

邮·电 高等函授试用教材

电路信号与系统上

詹汉强 肖仲 吕增义 编 赫慈辉 审

人民邮电出版社

POSTAL AND TELEGRAPHIC HIGHER CORRESPONDENCE TRIAL TEXTBOOK

内 容 提 要

本书分上、下两册，上册包括：电路的基本概念、简单电路的计算、线性网络的理论与计算、一阶和二阶电路的瞬态分析、正弦交流电路、二端口网络和传输线。下册是介绍信号分析和通信系统等内容。

本书内容以基本理论的叙述和必要的数学推导为主，并力求用物理概念加以说明，使数学表达式与物理概念密切结合。

本书是邮电高等函授教材，在内容上力求深入浅出、通俗易懂、讲述也比较详细、有便于自学的特点。在每章末还附有小结、习题、思考题，可供参考。

邮电高等函授试用教材

电路、信号与系统

上 册

詹汉强 肖 仲 吕增义 编

赫慈辉 审

*

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：787×1092 1/32 1981年2月第一版

印张：17 4/32 页数：274 1981年2月河北第一次印刷

字数：394千字 插页：1 印数：1-16,000册

统一书号：15045·总2457-无6127

定价：1.75元

前 言

《电路、信号与系统》是电信专业的技术基础课。

本书是为北京邮电函授学院电信专业的高等函授生编写的，也可作为同类专业的高等院校和其它业余大学师生以及从事电信技术的工程技术人员参考用书。

本书内容分三大部分：电路基础、信号分析和通信系统。考虑到函授教育的特点，全书内容的编写与体系，力求符合以自学为主的要求。其中带“*”号的内容可供读者选学。

本书分上、下两册出版，上册第一章至第五章由吕增义同志编写，第六章由肖仲同志编写，第七章的编写以及全书的统编工作由詹汉强同志负责。

该书（上册）由北京邮电学院赫慈辉同志审稿，谢沅清、黄一成、陈景明等同志也审校了部分书稿，审稿同志提出了许多宝贵的修改意见，谨致以衷心的感谢。

由于编写时间匆促，加之编者水平有限，书中难免有疏忽或错误之处，我们衷心地欢迎广大函授师生和读者提出宝贵意见。

编 者

一九八〇年元月

目 录

导论	1
----------	---

第一篇 电路基础

第一章 电路的基本概念	4
第一节 电路的组成及电路图	4
第二节 电路的基本变量	7
第三节 电动势、电压源	12
第四节 线性电路的特点	15
第五节 电阻元件	17
第六节 欧姆定律	20
第七节 克希荷夫定律	26
第八节 电功和电功率	31
第二章 简单电路的计算	43
第一节 电阻串联电路	44
第二节 电阻并联电路	48
第三节 电阻混联电路	54
第四节 电路中各点电位的计算	57
第五节 负载获得最大功率的条件	63
第六节 电流源及其与电压源的等效转换	65
第七节 受控源	70
第八节 星形及三角形负载的等效转换	77
第三章 线性网络的理论与计算	91
第一节 支路电流法	91
第二节 网孔电流法	95
第三节 结点电位法	105

第四节	迭加定理	113
第五节	替代定理	120
第六节	戴维南定理	123
第七节	诺顿定理	132
第八节	互易定理	138
*第九节	网络的线图	143
*第十节	割集分析法	147
*第十一节	回路分析法	154
第四章	一阶和二阶电路瞬态分析	168
第一节	电容元件	169
第二节	电感元件	177
第三节	瞬态过程的产生及初始状态的确定	182
第四节	零输入响应	188
第五节	零状态响应	199
第六节	全响应	209
第七节	阶跃信号激励下 RC 电路的零状态响应	218
第八节	矩形脉冲信号激励下 RC 电路的零状态响应	224
第九节	微分电路与积分电路	228
第十节	LC 电路中的自由振荡	235
第十一节	RLC 串联电路的零输入响应——非振荡情况	238
第十二节	RLC 串联电路的零输入响应——振荡情况	247
第五章	正弦交流电路	261
第一节	交流电的基本概念	261
第二节	正弦电流和电压	264
第三节	有效值	269
第四节	正弦量的相量表示法	271
第五节	正弦量的复数表示法	275
第六节	电阻中的正弦电流	284
第七节	电容中的正弦电流	289

第八节	电感中的正弦电流	295
第九节	R, L, C 串联电路	301
第十节	R, L, C 并联电路	307
第十一节	复阻抗与复导纳的等效互换	312
第十二节	正弦交流电路的计算	315
第十三节	正弦交流电路的功率	328
第十四节	交流电路的实际元件	334
第十五节	串联谐振电路	338
第十六节	并联谐振电路	348
第十七节	互感耦合电路	360
第十八节	变量器	378
第十九节	三相电路	391
第六章	二端口网络	417
第一节	二端口网络	417
第二节	二端口网络的方程和参数	421
第三节	二端口网络的网络函数	436
第四节	二端口网络的等效网络	447
第五节	二端口网络的影象参数	454
第六节	几种实用二端口网络	467
第七章	传输线	475
第一节	分布参数电路	475
第二节	传输线方程及其正弦稳态解	479
第三节	均匀传输线上的波动性质	488
第四节	无损耗传输线	493
第五节	终端短路和开路的无损耗线	506
第六节	传输线的阻抗匹配	515
*第七节	圆图及其应用	525

导 论

为了适应电子技术的迅速发展和配合电子计算机的普及和应用,本课程包括:电路基础、信号分析和通信系统三大部分内容。众所周知,在通信技术领域内,电路、信号与系统是三个互相联系且有区别的基本组成部分。本书在内容安排上以及分析方法处理上均考虑在加强基本理论的前提下,把三大部分内容有机地联系起来以满足电信技术各专业的需要,同时为计算机的辅助设计和计算机通信打下一定基础。

电路是对信号进行加工处理的具体结构。组成各种各样的电路元件有电阻、电容和电感等。若再加上半导体器件,尤其是目前集成电路的迅速发展可以组成更为复杂的电路。本书第一篇主要阐述基本电路理论,从欧姆定律和克希荷夫定律出发,对简单电路、线性网络和交流电路进行了详细地叙述。另外,还讲述了二端口网络和传输线的基本原理。

信号是运载信息的工具,这就是信号的任务或本质。电信号的基本形式就是变化的电压和电流。例如在实际应用中经常遇到的电话信号、电视信号、雷达信号、控制信号以及电子计算机的数字信号等等。众所周知,如要将原始的声振动、图象、机械运动以及数字等信息转化为电信号,必须采用换能器。换能后的电信号都可以表示为时间的函数,即时域分析法,同时也可通过频域分析其频谱。本课程第二篇基本内容是运用付氏变换和拉氏变换的数学工具进行频域和复频域的信号分析。同时利用卷积积分简化信号分析,最后通过 Z 变换,引出离散信号的分析。

“系统”是信号所通过的全部电路和设备的总和，这里所关心的主要问题是，在给定的条件下（如信号形式一定），使系统具备某种功能，并要求具有一定的传输特性，保证可靠而有效地将各种信号从一点传输到另一点。“可靠”和“有效”是通信系统“质”和“量”的要求。直到目前为止，通信系统有两种不同的发展趋向：其一是，在满足一定的可靠性（质）的前提下，尽可能提高系统的传输效率（量）；其二是，在满足一定传输效率（量）的条件下，尽可能提高传输的可靠性（质）。前者称为有效传输技术，后者称为可靠传输技术，或称抗干扰技术。两者是互相依赖、互相制约，不可截然分开。

由此可知，“系统”所涉及的问题是全局性的。例如：卫星通信系统包括，发射设备、接收设备、卫星体、天线、遥控遥测设备和计算机以及空间信道，这样的系统当然是很复杂的。其中每一个设备或部件均可看成是一个分系统。显然，各个分系统又是由各种各样的电路组成，这些电路对所传输的信号进行加工处理。又如，长途或市话通信系统包括，电话机（声电换能器）、市内电话交换机、多路电话传输设备、传输媒介及计算机等。本篇主要叙述组成各种通信系统（如调幅、调频和调相）的基本理论，系统方案、性能和指标等。当然也突出每种系统的特殊性能和分析方法。最后推荐几种现代通信系统。

总而言之，通过本书的学习，不但可以掌握必要的电路基础，通信电路理论，而且为从事通信技术工作的人员掌握各种信号分析方法，进而研究各种通信系统，并为电子计算机应用于通信打下一定的基础。

第一篇 电路基础

引 言

由于现代科学技术的迅速发展，电在工农业生产、国防、科学研究以及人们的日常生活等各方面都得到了广泛地应用。在通信、自动控制、计算机等各个电子技术领域中所应用的电子设备，不仅种类繁多，而且结构日益复杂。不过这些设备目前大多数仍是由各种各样的电路所组成的，而电路的结构不论如何复杂，它们和最简单的电路之间还是具有许多最基本的共性，并且遵循着共同的运动规律。因此，本篇主要是研究电路中所发生的共同的电磁现象及其基本规律，论述一般电路的分析与计算方法，为学习信号分析、通信系统以及其他后续课程准备必要的电路理论基础。

第一章 电路的基本概念

本章主要复习电流、电压、电动势的基本概念，以及电路理论的基本定律——欧姆定律、克希荷夫两定律和楞次-焦耳定律，同时介绍有关线性电路及线性电阻元件的主要特性。另外，还提出了电压源，电流、电压的参考方向等重要基本概念。

学习本章时，要求读者：

1. 较深刻理解电流、电压、电动势以及电功率等基本物理量的意义，并掌握它们之间的关系。
2. 欧姆定律，特别是一段含源电路的欧姆定律，必须能够熟练地运用。
3. 由于克希荷夫两定律在电路分析中得到了广泛地应用，所以必须理解它们的物理意义，掌握列写独立方程的原则。
4. 对电流、电压，参考方向的概念要十分清楚，它是分析电路的重要手段。

第一节 电路的组成及电路图

电路是由电源、负载和连接导线等部件所组成的。这些部件各自具有不同的物理性能和作用，因而将它们加以适当的组合，就可以构成各种不同功能的电路，人们利用这些电路来进行预期的能量传输、控制和转换。图 1-1 (a) 表示一个最简单的实际电路，其中干电池将化学能转换成电能供给灯泡，它就是电路的电源。电灯泡的灯丝是用电阻丝制成的，通过电流时

能把电能转换成光，它是耗电部件，称为负载。电源和负载之间用导线连接起来，以便使电流构成通路。

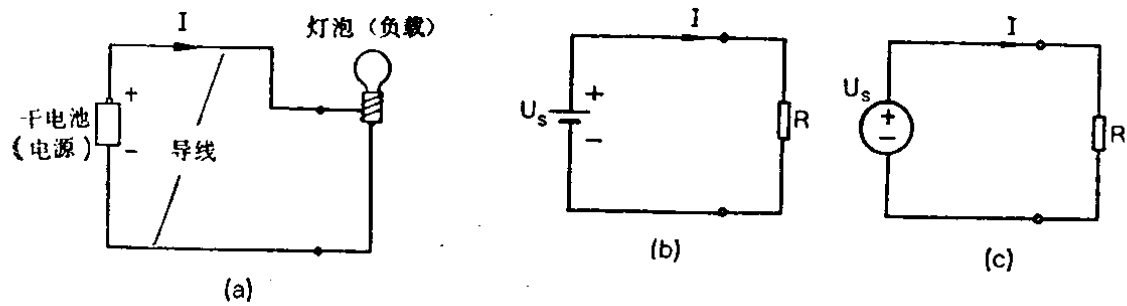


图 1-1 电池与灯泡组成的电路

上面所讲的是一个最简单的电路，许多实际电路要复杂得多，但也不外乎是由多个电源、负载和导线所组成。具体地说，各种实际电路都是由不同的电源、电阻器、电容器、电子管、晶体管、变压器、线圈等部件所组成的。在理想的情况下，每个部件只具有某种主要的物理性能，譬如说，电阻器只具有对电流呈现阻力的性能；电源在正负极间能保持恒定的电压值；连接导线能使电流畅通无阻的流过。然而，一个实际的电阻器通过电流时还会产生磁场，因而兼有电感的性质；一个实际的电源总有内阻，因而在使用时不可能总保持恒定的端电压；连接用的导线多少也总有一点电阻。也就是说，不可能制造出理想的部件。这样，在分析电路时，如果把各部件的全部物理性能都加以考虑，势必会给分析带来很大的困难，而且在工程设计上也没有这样精确的必要，因此，我们必须在一定的条件下对实际部件加以近似化、理想化，忽略它的次要性质，用一个表征其主要性能模型，即理想元件来表示。例如电灯泡的电感是极其微小的，我们可以把它看成一个理想的电阻元件，于是就构成了电灯泡的模型。

在一定的条件下，各种实际部件都可以找出它的模型，用来表征或近似地表征部件的性质和其中发生的物理现象。由于实际部件的运用都和电磁现象有关，因此，通常应用的有三种最基本的理想元件：只表示将电能转换为热能或其他形式能量的电阻元件；只表示电场现象的电容元件；只表示磁场现象的电感元件。各种实际部件中，有些比较简单，可以只用一种理想元件来表征，有些比较复杂，需要用几种理想元件来表征，例如晶体管。

实际部件用模型表示后，就可以画出由理想元件组成的电路图，各理想元件都用一定的符号来表示，这样，图 1-1 (a) 的实际电路就可画成图 1-1 (b) 或 (c) 所示的电路图。其中电阻元件用符号()表示，电源用电池的符号()表示，如图 1-1 (b) 所示，也可用更一般的符号来表示，如图 1-1 (c) 所示。

电路若按其中通过的电流性质来分，可分为直流电路和交流电路。若按其结构来分，可分为无分支电路和有分支电路。无分支电路也称为单回路，图 1-1 就是无分支电路。比较复杂的电路通常都有分支，每一个分支都是电路的一部分，称为支路。图 1-2 是一个分支电路，共有三个支路： BD 支路， BCD 支路和 BAD 支路。

电路中三个或更多的支路相汇集之点称为结点或节点。图中 B 和 D 都是结点。电路中任一闭合的路径称为回路。图中 $ABDA$ 、 $BCDB$ 及 $ABCD A$ 都是回路。通常把内部不包含支路的回路称为网孔，如图中 $ABDA$ 、 $BCDB$ 是网孔，而 $ABCD A$ 则不是网孔。另外，含有多个支路的复杂电路一般称为网络，通常所说的网络也就是较为复杂的电路。网络又分为平面网络和立体网络两种，所谓平面网络，就是可以画在一个平面上而

不至使任何两条支路交叉的电路，否则就称为立体网络。

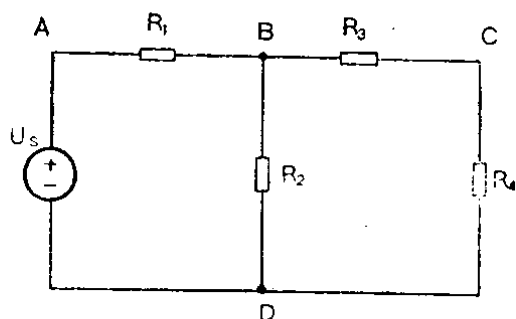


图 1-2 分支电路

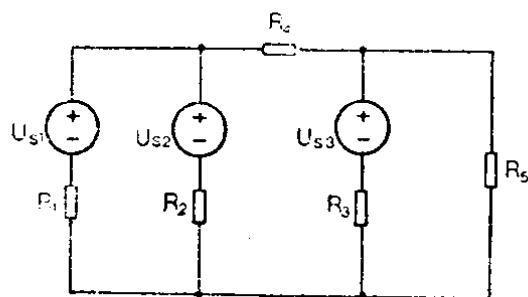


图 1-3

练 习 题

在图 1-3 所示的电路中，有几个结点？几条支路？几个网孔？几个回路？

第二节 电路的基本变量

在分析电路时，经常遇到的问题是给定电路及元件值，而需求出电路中各个电流和电压值。当然，有时还必须求出电路各部分的功率。但是，只要求得电路的电流和电压值，就可以确定该电路的性能，因此，电流和电压值是衡量电路性能的两个重要物理量，故称为电路的基本变量。

一、电流

在物理学中已经知道，带电质点有规则的运动形成电流。导体内的电流，是由导体内的自由电子在电场的作用下作有规则的运动所形成的。电流是一种客观的物理现象，通过它的热效应或磁效应，就可以察觉到它的存在。

导体中通过电流的大小以电流强度来度量，它的定义是：单位时间内通过导体横截面的电荷量的多少，称为电流强度，简称电流。电流是有方向的，由于历史的原因，人们习惯上规定正电荷移动的方向为电流的方向。由于电子是负电荷，故电流的方向与导体内电子移动的方向恰好相反，不过这对研究问题并无影响，所以一直沿用下来。

如果电流的大小及方向都不随时间而变化，即在单位时间内穿过导体横截面的电荷量都相同，这样就得到恒定电流，即直流电流。在这种情况下，通过导体横截面的电荷量将与时间成正比，电流可用大写字母 I 表示，则

$$I = \frac{q}{t} \quad (1-1)$$

式中 q 为在时间 t 内通过导体横截面的电荷量。

如果电流的大小和方向是随时间而变化的，即在不同的瞬间，电流的大小和方向都不一定相同，这种电流称为交流电流，用小写字母 i 表示（一般用小写字母表示随时间变化的各物理量）。设在极短时间 dt 内，通过导体的微量电荷为 dq ，则电流 i 为

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-2)$$

现在工程上逐步采用国际单位制，在这种单位制中，米 (M) 为长度的基本单位，千克 (kg) 为质量的基本单位，秒 (s) 为时间的基本单位，安培 (A) 为电流的基本单位等等。这时电量的基本单位是库仑 (Q)，用国际制的基本单位表示，则 1 库仑 = 1 安·秒。

电流的单位是安培，简称安 (A)。在电信技术中，因嫌安培这个单位太大，经常用毫安（记作 mA，即千分之一安）或

微安（记作 μA ，即百万分之一安）为单位。

最后，要特别说明在电路图中如何判定电流的真实方向问题。上面已经提到正电荷运动的方向就是电流的真实方向，但在分析电路时，电流的真实方向往往很难加以判定，例如交变电流的方向是随时间变化的，显然不能用一个固定的箭头来表示真实方向。从(1-2)式可以看出，当电量 q 随时间增加时，电流 i 为正值，反之则为负值，这表明电流 i 是一个代数量，可正可负。因此，只根据这一表达式是不能确定电流的真实方向的。另外，即使在直流电路中，当求解较复杂的电路时，往往也难以事先判定电流的真实方向。由于这些原因，我们引入电流的参考方向（或称正方向）这一概念。电流的参考方向可以任意选定，在电路图上用箭头表示出来，如图 1-4 所示，图中虚线箭头表示电流的真实方向。我们规定：如果电流的真实方向与参考方向一致时，把电流定为正值；当电流的真实方向与参考方向相反时，把电流定为负值。这样一来，就可利用电流的正负值结合参考方向来判定电流的真实方向。在分析电路时，可先任意假定电流的参考方向，若计算结果电流为正值，则表明电流的真实方向与选定的参考方向是一致的；若为负值，则表明电流的真实方向与参考方向是相反的。显然，在电路图中未标示参考方向的情况下，电流的正负将是没有意义的。

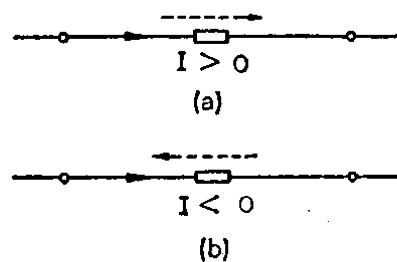


图 1-4 电流的参考方向

必须指出，今后在电路图中所标出的电流方向都是参考方向，不一定是电流的真实方向。

二、电压

电路中两点间的电位之差称为电位差，通常称为电压。电路中 a 点到 b 点间的电压，等于单位正电荷从 a 点移到 b 点时所获得或失去的电位能（简称电能），或者说，等于单位正电荷从 a 点移到 b 点时电场力所作的功。即

$$U_{ab} = U_a - U_b = \frac{W_a}{q} - \frac{W_b}{q} = \frac{W_{ab}}{q} = \frac{A_{ab}}{q} \quad (1-3)$$

式中 U_{ab} 表示由 a 点至 b 点间的电压； $U_a = \frac{W_a}{q}$ ， $U_b = \frac{W_b}{q}$ ，

分别表示 a 、 b 两点的电位； W_a 、 W_b 分别表示单位正电荷 q 在 a 、 b 两点所具有的电能； W_{ab} 表示从 a 点移到 b 点时 q 失去或获得的电能； A_{ab} 表示 q 从 a 点移到 b 点时电场力所作的功，称为电功。

在国际单位制中，电压的单位是伏特，简称伏(V)。电功的单位是焦耳(J)。如果把 1 库仑(Q)电量的正电荷从一点移到另一点时电场力所作的功为 1 焦耳，那末这两点间的电压就是 1 伏特。即 $1\text{ V} = 1\text{ J/Q}$ 。计量微弱电压时可用毫伏(mV，即千分之一伏)或微伏(μV ，即百万分之一伏)为单位，计量高压时可用千伏(KV，即 10^3 伏)为单位。

如果把单位正电荷从 a 点移到 b 点，电场力作了功，而正电荷所具有的电位能有所减少（即电位降低，称电位降或电压降），则表明 a 点为高电位，即电压的正极， b 点为低电位，即电压的负极。电压的实际方向是电位降低的方向，即从高电位端到低电位端的方向。如果在外力的作用下，把单位正电荷从 b 点移到 a 点，则正电荷所具有的电位能必将有所增加（即电位升高，称电位升或电压升），当然这是外力作了功，或者

说，电场力对单位正电荷作了负功。这两部分功的大小完全相等但符号相反。即由 b 点到 a 点的电压为

$$U_{ba} = -U_{ab}$$

由此可见，电路中两点间的电压，必须说明起点和终点。在用双下标记法时，例如 U_{ab} ，则表示由 a 到 b 点间的电压，前一个下标 a 代表起点，后一个下标 b 代表终点。

按电压随时间变化的情况，电压可分为恒定电压和交变电压。如果电压的大小和方向（极性）都不随时间而变化，这样的电压称为恒定电压或直流电压，用大写字母 U 来表示。如果电压的大小和方向（极性）都随时间变化，则称为交变电压，用小写字母 u 表示。这时，电路中 a 、 b 两点间的电压可用下式表示

$$u = \frac{dw}{dq} \quad (1-4)$$

式中 dq 为从 a 点转移到 b 点的电荷量， dw 为转移过程中 dq 所获得或失去的电位能。

对于电压来说，同样有必要指定参考极性或参考方向。当电路中两点间电压的实际极性或方向不易确定或随时间变化时，我们可以任选一点为正极，另一点为负极，称为电压的参考极性，由参考正极到参考负极的方向称为电压的参考方向（或正方向）。当然，电压的参考极性也不一定是电压的实际极性。一般规定，当电压的实际极性与所选的参考极性相同时，则电压为正，反之则为负。这样，在已选定参考极性的情况下，若计算结果电压为正值，则表明电压的实际极性与参考极性一致，若为负值，则电压的实际极性与参考极性相反。在电路图中未标明参考极性的情况下，电压的正负也是没有意义的。