

线性网络 的机辅设 计与综合

3

〔美〕N.巴拉巴尼安 I.A.扎卡特著 樊北鵬主译

内 容 简 介

本书是一本结合实用的,反映近代网络理论发展和设计成就的专著,译自 Norman Balabanian 和 Theodore A. Bickart 合著的“Linear Network Theory”一书(1981年出版)。

本书共分五章。前二章是讨论计算机辅助设计的问题。其中第一章讨论特勒根定理与伴随网络,它是第二章具体讨论线性电阻网络与动态网络的计算机辅助设计的基础。后三章是讨论网络综合部分,包括无源网络综合与有源网络综合,它们分别在第四章与第五章讨论。第三章讨论能量函数与正实函数,它是为讨论网络综合作准备。本书在每部分结束后都精心安排了大量的各种类型的作业题目。这些题目不仅可以帮助读者掌握本书的内容,并且可帮助读者在本书内容的基础上进一步深入。因此这本书很适宜于作为大学生高年级或研究生的教科书,也可作为工程技术人员的参考书和自学用书。

线性网络的机辅设计与综合

〔美〕N.巴拉巴尼安 T. A. 比卡特 著

吴兆熊 主译

*

高等教育出版社出版

新华书店上海发行所发行

祝桥新华印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 9.375 字数 224,000

1987年4月第1版 1987年9月第1次印刷

印数 00,001—2,220

书号 15010·0651 定价 2.10 元

译者的话

美国 Syracuse 大学 N. Balabanian、T.A. Bickart 及 Illinois 大学已故的 S. Seshu 等三位作者，在早些时候合写了一本“Electrical Network Theory”，于 1969 年出版，该书已由西安交通大学夏承铨同志等译成中文，由高等教育出版社出版。这是一本很系统、很有水平的书。后来，Balabanian 教授与 Bickart 教授又合写了“Linear Network Theory”一书，于 1981 年出版。该书由四个部分组成，它们是：分析、性能、设计和综合。这同样是一本很有价值的书，值得将它介绍给我国读者，这是我们要翻译这本书的起因。

著者在前言中指出：1981 年的书与早期的（1969 年）那本比较，“有一些共同的特点，但有两方面的主要差别：(a) 它不包括非线性和时变网络部分，(b) 它包括了早期书中没有讨论到的一些较重大的题目，即伴随网络、计算机辅助设计以及有源 RC 网络综合”。这些内容就是该书后二部分的主要内容。

鉴于上述情况，并考虑到 1981 年的这本书的前二部分内容在一般电路理论的教科书或专著中都可查到，特别是这前二部分是与 1969 年的书重复的，因此我们决定只选译该书有新的实质性内容的后二部分。但是为了方便读者阅读，以及为了可以反映原书的整体结构，我们将本书涉及到原书前二部分的内容，均编写成附录，以备查阅。该书后二部分：设计与综合的全名为“计算机辅助设计”与“网络综合”，故将我们这本书定名为《线性网络的机辅设计与综合》。

本书共分五章。前二章是讨论计算机辅助设计的问题。其中第一章讨论特勒根定理与伴随网络，它是第二章具体讨论线性电

阻网络与动态网络（含储能元件的网络）的计算机辅助设计的基础。后三章是讨论网络综合部分，包括无源网络综合与有源网络综合，它们分别在第四章与第五章讨论。第三章讨论能量函数与正实函数，它是为讨论网络综合作准备。本书在每部分结束后都精心安排了大量的各种类型的作业题目。这些题目不仅可帮助读者掌握本书的内容，并且可帮助读者在本书内容的基础上进一步深入。因此这本书很适宜于作为大学生高年级或研究生的教科书。

本书是由T. A. Bickart 教授 1981 年暑假来华讲学时带给我们的，该书当时尚未正式出版，是属于清样版本，因此在印刷上存在一些错误，我们在翻译时将发现的已作纠正，在译文中就不再一一注释了。

本书第一章与第二章由吴兆熊同志翻译，第三章由李中民同志翻译，第四章由阎鸿森与王婉南同志翻译，第五章由陈炳镛同志翻译，第一篇的作业题目由肖湘予同志翻译，第二篇的作业题目由田惠生同志翻译。全书由吴兆熊同志校审。译文中难免有疏忽和错误之处，竭诚希望读者帮助指出。

1983 年 5 月

原 序

本书在线性图论理论基础上,以及利用矩阵矢量表达形式的分析方法对线性网络理论提供了综合性的和严谨的推理和论述。本书并不企图提供所需要的数学工具,如矩阵理论、复变函数、拉氏变换、数值方法或程序设计。然而,在这些领域中的一些参考书则已写入文献目录中(见附录 B)。本书将有源非互易器件(受控源、回转器、运算放大器、一般变换器等)与无源互易元件作平行的讨论。对特勒根定理与伴随网络的谨严的论述是作为所涉及内容很广泛的计算机辅助设计章节的基础。

本书对分析与综合二者都进行了讨论,也包括了有关近代有源 RC 网络综合方法的较大篇幅的一章。灵敏度的概念一方面被用来确定特定网络实现的参数值变化所引起的响应变化量,另一方面也作为计算机辅助设计中最优化方法的基础。

本书还用一定篇幅来描述将线性网络表述为多端点和多端口的的方法以及由这些方法所展现出来的网络的解析性质。所讨论的专题包括二端口网络矩阵、不定导纳矩阵、散射参数以及网络函数的频域和时域表达。

在导论一章以后,本书的其余部分分成四部分:分析,性能,设计和综合共四个主题(即本书的次标题),每一部分专门讨论其中的一个主题。本书的特点是要学生完成逐步升级的和有次序的作业。书的每一部分(以及导论一章)都包括要求学生完成的几种类型的作业题目。练习题(Exercises)是关于该部分所讨论的各种概念和方法的常规练习。习题(Problems)包括若干方面:将所得到的结论推广到不同的或更复杂的情况,对附带的结论的理论推导,以及本来或许应该写入课本中,但由于篇幅关系而没有写入课

本的内容。程序题 (Programs) 用来提示用于特定分析或设计方法中的计算机主程序或子程序的推演。最后, 大型作业题 (Projects) 引导学生研究其它文献中的指定章节, 使学生熟悉未包括在本书中的令人感兴趣的题目。

这本书和我们早期的一本“电网络理论”(该书已绝版)有些共同的特点。然而, 却有在若干重要方面的差别: (a) 它不包括非线性网络和时变网络的论述, (b) 它包括了早期书中没有讨论到的一些较重大的题目, 即伴随网络、计算机辅助设计以及有源 RC 网络综合。本书并提供了一个很广泛的文献目录, 该目录是按专题题目分类的。

本书被用来作为 Syracuse 大学研究生低年级的课本。诚然, 也可有选择地作为大学生高年级的课本。

在过去几年中, 我们曾从许多同事和学生的议论和评论中得到益处, 我们在此对他们表示感谢。

N. Balabanian

T. A. Bickart

1980. 2. 22

目 录

第一篇 计算机辅助设计

第一章 特勒根定理和伴随网络.....	1
1.1 特勒根定理	1
1.2 互易网络	5
1.3 相互互易网络和伴随网络	13
第二章 计算机辅助网络设计.....	25
2.1 有参量增量的网络	25
2.2 响应变化与参量变化的关系	29
2.3 伴随网络的应用	31
2.4 线性电阻网络的 CAND	35
2.5 线性动态网络的 CAND	58
作业题目	
练习题.....	74
习题.....	87
程序题.....	91
大型作业题.....	92

第二篇 网络综合

第三章 能量函数与正实函数.....	94
3.1 能量函数	95
3.2 无源网络	97
3.3 阻抗函数.....	101
3.4 正实函数.....	105
3.5 二端口参数.....	118
第四章 无源(LC 、 RC 和 RLC)综合.....	123

4.1	电抗函数	123
4.2	电抗函数的实现	128
4.3	霍尔维茨 (Hurwitz) 多项式与电抗函数	135
4.4	RC 导抗函数 (immitance functions)	137
4.5	RC 导抗的实现	142
4.6	RL 一端口网络	146
4.7	RLC 一端口网络	146
4.8	无耗、互易的二端口网络综合	152
4.9	RC 二端口网络的可实现性	158
4.10	转移函数, 无源网络综合	161
第五章	有源 RC 网络综合	183
5.1	电感模拟	183
5.2	直接用一般变换器实现	188
5.3	双二阶电路	196
5.4	级联设计	229
5.5	运放频率特性对实现的影响	233
作业题目		
	练习题	238
	习题	244
	大型作业题	256
附录 A	FORTTRAN 和 APL 程序	257
附录 1	图的矩阵表示与基尔霍夫定律	262
附录 2	网络的互易性	271
附录 3	网络的支路电压电流关系	272
附录 4	二端口网络参数的计算	273
附录 5	网络的无源性	275
附录 6	二端口网络的参数	276
附录 7	二端口网络的并联和串联	281
附录 8	非最小相移函数表示为最小相移函数与	

全通函数之积	283
附录 9 回转器	284
附录 10 一般变换器	286
附录 11 Fialkow-Gerst 条件	289

第一篇 计算机辅助设计

第一章 特勒根定理和伴随网络

网络理论所依据的基本拓扑关系是基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律；在有关电工基础的课程中已详细地讨论了这两个定律。有一个与这两个定律同样有力的关系存在，它被称为特勒根定理，首次发表于 1948 年。正如基尔霍夫定律是研究一个网络中的电流平衡关系和电压平衡关系一样，这个定理是研究一个网络中的功率平衡关系。因为功率是与电压和电流有关的，所以，两个基尔霍夫定律和特勒根定理彼此相互有关并不至于令人感到意外；正如我们将要看到的，其中任何两个关系蕴涵了第三个关系。具有更重大意义的是，特勒根定理能够用来把单个网络的互易性概念扩展到二个不同网络的相互互易性概念。这样就引出了伴随网络的概念，而伴随网络在计算机辅助设计中起着重要作用。

1.1 特勒根定理

能量守恒概念很早就为人们所熟悉。所以当特勒根在 1948 年发表似乎是证实这个基本定律的文章时，并未引起多大的震动。他的基本成果的更深远的含义，一直到相当久以后才被人们领悟。我们首先来推导特勒根定理（简写为 TT）的基本形式。

考虑一个含源网络 $\mathcal{N}$ 。假定对于所有支路（包括任何含源支

路),电压和电流的参考方向都是负载参考方向^①,则传送到网络 $\mathcal{N}$ 的所有支路的瞬时功率的总和为

$$p = \sum_{\text{所有支路}} v_k i_k = \mathbf{v}' \mathbf{i} \quad (1)$$

利用第二种形式的 KCL 的表达式 (见附录 1 表 A1-1) $\mathbf{i} = \mathbf{B}' \mathbf{i}_c$, 我们可以把式(1)转变成下列形式:

$$p = \mathbf{v}' (\mathbf{B}' \mathbf{i}_c) = (\mathbf{B} \mathbf{v})' \mathbf{i}_c \quad (2)$$

最右边的等式是恒等关系 $\mathbf{v}' \mathbf{B}' = (\mathbf{B} \mathbf{v})'$ 的结果。但是按照附录 1 表 A1-1 中第一种形式的 KVL 表达式 $\mathbf{B} \mathbf{v} = 0$, 因此

$$p = \mathbf{v}' \mathbf{i} = 0 \quad (3)$$

这个结果,即 TT 的基本功率形式,可以如此陈述: 在任何瞬时传送到一个网络所有支路的功率等于零。

这个结果看来并不深奥。因为它是和能量守恒原理一致的,它不至令人感到太意外。但是,我们现在即要讨论的它的进一步广义化,却确有某些令人感到意外的因素。

考虑两个拓扑等同的网络 $\mathcal{N}$ 和 $\hat{\mathcal{N}}$ 。所谓拓扑等同,指的是两个网络由相同的图表达,但组成图的各支路的元器件并不一定相同。或者,即使某些对应的元器件相同,它们的参数值可以不同。网络 $\hat{\mathcal{N}}$ 的电压和电流变量将冠以“^”符号。让我们考察 $\hat{\mathbf{v}}$ (网络 $\hat{\mathcal{N}}$ 的电压矢量)和 $\mathbf{i}$ ($\mathcal{N}$ 的电流矢量)的内积;有,

$$\hat{\mathbf{v}}' \mathbf{i} = \hat{\mathbf{v}}' (\mathbf{B}' \mathbf{i}_c) = (\mathbf{B} \hat{\mathbf{v}})' \mathbf{i}_c = (\hat{\mathbf{B}} \hat{\mathbf{v}})' \mathbf{i}_c \quad (4)$$

或

$$\hat{\mathbf{v}}' \mathbf{i} = 0 \quad (5a)$$

在(4)的右边,所有步骤,除了最后一步外,都与(1)和(2)中的对应

① 当电流参考方向箭头沿着支路旁边画出,若电压参考方向的正号是在电流参考方向的尾端,称为负载参考方向,也称为关联参考方向。——译者注

② 黑体字代表矩阵(包括矢量)。——译者注

步骤相同。等式 $\mathbf{B} = \hat{\mathbf{B}}$ 是 $\mathcal{N}$ 与 $\hat{\mathcal{N}}$ 拓扑等同的结果。虽然表面上来看(5a)与(3)很象,但意义是不同的。乘积 $\hat{\mathbf{v}}'\mathbf{i}$ 与传送到一个网络的功率毫无关系,因为各电压是属于一个网络的,而各电流则是属于另一个网络的。不过, $\hat{\mathbf{v}}'\mathbf{i}$ 在量纲上是功率。所以常常称它为与拓扑等同网络有关的准功率^① (quasi-power)。因此(5a)可以如此陈述:与一对拓扑等同的网络有关的准功率等于零。

前面的结果仅仅是从基尔霍夫定律和两个网络的拓扑等同性产生的。它与网络中的元器件无关。因此, $\mathcal{N}$ 可以是非线性的电阻网络,而 $\hat{\mathcal{N}}$ 可以是线性动态网络。并且,此结果并不决定于分析所用的域。例如, $\mathcal{N}$ 和 $\hat{\mathcal{N}}$ 二者可以都在时域分析,或者都在频域分析,或者一个在时域分析,而另一个在频域分析(见练习2)。为了强调这点,让我们象习惯上那样,用大写字母表示频域变量,重写上面的特勒根定理的一般表达式如下:

$$\hat{\mathbf{V}}'\mathbf{I} = 0 \quad (5b)$$

$$\hat{\mathbf{V}}'\mathbf{i} = 0 \quad (5c)$$

$$\hat{\mathbf{v}}'\mathbf{I} = 0 \quad (5d)$$

因此,以(5c)为例,如果将一个线性网络的支路电压的拉氏变换与另一个非线性的,但拓扑上与前者等同的网络的对应支路的电流(作为时间的函数)相乘,乘积的和将是零。

不必说, $\mathcal{N}$ 在拓扑上当然是等同于它本身的,于是,如果取 $\hat{\mathcal{N}}$ 为 $\mathcal{N}$,则从(5a)得出(3),它就是传送到一个网络的功率的条件。

按照特勒根定理,确立如下关系是可能的:在正弦稳态条件下,传送到一个网络的复功率也将并不意外地是零。为此,令 $\mathbf{V}$ 和 $\mathbf{I}$ 表示 $\mathcal{N}$ 中各支路电压和电流相量的矢量。然后令 $\hat{\mathcal{N}}$ 与 $\mathcal{N}$

^① quasi-power 也可翻译成“拟功率”。——译者注

除了其中的电源外均相同； $\hat{\mathcal{N}}$ 中的电源相量则是 $\mathcal{N}$ 中电源相量的复数共轭。在这种情况下，我们发现，(正如所期望的)从(5b)得

$$\mathbf{V}^* \mathbf{I} = 0 \quad (6)$$

到此为止所讨论的特勒根定理的各种形式称之为强形式。有可能推导出别的较弱的形式。如果互换 $\mathcal{N}$ 和 $\hat{\mathcal{N}}$ 的位置，准功率可以写成另一种形式

$$\mathbf{v}^{\wedge} \mathbf{i} = 0 \quad (7)$$

现在，让我们从(5a)减去(7)得到

$$\hat{\mathbf{v}}' \mathbf{i} - \mathbf{v}^{\wedge} \mathbf{i} = 0 \quad (8)$$

(8)是特勒根定理的准功率的差形式。它被称为弱形式，因为它可以从前面的(强)形式推导出来，但是反过来则是不可能的(另一种弱形式见习题1)。

我们已经看到，给出两个基尔霍夫定律，特勒根定理随之而得。但是它们三者间的关系甚至更强，正象在下面的定理中所表达的：KCL, KVL, 和 TT 中任何两个蕴涵了第三个。在下面，我们将证明 KVL 和 TT 蕴涵了 KCL。剩下的情况留给读者们去证明(见习题2)。

我们从 TT 的(5a)表达式和 KVL 的如下表达式

$$\hat{\mathbf{v}} = \mathbf{Q}' \hat{\mathbf{v}}_0 \quad (9)$$

着手，式(9)来自 $\hat{\mathbf{v}} = \hat{\mathbf{Q}}' \hat{\mathbf{v}}_0$ 因为 $\hat{\mathbf{Q}} = \mathbf{Q}$ 。将(9)代入(5a)并稍微作些演算，我们就得到

$$\hat{\mathbf{v}}_0' \mathbf{Q} \mathbf{i} = 0 \quad (10)$$

现在假设 KCL 并不成立，即假设 $\mathbf{Q} \mathbf{i} \neq \mathbf{0}$ ，特别，假设 $\mathbf{Q} \mathbf{i}$ 的第 i 行不等于零。因为前面的结果是与网络的元器件无关的，令 $\hat{\mathcal{N}}$ 只有作为树支的独立电压源，并令 $\hat{v}_{0i} = 1$ 及 $\hat{v}_{0j} = 0 (j \neq i)$ ，于是 $\hat{\mathbf{v}}_0'$ 和 $\mathbf{Q} \mathbf{i}$ 的乘积不能等于零。因为这与(10)矛盾， $\mathbf{Q} \mathbf{i}$ 的第 i 行不等于零的假设不能成立。因此， $\mathbf{Q} \mathbf{i}$ 的所有行必须都等于零，从而 KCL

必须成立。

1.2 互易网络

在前面的讨论中，并没有议及网络中各元器件的性质。具体来讲，独立源和别的元器件并未加以区分。但是，对于网络的输入和输出是要特别关心的。所以，为了某些目的，我们将把输入支路、输出支路和另外那些非输入非输出支路分开。

1.2.1 二端口网络

作为开始，设 $\mathcal{N}$ 是一个其端口的状况如图(1)(a)所示的二端口网络^①。并设拓扑等同网络 $\hat{\mathcal{N}}$ 是与 $\mathcal{N}$ 相同的网络，但具有颠倒的端口状况如图 1 (b)所示。注意，这两个网络中每个支路的参考方向是负载参考方向，即使是端口支路也是如此。由此，端口电流的参考方向是与正常情况相反。这将在某些表达式中引入

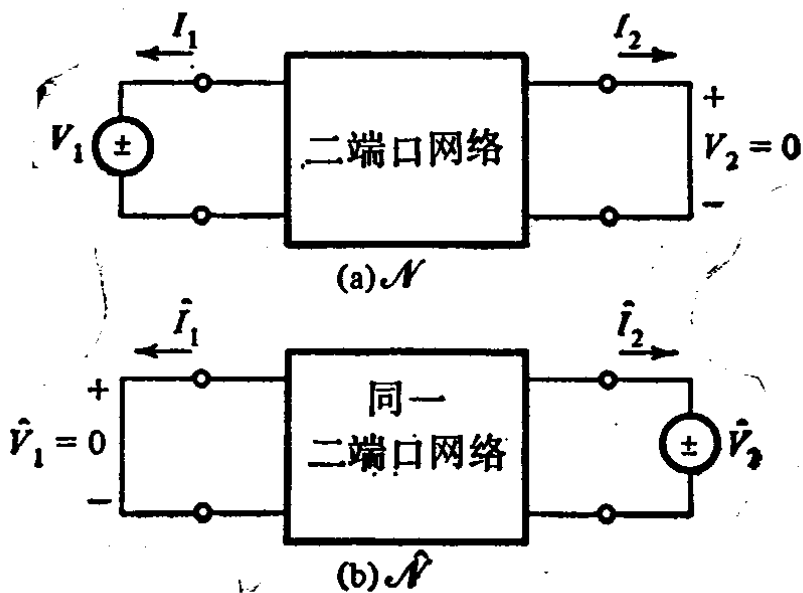


图 1 网络 $\mathcal{N}$ 和 $\hat{\mathcal{N}}$

^① 除非另作明白地说明(参见习题 13),每当提到多端口网络时(具体地,一个二端口网络)意指该多端口网络并没有内部的独立源。

符号的改变,因而必须予以注意。

因为我们将主要涉及频域,所以今后我们将用大写字母表示各变量。

当端口支路明显地(非含蓄地)被示出时,特勒根定理的准功率的差形式可表示为

$$0 = (\hat{V}_1 I_1 - V_1 \hat{I}_1) + (\hat{V}_2 I_2 - V_2 \hat{I}_2) + \sum_{k=3}^b (\hat{V}_k I_k - V_k \hat{I}_k) \quad (11)$$

但是 $V_2 = 0$ 及 $\hat{V}_1 = 0$; 因此当重新整理端口的各项时,这个表达式成为

$$V_1 \hat{I}_1 - \hat{V}_2 I_2 = \sum_{k=3}^b (\hat{V}_k I_k - V_k \hat{I}_k) \quad (12)$$

上式左边只含有端口变量,而右边只含有非端口变量。

现在让我们看一下(见附录2)二端口网络为互易的条件;即在图1的条件下,如果 $\hat{V}_2 = V_1$, 则 $\hat{I}_1 = I_2$ 。因此,式(12)的左边为零;即

$$V_1 \hat{I}_1 - \hat{V}_2 I_2 = 0 \leftrightarrow \frac{\hat{I}_1}{\hat{V}_2} = \frac{I_2}{V_1} \quad (13)$$

[式(13)的右边就是人们熟知的互易二端口网络的关系(条件) $y_{12} = y_{21}$ 。]因为按照互易性,式(12)的左边为零,从而式(12)的右边也为零。反之也显然成立;即如果式(12)的右边为零,则左边也为零。[这也导致示于式(13)右边的条件 $y_{12} = y_{21}$ 。]我们到此确立了下列结果: 当且仅当

$$\sum_{\text{非端口支路}} (\hat{V}_k I_k - V_k \hat{I}_k) = 0 \quad (14)$$

时,一个二端口网络才是互易的。

注意,二端口网络的互易性条件起初是按在特定激励下,端口电压和电流变量间的关系来定义的。上面完成的工作是从这些端口变量间的关系导出二端口网络内部变量间的另一个关系,即式

(14)。

顺便指出，考查特定类型的元器件对式(12)右边的贡献也许是另一途径。如果这样做了，会发现电阻、电容、电感和理想变压器对式(12)右边的贡献为零。(见习题3。)这确立了下列定理：一个仅含有电阻、电容、电感(可能有耦合的)和理想变压器的二端口网络是互易的。

还有一件必须弄清楚的事。如果不象图1那样激励是一个电压，响应是一个电流，而是相反，如图2所示。于是在式(11)中我们将有 $I_2 = 0$ 及 $\hat{I}_1 = 0$ 。因此式(13)将由下式代替：

$$-\hat{V}_1 I_1 + V_2 \hat{I}_2 = 0 \leftrightarrow \frac{V_2}{I_1} = \frac{\hat{V}_1}{\hat{I}_2} \quad (15)$$

这就是互易二端口网络的 $z_{12} = z_{21}$ 的关系。

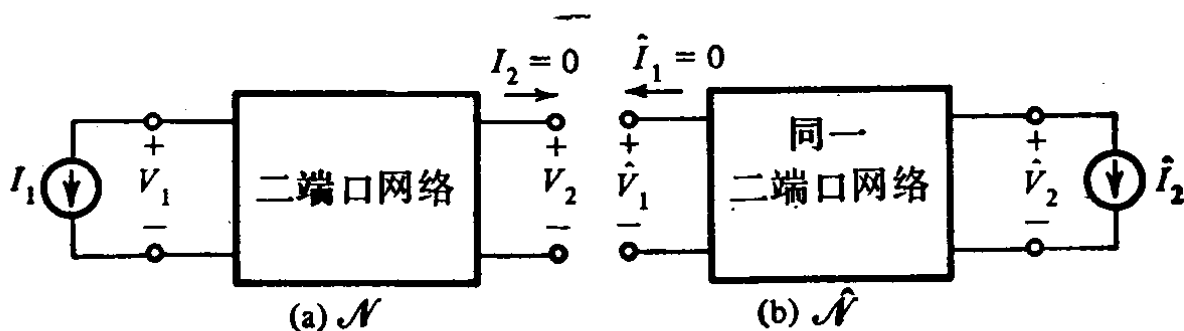


图2 用电流激励的网络 $\hat{N}$ 和 N

最后，还可能另外两种激励-响应的组合 ($V-V$ 和 $I-I$)。对于这二种情况，读者应重复以上步骤，证实互易性分别意味着 $g_{12} = -g_{21}$ 及 $h_{12} = -h_{21}$ 。

1.2.2 n 端口网络

现在让我们将前面的讨论扩展到 n 端口网络。设将网络的端口按从 1 到 n 编号，剩下的支路编号则是从 $n+1$ 到 b 。有些端口将由电压源激励，而有些由电流源激励。令各个由电压源激励的端口标明为电压端口，而各个电流源激励的端口标明为电流端口。

假设 $\mathcal{N}$ 指的是端口 1 到 n_v 为电压端口而端口 n_v+1 到 $n(=n_v+n_i)$ 为电流端口的网络。又设 $\hat{\mathcal{N}}$ 指的是具有相同激励类型(电压或电流)的同一网络,只是电源的值可以有所差别。我们说 $\mathcal{N}$ 和 $\hat{\mathcal{N}}$ 是一致激励的。应该注意,短路可以视为零电压的电压源;开路可以视为零电流的电流源。

现在让我们将式(8)形式的特勒根定理应用于 $\mathcal{N}$ 和 $\hat{\mathcal{N}}$ 的两种情况(其区别如上)。将涉及端口变量的项移到一边,结果是

$$\sum_{\text{端口支路}} (-\hat{V}_k I_k + V_k \hat{I}_k) = \sum_{\text{非端口支路}} (\hat{V}_k I_k - V_k \hat{I}_k) \quad (16)$$

将这个表达式写成矢量形式会是有用的。为了这个目的,对端口变量我们将用下标“ p ”,而对非端口(内部)变量将用下标“ i ”。于是式(16)可以写成

$$-[-\hat{\mathbf{I}}'_p \quad \hat{\mathbf{V}}'_p] \begin{bmatrix} \mathbf{V}_p \\ \mathbf{I}_p \end{bmatrix} = [-\hat{\mathbf{I}}'_i \quad \hat{\mathbf{V}}'_i] \begin{bmatrix} \mathbf{V}_i \\ \mathbf{I}_i \end{bmatrix} \quad (17)$$

除了左边的负号和各下标外,这个表达式的两边是一模一样的。在左边的子矢量具有维数 n , n 为端口数;在右边的那些具有维数 $b-n$, $b-n$ 为非端口支路数。今后,我们将视方便有时用式(16)的标量形式,有时用式(17)的矢量形式。

现在令在 $\mathcal{N}$ 和 $\hat{\mathcal{N}}$ 中的所有电流端口开路。令在 $\mathcal{N}$ 中除了一个(例如端口 j)外所有电压端口短路,在 $\hat{\mathcal{N}}$ 中除了一个(例如端口 i)外所有电压端口短路。式(16)的左边简化成 $-\hat{V}_i I_i + V_j I_j$ 。在 $\mathcal{N}$ 和 $\hat{\mathcal{N}}$ 两个网络中,端口 i 和 j 都由电压源激励,但在每个网络中,两个端口 i 和 j 的电压源中有一个恰具有零值。

假设由 i 和 j 作为端口(所有其它端口开路或短路)形成的二端口网络是互易的。按照式(13)这将意味着

$$-\hat{V}_i I_i + V_j \hat{I}_j = 0 \leftrightarrow \frac{\hat{I}_j}{\hat{V}_i} = \frac{I_i}{V_j} \quad (18)$$