

高等学校试用教材

电路、信号与系统

上册第二分册

管致中 沙玉钧 夏恭恪编

人民邮电出版社

高等学校试用教材
电路、信号与系统

上册第一分册

管致中 沙玉钧 夏恭谕编

•

人民邮电出版社出版

北京发行所发行

山东新华印刷厂德州厂印装

•

开本 787×1092 1/32 印张 8 12/16 字数 210,000

1979年2月第1版 1979年8月第1次印刷

印数 1—40,000

书号 15012·0143 定价 0.73 元

前 言

《电路、信号与系统》是无线电技术类专业的第一门技术基础课。学生在学习了高等数学、物理学等课的基础上,再通过本课程的学习,将进一步掌握专业所需的基本概念、基本理论和基本方法。根据一九七七年十月教育部召开的高等学校工科基础课教材座谈会上确定的教材编写计划,属于这一性质的教材有两种类型,本教材是其中之一。同年十二月,在高等学校工科基础课电工、无线电教材编写会议上,讨论审订了《电路、信号与系统》教材的编写大纲,本书就是根据这个大纲编写的。

按照编写大纲的要求,本课程应当继承原《电路及磁路基础》课和《无线电技术基础》课线性电路部分中有用的基本内容,删除其中陈旧繁琐的内容,同时还要引进一些为适应科学技术迅速发展所需要的新内容。因此,本教材应当包括有关电路定理与电路特性,信号分析方法与信号的频谱特性,线性系统的各种分析方法,以及一些典型信号加于一些典型电路后电路响应的特性等主要内容,并且要将这些内容组成一个新的有机的体系。

在教材体系的处理上,考虑到如果把稳态分析和瞬态分析、时域分析法和频域分析法、连续信号系统和离散信号系统全部一下和盘托出,势必会使初学的低年级学生感到头绪纷繁,概念混杂。从教学法的角度看,这样做是不适当的。因此,各种基本分析方法与基本概念要先易后难逐步引出,逐步巩固,逐步扩大。在组织本书的内容时,我们把激励信号施加于线性系统而后求取系统响应作为贯穿全书的主要线索。在本书上册第一、二、三章,首先研究如何应用电路定理去分析直流和正弦形交流等简单激励源作用于

简单电路的方法,继而在第四章中对单频率正弦信号通过 RC 、 LC 电路这样的简单线性系统进行了分析,再进一步在第五章中介绍了一般的二端对网络的分析法,然后再在第六章把集中参数系统的分析扩展到作为分布参数系统的传输线。这样,在本书上册中,就构成了单频信号作用于线性系统的稳态分析的一个完整体系。在本书下册第七、八章,先介绍信号的频谱分析法及信号的频谱特性,从而将一复杂信号分解为许多正弦分量,同时把激励源的接入也看成为无限多个稳定的正弦分量的作用相迭加;然后在第九章中利用傅里叶积分和迭加原理,就很自然地从事线性系统的稳态分析法过渡到瞬态分析法,再在第十章中将频域分析法推广到复频域,引出了重要的分析线性系统的拉普拉斯变换法。在第十一章时域分析法中,也是先将信号在时域中进行分解,然后运用迭加积分,这就构成了另一重要的分析线性系统的卷积法。第十二章是把上述频域、时域分析法应用于求解状态方程;最后,第十三章,把连续时间系统的分析方法扩展引伸到离散时间系统。所以,从稳态到瞬态,从频域到时域,从连续到离散,这就是本书的体系,也是本书的特点。本课程应有的基本概念、基本理论和基本方法,都是按这个体系组织起来的。

根据过去的教学经验,我们在编写本书时,对于原《电路及磁路基础》课和《无线电技术基础》课线性电路部分中一些陈旧繁琐的内容,作了删减,例如交流电路的一些部分、磁路、谐振电路中谐振特性的一些部分、影象参数滤波器等。过去有关耦合电路和变压器的内容散处在各课中,从不同的角度去进行分析,各自得出需用的结论,其间缺乏互相关联;现在把这方面的内容集中在第三章中统一处理,用统一的分析方法引出在不同条件下的各种实用等效电路。过去只讨论 LC 电路的频率特性,对于同样重要的 RC 电路的频率特性却很少讨论;现在在第四章中补充了这部分内容。

网络拓扑、信号分析中的正交函数集等概念,还有最后三章,都是为适应新技术发展的需要而增加的新内容。

本教材是给低年级学生使用的,不可能也不应当把有关电路、信号与系统的内容包罗无遗。例如网络综合理论、随机过程、反馈系统、时变系统等,本书均未涉及。这些内容均将在后继的高年级必修和选修课中学习。再如状态方程、离散时间系统等内容,本书也只是对其基本理论和基本分析方法进行介绍,而把进一步深入研究的内容留给后继课程。

科学技术在迅速发展,为适应形势的需要,在学校里应该使学生学什么,课程的内容如何组织,这些始终是教师不断面临的问题。解决这些问题的方案不应该只有一种,而是可以见仁见智、百家争鸣,提出多种方案。因此我们认为,教师在使用本教材时,不宜受过多的约束,在内容的取舍上、讲解的次序上以及阐明问题的方法上,都可以有自己的看法和做法。例如,有的院校把传输线、已调波的频谱等内容划归别的课程,有的院校认为时域分析法可提前学习,而且还要强调古典解法,诸如此类,当然都是可以的。对于学生,我们认为也要告诉他们,不要只读一本教科书,还应该读点参考书,才能思路开阔。

本书一至六章由沙玉钧同志编写,绪论、七、八、十一、十二、十三章由管致中同志编写,九、十章由夏恭恪同志编写,前六章习题由江金蓉同志选编,后七章习题由华似韵同志选编,教研组内还有一些同志参加了辅助工作。本书原稿由华南工学院冯秉铨教授主审,并于一九七八年十二月举行了审稿会议进行集体审稿。审稿会由冯秉铨教授主持,大连工学院、上海交通大学、北京工业学院、北京航空学院、华中工学院、华南工学院、西北电讯工程学院、西安交通大学、合肥工业大学、重庆大学、南京工学院、浙江大学、清华大学等兄弟院校都派代表参加了审稿,提出了许多宝贵意见。此

外,有的兄弟院校还给我们寄来了书面意见。这些意见对于本书的修改定稿帮助很大。在这里我们谨向上述院校和同志们致以衷心的感谢。

由于本书编写的时间紧迫,成书匆促,又由于我们学识水平有限,书中很可能还留有疏漏或错误之处。我们非常欢迎读者提出本书存在的问题,寄交人民教育出版社编辑部,或者直接寄给我们,以便今后据以修改。

编 者

一九七九年元月于南京工学院

目 录

绪 论	1
-----------	---

第一章 直流电路及电路的基本分析方法

§ 1.1 引言	9
§ 1.2 电路图, 电压、电流的正方向	10
§ 1.3 电阻元件的电压、电流及电功率	13
§ 1.4 电阻的串、并联, 等效电阻	18
§ 1.5 简单电路的计算	23
§ 1.6 电源及其等效电路	40
§ 1.7 电源向负载的功率传输	52
§ 1.8 网络的基本结构与基尔霍夫定律	58
§ 1.9 结点电位法	64
§ 1.10 网孔电流法	73
§ 1.11 网络方程组及其解的一般形式	85
§ 1.12 常用电路定理	90
§ 1.13 网络拓扑的结点分析法	107
§ 1.14 网络拓扑的网孔分析法	121
§ 1.15 回路分析法与割集分析法	130
习题	139

第二章 交流电路

§ 2.1 交流电的基本概念	155
§ 2.2 交流电的相量及复数表示	161
§ 2.3 R 、 L 、 C 元件在交流工作条件下的特性	173
§ 2.4 阻抗与导纳	188
§ 2.5 交流电路的计算	197
§ 2.6 交流电路的功率	211

§ 2.7 三相交流的基本知识	219
习题	226

第三章 含互感的交流电路

§ 3.1 互感和互感电压	234
§ 3.2 含互感电路的基本计算方法	243
§ 3.3 互感耦合电路的初、次级等效电路	249
§ 3.4 全耦合变压器	253
§ 3.5 理想变压器	259
§ 3.6 变压器的等效电路	262
习题	267

目 录

第四章 简单线性电路的频率特性

§ 4.1 引言	273
§ 4.2 简单 RC 电路的频率特性	274
§ 4.3 常用的 RC 选频网络	288
§ 4.4 网络函数的一般表达式及其对数频率特性	296
§ 4.5 LC 回路的自由振荡	305
§ 4.6 串联谐振回路	312
§ 4.7 并联谐振回路	331
§ 4.8 耦合谐振回路的耦合方式及谐振现象	345
§ 4.9 耦合谐振回路的谐振曲线及通频带	360
§ 4.10 纯电抗二端网络的频率特性	369
习 题	384

第五章 二端对网络

§ 5.1 二端对网络的概念及其典型结构	395
§ 5.2 二端对网络的参数	398
§ 5.3 二端对网络的网络函数	408
§ 5.4 二端对网络的等效电路	413
§ 5.5 复合二端对网络的网络参数	418
§ 5.6 二端对网络的影象参数	436
§ 5.7 中分定理	445
§ 5.8 工作传输函数与插入传输函数	456
§ 5.9 衰减网络	463
§ 5.10 影象参数滤波器	476
§ 5.11 工作参数滤波器的频率特性	488
习 题	498

第六章 传输线

§ 6.1 分布参数和分布参数电路	509
§ 6.2 传输线方程及其正弦稳态解	513
§ 6.3 均匀传输线上的波	519
§ 6.4 无损耗传输线	525
§ 6.5 终端短路及终端开路的无损耗线	535
§ 6.6 低损耗传输线	549
习 题	558

绪 论

无线电技术的发展

无线电技术的发展开始于本世纪初的无线电报通信。接着,又解决了以无线电波传送语言和音乐的问题,从而开展了无线电话通信和无线电广播。以后,传送图象的问题也解决了,出现了无线电传真和电视。到三十年代中期以前,无线电技术主要是在上述通信方面发展,完成了利用电磁波来传递电码、声音和图象的任务。直到今天,无线电通信仍是在不断提高和发展之中。

三十年代中期到第二次世界大战期间,为了防空的需要,无线电定位技术有了迅速的发展;雷达的出现,还带动了一些其它的科学的兴起,如无线电天文学、无线电气象学等。在第二次世界大战期间,电子计算机诞生了,它能对复杂的数学问题进行快速运算,代替部分非创造性的脑力劳动,从而推动了无线电技术的发展;在战后,电子计算机得到了很快的发展,成为国防、生产和科学研究中不可缺少的设备。

五十年代以来,火箭、导弹、人造卫星和宇宙航行等相继问世,又进一步促使无线电技术向更高的阶段发展,出现了空间通信、遥测、遥控、遥感等技术。

无线电技术在自动控制中的应用,亦是主要发展方向之一。由于应用了信息论和控制论,现在不仅已使生产高度自动化,而且具有各种功能的机器人也已制造出来了。

所以无线电技术的发展,是由利用电磁波传输信息的无线电通信扩大到计算机科学、自动控制以及其它各学科领域。到今天

可以说,上至天文,下至地理,大到宇宙空间,小到核子、粒子等学科的研究,从工农业生产直到社会、家庭生活,没有一处能够脱离无线电技术。无线电技术的发展过程,是不断延伸和扩展人的感觉器官和大脑部分功能的过程。无线电话、电视、雷达是延伸和扩展了眼和耳的功能,电子计算机是延伸和扩展了大脑的部分功能。人类的感覺器官和大脑联合工作,能感知、传递和处理信息,现在已发展起来的各種控制系统正是部分地模拟、延伸和扩展了人类对于信息的感知、传递和处理的综合运用的控制功能。

无线电技术的发展是与电子器件的发展紧密结合的。电子器件是无线电设备的核心元件,无线电技术的发展向电子器件提出了新的要求,促进了电子技术的发展;一种新的电子器件的出现,又反过来推动无线电技术的跃进。在无线电发展史上,电子管、半导体器件、激光器件、大规模集成电路等的出现,都是促使无线电技术发生飞跃的大事。所以前述无线电技术的发展过程,同时也是电子学的发展过程。由于这个原因,人们常常把无线电和电子学合起来称为无线电电子学。

信号、电路、系统

无线电技术的发展虽然头绪纷繁,应用极广,但是就其本门学科的任务说,主要是解决信息传输的问题,也就是将带有信息的电信号由发送者传送给接收者,为此就需要将信号进行各种处理。

信息要用某种物理方式表达出来,例如可以用语言、文字或图画来表达,还可以用收、发双方事先约定的编码来表达。这些语言、文字、图画、编码等统称为消息。消息一般并不便于直接传输,所以需要利用一种变换设备把消息转变成为便于传输的电信号。电信号常常是随着时间变化的电压或电流,这种变化是与语言的声音变化或者图画的色光变化等相对应的。这样变化着的电压或

电流，分别构成了代表声音、图象和编码等消息的信号，因而信号中也就包含了消息中所含有的信息。所以带有信息的信号是无线电技术的工作对象。

信号的传输和处理，要由用许多不同功能的单元组织起来的一个复杂系统来完成。从广泛的含义上说，一切信息的传输过程都可以看成是通信，一切完成信息传输任务的系统都是通信系统，例如无线电话、电视、雷达、导航等系统均属之。举一个电视系统为例来说，在这系统中，所要传输的信息包含在一些配有声音的画面之中。在传输这些画面时，先要利用电视摄像管把画面的光线色彩转变成图象信号，并利用话筒把声音转变成伴音信号，这些就是电视要传输的带有信息的信号。然后，把这些信号送入电视发射机，发射机能够对此信号进行处理，产生一种反映信号变化的便于传播的高频电信号。最后，由天线将这高频电信号转换为电磁波发射出去，在空间传播。电视接收者用接收天线截获了电磁波的很小一部分能量送入电视接收机。接收机的作用正好和发射机相反，它能对接收到的由电磁波转换而来的高频电信号进行处理，从中恢复出原来的图象信号与伴音信号，并把它们分别送入显象管与喇叭，使接收者能看到欲传输的画面，还听到配有的伴音。这个过程，可以用一个简明的方框图表示如图 0-1 所示。这个图表示了一般通信系统的组成，其中变换器指的是把消息转换为电信号或者反过来把电信号还原成消息的装置，如摄像管和显象管、话筒和喇叭之类。信道指的是信号传输的通道，在有线电话中它是一对导线；在利用电磁波传播的无线电通信系统中，它可以是空间、卫星通信中的人造卫星，也可以是波导或同轴电缆；在近来发展的光通信中，则是导光纤维。如果理解得更加广泛一点，发射机和接收机也可以看成是信号的通道，因此有时也称它们为信道机。

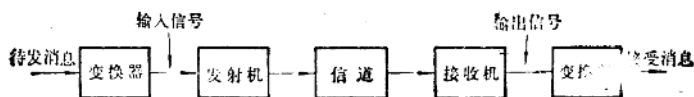


图 0-1 通信系统的组成

无线电技术的任务，是要保证通过信道传输后的输出信号能够尽量保持输入信号的原来样子。无线电工作者就要为完成这样的任务而去研究信号的特性、系统的分析方法、实现系统各组成部分的具体电路以及这些电路对通过的信号产生何种影响等问题。

除了通信系统以外，还有其它各种无线电电子学的系统，例如自动控制系统就是其中之一。在这些系统中，系统的组成部分与通信系统并不一样，但是它们的功能一般仍然是信号的传输、比较、处理等等。现在，系统的概念还在不断发展，并且已经逐渐形成了一门叫做系统工程的学科，它的研究对象可以是电力系统、信号传输与处理系统、交通运输系统、经济系统、生物系统等等，它们不仅越出了电的范围，而且还越出了自然科学的范围，进入了社会科学的领域。

这样说来，系统究竟是个什么东西呢？从一般的意义上说，系统是一个由若干互有关联的单元组成的并用来达到某些特定目的的有机整体。这样理解的系统的意义十分广泛。例如它的组成单元可以是一些巨大的机器设备，甚至把人也包括进去，组织起来去完成某种极其复杂的任务；这些组成单元也可以仅仅是一些电阻、电容元件，联成了具有某种简单功能的电路。无线电技术中所指的系统，大多是各种不同复杂程度的用作信号传输与处理的组成体。通常的概念，常常把系统看成是比电路更为复杂、规模更大的组成体。但实际上却很难从复杂程度或规模大小来确切区分什么是电路，什么是系统，这两者的区别毋宁说是观点上、处理问题的角度上的差别。电路的观点指的是去确定电路中各支路或回路的电流

和电压,而系统的观点则着重在输入输出间的关系即运算功能上。因此一个最简单的 RC 电路也可以说是一个初级的信号处理系统,例如它在一定条件下具有微分或积分的运算功能。在无线电技术中,一般都是用系统的观点去分析问题的。

《电路、信号与系统》是无线电技术专业的第一门技术基础课,它不可能来解决全部的无线电信号传输和处理的理论以及无线电系统的实现问题,它只提供电路、信号、系统分析的基本理论。

系统的模型

系统一般是一个复杂的组合体,这组合体中的每一个单元都可能具有复杂的物理性能。为了便于对系统进行分析,就需要把系统的物理特性表达为数学形式,即所谓系统的数学模型。这种模型并非物理实体,它是系统特性的某种数学抽象,只是从这些特性的角度说,模型才近似地代表了系统。

例如由一个电阻器和一个电容器组成的电路,通常用如图 0-2 所示那样一个电路图来代表,这就是一个模型。对于这样一个电路图,一般就理解为 R 代表电阻器的阻值, C 代表电容器的容量。其实,这只是在频率较低时的一种近似;或者说,这个电路图是实际电路的一个

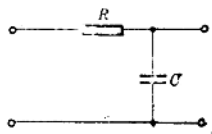


图 0-2 阻容电路模型

一个低频时的模型。因为电路里实际的电阻器还具有分布电容和引线电感,实际的电容器也具有漏电导和引线电感,当工作频率较高时,这些因素都必需考虑。这时,单独一个电阻器或电容器本身就要用一个复杂的等效电路图来表示,所以这个实际阻容电路的高频模型就会比图 0-2 所示的模型复杂得多。工作频率更高时,这个电路甚至可以具有分布参数的特性,而无法用集中参数的模型来表示了。

所以, 电路图里的符号都是代表一些理想化了的元件, 如理想电阻、理想电容、理想电感、理想变压器等。每一个理想元件代表某一种物理特性, 表示为端子上电压电流间的一定运算关系; 例如, 对于电阻为 $u= Ri$, 对于电容为 $i=C \frac{du}{dt}$, 等等。一个真实元件, 在不同的工作条件下, 可以用一个或者若干个理想元件的不同组合来近似地表示。除了理想元件外, 另外还有理想电源, 包括理想电压源和理想电流源。这些理想元件和理想电源, 是组成电的系统模型的最基本的单元。

组成系统模型的理想元件代表某种数学运算关系, 除前述理想的电阻、电容、电感、变压器等以外, 还有放大器、积分器、延时器、加法器、乘法器等, 它们中的每一种完成一种运算功能。例如, 放大器的输出信号是输入信号的 K 倍, 加法器的输出信号是若干个输入信号之和, 等等。这些理想的运算器的特性, 可以用实际电路做得很接近。它们本身都各是一个小系统, 另一方面又可用来作为一个大系统模型的基本单元。这些运算单元常常抽象地分别用一个方框或一个圆圈加上输入输出的信号流向来表示, 如图 0-3 所示。

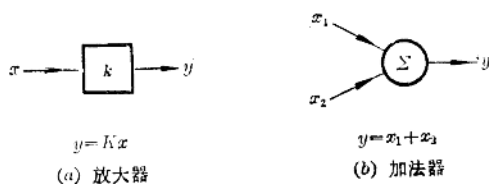


图 0-3 理想运算器

根据系统的物理特性, 把理想元件或理想运算器加以组合联接, 就可构成如图 0-2 那样的电路图, 或者如以后将看到的模拟图。这些图是用符号表示的系统模型, 由图可以写出描述系统特性的数学方程, 这些方程是用数学形式表示的系统模型。事实上,

不论用符号或数学式表示,它们都是系统的数学模型。

有了数学模型,就可以运用数学方法去求解,例如解出系统在一定的初始条件和一定的输入信号激励下的输出响应信号。然后再对所得数学解给以物理解释,赋予物理意义。所以系统分析的过程,是从物理实际中去建立一抽象的数学模型,经过数学处理后又回到物理实际的过程,这就是无线电技术中广为应用的分析方法。

系统的分析方法

系统可以分为线性系统和非线性系统。粗略地说,线性系统是由线性元件组成的系统,非线性系统是含有非线性元件的系统。它们的确切定义,将在以后逐渐给出。不论线性或非线性系统,根据它们所传输和处理的信号是连续波形还是离散序列,又可分为连续时间系统和离散时间系统。本书将只研究线性连续时间系统和线性离散时间系统的分析,而非线性系统要在《电子线路》和《脉冲与数字电路》等后继课程中去研究。

线性连续时间系统的数学模型是线性微分方程。根据建立模型时变量选取的观点和方法不同,系统的微分方程可以是输入-输出方程,也可以是状态方程。求解微分方程的古典方法是时域分析法。但是,对于在复杂信号激励下的系统,用古典方法求微分方程的特解十分困难,于是人们另找出路,改用变换域的方法去求解。所以在五十年代以前,系统分析一般都用拉普拉斯变换法。后来,由于数字计算机的普遍应用,数值积分的计算变得迅速易行了,于是利用卷积的时域分析法又占有了重要的地位。现在,时域法和变换法是对数学模型求解的两种并重的方法。

随着数字技术的迅速发展,离散时间系统的分析显得日益重要。线性离散时间系统的数学模型是线性差分方程,差分方程也