

信息技术丛书

# 现代网络 分析

陈惠开〔美〕

吴新余 吴叔美 编著

王兆明 审校

人民邮电出版社

# 现代网络分析

陈惠开〔美〕 编著  
吴新余 吴叔美

王兆明 审校

人民邮电出版社

2024/03  
登记证号 (京) 143 号

## 内 容 简 介

本书是面向国内读者而编写的一本有关“线性网络与系统”方面的教学参考书，也可选作教材。书中反映了作者们的历年教学经验和研究成果。

全书基本内容包括如下：基本概念、图与网络方程，网络方程组的时域解，状态方程的建立及求解，拉氏变换，傅氏级数和傅氏变换，快速傅立叶变换，有源双口网络，流图与信号流图理论，有向树理论，反馈放大器理论，散射矩阵理论分析基础，Z变换及开关电容网络分析等。

本书可作为高等学校电专业学生选修或研究生(配合陈的原著)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。

## 现代网络分析

陈惠开 [美] 编著  
吴新余 吴叔美

王兆明 审校  
责任编辑 徐德霆

\*  
人民邮电出版社出版发行  
北京东长安街27号

北京顺义振华胶印厂印刷  
新华书店总店科技发行所经销

\*  
开本：850×1168 1/32 1992年6月 第一版  
印张：42<sup>12</sup>/<sub>32</sub> 页数：678 1992年6月北京第1次印刷  
字数：1130千字 印数：1-2500册

ISBN7-115-04529-1/TN·467

定价：31.10元

# 前 言

一九八二年夏天，美国圣他、克勒拉大学的陈树柏教授在北京组织了“图论及其应用”讲习班，应中国科技大学研究生院的邀请，在此讲习班上我作了“有向图及其应用”的连续讲座。两年后，华东工学院和南京邮电学院邀请我作了“宽带匹配网络理论”的连续讲座及“图论与宽带匹配研究最新进展”的专题讲演。在两次暑期讲习班的总结讨论中，我感到中国迫切需要适合高年级本科生的中文现代科技书籍，油然产生了编写“现代网络分析”一书的想法，它的内容可以取材于我已经出版过的几本书和近年来发表的论文：

应用图论：图和电网络	1976年
宽带匹配网络的理论和设计	1976年
有源网络和反馈放大器理论	1980年
线性网络和系统	1983年

本书的编写工作是由几位对这一课题有浓厚兴趣并在讲习班听过讲的教师志愿担任的。整个编写工作花了两年多的时间，本书的内容是我选定和提供的，副主编吴新余先生和吴叔美先生担任了全书的编写和组织工作，成都电讯工程学院的王兆明先生是书稿的审校者，他校阅和修订了全书的大部分手稿。

东南大学吴叔美先生编写了第一、二、三、七和十六章；第四、五、六、八、九、十二、十三、十四和十五章是南京邮电学院吴新余先生编写的；东南大学的何琴芳女士编写了第十、十一章。大连海运学院的朱义胜先生和东北工学院的贡吉安先生分别审阅了第八章和第十五、十六章书稿。

最后，我要借此机会向我所有的同事，访问学者和以前的学生表示诚挚的谢意，没有他们的努力和支持是不可能完成本书编写的。

特别是，我要感谢吴新余先生、吴叔美先生和王兆明先生在整整两年的时间里所作出的宝贵贡献。我希望本书的出版将有助于中国的科研和教学工作的发展。

陈惠开（签字）

一九八六年十二月于芝加哥伊利诺大学

# 目 录

<b>第一章 基本概念</b> .....	1
1. 1 引言.....	1
1. 2 系统和它们的分类.....	3
1. 3 无源性和有源性 .....	15
1. 4 信号 .....	17
1. 5 把信号分解为各种基本信号 .....	21
1. 6 系统的连接 .....	30
小结 .....	31
习题 .....	33
<b>第二章 图和网络方程</b> .....	37
2. 1 线图的概念和定义 .....	37
2. 2 图的矩阵和基尔霍夫方程 .....	54
2. 3 图的各矩阵之间的关系 .....	65
2. 4 特勒根定理 .....	68
2. 5 原始网络方程组 .....	74
2. 6 平面图和对偶图 .....	76
小结 .....	84
习题 .....	85
<b>第三章 导出网络方程组</b> .....	93
3. 1 回路方程组 .....	94
3. 2 割集方程组.....	113
3. 3 混合方程组.....	135

小结	139
习题	140
<b>第四章 网络导出方程组的时域解</b>	<b>150</b>
4.1 线性联立微分方程	150
4.2 齐次线性微分方程	157
4.3 非齐次线性微分方程	176
小结	196
习题	198
<b>第五章 网络的状态方程</b>	<b>204</b>
5.1 范式状态方程	205
5.2 网络的状态和状态变量的概念	214
5.3 正规树及其选取	217
5.4 建立状态方程的步骤	223
5.5 蜕化网络的状态方程	231
5.6 状态方程的显式表示	236
5.7 状态变量的另一种表示式	246
5.8 参数矩阵的物理解释	248
5.9 网络复杂度的初步研究	256
5.10 用标量微分方程描述的系统的状态方程	266
小结	274
习题	275
<b>第六章 状态方程的求解及一些重要概念</b>	<b>285</b>
6.1 一阶系统	285
6.2 高阶系统的求解	288
6.3 固有频率和特征值	299
6.4 状态转移矩阵	302

6. 5	利用 Cayley-Hamilton 定理求状态转移矩阵 .....	314
6. 6	约当标准型和齐次状态方程的解 .....	319
6. 7	计算机求解和程序 .....	327
6. 8	转移函数矩阵 .....	355
6. 9	状态变量的空间轨迹 .....	367
6. 10	可控性和可测性 .....	372
6. 11	状态变量反馈 .....	385
	小结 .....	390
	习题 .....	390
<b>第七章 用拉普拉斯变换分析网络 .....</b>		<b>399</b>
7. 1	拉普拉斯变换 .....	399
7. 2	拉普拉斯变换的基本性质 .....	409
7. 3	部分分式展开 .....	419
7. 4	部分分式展开的非迭代法 .....	428
7. 5	计算机解和程序 .....	434
7. 6	初始条件对应的等值电路 .....	445
7. 7	导出方程组的解 .....	448
7. 8	复变函数的反演积分 .....	452
7. 9	卷积积分 .....	455
	小结 .....	457
	习题 .....	459
<b>第八章 网络的矩阵表征 .....</b>		<b>463</b>
8. 1	$n$ 端口网络的常见矩阵 .....	463
8. 2	埃尔米特型和正实矩阵 .....	467
8. 3	$n$ 端口网络的散射矩阵 .....	480
8. 4	$n$ 端口网络的无源性分析 .....	508
8. 5	有界实散射矩阵 .....	514



8. 6	$n$ 端口网络的互连	520
8. 7	多端网络的不定导纳矩阵	528
	小结	571
	习题	573
<b>第九章</b>	<b>有源双口网络</b>	<b>586</b>
9. 1	双口参数	586
9. 2	功率增益	590
9. 3	灵敏度	592
9. 4	无源性和有源性	596
9. 5	U 函数	601
9. 6	潜在稳定性和绝对稳定性	617
9. 7	绝对稳定双口网络的最佳终端	630
	小结	643
	习题	644
<b>第十章</b>	<b>傅立叶级数和傅立叶变换</b>	<b>652</b>
10. 1	周期信号和傅立叶级数	652
10. 2	三角傅立叶级数和指数傅立叶级数	663
10. 3	傅立叶级数的收敛性	677
10. 4	吉伯斯现象	682
10. 5	线性时恒系统对于周期性激励的稳态响应	714
10. 6	傅立叶系数的数值计算	720
10. 7	计算机解及程序	727
10. 8	傅立叶积分和傅立叶变换	743
10. 9	傅立叶变换的性质	752
10. 10	傅立叶变换在网络分析中的应用	774
10. 11	带宽、脉冲持续时间与上升时间	777
10. 12	傅立叶变换与拉普拉斯变换的关系	790

小结.....	794
习题.....	796
<b>第十一章 快速傅立叶变换.....</b>	<b>813</b>
11. 1 离散傅立叶级数 .....	813
11. 2 离散傅立叶变换 (DFT) .....	826
11. 3 离散傅立叶变换的性质 .....	829
11. 4 快速傅立叶变换 .....	838
11. 5 计算机求解和程序 .....	849
11. 6 抽样定理 .....	860
11. 7 傅立叶变换的数值计算 .....	867
11. 8 带限周期信号的取样 .....	888
小结.....	892
习题.....	893
<b>第十二章 有源网络的拓扑分析.....</b>	<b>897</b>
12. 1 伴随有向图 .....	898
12. 2 有向树 .....	909
12. 3 有向 2-树 .....	918
12. 4 产生有向树的各种方法 .....	922
12. 5 电网络的直接分析 .....	943
12. 6 有源网络的复杂度 .....	966
12. 7 有源网络的唯一解 .....	969
小结.....	985
习题.....	987
<b>第十三章 线性代数方程的有向图解.....</b>	<b>994</b>
13. 1 Coates 图——流图 .....	996
13. 2 Mason 图——信号流图 .....	1020

13. 3	矩阵的特征多项式的计算	1041
13. 4	利用流图进行矩阵求逆	1046
	小结	1050
	习题	1050
<b>第十四章</b>	<b>反馈网络理论</b>	<b>1056</b>
14. 1	理想反馈模型	1057
14. 2	波特反馈理论	1059
14. 3	网络函数和反馈	1075
14. 4	灵敏度函数与反馈	1082
14. 5	网络函数与一般回归差和一般零回归差	1092
14. 6	相对灵敏度函数与反馈	1106
14. 7	反馈放大器理论的信号流图公式	1111
14. 8	回归差的测量	1117
14. 9	反馈放大器的稳定性	1128
14. 10	劳斯准则, 胡尔维茨准则和李野纳-切派特准则	1130
14. 11	耐奎斯特准则	1137
14. 12	将耐奎斯特准则应用于单回路反馈放大器	1143
14. 13	根轨迹法	1151
14. 14	根灵敏度	1163
14. 15	波特公式	1168
14. 16	波特设计理论	1180
	小结	1189
	习题	1192
<b>第十五章</b>	<b>Z 变换和离散时间系统的分析</b>	<b>1207</b>
	引言	1207
15. 1	离散时间系统和线性差分方程	1208

15. 2	Z 变换的定义	1215
15. 3	Z 变换的性质	1222
15. 4	Z 反变换	1227
15. 5	利用 Z 变换求解差分方程和离散状态方程	1232
15. 6	Z 变换, 拉氏变换和包括傅氏变换之间的关系	1241
15. 7	数字滤波器	1247
15. 8	离散系统稳定性的检验	1262
	小结	1266
	习题	1267
<b>第十六章</b>	<b>开关电容网络分析</b>	<b>1272</b>
16. 1	开关电容电路原理和基本元件	1273
16. 2	开关电容网络的分析方法	1281
16. 3	MOS 开关电容滤波器	1301
	小结	1310
	习题	1311
	<b>参考文献</b>	<b>1314</b>

后记

# 第一章

## 基本概念

---

### 1.1 引言

在过去二三十年中，电子工程特别是固态电子技术取得了飞速的发展。晶体管、隧道二极管和齐纳二极管等固态器件已经代替了电子管。集成电路特别是 VLSI 技术的发展又使电子学中一些新近的发明逐渐变得过时。为了使培养出来的人才能适应技术发展所提出的挑战，在电气工程教育中，进一步加强数学和物理学这样一些基础性知识已势在必行。本书把数学方法应用于工程系统的分析，以满足上述两个目的。

通常使用的“系统”这一术语有多种含意。我们可以把相互作用以完成一个共同计划或服务于共同目的的一些物体的集合当作一个系统。这种广义的概念包括了所有物理及非物理系统、自然系统和各种类型的人为系统。电子系统、机械系统、液压系统和热力系统都是物理（自然）系统的例子。政治系统、经济系统和社会系统是非物理（人为）系统的例子。从某种意义上讲，宇宙总体也可以看作是一个巨大的系统。在求解工程系统问题时，通常我们限于讨论具有确定范围的其规模比较小的有界系统，以便在分析各种条件下系统的特性时能获得有用的解答。

在本书中，“系统”这一术语是指由各种元件如电阻器、电感器、电容器、变压器、晶体管、运算放大器和电源等组成的电网络。这些物理元件可以看成能完成某些数学函数运算功能的器件。例如，电阻器完成乘法运算，电容器和电感器分别完成微分和积分运算。如果我们主要关心的是这些元件的功能而不是实际元件本身，则可以将系统看成是一个处理器。模拟网络、数字网络或混合网络都可用来完成处理功能。如果采用数字网络，则系统是具有离散输入和输出的数字器件。因此，系统有三种不同的表示方法。

作为工程师，我们不仅要懂得系统的分析，而且要掌握系统的设计方法。但是在掌握系统的设计方法以前，必须学会对系统进行分析。系统分析通常包括以下三个步骤：

1. **建模** 建立适当的数学模型，以描述系统多方面的物理特性。
2. **求解** 用任何数学方法对上述数学模型求解。
3. **解释** 以物理概念为基础来解释所得到的数学模型。

为了对系统的研究方法有个大致了解，让我们研究图 1.1 所表示的通信系统。图中的方框代表各个功能子系统，这些子系统都可以用系统分析的方法分别进行研究。大多数情况下，一个传输系统担负着同时传递几路信号的任务。来自各路信号源的信号被送往各相应的接收机。无线电广播就是通信系统的一个例子。电离层是一个公共传输系统，各广播电台就是各个不同的信号源，各收音机就是各路接收机。为了区别各个不同的信号（关于信号的定义将在 1.4 节中讨论），用编码器对信号进行编码，这个过程称为**调制**。解调器不仅要能选择所需要信号而且要把它变换为原来的形式，这个过程称为**解调**。有关调制和解调，编码和解码的原理将在后续课程中详细讨论。

本书所讨论的系统分析方法，已经有效地用于各种工程实际，这些方法构成了现代工程系统分析的基础。虽然书中的例子均只涉及电信号和电系统，但是，这些分析方法也适用于具有类似数学模型

的其它系统。

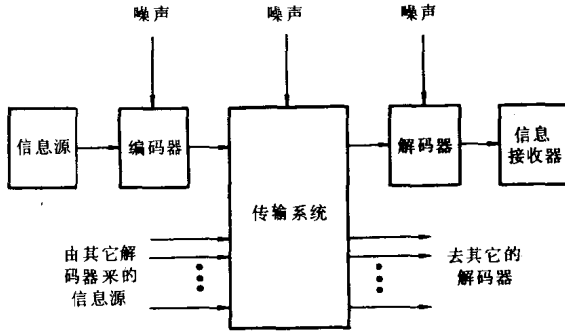


图 1.1 通信系统的方框图

## 1.2 系统和它们的分类

本书的目的之一是帮助读者从系统的观点来考虑电气工程问题。虽然系统内各元件都会影响到整个系统的性能，但是，组成系统的元件通常一组一组地集合在一起，每一组元件完成一定的功能，这样一组元件的集合称为**子系统**。这些子系统相互连接构成整个系统。子系统之间只在端子处相互作用。例如，如果数字计算机用它所包含的电阻器、二极管、运算放大器和电容器等元件来建立模型，所得出的模型和原来电路一样复杂。如果把计算机看成是由算术单元、控制电路、存储器和输入输出设备所组成的系统就比较方便了，这些单元可以视为整个系统的子系统，每个子系统又以它本身的方式形成一个独立系统。当然，它们也可以由更小的子系统组成。例如，数字计算机的算术单元是由加法器、计数器和指示器等子系统组成的系统。无线电接收机是由振荡器、放大器、检波器和滤波器等子系统组成的系统。如果接收机是人造卫星跟踪站的一部分，它就成为一个大系统中的子系统，这个大系统还包括诸如计算机、天线和发射机等子系统。

在实际工作中我们常常并不关心各子系统的相互作用，而只要导出输入和输出之间关系。例如，图 1.2 系统的输入为  $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ ，输出为  $y_1(t), y_2(t), \dots, y_m(t)$ 。输入和输出之间关系的图形叫做**系统模型**。建立模型是研究系统的重要步骤之一。例如，对于图 1.3 所示的电压放大器，我们并不关心其输入和输出电流，而只注意它的电压放大作用，输出和输入电压的关系



图 1.2 输入  $x_i(t)$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 和输出  $y_j(t)$  ( $j=1, 2, \dots, m$ ) 作为一个整体描述的系统

可表示为

$$V_o(t) = AV_i(t) \tag{1.1}$$

其中  $A$  是电压放大系数。

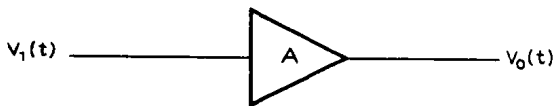


图 1.3 电压放大器的图形表示

本书的主要任务之一是介绍描述系统输入输出关系的各种方法。我们将主要讨论图 1.4 所示的单输入和单输出系统。但这里所介绍的许多概念易于推广到多输入-输出系统。

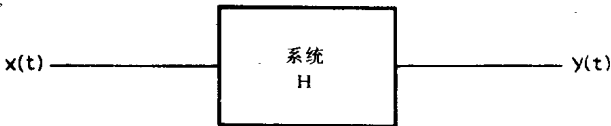


图 1.4 具有单输入和单输出系统的描述

对于图 1.4 所示的单输入-输出系统，

$$y(t) = H[x(t)] \tag{1.2}$$



式中  $y(t)$  是与输入信号  $x(t)$  对应的系统输出。对于图 1.3 的理想放大器有

$$x(t) = v_i(t) \quad y(t) = v_o(t) \quad (1.3a)$$

以及

$$y(t) = H[x(t)] = Ax(t) \quad (1.3b)$$

系统根据其数学模型的特点分类。以下是几种主要的分类方式。

**线性系统与非线性系统** 如果系统的输入-输出关系由式 (1.2) 描述, 且对于任意常数  $\alpha$  有

$$H[\alpha x(t)] = \alpha H[x(t)] = \alpha y(t) \quad (1.4)$$

我们说该系统是**齐次的**。换句话说, 输入信号为  $\alpha x(t)$  的输出等于输入信号为  $x(t)$  时系统响应的  $\alpha$  倍。

如果系统对于任意输入信号  $x_1(t)$  和  $x_2(t)$  有下列关系

$$y_1(t) = H[x_1(t)] \quad (1.5a)$$

$$y_2(t) = H[x_2(t)] \quad (1.5b)$$

和 
$$\begin{aligned} H[x_1(t) + x_2(t)] &= H[x_1(t)] + H[x_2(t)] \\ &= y_1(t) + y_2(t) \end{aligned} \quad (1.6)$$

就说该系统是**可加的**。

可加性也称为**迭加性**。意思是系统对于任意两个信号  $x_1(t)$  和  $x_2(t)$  之和的响应等于系统对于单个信号  $x_1(t)$  和  $x_2(t)$  的响应之和。如果系统既具有齐次性又具有可加性, 则该系统就是**线性系统**。如果  $\alpha$  是有理数, 虽然可以从可加性推断出齐次性, 但有一些系统是**可加的却不是齐次的**。不过这种系统多半是病态的, 实际上不可能存在。

在线性系统中, 对于任意输入信号  $x_1(t)$  和  $x_2(t)$  以及任意常数  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  有下列关系:

$$y_1(t) = H[x_1(t)] \quad (1.7a)$$

$$y_2(t) = H[x_2(t)] \quad (1.7b)$$

$$y(t) = H[\alpha_1 x_1(t) + \alpha_2 x_2(t)] \quad (1.7c)$$