

网络分析引论

陈大梧 编著

人民邮电出版社

内 容 简 介

本书是根据北京工业大学自动化系研究生“网络分析”课程的讲稿修改而成的，书中将网络的线性、非线性、时不变、时变等不同方面结合在一起进行讨论，既强调对各不同方面的特性的分析，又致力于探讨它们之间的相互关系。

全书共十四章，其中包含网络元件，网络的基本特性，网络的输入，网络的响应，网络图论，网络的平衡方程，网络函数，状态方程，小信号分析，稳定性理论，开关电容网络，灵敏度分析，误差函数的梯度分析与元件参数的最优修正量，模拟电路故障诊断与伴随网络等问题。本书内容丰富，几乎涉及了现代网络理论的各个方面，而且选材新颖，多处引入了七十年代后期以来在网络理论中提出的新概念、新问题与新的分析方法，在一定程度上反映了现代网络理论的发展动向。

本书可作为高等学校电类专业研究生、高年级大学生的教材或教学参考书。也可供有关专业的教师、科研人员及工程技术人员参考用。

网 络 分 析 引 论

陈大榕 编著

责任编辑：许蔚、徐德选

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

开本：850×1168 1/32 1987年12月第一版
印张：25 页数：400 1987年12月河北第1次印刷
字数：672千字 印数：1—3 000 册

ISBN7115-03348-x/TP

定价：6.40元

前 言

1980年冬北京市电路理论研究会召开了一次关于拟订研究生用网络理论课程教学提纲的座谈会。会上，理事长中国科学技术大学研究生院左垵教授和副理事长北京工业学院李瀚荪教授嘱我执笔撰写网络分析课程的教学提纲。以后，我又编写了讲义，讲义于1982年完稿。本书是在讲义的基础上根据各地的意见修改补充而成的。

全书共十四章，包括网络元件、网络基本特性的讨论，网络的输入、网络的响应、网络图论、网络平衡方程的建立，网络函数、网络分析的状态变量法、非线性网络的小信号分析、灵敏度分析，误差函数的梯度计算、模拟电路的故障诊断、伴随网络，网络的稳定性理论、开关电容网络等内容。某几章末还列有附录，以便于读者查考。列入附录的内容有傅氏变换、拉氏变换、矢量与矩阵的范数、Z变换等。

本书可作高等学校电类专业研究生用教材（由于具体情况差异很大，各校可根据具体情况选用有关章节），也可供高等学校教师、高年级大学生、科研人员、工程技术人员参考用。

本书从提纲的拟订到出版，自始至终受到左垵、李瀚荪和张德有三位教授的鼓励、支持与关心，对此表示衷心的感谢。

在本书的编写过程中还受到郑州解放军工程技术学院张世津教授、胡自臣副教授、南京邮电学院刘永健副教授、吴新余副教授、上海机械学院肖杰生教授、苏州丝绸工学院奚寿根副教授、福州大学林公逵副教授、我校应用数学系沈永欢教授、蔡蓓蓓副教授，以及我系钟佐华教授等热情帮助，在此一并致谢。

由于水平所限，书中缺点错误在所难免，恳切地希望同志们批评指正。

北京工业大学自动化系

陈大梧 1985.10

目 录

第一章 网络元件

§ 1.1 网络元件与网络的电路模型	(1)
§ 1.2 电阻元件	(3)
§ 1.3 电容元件	(17)
§ 1.4 电感元件	(22)
§ 1.5 忆阻元件	(26)
§ 1.6 非线性元件的增量参数	(35)
§ 1.7 受控元件	(41)
§ 1.8 代数元件与动态元件	(46)
§ 1.9 集中元件与分布元件	(57)
本章提要	(59)
附录 关于常见的某些符号的说明	(61)
参考文献	(62)

第二章 网络的基本特性

§ 2.1 线性网络与非线性网络	(64)
§ 2.2 时不变网络与时变网络	(73)
§ 2.3 无源元件与有源元件	(84)
§ 2.4 无源网络与有源网络	(111)
本章提要	(116)
参考文献	(119)

第三章 网络的输入

§ 3.1 指数型输入	(120)
-------------------	---------

§ 3.2 奇异输入	(125)
§ 3.3 冲激函数讨论	(137)
§ 3.4 信号的分解	(152)
本章提要	(157)
附录 傅氏级数与傅氏变换	(159)
参考文献	(178)

第四章 网络的响应

§ 4.1 线性网络的零输入响应与零状态响应	(179)
§ 4.2 线性时不变网络零输入响应的形式	(183)
§ 4.3 线性时不变网络关于指数型输入与抛物型输入的零 状态响应	(185)
§ 4.4 冲激响应及任意输入的零状态响应	(199)
§ 4.5 求网络响应的频域法	(211)
§ 4.6 线性网络的稳态响应与暂态响应	(215)
本章提要	(218)
附录 拉氏变换	(221)
参考文献	(236)

第五章 网络图论

§ 5.1 基本定义与定理	(238)
§ 5.2 节点支路关联矩阵	(247)
§ 5.3 网孔支路关联矩阵	(253)
§ 5.4 回路支路关联矩阵	(259)
§ 5.5 割集支路关联矩阵	(265)
§ 5.6 矩阵 A 、 B_f 、 Q_f 之间的关系	(270)
§ 5.7 特兰根定理	(274)
§ 5.8 对偶线图	(275)
本章提要	(279)

参考文献	(281)
------	---------

第六章 网络方程的建立

§ 6.1 线性网络的一般支路	(282)
§ 6.2 阻抗矩阵与导纳矩阵	(287)
§ 6.3 线性时不变网络的平衡方程	(291)
§ 6.4 线性时变网络的平衡方程	(301)
§ 6.5 线性时变指数网络与线性周期时变指数网络	(304)
§ 6.6 非线性网络方程的建立	(304)
§ 6.7 网络分析的表格法	(306)
§ 6.8 建立网络方程的混合线性电阻 n 端口法	(311)
§ 6.9 对偶网络	(329)
本章提要	(334)
附录 梯阵	(338)
参考文献	(341)

第七章 网络函数

§ 7.1 几种重要的网络函数	(342)
§ 7.2 二端口网络参数	(348)
§ 7.3 多端口网络的联接	(350)
§ 7.4 不定导纳矩阵与不定阻抗矩阵	(361)
§ 7.5 散射参数	(374)
本章提要	(382)
参考文献	(395)

第八章 线性时不变网络分析的状态变量法

§ 8.1 基本概念	(396)
§ 8.2 建立线性时不变网络状态方程的观察法	(400)
§ 8.3 建立不存在受控源的线性时不变网络范式状态方	

程的公式法	(412)
§ 8.4 存在受控源的线性时不变网络建立范式状态方程的公式法	(423)
§ 8.5 建立状态方程的降阶法	(436)
§ 8.6 线性时不变网络状态方程的解	(442)
§ 8.7 利用特征多项式的化零特性计算状态转移矩阵 e^{At}	(448)
§ 8.8 利用最小多项式的化零特性求状态转移矩阵	(456)
§ 8.9 通过相似变换与本征矢量求 e^{At}	(461)
§ 8.10 线性时不变网络范式状态方程的频域解	(477)
本章提要	(479)
参考文献	(482)

第九章 线性时变网络分析的状态变量法

§ 9.1 建立线性时变网络状态方程的观察法	(484)
§ 9.2 建立不存在受控源的线性时变网络状态方程的公式法	(486)
§ 9.3 存在受控源的线性时变网络建立范式状态方程的公式法	(490)
§ 9.4 线性时变网络状态方程的解	(493)
本章提要	(508)
参考文献	(509)

第十章 非线性网络分析的状态变量法

§ 10.1 非线性网络建立范式状态方程的元件特性条件与状态变量选取规律	(510)
§ 10.2 不存在受控源的非线性网络建立范式状态方程的公式法	(518)
§ 10.3 存在受控源的非线性网络建立范式状态方程的公	

式法	(526)
§ 10.4 非线性网络范式状态方程的解的存在性与唯一性问题	(541)
本章提要	(548)
附录 向量与矩阵的范数	(550)
参考文献	(561)

第十一章 灵敏度分析、误差函数的梯度计算、故障诊断与伴随网络

§ 11.1 伴随网络	(562)
§ 11.2 网络的灵敏度分析	(568)
§ 11.3 误差函数的梯度计算	(578)
§ 11.4 模拟电路故障诊断	(589)
本章提要	(608)
参考文献	(611)

第十二章 非线性网络的小信号分析

§ 12.1 非线性网络关于小信号分析的基本方法	(612)
§ 12.2 自主网络与非自主网络	(615)
§ 12.3 非线性自主网络关于平衡点的小信号分析	(617)
§ 12.4 非线性非自主网络的小信号分析	(625)
§ 12.5 利用非线性非自主网络实现线性时变网络问题的探讨	(636)
本章提要	(654)
参考文献	(656)

第十三章 网络的稳定性理论

§ 13.1 有界输入有界输出稳定	(658)
§ 13.2 李雅普诺夫稳定与渐近稳定概念	(672)

§ 13.3	线性自主网络的i. s. L. 稳定与渐近稳定	(681)
§ 13.4	非线性自主网络的i. s. L. 稳定与渐近稳定	(683)
§ 13.5	非自主网络的i. s. L. 稳定及渐近稳定	(690)
	本章提要	(699)
	参考文献	(702)

第十四章 开关电容网络

§ 14.1	开关电容电路概说	(704)
§ 14.2	开关电容网络的节点分析法	(713)
§ 14.3	开关电容网络的积木块分析法	(727)
§ 14.4	开关电容网络的频域分析法	(747)
	本章提要	(756)
	附录 Z 变换	(759)
	参考文献	(774)
	索引	(775)

第一章 网络元件

“网络元件”是理想化网络元件的简称，网络元件并不是元件实体，而是一种概念。引入这个概念的目的是为了建立实际元件的电路模型，从而建立实际网络的电路模型。这个概念是网络理论中非常重要的概念，网络理论正是建立在元件概念的基础上的。本章在提出这个概念之后将进一步根据不同情况定义各种不同的元件。

§ 1.1 网络元件与网络的电路模型

一、实际元件与理想元件

我们在理论上研究电气网络时，首先遇到的是实际网络的造型问题，由于实际网络元件是实际网络的最基本组成部分，所以实际网络的造型问题归根到底是实际网络元件的造型问题。

由于实际的网络元件往往具有电的与磁的多方面效应，在建立实际网络元件的模型时，如果不是将电的与磁的效应区别情况分别考虑，而要同时完全地表示出来，往往会使问题十分复杂，甚至使网络的研究工作难以进行下去，解决这个问题的办法是定义理想化的网络元件。我们所定义的理想化网络元件每一种只单一地表现有电或磁的特性，于是任一实际元件可以根据一定要求由这些理想化元件单独地或者由几种元件按照一定形式联接起来的模型来近似表示，这就解决了实际元件的造型问题。

任何实际网络都是由实际的网络元件按照一定形式联接而成，解决了实际元件的造型问题也就解决了实际网络的造型问题。

已经说过，理想化的网络元件简称网络元件。在本著作中除另加申明以外，今后提到的“元件”指的都是理想化的网络元件。

二、电路模型

前面提到实际网络可以用理想化元件作成的电路模型来近似表示，这就极大地方便了我们对网络进行研究。用理想化元件作成的电路模型简称电路模型，或者称为电路。今后除另加申明以外，我们所说的电路（网络）都是指实际电路（网络）的电路模型。

一个实际网络可以用不同的模型来表示。例如，一个实际电阻器，当只需考虑其吸收电磁能量转换为热能的特性时，就可简单地用一电阻元件来表示；当还需考虑其引起磁场存在的效应时，则可用一电阻元件与电感元件相串联的模型来表示；若需考虑其引起电场存在的效应时，则可用一电阻元件与电容元件相并联的模型来表示，等等。

如何正确选用（建立）电路模型是一个值得慎重考虑的问题。选用原则一是要便于通过对模型的研究来研究实际网络，二是要满足一定的精确度。模型选得不恰当，可能会使对模型的分析结果与对该模型所表示的实际网络的测试结果有较大的出入，或者使分析工作十分复杂。当发现模型选得不恰当时，应设法修正模型。当然，修正模型的工作不一定简单，有时可能要反复进行。

在这里我们强调指出网络理论是在电路模型的基础上建立起来的，网络理论所研究的直接对象并不是实际网络而是实际网络的电路模型。然而只要电路模型建立得足够精确，则通过对模型的研究所获得的结论就能足够精确地反映实际网络中所出现的情况。不仅如此，我们还可以通过对模型的研究判断出实际网络可能具有的特性，从而为设计一定的实际网络提供可靠的依据。

三、参考方向

元件上电压与电流的参考方向原则上是可以任意规定的，但习惯上对非电源元件来说，往往将电流与电压的参考方向规定为一致的，这样规定的参考方向称为关联的参考方向。对于电源元件来说

则有些著作采用关联的参考方向，有些著作采用非关联的参考方向。在本著作中则不论非源元件还是电源元件都采用关联的参考方向。

四、四类基本元件

网络理论所涉及的基本网络变量是如下四个：

电压 v ，电流 i ，电荷 q ，磁链 φ 。

其中 v 与 φ ， i 与 q 是动态相关的

$$v = \dot{\varphi} \quad \left(\text{或} \quad \varphi = \int_{-\infty}^t v d\tau \right) \quad (1.1-1.1)$$

$$i = \dot{q} \quad \left(\text{或} \quad q = \int_{-\infty}^t i d\tau \right) \quad (1.1-1.2)$$

这二个关系不受元件特性的影响，称为网络的一般规律。

相应于 v ， i ， q ， φ 四个变量中任何一对动态无关的变量，可以定义一类基本元件，这样定义的基本元件一共有四类，即：

1. 根据 v ， i 之间的关系定义电阻元件。
2. 根据 v ， q 之间的关系定义电容元件。
3. 根据 i ， φ 之间的关系定义电感元件。
4. 根据 q ， φ 之间的关系定义忆阻元件。

某些复杂元件可以由这四类元件派生而成。

下面来逐个讨论这四类基本元件。

§ 1.2 电阻元件

在我们所定义的元件中仅含有二个引出端（可以和其它网络元件或网络的其它部分相联接）的元件称为二端元件，引出端多于二个的元件称为多端元件。

一、二端电阻元件

定义1.2-1 (二端电阻元件的一般定义)

若对所有时间 t ，二端元件的赋定关系(电流电压关系)为

$$f(v(t), i(t), t) = 0 \quad (\forall t) \quad (1.2-1)$$

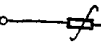

则此二端元件称为二端电阻元件，简称二端电阻。

式中 $f: R \times R \times R \rightarrow R$ 为一代数函数。 \diamond

(1.2-1)式在几何上确定了 $v-i$ 平面上一条曲线，因此定义1.2-1也可改述如下：

若二端元件的赋定关系 $\forall t$ 可由 $v-i$ 平面上一条曲线所确定，则此元件称为二端电阻元件。

(1.2-1)式中 f 的第三宗量“ t ”用以着重表示函数关系是时变的。如果函数是时不变的，那就不必写上宗量 t ，我们可以将时不变情况理解为时变情况的一种特例。

由赋定关系(1.2-1)所确定的电阻元件一般是非线性的，非线性电阻元件的电路符号为  或 。

定义1.2-2 (二端流控电阻元件)

若对所有时间 t ，二端元件的赋定关系为

$$v(t) = f(i(t), t) \quad \forall t \quad (1.2-2)$$

式中 f 是 i 的单值代数函数，则此元件称为二端电流控制电阻元件，简称二端流控电阻。 \diamond

我们也可将定义1.2-2理解为：如果二端元件的电压可以用电流的单值函数表示，则此元件称为二端流控电阻元件。

例1.2-1 (辉光管的电路模型)

辉光管的特性曲线如图1.2-1.(b)所示，从这特性曲线可以看出辉光管的电压是电流的单值函数，但辉光管的电流不是电压的单值函数，因此可用具有一定赋定关系的流控电阻作成辉光管的电路模型。

定义1.2-3 (二端压控电阻元件)

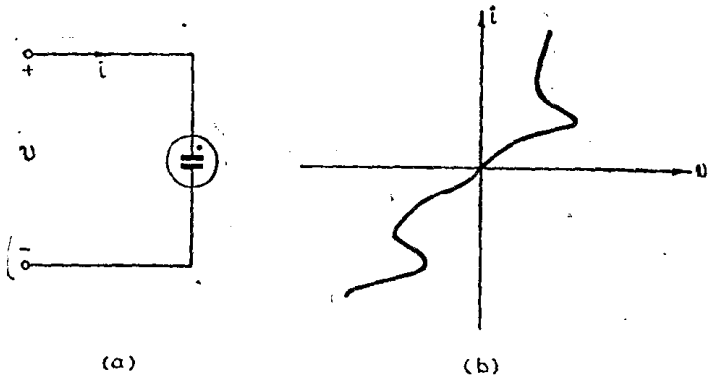


图 1.2-1

若对所有时间 t ，二端元件的赋定关系为

$$i(t) = f(v(t), t) \quad (\forall t) \quad (1.2-3)$$

式中 f 是 v 的单值函数，则此元件称为二端电压控制电阻元件，简称二端压控电阻。◇

我们也可将定义 1.2-3 理解为：如果二端元件的电流可用电压的单值函数表示，则此二端元件称为二端压控电阻元件。

例 1.2-2 (隧道二极管的电路模型)

隧道二极管的特性曲线如图 1.2-2 所示，从这曲线可以看出隧道二极管的电流是电压的单值函数，但隧道二极管的电压不是电流的单值函数，因此可用具有一定赋定关系的压控电阻作成隧道二极管的电路模型。

定义 1.2-4 (二端单调电阻元件)

若二端电阻元件既是流控的又是压控的，则此元件称为二端单调电阻元件。◇

对于单调电阻元件来说电压可用电流的单值函数表示，电流也可用电压的单值函数表示，即 $v = f(i(t), t)$ ， $i = g(v(t), t)$ ，这里 $\forall t$ ， f 与 g 互为反函数， $g = f^{-1}$ ， $f = g^{-1}$ 。

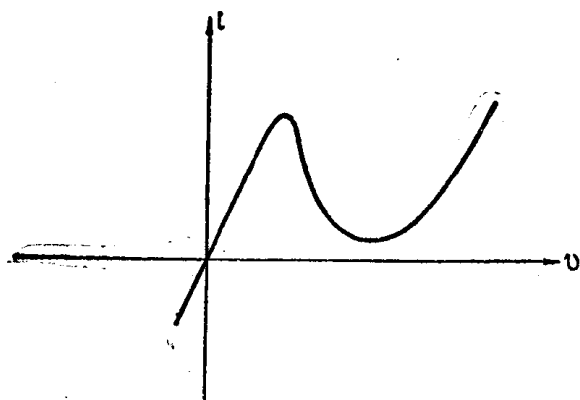


图 1.2-2

我们熟知的 $p-n$ 晶体二极管就可用具有一定赋定关系的单调电阻作成其电路模型。

在这里可以看到流控电阻与压控电阻都是由定义 1.2-1 所定义的电阻元件中的一种特定的电阻元件。而单调电阻又是流控电阻或压控电阻中的一种特定电阻元件。

例 1.2-3 (确定倍频器的赋定关系)

已知流向流控电阻的电流为 $i = \cos \omega t$ ，欲使该电阻输出电压的频率为电流频率的四倍，试确定该流控电阻的赋定关系。

解：

$$\because \cos 4\omega t = 8\cos^4 \omega t - 8\cos^2 \omega t + 1$$

\therefore 该电阻的赋定关系应为

$$v = 8i^4 - 8i^2 + 1$$

这个例子说明一定形式的倍频器的电路模型可用具有一定赋定关系的流控（或压控）电阻来作成。

定义 1.2-5 (二端拟线性电阻元件)

若二端元件的赋定关系为

$$v = f(i, t) \tag{1.2-4}$$

当 f 关于 i 的偏导数

$$A(i, t) \triangleq \frac{\partial}{\partial t} f(i, t) \quad (1.2-5)$$

存在, 且当

1. $A(i, t)$ 对所有的 (i, t) 连续有界
2. 对每一 t 存在 (与 i 无关的) $\mu > 0$, 以使

$$A(i, t) \geq \mu \quad (1.2-6)$$

则此元件称为拟线性二端流控电阻元件。◇

当 f 满足上述条件时, f 称为拟线性函数, 可以看出拟线性函数是严格递增的, 并且反函数 f^{-1} 存在。这说明拟线性元件的赋定关系也是严格递增的, 并且电阻元件若是拟线性流控的必同时是拟线性压控的。还可看出拟线性函数之和仍是拟线性的, 说明二个 (或几个) 拟线性电阻元件串联起来的等效元件仍是拟线性的。

定义1.2-6 (二端线性电阻元件)

若二端元件的赋定关系为

$$v(t) = R(t)i(t) \quad (\forall t) \quad (1.2-7)$$

则此元件称为二端线性电阻元件。◇

式中 $R(t)$ 与电压及电流无关, 称为线性电阻元件的电阻。

(1.2-7) 在几何上确定了 $v-i$ 平面上过原点的一条直线, $R(t)$ 表示该直线在时间 t 的斜率。若 $R(t)$ 是一个恒值 R , 则可将 (1.2-7) 改写为

$$v(t) = Ri(t) \quad (\forall t) \quad (1.2-8)$$

由赋定关系 (1.2-8) 所确定的电阻元件称为二端线性时不变电阻元件。

线性电阻元件的电阻参数 $R(t)$ 集中地反映了线性电阻元件的特性, 但我们要强调指出电阻参数的概念仅存在于线性电阻元件中, 对于非线性电阻元件则不存在电阻参数 $R(t)$ 的概念。

在这里也可看到线性电阻元件是单调电阻元件的一种特例, 因此是定义 1.21 所定义的 (非线性) 电阻元件的一种特例。

例1.2-4 (线性时变与时不变电阻元件)

若流过线性时不变电阻 $R=1+\cos\theta$ ，及线性时变电阻 $R(t)=1+\cos\omega_2 t$ 的电流为 $i=\cos\omega_1 t$ ，试比较在二个电阻上所产生的电压。

解：

$$v = Ri = (1 + \cos\theta)\cos\omega_1 t$$

$$\hat{v} = R(t)i = (1 + \cos\omega_2 t)\cos\omega_1 t$$

$$= \cos\omega_1 t + \frac{1}{2}\cos(\omega_1 + \omega_2)t + \frac{1}{2}\cos(\omega_1 - \omega_2)t$$

可见在时不变电阻上所产生的电压波形与输入完全一致，而在时变电阻上所产生的电压 \hat{v} 为一调制波。这一例子说明：

1. 时变电阻元件与时不变电阻元件存在着本质上的差别。
2. 一定形式的调制器可用具有一定赋定关系的线性时变电阻元件作成其电路模型。

例1.2-5 （开路元件与短路元件）

开路元件的赋定关系为 $i=0$ ； v 任意。在 $v-i$ 平面上反映为与 v 轴相重合的一条直线。短路元件的赋定关系为 $v=0$ ； i 任意。在 $v-i$ 平面上反映为与 i 轴相重合的一条直线。根据定义1.2-6，此二元件都属于线性时不变电阻元件。

例1.2-6 （独立电压源元件与独立电流源元件）

独立电压源的赋定关系为 $v=v(t)$ ； i 任意。在 $v-i$ 平面上反映为平行于 i 轴且与 i 轴之间的距离随时间变化的直线。独立电流源的赋定关系为 $i=i(t)$ ； v 任意。在 $v-i$ 平面上反映为平行于 v 轴且与 v 轴之间的距离随时间变化的直线。由于这二种元件的 $v-i$ 曲线不满足在所有时间 t 都是过原点的直线的条件，因此都不属于线性电阻元件，而是非线性电阻元件。

二、多端电阻元件

若一元件具有 $N+1$ 个引出端，如图1.2-3所示，任选一个引出端（图中选第 $N+1$ 个）作为参考点，则该元件具有 N 个独立引出端电压（从引出端至参考点之间的电压）或磁链。又，根据KCL