

高等学校教材

电路与系统理论

赖先聪 韩文昭 编



高等教育出版社

T1413
17

高等学校教材

电路与系统理论

赖先聪 韩文昭 编



高等教育出版社

本书根据国家教育委员会 1983 年制定的《电路与系统理论教学大纲》编写而成。全书共分十一章,内容包括:绪论;电路元件和 n 端口网络;网络图论;电网络方程;线性时不变网络的时域分析;线性时不变网络的 s 域分析;网络的状态变量分析法;非线性网络简述;基础滤波理论;无源网络综合;有源滤波器及其综合等。每章附有适量的练习题。适用于 72 学时教学。

本书可作综合大学无线电系“电路与系统理论”课程的教材使用,亦可供有关方面的技术人员参考。

责任编辑 尹 洪

3556/10

高等学校教材

电路与系统理论

赖先聪 韩文昭 编

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

国防出版社印刷厂印

*

开本 850×1168 1/32 印张 22.875 字数 570 000

1988 年 5 月第 1 版 1988 年 5 月第 1 次印刷

印数 0 001— 2 660

ISBN 7-04-000862-9/TN·52

定价 4.50 元

前 言

本书是根据国家教委 1983 年制定的综合大学无线电电子学专业《电路与系统理论》课程教学大纲编写而成的。该大纲的教学时数有 72 学时和 54 学时两种安排，本书按 72 学时的安排编写。

上述教学大纲指出，本课程是在“学习高等数学(包括应用数学)、普通物理和模拟电子线路等课程的基础上，进一步从电路元件模型的概念上，建立电路系统的一般方程及有关概念，从而在理论上对电路系统有更深刻的认识。此外，着重介绍了网络的综合，滤波器网络函数的设计，线性系统的反馈和稳定性等基本内容。”因此，本书也适合有类似需要的读者和专业选用。

最近二、三十年来，系统理论的研究方法不断渗透到电路理论的研究中，促进了电路理论的发展，形成了“电路与系统”这一学科。但是，迄今为止，将电路与系统较好地结合起来阐述的教材尚不多见。一些教材着重讨论电路，很少涉及到系统；另一些教材则偏重于系统，仅把电路作为例子。本书试图将电路与系统有机地结合起来，将电路作为一类系统来处理。这样，便将系统的某些一般概念和特性直接用于相应的电路，又把电路的某些概念和特性推广到相应的一般系统。我们认为，这样处理不仅能对当前的教学收到事半功倍的效果，而且能为读者将来的深造打下更好的基础。

对于电路系统的基础部分，我们强调了支路网络系统的数学模型，即将基尔霍夫方程和元件特性方程这一基本前提，贯穿于所有有关章节。从具有一般性的非线性和时变的观点引入元件和网络的概念，把线性时不变网络作为一种特例来加以着重讨论，到第八章再把讨论扩大到非线性网络。

对于线性时不变网络和系统理论，我们特别强调迭加性、齐次性和时不变性等基本观点，有意识地将它们贯穿于这类网络和系统讨论的全过程。

对于滤波器和网络综合部分，我们力图处理好网络分析与网络综合，无源网络与有源网络，基础知识与学科进展等三个关系。以分析为基础，充分强调综合的特点；以无源网络理论为出发点，突出有源网络的实用性、多样性和灵活性；以基础知识为重点，简明给出学科的新进展。

本书既重视论述的严密性，又重视物理意义的阐述。每章末均附有一定数量的习题和进一步阅读的参考书。

本书初稿曾于1985年8月在兰州由综合大学无线电专业教材编审委员会副主任、复旦大学凌燮亭教授主持进行了评审，此后又由高等教育出版社组织专家审稿，以上评审和审稿都对本书提出了若干建设性的修改意见，我们根据这些意见对初稿进行了仔细修改，最终形成本书。在此我们谨向为本书的修改、定稿作出贡献的老师们表示衷心地感谢。本书是在山东大学电子学系的领导和许多教师的大力支持和关怀下出版的，在此致以诚挚的谢意。

本书前八章由赖先聪执笔，后三章由韩文昭执笔。

编者

1987年7月

目 录

第一章 绪论	1
§ 1.1 电路与系统	1
§ 1.2 激励、响应与系统模型	7
§ 1.3 集中参数支路网络系统	16
1.3.1 网络变量和参考方向	16
1.3.2 集中参数支路网络	18
1.3.3 基尔霍夫定律	19
1.3.4 元件约束	23
参考书	24
习题	24
第二章 电路元件和 n 端口网络	29
§ 2.1 概述	29
§ 2.2 电阻器	33
2.2.1 二端电阻器(简称电阻器)	33
2.2.2 独立电源	39
2.2.3 多端电阻器	47
§ 2.3 电容器	57
§ 2.4 电感器	61
2.4.1 二端电感器(简称电感器)	61
2.4.2 耦合电感器	64
§ 2.5 全零器(nullator)和无定器(norator)	70
§ 2.6 电路元件的基本组和器件造型的概念	74
§ 2.7 功率和能量	76
2.7.1 元件(或网络)的无源性	77
2.7.2 元件(或网络)的非能性	81

2.7.3 元件(或网络)的无损性	82
§ 2.8 元件(或网络)的互易性	84
参考书	88
习题	89
第三章 网络图论	99
§ 3.1 基本概念	101
§ 3.2 有向图矩阵	107
3.2.1 关联矩阵	108
3.2.2 回路矩阵	112
3.2.3 割集矩阵	118
3.2.4 矩阵 A , B_r 和 Q_r 之间的关系	124
§ 3.3 基尔霍夫定律和特勒根定理	125
3.3.1 基尔霍夫定律	125
3.3.2 特勒根定理及其应用	131
参考书	136
习题	136
第四章 电网络方程	143
§ 4.1 概述	143
§ 4.2 电源变换与标准支路	150
§ 4.3 节点分析与割集分析	152
4.3.1 支路导纳算子矩阵	152
4.3.2 节点分析法	158
4.3.3 割集分析法	159
§ 4.4 回路分析与网孔分析	160
§ 4.5 节点分析与网孔分析的直接写入法	166
4.5.1 仅含二端元件网络节点分析直接写入法	166
4.5.2 含耦合元件网络节点分析直接写入法	168
4.5.3 网孔分析的直接写入法	172
§ 4.6 改进节点分析法	174

§ 4.7	关于电网络方程解的概念	179
§ 4.8	线性电阻网络	184
4.8.1	网络方程的建立	184
4.8.2	矩阵求逆法	185
4.8.3	高斯消元法	186
4.8.4	解的存在唯一性	189
4.8.5	线性电阻网络的基本定理	191
	参考书	194
	习题	195
第五章 线性时不变网络(系统)的输入-输出分析		
	(I)——时域分析	202
§ 5.1	单输入-单输出微分方程的建立和求解	202
5.1.1	微分方程的建立	202
5.1.2	初始条件的确定	208
5.1.3	微分方程的求解	214
§ 5.2	零状态响应和零输入响应	217
§ 5.3	冲激响应和阶跃响应	224
§ 5.4	卷积积分	229
5.4.1	卷积积分的导出	229
5.4.2	卷积积分的性质和计算	233
5.4.3	卷积运算	240
	参考书	248
	习题	248
第六章 线性时不变网络(系统)的输入-输出分析		
	(II)—— s 域分析	259
§ 6.1	拉氏变换	259
6.1.1	拉氏变换的定义和基本性质	259
6.1.2	利用拉氏变换解线性时不变网络的输入-输出微分方程	262
6.1.3	部分分式展开法	263

6.1.4	线性时不变网络的 s 域模型	267
§ 6.2	网络函数和网络参数	271
6.2.1	网络函数	271
6.2.2	网络参数	282
§ 6.3	网络函数与时域特性	291
6.3.1	网络函数与冲激响应	291
6.3.2	网络变量的固有频率与网络函数	298
6.3.3	网络的固有频率与网络函数	302
§ 6.4	正弦稳态与频率响应	307
6.4.1	稳态与正弦稳态	307
6.4.2	网络函数的零极点分布与频率特性	311
§ 6.5	系统的稳定性	318
6.5.1	稳定性的定义和条件	320
6.5.2	罗斯-霍尔维茨(Routh-Hurwitz)判据	322
§ 6.6	反馈系统的稳定性	326
6.6.1	反馈系统的框图表示	326
6.6.2	奈奎斯特(Nyquist)准则	328
	参考书	337
	习题	337
第七章	网络(系统)的状态变量分析法	352
§ 7.1	概述	352
§ 7.2	电网络状态方程的建立	364
7.2.1	线性时不变常态网络的状态方程	365
7.2.2	线性时变和非线性常态网络的状态方程	370
7.2.3	非常态网络的状态方程	372
7.2.4	线性时不变常态网络状态方程的公式表述	378
§ 7.3	线性时不变网络(系统)状态方程的解	382
7.3.1	状态方程的时域解	383
7.3.2	线性时不变网络解的基本性质	385

7.3.3	状态转移矩阵 e^{At} 的求解	387
7.3.4	求解状态方程的 s 域方法	393
7.3.5	用 A 矩阵的特征值和特征向量表示零输入响应, 特征值 与固有频率的关系	396
§ 7.4	线性时不变动态系统的状态变量描述和 输入-输出 描述之间的关系	399
7.4.1	由状态变量描述到输入-输出描述	399
7.4.2	状态变量的替换形式和输入-输出不变性	401
7.4.3	输入-输出法与状态变量法的比较, 线性时不变系统的模 拟	403
7.4.4	从输入-输出描述到状态变量描述	404
§ 7.5	线性时不变系统的零输入稳定性, 可控性与可观 测性	413
7.5.1	零输入稳定性	413
7.5.2	可控性	420
7.5.3	可观测性	424
7.5.4	既可控又可观的系统	428
§ 7.6	状态变量反馈	433
参考书	437
习题	438
第八章	非线性网络简述	452
§ 8.1	非线性电阻网络	452
8.1.1	网络方程的建立	452
8.1.2	解的存在唯一性	454
8.1.3	迭代算法的基本原理和匹卡德(Picard)算法	456
8.1.4	牛顿-拉夫逊算法	464
§ 8.2	非线性动态网络状态方程解的一些基本概念和 分析方法	473
8.2.1	非线性网络状态方程解的存在唯一性	473

8.2.2	自治网络(Autonomous Networks)的平衡点及其稳定性	476
8.2.3	非线性网络的小信号分析	481
§ 8.3	二阶非线性动态网络的定性分析和近似解法概要	486
8.3.1	二阶自治网络状态平面法(相平面法)和极限环	486
8.3.2	二阶动态网络的缓变振幅近似解法和隧道二极管振荡电路分析	496
8.3.3	二阶动态网络的小参数近似解法和铁磁谐振电路的谐振特性	504
	参考书	512
	习题	512
第九章	基础滤波理论	518
§ 9.1	滤波器的网络函数	518
9.1.1	幅度函数和相位函数	518
9.1.2	滤波器的类型	521
9.1.3	全通函数与最小相移函数	530
§ 9.2	归一化及频率变换	533
9.2.1	归一化	533
9.2.2	频率变换	536
§ 9.3	滤波器设计的近似理论	538
9.3.1	近似函数的获得	540
9.3.2	低通最平幅度近似	543
9.3.3	低通等纹波近似	547
9.3.4	最平时延近似和椭圆近似	555
§ 9.4	灵敏度	558
9.4.1	灵敏度的定义及其基本性质	559
9.4.2	多项式灵敏度	562
	参考书	566

习题	566
第十章 无源网络综合	571
§ 10.1 正实函数及霍尔维茨多项式	572
10.1.1 正实函数	572
10.1.2 霍尔维茨多项式	579
§ 10.2 单口无源网络策动点函数的综合	581
10.2.1 单口 LC 网络策动点函数的综合	581
10.2.2 单口 RC 网络策动点函数的综合	595
§ 10.3 双口无源网络传输函数的综合	607
10.3.1 LC 梯形网络传输函数的零点	607
10.3.2 LC 梯形网络传输函数的综合	611
10.3.3 无源 RC 梯形网络的综合	623
参考书	629
习题	629
第十一章 有源滤波器及其综合	635
§ 11.1 运算放大器模型及其在有源滤波器中的应用	635
11.1.1 运算放大器模型	635
11.1.2 运算放大器在有源 RC 滤波器中的应用	642
§ 11.2 低阶有源滤波器的综合	647
11.2.1 有源 RC 积分器	648
11.2.2 低通二阶滤波电路	654
11.2.3 用 $+K$ 放大器实现的二阶滤波电路	661
11.2.4 相位失真及相位均衡器	670
§ 11.3 高阶滤波器综合及新型滤波器介绍	675
11.3.1 高阶滤波器的实现途径	675
11.3.2 新型滤波器介绍	698
参考书	709
习题	709

第一章 绪 论

§ 1.1 电路与系统

无线电电子学是一个领域十分广泛的应用学科,众所周知,它的任何一项具体应用都要通过电路系统来实现.通常,将由电路元件相互连接构成的整体称为电路,将由相互作用和相互依赖的一些基本单元(称为元件)结合而成并具有特定功能的整体称为系统,而这个系统本身又是它所从属的一个更大系统的元件.显然,电路是一类系统,电路元件是它的基本单元.但系统的含义比电路广泛得多,它包含各种物理系统和非物理系统.例如,机械系统、电力系统和光学系统等都是物理系统,而经济管理、生产计划和政治结构等则是非物理系统.本书以电路系统为主要研究对象.

元件和系统的概念是相对的,用某一观点看是系统的东西,用另一观点看却可以认为是元件.例如,音频放大器可以看成是由电阻器、变压器和晶体管等元件组成的系统,但它又可看成是扩音系统中的一个元件.这种元件与系统概念的相对性,对于复杂系统的分析常是不可缺少的.例如:如果将数字计算机看成是由千百万个电路元件构成的系统,就很难对它的工作进行分析;但如果将它定义为由信息处理器、磁心存储器和输入-输出电路等基本单元构成的系统,分析起来就容易得多,因为这时只需考虑这几个单元部件的功能和特性,而无需考虑其内部的构造细节.当要进一步分析以上几个单元部件的功能特性时,又可将它们看成是由几个相对简单的单元构成的系统(称为计算机的子系统)…….

系统的类型由构成系统的元件及其组成系统的方式决定,其

严格定义如下：

定义 1.1.1 一个系统类 S 的定义是

(1) 某些不可分的系统称为元件，它们是属于 S 的成员，由元件构成元件集 E ①。

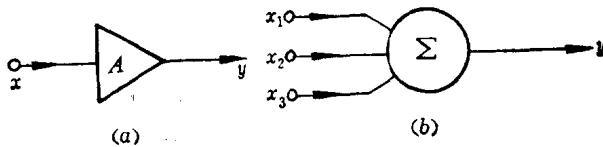
(2) 规定了相互连接的规则 R ，应用这些规则于 S 的成员而得到的系统仍是属于 S 的成员。

(3) 唯有属于 E 或经过有限次应用 R 所构成的系统才是 S 的成员。

上面的定义说明：元件只有按一定的互连规则才可以构成系统，构成的系统可按相同的规则连接到元件或与自己同类的其他系统上组成更大的系统，并可依此类推到有限次，只有这样所得的系统才属于同一类型的系统。下面举例说明上述定义。

例 1.1.1 模拟框图(模拟计算机框图)系统类

定义 元件集 E 如图 1.1.1，该图表明，元件集 E 中的每一元件都有一个变量 y ，称为输出，一个(或多个)变量 x (或 x_i)，称为输入，每一元件表示一种简单的数学运算。



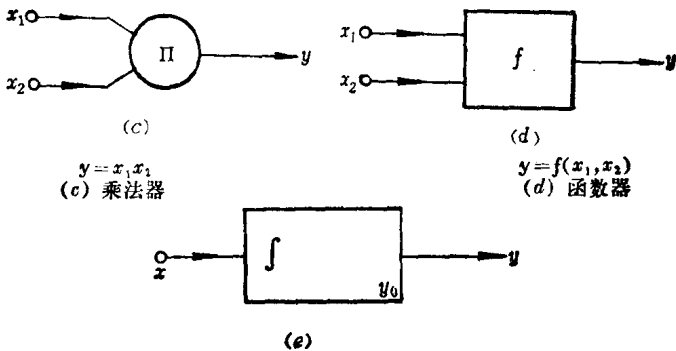
$$y = Ax$$

(a) 比例器

$$y = x_1 + x_2 + x_3$$

(b) 求和器

① 由于元件和系统概念的相对性，对于一个具体的系统而言，构成它的部件是否可分也是相对的。例如，将扩音器系统看成由音频放大器、声-电和电-声转换器等元件构成的一类系统，音频放大器是不可分的元件，若将扩音器系统看成是由电阻器、电容器、晶体管、变压器、声-电和电-声转换器等元件构成的另一类系统，则音频放大器是由电阻器、电容器、晶体管和变压器等构成的子系统，这时，它是可分的。



$$y(t) = \int_{t_0}^t x(\tau) d\tau + y_0$$

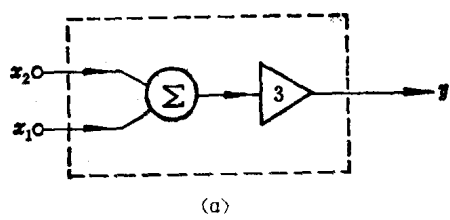
(e) 积分器

图 1.1.1 模拟框图系统的元件集

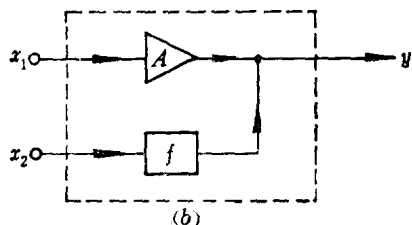
该系统的互连规则如下：

- (1) 任何两个元件的输出不能相连。
- (2) 每一元件的一个输入或与某一元件的输出相连，或为互连系统的一个输入。
- (3) 恰有一个元件的输出是互连系统的输出，其他任何元件的输出都必须与某元件的输入相连。

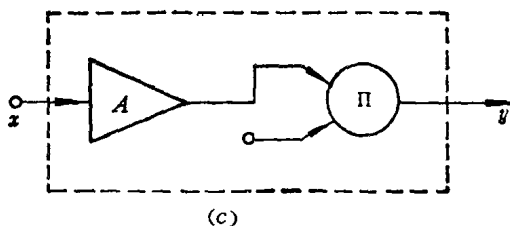
以上互连规则中“相连”的含义是在相连点上变量有相同的值。根据以上规则我们就能判断一个系统是否属于模拟框图系统。例如：图 1.1.2(a)属于这类系统，而图 1.1.2(b)和(c)都不属于这类系统。



(a) 属于模拟框图系统的例子。



(b) 违反互连规则(1).



(c) 违反互连规则(2).

图 1.1.2 属于和不属于模拟框图系统的例子

从图 1.1.2 (a) 不难得到

$$y = 3(x_1 + x_2) = f(x_1, x_2)$$

可见这个系统的结构和特性都具有元件的特点，因而它也是这个系统类的成员，并可按互连规则连接到元件或其他同类系统上构成更大的系统。

例 1.1.2 支路网络系统

定义 构成系统的元件集为二端元件，它具有两个端点，称为节点，两端点间的电通路，称为支路。支路的特点是从一个端点流入它的电流等于从另一端点流出的电流，如图 1.1.3 (a)。二端元件又称为支路元件，在第二章将对它作详细的讨论。

构成支路网络的互连规则是

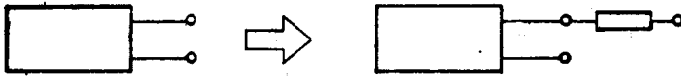
(1) 将元件的一个节点与原来网络的任一节点相连，构成一个新网络，如图 1.1.3 (b)。

(2) 将元件的两个节点和原网络的任意两个节点相连，构成一个新网络，如图 1.1.3 (c)。



(a)

(a) 元件集：二端元件

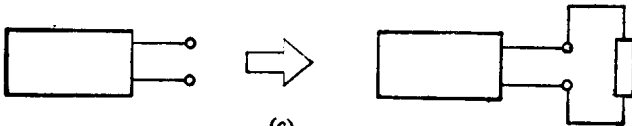


(b)

原网络

新网络

(b) 规则(1)



(c)

原网络

新网络

(c) 规则(2)

图 1.1.3 支路网络系统的元件集和互连规则

按以上定义我们就可以从一个二端元件（将它看成最简单的“原网络”）出发，反复运用以上两条互连规则构成各种不同的支路网络。

常用的电路元件除了二端元件外尚有多端元件（即具有两个以上端点的元件），支路网络系统并不排斥多端元件。通常将多端元件看成是由二端元件构成的子网络（这将在第二章讨论），按定