

线性网络分析

杨 山 主编

高等教育出版社

线性网络分析

杨山主编

•

高等教育出版社出版
新华书店北京发行所发行
沈阳市第二印刷厂印装

*

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ 印张12.25 字数290,000

1987年5月第1版 1987年5月第1次印刷

印数 0,001—4,140

书号 15010·0697 定价 2.50元

前 言

网络理论的应用早已超出了电工学科的范围，扩展到了机械、生物、经济等学科领域。网络理论所涉及的范围是很广泛的，目前它已划分为许多分支，本书是学习网络理论的基础性教材，只对集中参数、线性、时不变电网络，在连续时间信号作用下的分析问题作些介绍。

本书内容的起点与大学本科电类专业的“电路”课程相衔接。凡在电路课程中已学习过的基本原理和定义，除为了叙述的完整作必要的引伸外，都不再重复而直接引用，要求读者具有电路、线性代数和算法语言的基本知识。本书可供电类专业研究生阅读，也可供高等工科院校电类专业的教师、高年级学生和工程技术人员参考。

近代复杂网络的分析离不开电子计算机。书中所介绍的分析方法有许多是适用于网络的计算机辅助分析的。但书中没有给出具体的分析程序。这方面的训练可在课外练习中完成。

本书的原型是编者为天津大学电力类专业研究生开设的《网络理论》课程讲义的一部分。在此基础上加以修改和补充编写而成。参加整理原稿和编写工作的有刘美轮、孙雨耕、房大中、张其遂等同志。

北京工业大学钟佐华同志仔细地审阅了本书初稿，提出了不少宝贵的修改意见。谨致深切的谢意。

限于水平，书中可能有很多错误和不妥之处，衷心欢迎批评指正。

编 者

1983 ·

目 录

前言

| | |
|-------------------------------------|-----|
| 第一章 网络元件和网络特性 | 1 |
| § 1-1 网络参数 | 1 |
| § 1-2 二端元件的参数和性质 | 3 |
| § 1-3 二端口元件的六组参数 | 6 |
| § 1-4 二端口元件及其性质 | 8 |
| § 1-5 受控电源 | 13 |
| § 1-6 网络特性 | 17 |
| 习 题 | 19 |
| 第二章 网络图论 | 21 |
| § 2-1 图的概念及定义 | 21 |
| § 2-2 节点关联矩阵 | 34 |
| § 2-3 回路关联矩阵 | 41 |
| § 2-4 割集关联矩阵 | 51 |
| § 2-5 独立变量组 | 60 |
| § 2-6 非基本关联矩阵 | 65 |
| § 2-7 矩阵 C_t 和 B_t 的单位模特性 | 75 |
| § 2-8 图形的树数 | 82 |
| § 2-9 求全部树 | 89 |
| § 2-10 由矩阵求图 | 95 |
| 习 题 | 102 |
| 第三章 网络方程 | 106 |
| § 3-1 支路的伏安方程 | 106 |
| § 3-2 支路电流方程和支路电压方程 | 109 |
| § 3-3 回路电流方程和网孔电流方程 | 115 |
| § 3-4 割集电压方程和节点电位方程 | 120 |

| | | |
|------------|-------------------------------|------------|
| § 3-5 | 混合方程 | 126 |
| § 3-6 | 含有受控源网络的节点方程 | 131 |
| § 3-7 | 改进的节点方程 | 137 |
| § 3-8 | 稀疏表方程 | 145 |
| § 3-9 | 含有理想放大器网络的节点方程 | 150 |
| 习 题 | | 155 |
| 第四章 | 网络的拓扑分析 | 160 |
| § 4-1 | 割集方程和回路方程的拓扑解 | 160 |
| § 4-2 | 驱动点函数的拓扑公式 | 171 |
| § 4-3 | 传输函数的拓扑公式 | 176 |
| § 4-4 | 含有受控源网络的传输导纳 | 184 |
| § 4-5 | 节点方程的拓扑解 | 196 |
| 习 题 | | 206 |
| 第五章 | 信号流图 | 211 |
| § 5-1 | 基本性质及一些定义 | 211 |
| § 5-2 | 信号流图的构成方法 | 217 |
| § 5-3 | 一些基本简化规则 | 223 |
| § 5-4 | 梅森 (Mason) 公式 | 229 |
| § 5-5 | 状态变换图解 | 235 |
| § 5-6 | 从线图到信号流图 | 240 |
| § 5-7 | 山农-哈卜 (Shannon-Happ) 公式 | 245 |
| § 5-8 | 考特斯 (Coates) 公式 | 248 |
| 习 题 | | 254 |
| 第六章 | 状态方程 | 258 |
| § 6-1 | 含有受控源网络的状态方程 | 258 |
| § 6-2 | 建立初始型状态-输出方程的拓扑矩阵法 | 262 |
| § 6-3 | 初始型状态-输出方程的直接建立法 | 276 |
| § 6-4 | 化初始型状态-输出方程为标准型 | 283 |
| § 6-5 | 含源网络状态方程初值分析方法 | 293 |
| § 6-6 | 状态方程的时域解析公式 | 307 |

| | | |
|------------|--------------------------|------------|
| § 6-7 | 状态转移矩阵 $e^{A't}$ 的解析分析方法 | 311 |
| § 6-8 | 状态方程的时域差分公式递推算法 | 321 |
| § 6-9 | 状态方程的频域解 | 331 |
| | 习 题 | 338 |
| 第七章 | 灵敏度 | 342 |
| § 7-1 | 灵敏度函数 | 342 |
| § 7-2 | 元件大变化灵敏度 | 349 |
| § 7-3 | 灵敏度的一些运算性质 | 354 |
| § 7-4 | 根灵敏度 | 358 |
| § 7-5 | 灵敏度的拓扑确定法 | 365 |
| § 7-6 | 求解灵敏度的直接微分方法 | 368 |
| § 7-7 | 求解灵敏度的伴随网络方法 | 375 |
| | 习 题 | 382 |
| | 参考书目 | 386 |

第一章 网络元件和网络特性

§ 1-1 网络参数

1. 集中电路由集中电元件联结而成。集中元件的电性能模型可依据元件端子处电流与端子间电压之间的关系来建立。

图 1-1 表示一个集中多端网络。它有 n 个端子与电路的其他部分相连接。元件内部可能是复杂的，但我们所关心的是它的外部特性。即在 n 个端子间电压与端子处电流之间的关系。这种多端网络有时也叫做 n 端网络。

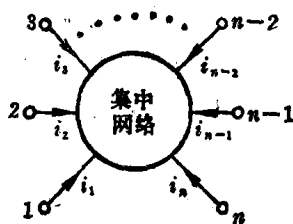


图 1-1

从端子进入网络的 n 个电流中，有一个不是独立变量。因为对集中元件总有

$$i_1 + i_2 + \cdots + i_n = 0 \quad (1-1)$$

从 n 个端子电流中选取一组 ($n-1$ 个) 独立电流，可有 n 种选法。两端子间的电压共有 $n(n-1)/2$ 个， $U_{kl} = -U_{lk}$ ($k, l = 1, 2, \dots, n, k \neq l$) 作为一个。可把它们做出 n^{n-2} 种组合，每种组合中含有 $n-1$ 个独立电压。

n 端网络外部特性的一种表示方法就是：把选定的 $n-1$ 个独立电压用 $n-1$ 个独立电流来表示。在时域，这将是一组代数方程或微分方程；在频域，是复变量 s 的代数方程组，可写为

$$\mathbf{U}(s) = \mathbf{Z}(s)\mathbf{I}(s) + \mathbf{E}(s) \quad (1-2)$$

其中， $\mathbf{U}(s)$ 为端子间电压的 $n-1$ 阶列阵； $\mathbf{I}(s)$ 为端子电流的 $n-1$ 阶列阵； $\mathbf{E}(s)$ 为 $n-1$ 阶的列阵； $\mathbf{Z}(s)$ 为 $n-1$ 阶方阵。

式 (1-2) 表明， n 端网络的外部特性可用 $n-1$ 个 E 参数

和 $(n-1)^2$ 个 Z 参数来描述，但只有这些参数当不出现无穷大值时才有意义。在线性情况下，这些参数值与电压 U 和电流 I 的值无关。当端子电流全为零（所有端子都开路，与外部电路隔离）时，测得端子间电压就是相应的 E 参数。若不是所有 E 参数都为零，该网络叫做自发网络， E 参数也叫做自发参数。若所有 E 参数都为零，该网络叫做非自发网络， Z 参数也叫做非自发参数。自发网络和非自发网络的 Z 参数都可利用实验方法来测定。

网络的外特性也可用其他形式的方程组来描述。例如，把 $n-1$ 个独立电流用 $n-1$ 个独立电压来表示；或把 m 个独立电压和 $n-1-m$ 个独立电流用另外 m 个独立电流和 $n-1-m$ 个独立电压来表示；等等。但不管用那种形式方程组来表示，都应该是 $n-1$ 个独立方程式，总共含有 $n-1$ 个自发参数和 $(n-1)^2$ 个非自发参数。

2. 常常有这种可能，网络的外部特性可从端口的电压与电流关系表现出来，而不用端子间电压与端子处电流的关系来表述。这可使得表征多端网络特性的方程式数目大为减少。所谓端口，是这样一对端子，从一个端子进入网络的电流等于从另一端子流出的电流。含有 m 个端口的网络叫做 m 端口网络，最简单的二端网络也就是一端口网络。为了造成端口，我们可把二端元件接在所研究的两个端子上，例如，我们在端子1与 n 间，2与 $n-1$ 间，3与 $n-2$ 间，……，各接入一个二端元件，原网络就形成一个 $m=n/2$ 端口网络。这里我们假定 n 为偶数。在 n 端情况，有 n 个端子电流，其中 $n-1$ 个是独立的。在 $n/2$ 端口情况，有 $n/2$ 个电流，并且都是独立的。若用 $n/2$ 个端口电流来表示 $n/2$ 个端口电压的网络外特性，所需的方程式数目也将是 $n/2$ 个。当 n 很大时，所需的方程式数目约可减少一半，自发参数和非自发参数的数目都将随之减少。

在图 1-1 中，假如我们在 1 与 n 端、2 与 n 端、……、 $n-1$ 与 n 端各接入一个二端元件，于是构成 $n-1$ 端口网络。所

有端口共有一个公用的端子 n (接地), 这种网络叫做接地 $n-1$ 端口网络。这种网络与 n 端网络没有什么区别, 仍有 $n-1$ 个独立电流和 $n-1$ 个独立电压。只是所有独立电压都是相对于同一端子读取的, 并把此端子的电流作为非独立电流。

§ 1-2 二端元件的参数和性质

1. 二端网络只有一个独立电流, 在式 (1-2) 形式的特性方程组中只有一个方程式, 简写为

$$U = ZI + E \quad (1-3)$$

在这里及以后不至于引起混淆的情况下, 我们均把 (s) 略去不写。

根据排列组合理论, 如果我们从 p 件事物中选取 q 件, 则有

$$C_p^q = \frac{p(p-1)\cdots(p-q+1)}{q!} \quad (1-4)$$

种可能的组合。在现在的情况, $p=2$ (一个电压和一个电流), $q=1$ (一个独立变量)。所以 $C_2^1 = C_1^1 = 2$ 。再选取端口电压作为独立变量, 可得

$$I = YU + J \quad (1-5)$$

其中自发参数 J 为端口短路时的端子电流。

2. 从式 (1-3) 可以看出, 当自发网络的 Z 参数等于零时, 端口电压 $U = E$, 在任何时刻均与其端子电流无关, 无论在其端子上接入什么网络, 它的端电压均保持其幅值和波形, 它的电流则决定于外接网络。(短路情况是没有意义的, 因为这时电流将为无穷大值。因此, 这种网络不能用式 (1-5) 来表示。) 具有这种特性的二端元件叫做理想电压源, 或简称电压源, 其电路图符号如图 1-2 (a) 所示。

理想电流源是一个二端元件, 在任何时刻它的端子电流均与端子间电压无关。无论外接网络如何(端子开路是没有意义的), 其端子电流均保持其幅值和波形, 端电压则决定于外接电路。电

流源的电路图符号如图 1-2 (b) 所示。容易看出, 这相当于用式 (1-5) 表示其外特性的二端网络, $Y=0$ 的情况。

实际电路的基本非自发二端元件有电阻器、电感器和电容器, 它们的电路图符号、端子电压-电流关系、以及参数如表 1-1 所示。

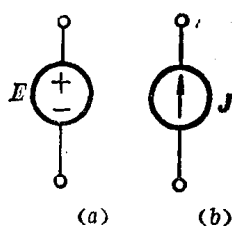


图 1-2

表 1-1

| 元 件 | 符 号 | 电压与电流间关系 | | 参 数 |
|-----|-----|--|--|-------------------|
| | | 在时域 | 在频域 | |
| 电阻器 | | $u = Ri$ $i = Gu$ | $U(s) = RI(s)$ $I(s) = GU(s)$ | 电阻 R 电导 G |
| 电感器 | | $u = L \frac{di}{dt}$ $i = \frac{1}{L} \int_0^t u(x) dx$ | $U(s) = sLI(s)$ $I(s) = \frac{1}{sL} U(s)$ | 感抗 sL |
| 电容器 | | $i = C \frac{du}{dt}$ $u = \frac{1}{C} \int_0^t i(x) dx$ | $I(s) = sCU(s)$ $U(s) = \frac{1}{sC} I(s)$ | 容抗 $\frac{1}{sC}$ |

当电感器中有初始电流 $i(0)$ 或电容器有初始电压 $U(0)$ 时, 它们的外特性方程分别为

$$I(s) = \frac{1}{sL} U(s) + \frac{i(0)}{s}$$

$$U(s) = \frac{1}{sC} I(s) + \frac{u(0)}{s}$$

可见, 元件的初始值将形成自发参数。

在这里，我们把电感器的电感值 L 和电容器的电容值 C 称做元件的原始参数。在不致于混淆情况下，亦简称为元件参数。

3. 当参数 R, L, C 与通过元件的电流和元件端电压无关时，该元件叫做线性元件。当 R, L, C 不随时间变化时，该元件叫做时不变的，线性时不变元件的参数叫做定常的。

我们知道，有些元件具有吸收能量的性质，其中有些还可存储所吸收的能量，并可以把存储的能量返还给外电路。但是，它所供给外电路的能量不能超过直至那时以前它所存储的能量。具有这种性质的元件叫做无源元件。换句话说，到任何瞬时 t_0 ，提供给无源元件的净能量总为非负值，即

$$W(t_0) = \int_{-\infty}^{t_0} u(t)i(t)dt \geq 0 \quad (1-6)$$

对定常电阻 R

$$W(t_0) = \int_{-\infty}^{t_0} uiddt = \int_{-\infty}^{t_0} i^2Rdt \quad (1-7)$$

对定常电容 C

$$\begin{aligned} W(t_0) &= \int_{-\infty}^{t_0} uiddt = C \int_{-\infty}^{t_0} u \frac{du}{dt} dt \\ &= C \int_0^{u(t_0)} udu = \frac{1}{2}Cu^2(t_0) \end{aligned} \quad (1-8)$$

对定常电感 L

$$\begin{aligned} W(t_0) &= L \int_{-\infty}^{t_0} i \frac{di}{dt} dt = L \int_0^{i(t_0)} idi \\ &= \frac{1}{2}Li^2(t_0) \end{aligned} \quad (1-9)$$

可见当 R, L, C 为正值时，它们都是无源元件；当 R, L, C 为负值时，它们都是有源元件。

元件是否有损耗也是一重要特性。令 $u(t)$ 和 $i(t)$ 是平方可积的，即

$$\int_{-\infty}^{\infty} u^2(t) dt < \infty \quad \text{和} \quad \int_{-\infty}^{\infty} i^2(t) dt < \infty$$

这意味着 $u(\infty) = u(-\infty) = i(\infty) = i(-\infty) = 0$ 。在此条件下，若在整个时域内提供给元件的净能量为零，则此元件叫做无损元件，即

$$W(\infty) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t)i(t) dt = 0 \quad (1-10)$$

按此定义，具有定常参数 $\pm C$ 的电容器和定常参数 $\pm L$ 的电感器都是无损元件。

§ 1-3 二端口元件的六组参数

图 1-3 示一二端口网络，以及端口电压和电流正方向的选择。这里有四个变量，其中任给定两个变量的值，其余两个变量的值就被唯一地确定了。在式 (1-4) 中， $p=4$ ， $q=2$ ，所以应有六种可能的方程组：

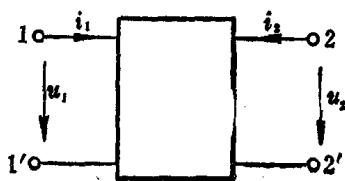


图 1-3

(1) z 参数方程

$$u_1 = z_{11}i_1 + z_{12}i_2 + e_1$$

$$u_2 = z_{21}i_1 + z_{22}i_2 + e_2$$

(2) y 参数方程

$$i_1 = y_{11}u_1 + y_{12}u_2 + J_1$$

$$i_2 = y_{21}u_1 + y_{22}u_2 + J_2$$

(3) 混合参数方程

$$u_1 = h_{11}i_1 + h_{12}u_2 + e_h$$

$$i_2 = h_{21}i_1 + h_{22}u_2 + J_h$$

(4) 倒混合参数方程

$$i_1 = g_{11}u_1 + g_{12}i_2 + J_g$$

$$u_2 = g_{21}u_1 + g_{22}i_2 + e_g$$

(5) 链参数方程

$$u_1 = au_2 + b(-i_2) + e_a$$

$$i_1 = cu_2 + d(-i_2) + J_a$$

(6) 倒链参数方程

$$u_2 = a'u_1 + b'(-i_1) + e_{a'}$$

$$i_2 = c'u_1 + d'(-i_1) + J_{a'}$$

为了方便，这里我们使用了小写字母，但其意义与前面所使用的大写字母相同。这六组参数之间相互转换的关系如表 1-2 和表 1-3，表中 $|z| = z_{11}z_{22} - z_{12}z_{21}$ ， $|y| = y_{11}y_{22} - y_{12}y_{21}$ ， $|h| = h_{11}h_{22} - h_{12}h_{21}$ ， $|g| = g_{11}g_{22} - g_{12}g_{21}$ ， $|a| = ad - bc$ ， $|a'| = a'd' - b'c'$ 。

表 1-2

| | z | y | h | g | a | a' |
|---|---|---|---|---|--|---|
| z | $\begin{matrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{matrix}$ | $\begin{matrix} \frac{y_{22} - y_{12}}{ y } & \frac{-y_{12}}{ y } \\ \frac{-y_{21}}{ y } & \frac{y_{11}}{ y } \end{matrix}$ | $\begin{matrix} \frac{ h }{h_{22}} & \frac{h_{12}}{h_{22}} \\ -\frac{h_{21}}{h_{22}} & \frac{1}{h_{22}} \end{matrix}$ | $\begin{matrix} \frac{1}{g_{11}} & \frac{-g_{12}}{g_{11}} \\ \frac{g_{21}}{g_{11}} & \frac{ g }{g_{11}} \end{matrix}$ | $\begin{matrix} \frac{a}{c} & \frac{ a }{c} \\ \frac{1}{c} & \frac{d}{c} \end{matrix}$ | $\begin{matrix} \frac{d'}{c'} & \frac{1}{c'} \\ \frac{ a' }{c'} & \frac{a'}{c'} \end{matrix}$ |
| | $\begin{matrix} \frac{z_{22} - z_{12}}{ z } & \frac{-z_{12}}{ z } \\ \frac{-z_{21}}{ z } & \frac{z_{11}}{ z } \end{matrix}$ | $\begin{matrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{matrix}$ | $\begin{matrix} \frac{1}{h_{11}} & \frac{-h_{12}}{h_{11}} \\ \frac{h_{21}}{h_{11}} & \frac{ h }{h_{11}} \end{matrix}$ | $\begin{matrix} \frac{ g }{g_{22}} & \frac{g_{12}}{g_{22}} \\ -\frac{g_{21}}{g_{22}} & \frac{1}{g_{22}} \end{matrix}$ | $\begin{matrix} \frac{d}{b} & \frac{- a }{b} \\ \frac{-1}{b} & \frac{a}{b} \end{matrix}$ | $\begin{matrix} \frac{a'}{b'} & \frac{-1}{b'} \\ \frac{- a' }{b'} & \frac{d'}{b'} \end{matrix}$ |
| h | $\begin{matrix} \frac{ z }{z_{22}} & \frac{z_{12}}{z_{22}} \\ \frac{-z_{21}}{z_{22}} & \frac{1}{z_{22}} \end{matrix}$ | $\begin{matrix} \frac{1}{y_{11}} & \frac{-y_{12}}{y_{11}} \\ \frac{y_{21}}{y_{11}} & \frac{ y }{y_{11}} \end{matrix}$ | $\begin{matrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{matrix}$ | $\begin{matrix} \frac{g_{22}}{ g } & \frac{-g_{12}}{ g } \\ -\frac{g_{21}}{ g } & \frac{g_{11}}{ g } \end{matrix}$ | $\begin{matrix} \frac{b}{d} & \frac{ a }{d} \\ \frac{-1}{d} & \frac{c}{d} \end{matrix}$ | $\begin{matrix} \frac{b'}{a'} & \frac{1}{a'} \\ \frac{- a' }{a'} & \frac{c'}{a'} \end{matrix}$ |
| | $\begin{matrix} \frac{1}{z_{11}} & \frac{-z_{12}}{z_{11}} \\ \frac{z_{21}}{z_{11}} & \frac{ z }{z_{11}} \end{matrix}$ | $\begin{matrix} y_{22} & y_{22} \\ -y_{21} & \frac{1}{y_{22}} \end{matrix}$ | $\begin{matrix} \frac{h_{22}}{ h } & \frac{-h_{12}}{ h } \\ -\frac{h_{21}}{ h } & \frac{h_{11}}{ h } \end{matrix}$ | $\begin{matrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{matrix}$ | $\begin{matrix} \frac{c}{a} & \frac{- a }{a} \\ \frac{1}{a} & \frac{b}{a} \end{matrix}$ | $\begin{matrix} \frac{c'}{d'} & \frac{-1}{d'} \\ \frac{ a' }{d'} & \frac{b'}{d'} \end{matrix}$ |

续表

| | z | y | h | g | a | a' |
|------|--|---|--|--|-------------------------------------|---|
| a | $\frac{z_{11}}{z_{21}} \quad z $ | $\frac{-y_{22} - 1}{y_{21} \quad y_{21}}$ | $\frac{- h \quad -h_{11}}{h_{21} \quad h_{21}}$ | $\frac{1 \quad g_{22}}{g_{21} \quad g_{21}}$ | $a \quad b$ | $\frac{d'}{ a' } \quad \frac{b'}{ a' }$ |
| | $\frac{1}{z_{21}} \quad \frac{z_{22}}{z_{21}}$ | $\frac{- y - y_{11}}{y_{21} \quad y_{21}}$ | $\frac{-h_{22} \quad -1}{h_{21} \quad h_{21}}$ | $\frac{g_{11} \quad g }{g_{21} \quad g_{21}}$ | $c \quad d$ | $\frac{c'}{ a' } \quad \frac{a'}{ a' }$ |
| a' | $\frac{z_{22}}{z_{12}} \quad z $ | $\frac{-y_{11} - 1}{y_{12} \quad y_{12}}$ | $\frac{1 \quad h_{11}}{h_{12} \quad h_{12}}$ | $\frac{- g - g_{22}}{g_{12} \quad g_{12}}$ | $\frac{d}{ a } \quad \frac{b}{ a }$ | $a' \quad b'$ |
| | $\frac{1}{z_{12}} \quad \frac{z_{11}}{z_{12}}$ | $\frac{- y - y_{22}}{y_{12} \quad y_{12}}$ | $\frac{h_{22} \quad h }{h_{12} \quad h_{12}}$ | $\frac{-g_{11} \quad -1}{g_{12} \quad g_{12}}$ | $\frac{c}{ a } \quad \frac{a}{ a }$ | $c' \quad d'$ |

§ 1-4 二端口元件及其性质

1. 最简单的二端口元件是一对有互感耦合的线圈，如图 1-4 所示。这是一个非自发二端口网络，其 z 参数方程是

$$U_1 = (R_1 + sL_1)I_1 + sMI_2$$

$$U_2 = sMI_1 + (R_2 + sL_2)I_2$$

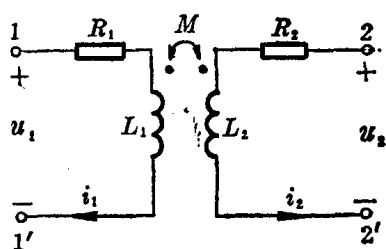


图 1-4

互感线圈在满足 $R_1 = R_2 = 0$, L_1 、 L_2 和 M 为常数，且有 $k = M / \sqrt{L_1 L_2} = 1$, $\sqrt{L_1 / L_2} = n$ (匝数比 N_1 / N_2) 的条件时，称为完善变压器。用混合参数方程表示其外特性，矩阵形式为

$$\begin{pmatrix} U_1 \\ I_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & n \\ -n & \frac{1}{sL_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ U_2 \end{pmatrix} \quad (1-11)$$

如果 L_1 和 L_2 趋于无穷大，但它们之间的比值保持不变，仍为 n^2 ，该完善变压器就成为理想变压器。

表 1-3

| | (z) | (y) | (h) | (g) | (a) | (a') |
|-----|-------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|------------------------|--------------------------------|
| (z) | e_1 | $\frac{y_{12}J_2 - y_{22}J_1}{ y }$ | $e_h - \frac{h_{12}J_h}{h_{21}}$ | $-\frac{J_r}{g_{11}}$ | $e_a - \frac{aJ_a}{c}$ | $-\frac{J_{a'}}{c'}$ |
| | e_2 | $\frac{y_{21}J_1 - y_{11}J_2}{ y }$ | $-\frac{J_h}{h_{22}}$ | $e_r - \frac{g_{21}J_r}{g_{11}}$ | $-\frac{J_a}{c}$ | $e_{a'} - \frac{a'J_{a'}}{c'}$ |
| (y) | $\frac{z_{12}e_2 - z_{22}e_1}{ z }$ | J_1 | $-\frac{e_h}{h_{11}}$ | $J_r - \frac{g_{12}e_r}{g_{22}}$ | $J_a - \frac{ae_a}{b}$ | $\frac{e_{a'}}{b'}$ |
| | $\frac{z_{21}e_1 - z_{11}e_2}{ z }$ | J_2 | $J_h - \frac{h_{21}e_h}{h_{11}}$ | $-\frac{e_r}{g_{22}}$ | $\frac{e_a}{b}$ | $J_a - \frac{d'e_{a'}}{b'}$ |
| (h) | $e_1 - \frac{z_{12}e_2}{z_{22}}$ | $-\frac{J_1}{y_{11}}$ | e_h | $\frac{g_{12}e_r - g_{22}J_r}{ g }$ | $e_a - \frac{bJ_a}{d}$ | $-\frac{e_{a'}}{a'}$ |
| | $-\frac{e_2}{z_{11}}$ | $J_2 - \frac{y_{21}J_1}{y_{11}}$ | J_h | $\frac{g_{21}J_r - g_{11}e_r}{ g }$ | $\frac{J_a}{d}$ | $J_{a'} - \frac{c'e_{a'}}{d'}$ |

续表

| | (z) | (y) | (h) | (g) | (a) | (a') |
|------|---|---|--|---|--|--|
| (g) | $-\frac{e_1}{z_{11}}$ $e_2 - \frac{z_{21}e_1}{z_{11}}$ | $J_1 - \frac{y_{11}J_2}{y_{22}}$ $-\frac{J_2}{y_{22}}$ | $\frac{h_{12}J_h - h_{22}e_h}{ h }$ $\frac{h_{21}e_h - h_{11}J_h}{ h }$ | J_r e_r | $-\frac{e_a}{a}$ $J_a - \frac{ce_a}{a}$ | $\frac{J_{a'}}{d_1}$ $e_{a'} - \frac{b'J_{a'}}{d_1}$ |
| (a) | $e_1 - \frac{z_{11}e_2}{z_{21}}$ $-\frac{e_2}{z_{21}}$ | $-\frac{J_2}{y_{21}}$ $J_1 - \frac{y_{11}J_2}{y_{21}}$ | $e_h - \frac{h_{11}J_h}{h_{21}}$ $-\frac{J_h}{h_{21}}$ | $-\frac{e_g}{g_{21}}$ $J_r - \frac{g_{11}e_r}{g_{21}}$ | e_a J_a | $\frac{b'J_{a'} - d'e_{a'}}{ a' }$ $\frac{a'J_{a'} - c'e_{a'}}{ a' }$ |
| (a') | $e_2 - \frac{z_{22}e_1}{z_{12}}$ $-\frac{e_1}{z_{12}}$ | $-\frac{J_1}{y_{12}}$ $J_2 - \frac{y_{22}J_1}{y_{12}}$ | $-\frac{e_h}{h_{12}}$ $J_h - \frac{h_{22}e_h}{h_{12}}$ | $e_r - \frac{g_{22}J_g}{g_{12}}$ $-\frac{J_r}{g_{12}}$ | $\frac{bJ_a - de_a}{ a }$ $\frac{aJ_a - ce_a}{ a }$ | $e_{a'}$ $J_{a'}$ |

2. 理想变压器、理想回转器、理想负阻抗变换器是具有特殊参数的二端口元件，它们的电路图符号及各种参数如表 1-4 所示。

表 1-4

| | 理想变压器 | 理想回转器 | 理想负阻抗变换器 | |
|---|-------|---|--|--|
| | | | | |
| 参 | z | — | $\begin{matrix} 0 & \mp r \\ \pm r & 0 \end{matrix}$ | — |
| | y | — | $\begin{matrix} 0 & \pm \frac{1}{r} \\ \mp \frac{1}{r} & 0 \end{matrix}$ | — |
| | k | $\begin{matrix} 0 & n \\ -n & 0 \end{matrix}$ | — | $\begin{matrix} 0 & \pm k \\ \pm k & 0 \end{matrix}$ |
| | g | $\begin{matrix} 0 & -\frac{1}{n} \\ \frac{1}{n} & 0 \end{matrix}$ | — | $\begin{matrix} 0 & \pm \frac{1}{k} \\ \pm \frac{1}{k} & 0 \end{matrix}$ |
| 数 | a | $\begin{matrix} n & 0 \\ 0 & \frac{1}{n} \end{matrix}$ | $\begin{matrix} 0 & \pm r \\ \pm \frac{1}{r} & 0 \end{matrix}$ | $\begin{matrix} \pm k & 0 \\ 0 & \mp \frac{1}{k} \end{matrix}$ |
| | a' | $\begin{matrix} \frac{1}{n} & 0 \\ 0 & n \end{matrix}$ | $\begin{matrix} 0 & \mp r \\ \mp \frac{1}{r} & 0 \end{matrix}$ | $\begin{matrix} \pm \frac{1}{k} & 0 \\ 0 & \mp k \end{matrix}$ |

我们来看一下它们的基本特性：