效,应归因于从事现代研究法所花费的力量相对地讲还太小;现代网络理论如与现代控制理论相比较,还只处于摇篮

时代,至多也不过处于童年时期,我们一定期待见到随着它的成熟而带来的成果。

### 1.3 本书的概述

除了第一部分引论以外,全书共分为五个部分。第二部分的目的在于提供两个方面的基础知识,首先是 $m$ 端口网络及其描述方法;其次是状态空间方程及其与传递函数矩阵的关系。第二章讨论了 $m$ 端口网络,我们处理了电路元件的分类,还有网络的性质,如无源性、无耗性、互易性、以及网络的导抗、混合和散射矩阵的描述方法,还有一些重要的网络连接方式。第三章讨论了用状态空间方程对集总系统的描述,状态空间方程的解法,还讨论了一些性质,如可控性、可观性、稳定性,以及状态描述与传递函数矩阵描述之间的关系。

第三部分是篇幅相当长的一章,讨论了通过状态空间法进行的网络分析。我们讨论了三种分析方法,即:无源网络的分析,最复杂、最普遍水平上的无源网络分析,以及有源网络的分析。我们没有明显地使用网络拓扑来提供这部分材料。

第四部分涉及到将无源性与互易性的概念转译成状态空间术语。第五章讨论了现代系统理论的一个基本结果,我们称它为正实引理,这个引理在诸如非线性系统稳定性、最优控制等领域内以及网络理论中都是非常重要的。第六章涉及到建立一种计算程序,来求解出现在正实引理中的方程。第七章包含两方面的内容,一个是有界实引理,它是正实引理的第一个“表兄弟”;另一个是互易性的状态空间描述,互易性首次是在第二章引出的。

第五部分涉及无源网络综合,主要靠第四部分的正实引理的材料。第八章介绍综合问题的普遍研究方法,并安排了一些必要的预备性材料。第九章与第十章分别包括了阻抗综合和互易阻抗综合的内容。第十一章研究了散射矩阵综合,第十二章研究传递函数综合。

第六部分只有一章,研究有源 $RC$ 网络综合,即用有源元件、电阻器与电容器进行综合。如本书的前面几章一样,只考虑用状态空间法。

### 参 考 文 献

- [1] H. J. CARLIN and A. B. GIORDANO, *Network Theory*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1964.
- [2] R. W. NEWCOMB, *Linear Multiport Synthesis*, McGraw-Hill, New York, 1966.
- [3] L. A. WEINBERG, *Network Analysis and Synthesis*, McGraw-Hill, New York, 1962.
- [4] M. R. WOHLERS, *Lumped and Distributed Passive Networks*, Academic Press, New York, 1969.

## 第二部分

### 网络与状态空间方程 的基础知识

在这一部分中,主要考虑为将出现在本书以后的各章之中的主要部分奠定基础。特别是,我们介绍了多端口网络的概念,还复习了状态空间的概念及其与传递函数之间的关系。可以肯定地说,读者对这部分所涉及的许多概念都已见过,因而,只以适当的简洁的形式提出这部分材料。

## 第二章 $m$ 端口网络及其端口描述

### 2.1 引言

本章的主要目的是定义网络的涵义，特别是要从综合观点来定义我们感兴趣的那些网络的“子类”。这就要求列出容许的电路元件的类型，这些元件是要在一些感兴趣的网络中出现的。还要求指出各种网络描述的存在性，主要是用传递函数矩阵所作的端口描述。

我们将定义电路元件与网络的无源性、无耗性与互易性这些重要概念，与此同时，还要将这些概念与网络端口描述的性质联系起来。

本章的 2-2 节给出了如  $m$  端口网络、电路元件、电源、无源性与无耗性这样一些概念的基本定义。在参考书[1]中，可以见到对这些概念所做的公理性的介绍。2-3 节叙述了特勒根定理，这个定理证明了一个有用的方法，可用来解释那些加在电路元件的约束(如无源性和以后讲的互易性)对在网络端口上观察到的网络特性的影响。这些材料见于各参考书，例如[2, 3]。在 2-4 节中，我们研究了使用传递函数矩阵对网络的各种端口描述法，还列举了这些方法在能够应用的地方它们彼此之间的关系。其次，在 2-5 节讨论了一些常遇到的将网络连接起来构成更加复杂网络的方法。在 2-6 节与 2-7 节中，我们介绍了传递函数矩阵的有界实性质和正实性质的定义，并将这些性质与网络的端口描述联系起来。讨论了有界实性质和正实性质的特定的性质，即无耗有界实性质和无耗正实性质。还叙述了其传递函数矩阵具有这种性质的网络的“子类”。在 2-8 节中，我们定义了互易性的概念，并研究了当网络全部由互易的电路元件组成时、网络的端口描述所具有的性质。2-4 节中的大部分材料可在参考文献[1—3]中的某一本中找到。

我们可以用两点陈述来概括本章拟论述的内容：

1. 我们要提供网络的各种端口描述，来代替由一系列元件和由这些元件按设计图所组成的网络描述。
2. 我们将一个网络中的各单独器件的约束关系转化为网络的端口描述的约束关系。

### 2.2 $m$ 端口网络和电路元件

#### 多口网络

一个  $m$  端口网络是一个实际装置，它包含了一组电路元件或部件，按照某一设计图而连接组成的。与  $m$  端口网络相关的是称作“端钮”的接入点，它们成对地形成端口。在网络的每一端口上，有可能连接其他电路元件，也有可能连接另一网络的端口，或者某种本身具有两个端钮的激励装置。一般来讲，在每一对端钮上将有一电压，并且由端口的一个端钮流出来的电流，必等于流入另一个端钮的电流。如第  $j$  端口用端钮  $T_j$  与  $T'_j$  表示，那么，对每一个端口  $j$ ，可指定  $v_j$  及

$i_j$  两个变量来分别表示  $T_j$  相对于  $T'_j$  的电压及从  $T_j$  流向  $T'_j$  的电流, 详见图 2.2.1a。简化了的表示法如图 2.2.1b 所示。这样, 与  $m$  端口网络相联系的是两个时间的向量函数, 即端口电压(向量)  $v = [v_1, v_2, \dots, v_m]'$  与端口电流(向量)  $i = [i_1, i_2, \dots, i_m]'$ 。  $m$  端口网络的实际结构一般约束了(常常以一种非常普遍方式)两个向量变量  $v$  与  $i$ , 反之, 对  $v$  与  $i$  的约束可用来完整地说明  $m$  端口的外部可观测特性。

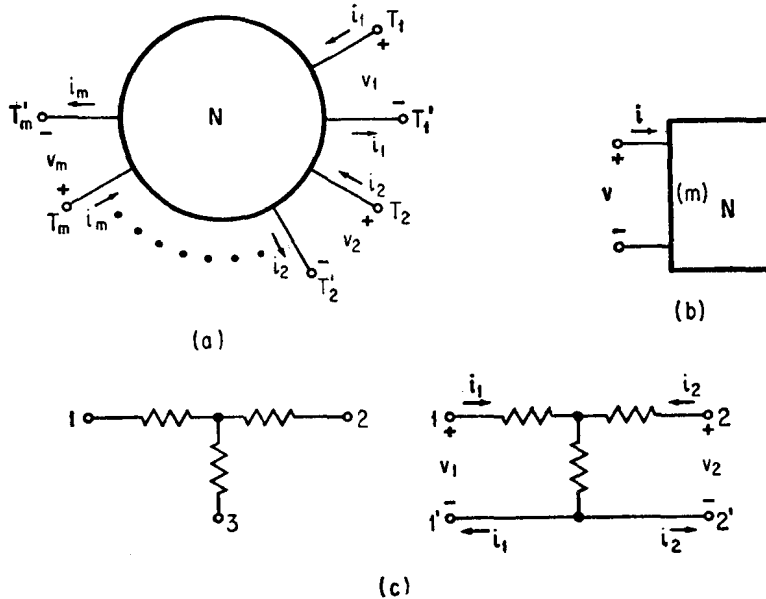


图 2.2.1 用有关端口表示的网络

通过上述说明之后, 请读者注意下面重要的两点:

1. 给定一个网络, 用一系列的端钮表示, 而不用端口表示, 除非在所有运行条件下, 流入这一对中的一个端钮的电流都等于流出另一端钮的电流, 否则不允许将这对端钮组合起来并称之为端口。
2. 给定一个网络, 用一系列的端钮表示, 而不用端口表示, 如果选择“端钮对”适当组成端口并恰当地约束其激励, 就完全可允许两个端口共同包含一个端钮。(见图 2.2.1c, 那是一个将三端钮网络改画为二端口网络的例子)。

### 网络元件

现将感兴趣的一些电路元件列于图 2.2.2 中, 并给出确定的定义。(另外一个电路元件, 即双口变压器的推广, 也将很快给出定义)。将这些元件连接起来便组成网络, 我们将以极大的注意来研究这种网络。要注意到, 每一个元件也都可以理所当然地看作是一个简单网络。例如, 图 2.2.2a 所示的简单的单口网络——电阻器, 可用电压  $v$  与电流  $i$  来描述, 其关系式为  $v = ri$ , 且  $i$  或  $v$  可以任意选取。

在所列的电路元件中, 可能只有一种不熟悉的元件, 就是回转器。在音频范围, 回转器是

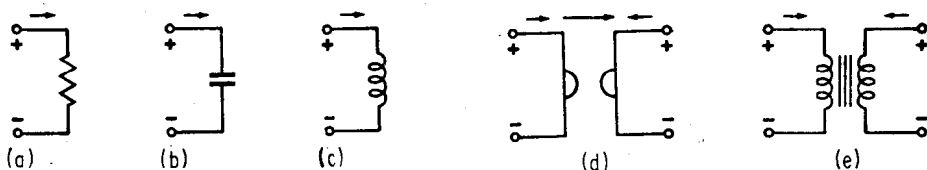


图 2.2.2 基本电路元件的表示法及其定义

一种特别的、非常理想的器件，因为它可由电阻器、电容器和晶体管或其他有源器件所组成。从某种意义上讲，使用这种元件所构成的双口网络，其运行特性与图 2.2.2d 所示的理想器件的运行特性是很接近的。与此不同，在微波频率的情况下，所设计的回转器对于它们的运行来说不包含使用有源元件（以及由此所需的外部电源）。（然而它们需一个永久磁场。）

### 无源电路元件

今后，我们几乎仅考虑具有恒定元件值的电路元件，对电阻器、电感器与电容器等器件来说，它们的元件值是非负的。所有这些元件（包括变压器与回转器元件）的类型都可称为是线性、集总、非时变与无源的。线性这个术语是来自这样的一个事实，即端口变量是由一线性关系约束的；集总这个词，是因为端口变量是通过“无记忆”的变换或通过常微分方程（而不是偏微分方程或带时滞的常微分方程）来约束的；非时变这一术语是因为元件值是常数而引起的。使用无源这一词的理由并不十分明显。一个器件的无源性可定义如下：

假定一个器件在任一时刻  $t_0$  未储能，则连接这个器件的任何电源向该器件所供给的总能量，在任一时间间隔  $[t_0, T]$  内计算出来的值，总是非负的。

因为在时间  $t$  时，向一对端钮送入的瞬时功率为  $v(t)i(t)$ ，其惯用的符号如图 2.2.1 所示，则对于图 2.2.2 中的单口器件的无源性要求对于所有初始时间  $t_0$ ，所有的  $T \geq t_0$ ，有

$$\mathcal{E}(T) = \int_{t_0}^T v(t)i(t)dt \geq 0 \quad (2.2.1)$$

且所有可能的“电压-电流对”都满足由器件所加的约束条件。当且仅当  $r(R)$ ,  $l(L)$  与  $c(C)$  是非负时，才能满足具有实常数  $r$ ,  $l$  与  $c$  的 (2.2.1) 式，这一点是容易校核的（校核要求在习题中去做）。

对于已定义过的多口电路元件，即双口变压器与回转器，或尚未定义的多口变压器，(2.2.1) 式可改写为

$$\mathcal{E}(T) = \int_{t_0}^T v'(t)i(t)dt \geq 0 \quad (2.2.2)$$

注意， $v'(t)i(t)$  即是  $\sum v_j(t)i_j(t)$ ，代表流入元件的瞬时功率，是将每一个端口流入的功率相加而算出来的。

对于变压器与回转器而言，在所有的时间  $t$  与所有可能激励的情况下，关系式  $v'i = v_1i_1 + v_2i_2 = 0$  一直成立。这就意味着永远不可能有净功率流入变压器与回转器内，因此，永远不能具有非零值的储能。所以，(2.2.2) 式满足  $\mathcal{E}(T)$  恒为零这一条件。



## 无耗电路元件

与无源性相联系的概念是无耗性。粗略地说,如果一个电路元件是无源的,而且如果当一定数量的能量输入到这个元件时,而这些能量又会全部送回去,这种元件就是无耗的。更准确地说,无耗性要求无源性,而且假设在  $t_0$  时为零激励,则

$$\mathcal{E}(\infty) = \int_{t_0}^{\infty} v(t)i(t)dt = 0 \quad (2.2.3a)$$

或者,对于多口电路元件,则为

$$\mathcal{E}(\infty) = \int_{t_0}^{\infty} v'(t)i(t)dt = 0 \quad (2.2.3b)$$

对于所有相容的成对的  $v(\cdot)$  与  $i(\cdot)$ , 它们也是平方可积的

$$\int_{t_0}^{\infty} v'(t)v(t)dt < \infty \quad \int_{t_0}^{\infty} i'(t)i(t)dt < \infty \quad (2.2.4)$$

回转器和变压器都是无耗的,其理由如前所述,对于所有的时间  $T$ ,  $\mathcal{E}(T) = 0$ , 而且与激励无关。电容器和电感器也是无耗的(其证明可作为习题)。

我们在构造  $m$  端口网络时,要限制元件的个数是有限的。一个  $m$  端口网络,如由线性、集总、非时变的和无源的有限数目的器件所组成,则称这个网络是一个有限数、线性、集总、非时变的和无源的  $m$  端口;除非另有说明,我们将简称这个网络为  $m$  端口。如果  $m$  端口只由无耗器件组成,即称为无耗  $m$  端口。

## 多口变压器

现在提供了一种理想的双口变压器的推广,即理想多口变压器;这是贝莱卫奇(Belevitch)著作(参考文献[4])中提出的。不久可以看到,在综合方法的讨论中,多口变压器确实在将要论述的几乎所有综合方法中都起着重要作用。

研究图 2.2.3 中所示的  $(p+q)$  端口变压器  $N_T$ 。图 2.2.3a 表示一个简便的符号表示法,经常用它来代替图 2.2.3b 所示的那种详细排列的图形。在这个图中,标明了在  $q$  个次级端口的副边电流  $(i_2)_1, (i_2)_2, \dots, (i_2)_q$  和副边电压  $(v_2)_1, \dots, (v_2)_q$ ; 还标明了  $p$  个初级端口的原边电流  $(i_1)_1, (i_1)_2, \dots, (i_1)_p$  和原边电压之一的  $(v_1)_1$  (从图中可一目了然地看出其他原边电压的情况)。用符号  $t_{ij}$  表示匝比,该图形可用下列的关系式来描述,即

$$(v_1)_i = \sum_{j=1}^q t_{ji}(v_2)_j \quad i = 1, 2, \dots, p$$

和

$$(i_2)_i = -\sum_{j=1}^p t_{ij}(i_1)_j \quad i = 1, 2, \dots, q$$

如用矩阵符号,则

$$v_1 = T'v_2 \quad i_2 = -Ti_1 \quad (2.2.5)$$