〔美〕N. 巴拉巴尼安 T. A. 比卡特 著

电网络理论

上 册

夏承铨 刘国柱 宁 超 刘正兴 黄东泉 译

邱关源 校

内容简介

本书详细阐明了现代电网络理论的一些重要论题，对系统内部成分和系统特性、网络的频率响应和时间响应、网络分析和网络综合都加以讨论，比较全面讨论了线性非时变网络，也介绍了时变和非线性网络。本书重视基本概念和逻辑思维，系统性强，论证比较严密。书中很多地方还留一部分内容给读者思考，有适量的说明性例题，每章末配有丰富多样的习题，其中一部分具有一定的难度和思考价值。

本书可用作电类各专业的研究生和高年级大学生的教学参考书，也可供有关科技人员参考。

中译本分两册出版。上册为基本概念、图论和网络方程式、网络函数、状态方程式、积分解法和网络函数表示法等六章。下册为网络综合基础、散射参数、信号流图和反馈、线性时变和非线性网络等四章以及广义函数、复变函数理论和拉普拉斯变换理论等三个附录。

电网络理论

上　册

〔美〕N. 巴拉巴尼安　T.A. 比卡特 著

夏承铨 刘国柱 宁 超 刘正兴 黄东泉 译

邱关源 校

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

河北香河印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32　印张 15.375　字数 370,000

1982 年 9 月第 1 版　1983 年 12 月第 1 次印刷

印数 00,001—8,500

书号 15010·0451　定价 2.35 元

译 者 序

美国叙拉古大学(Syracuse University)的Norman Balabanian 教授和 Theodore A. Bickart 教授合著的《电网络理论》(Electrical Network Theory)一书(John Wiley, 1969 年版)可用来作为电类各专业的研究生和高年级大学生的教学参考书。本书阐明了现代电网络理论的一些重要论题，比较全面地讨论了线性非时变网络的性质和求解方法，还介绍了时变和非线性网络的重要性质和分析方法。

本书重视基本概念和逻辑思维，系统性强，论证较为严密，而且在很多地方作者留一部分内容让读者思考，使人读了之后受到启发。书中包括适量的说明性的例题，并在每章之末配以丰富多样的习题供读者练习；其中有一部分习题具有一定的难度和思考价值。

读者应具备线性代数、复变函数、微分方程、拉普拉斯变换以及广义函数等方面的数学基础。为了帮助读者复习，书末还有三个附录，即：广义函数、复变函数理论以及拉普拉斯变换理论。线性代数内容用得较多，故在第一章、第四章以及第七章中有较详细的论述。所以读者即使不查阅有关数学教材，也可以看懂本书的内容。此外，本书并不要求计算机程序设计作为必备的基础。当然，读者若具备这方面的知识，就可以顺利完成书中带星号的习题；否则，就只好暂时不做这些题目。

由于本书的篇幅较大，故中译本分上下两册出版，上册包括一至六章，下册包括七至十章以及三个附录。

参加本书翻译的有：夏承铨(序言、第二章、第十章、附录三、译名索引)、刘国柱(第七章、附录一、附录二)、宁超(第三章、第六

章)、刘正兴(第四章、第九章)、黄东泉(第一章、第五章、第八章)。全书由夏承铨副教授主译,由邱关源教授审校。

译者希望本书的出版对于我国高等学校的研究生的培养工作有所裨益。但由于译者水平所限,错谬之处恐在所难免,尚请读者批评指正。

译　　者

一九八二年七月

原　　序

在1965年夏天，最初曾把本书设想为S. 赛舒(Sundaram Seshu)和N. 巴拉巴尼安合著的《线性网络分析》的修订版；可是，在修订工作实际开始之前，在一次车祸中，赛舒悲惨地死去了。从那时起，所设想的修订工作逐步展开；修改的程度如此之大，以致写成后使本书以一部新书而问世。虽然如此，我们(特别是N. 巴拉巴尼安)还得感激赛舒对本书所做的直接和间接的贡献。

本书是由一套讲稿发展起来的；这套讲稿曾在叙拉古大学(Syracuse University)和加里福尼亚大学伯克莱分校(Berkeley Campus of the University of California)的研究生早期课程中使用过。本书的深浅程度也容许从中挑选部分内容用在高年级大学生的课程中。

在电系统的研究中，有时需要处理系统的内部结构和成分；在此情况下，拓扑学就成为分析中的一种重要工具。在其他情况下，只有系统的外部特性才是重要的；于是，"系统"的考虑方法就起作用了。在本书中，我们对于系统内部的成分和系统特性或端口特性这两个方面都要讨论。

矩阵分析、线图、复变函数以及拉普拉斯变换是最重要的数学工具；其中前两部分内容在正文中介绍，后两部分内容则于附录中论述。在附录中还讨论广义函数，以加强第五章中应用冲激函数的基础。每个附录的内容都相当详细而认真地展开阐明所述的问题。

在本书中，我们试图对网络理论的基础展开仔细的讨论。我们考虑网络的频率响应和时间响应，也考虑网络分析和网络综合。我们把有源、非互易部件(诸如受控源、回转器、负变换器等等)与

无源、互易部件摆在一起处理。虽然本书的大部分内容限于线性、非时变网络，但还有涉及到时变和非线性网络的内容广泛的一章。

矩阵分析并不全在一处讨论，某些内容在需要的时候才加以介绍。因此，第一章讨论入门所需要考虑的问题，而矩阵函数则于第四章中介绍，在该章中要寻求向量状态方程式的解答。类似地，在第七章中讨论等价、矩阵的标准形式以及二次型，作为探讨网络解析性质的准备。

在第二章中，以基尔霍夫基本关系的精确编列来开始进行网络的分析，而且是通过图论的应用来展开讨论的。回路、节点、节偶(node-pair)(以及混合变量方程式等经典方法是在拓扑的基础上介绍的。

第三章讨论多端网络的端口描述和端子描述。介绍通常的二端口参数，但也讨论多端口网络。不定导纳矩阵和不定阻抗矩阵及其性质的讨论出现在此处。本章以讨论用拓扑概念来计算网络函数的公式而结束。

第四章介绍网络方程的状态编列法。有关无源和有源以及互易和非互易网络的状态方程式的编写步骤包括这样一种处理方法，它所需要计算的仅仅是一个电阻网络的多端口参数(此电阻网络可以是有源的和非互易的)。本章包含有关于向量状态方程式时域解的广泛讨论。

第五章讨论了求解的积分方法，包括卷积积分和叠加积分。本章还讨论了计算转移矩阵的数值方法以及在数值解中的误差等问题。

第六章和第七章提供了从分析到综合的过渡。研究了以函数的实部、幅值或角度作为网络函数规范的充分性，并推导出从一个函数的任意部分来决定此函数的步骤。这些步骤既包括代数方法

也包括由波特公式所给出的积分关系。还推导了网络函数的实部和虚部与冲激响应或阶跃响应之间关系的积分公式。对于无源网络，能量函数为确定网络函数的解析性质提供了基础。引入正实函数，并且由此深入地导出电抗函数、*RC* 阻抗函数和 *RC* 导纳函数的性质。所讨论的上述或其他网络函数的综合步骤包括达令顿(Darlington)步骤和有源 *RC* 综合方法。

第八章给出关于散射参数以及用散射矩阵描述多端口网络的详尽论述。对于实数归一化和复数归一化都加以论述；后者包括单一频率的归一化和与频率无关的归一化。有源的和无源的、互易的和非互易的多端口网络的反射性质和传输性质是通过散射参数展开讨论的。对于滤波器设计和负电阻放大器方面的应用也加以讨论。

反馈和稳定性的概念在第九章中讨论。作为一种工具，在此引入了信号流图。本章还提出鲁斯-胡尔维茨 (Routh-Hurwitz) 判据、李野纳-齐派特(Liénard-Chipart) 判据以及奈奎斯特(Nyquist)判据。

最后一章专门研究时变和非线性网络。在通过状态方程式展开讨论时，重点放在这两种类型网络的一般性质上。既讨论解的存在和唯一性问题，也讨论求解的数值方法。本章还专门研究李雅普诺夫(Liapunov)稳定性理论。

在每章之末都提出丰富多样的习题，总共有 460 道题。其中有些习题是正文中推导出来的结果的例行应用。但是，有许多习题却需要对正文材料作相当大的扩展，或者需要证明一些间接的结果；这些本来很容易包括在正文中的，但限于篇幅而未能包括进去。许多章中都包括一类特定的习题，每道这类题目都用星号注明，它们都要求为正文中所论述的某个特定问题编写计算机程序。尽管书中并未包括编写计算机程序的内容，而只包括最低限度的

数值方法的讨论；然而我们认为本书的读者可能有足够的基础去完成这些习题。

书末提出了参考文献目录，其目的是列举一些作者；在某些概念方面我们感谢这些作者。此外，这个文献目录还提供了对于某些特定论题的可供查阅的一些附加的参考文献。

我们从许多提出改进意见的同事们和学生们的评论和批评中得到益处，为此特表谢意。

N. 巴拉巴尼安
T. A. 比卡特
1968年11月于
纽约州叙拉古

目　录

第一章 基本概念

1.1 引　　言

就象许多科学分支那样，电网络理论企图通过建立一种数学模型来描述发生在一部分客观世界中的现象。当然，这种模型是以对客观世界中的观察作为依据的；但它也利用其他的数学模型，这些模型已经如此出色地经受住时间的考验，以致已被认为是客观真实性的本身。例如，关于在导体中电子流动而形成电流的景象是如此地生动，以致于使我们不觉得这只是部分客观世界的一种理论模型。

提出一种模型的目的，是为了使我们能够了解自然现象；但不仅如此，我们希望所导出的逻辑结论使我们能预测出在我们所确立的条件下该模型的行为(behavior)。如果我们能在客观世界中重现在模型中起主要作用的条件，我们的推测便可以用实验来检验。假若我们的推测被证实，我们便确信这种模型是好的。假若在推测与实验数据之间有差异，而这种差异又不是实验误差引起的，并且我们有根据深信这种理论模型的实验模拟重现了模型的条件；那末，我们就应得出结论，就了解客观世界的目的来说，这个模型不是“恰当的”，必须加以彻底检查*。

就电网络理论来说，模型在推测实验结果方面取得了很大的成功。实际上，模型已变得如此真实，以致对于学生来说，很难区

---

* 在著名的迈克耳逊-莫雷(Michelson-Morley)实验之后，曾经发生过这种彻底检查的例子，其中根据牛顿力学计算出来的数据与实验结果不符。修正过的模型就是相对论力学。

分模型和客观世界之间的差别。

建立模型的第一步是详细观察客观世界。为了要建立可测量的各个变量之间的普遍关系而进行实验。从这些实验中，得出关于所研究的变量的行为的一般结论。这些结论被视为"定律"，并且常常通过数学模型的变量来表述。

不用说，我们将不涉及处理过程中的这一步，这样的模型现在已经很好地建立起来了。相反，我们将直接采用这种模型的诸元件，而不带推理证明或者实验证明。为了恰当地描写一个给定的实际情况，把该模型的各假想元件间的适当连接抽象出来的过程是一个重要的考虑。但这已超出本书的范围。

本书所研究的是线性电网络理论。所谓电网络是指电器件间的相互连接而言的；这种相互连接形成一种具有可达点的结构，在这些可达点上可以观测信号。假设组成网络的电器件是用模型或假想元件表示的；这些假想元件的电压-电流方程是线性方程（代数方程、差分方程、常微分方程或偏微分方程）。在本书中，我们仅研究集总网络；这样，我们将不涉及偏微分方程或差分方程。

网络的性质可在两个大标题下分类。第一，网络结构所引起的那些性质——拓扑性质。这些性质与由什么特定元件构成网络的支路无关，而仅仅取决于这些支路是如何相互连接的；例如，可推出一个梯形网络（一种特殊的拓扑结构）的传递函数零点必定位于左半平面，而不管各支路是由什么无源元件构成的。第二，作为信号处理器的网络的一些性质。信号在网络的可达点上加入，网络对这些信号按照一定的方式加以改变或处理。这些信号处理性质既取决于组成网络的元件，也取决于网络的拓扑结构。这样，假若网络元件是无损耗的，则不论网络结构如何，信号都按一定方式被改变；而网络结构则对于这些性质施加进一步的限制。例如，无损耗梯形网络一些性质就不同于无损耗格形网络那些性质。对于

网络的拓扑性质和信号处理性质，我们都要加以讨论。

1.2 矩阵代数初步

正像科学和工程技术的许多其他领域那样，在电网络分析中要出现代数的或者微分的线性方程组。当这些方程组包含有许多个方程式时，单单是编写它们和使它们具体化就够费力的了。矩阵表示法乃是编写这些方程组的一种简便方法；而且矩阵表示法还能简化这些方程的运算和它们的求解。正像人们学会把三维空间向量看成是一个整体那样，也可以把方程组看成是一个矩阵方程。在这一节中，我们将粗略地复习矩阵的某些基本性质和矩阵代数；在以后几章里，当需要某些附加的论题时，我们将暂时离开所讨论的主题去介绍它们。

矩阵是排成行和列的一些量的矩形阵列，其中每个量叫做矩阵的一个项或一个元素。所包含的这些量可以是实数或复数，也可以是时间函数，频率函数，微分算子等等。我们将假设这些项选自一个“域”，也就是说，它们服从类似于实数代数的一种代数。下面是矩阵的例子：

$$\mathbf{M}=\begin{bmatrix}1 & 2\\ 5 & -1\\ 0 & 6\end{bmatrix}\qquad \mathbf{Z}=\begin{bmatrix}\dfrac{s}{s+2} & 2s\\ 2s & 3s^2\end{bmatrix}\qquad \mathbf{V}=\begin{bmatrix}V_1\\ V_2\\ V_3\\ V_4\end{bmatrix}$$

在全部项的两边用一个方括号把整个矩阵框起来。为了援引某个矩阵，没有必要写出整个矩阵，可以用一个简单的记号作为它的“名称”，就象上面例子中 **M** 或 **V** 那样。我们将一律采用大写或小字的黑体字母表示矩阵。

矩阵的阶是说明行数和列数的有序数偶：(m, n)或者 $m\times n$。

在上面三个例子中，阶分别为(3, 2)，(2, 2)和(4, 1)；在使用另一种记法时，它们的阶分别为 3×2, 2×2 和 4×1。上面三个例子中的最后一个是矩阵的一种特殊类型，由于显见的理由，将其称为列矩阵；一个矩阵的阶也可能是 $1\times n$，也就是说这个矩阵只有一行，因而叫做行矩阵。行数等于列数的矩阵，叫做方阵。在上面例子中，**Z** 就是方阵。对于矩阵的类型是列矩阵、行矩阵或者方阵的特殊情况，矩阵的阶就可以不含糊地用一个数来确定，这个数分别为列矩阵的行数，行矩阵的列数，以及方阵的行数或列数。例如，若**M**是一个具有 n 行和 n 列的方阵，则为 n 阶的。

为了用通项指出矩阵的诸元素，我们用下列记法：

$$\mathbf{A}=[a_{ij}]_{m,n}$$

如果矩阵的阶 (m, n) 不关重要，在这个表达式中就可以不表示出来。矩阵的“代表元素”是 a_{ij}。上面的简单表达式和下式代表同一件事情：

$$\mathbf{A}=\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & a_{m3} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \tag{1}$$

基本运算

相等　如果两个矩阵同阶且其相应的元素恒等，则这两个矩阵 $\mathbf{A}=[a_{ij}]$和 $\mathbf{B}=[b_{ij}]$叫做相等；也就是说，如果对所有 i 和 j，$a_{ij}=b_{ij}$，则 $\mathbf{A}=\mathbf{B}$。

用一个标量相乘　用一个标量(就是一个普通的数值) k 乘一个矩阵，就是用此标量去乘该矩阵的每一个元素，也就是说，$k\mathbf{A}$ 是一个矩阵，其代表元素是 ka_{ij}。

矩阵的加法　加法仅对同阶的矩阵才有定义。把两个矩阵相