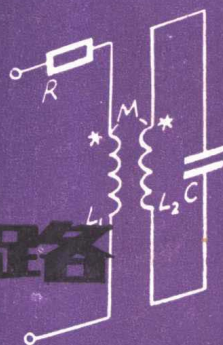


★ 职工高等工业专科学校教材

电路及磁路

★ 【上册】 俞大光 主编

★ 寇仲元 应铜城 朱经天 编



高等教育出版社

职工高等工业专科学校教材

电 路 及 磁 路

上 册

俞大光 主编

寇仲元、应铜城、朱经天 编

内 容 简 介

本书由国家教委组织的编写组根据1983年审订的职工高等工业专科学校《电路及磁路教学大纲》编写,经审稿会议通过作为职工大专教材出版。本书以经典内容为主,力图突出重点,理论联系实际,贯彻国家标准,例题比较丰富,以体现高等专科学校这一层次的要求,适应成人教育的需要。每节末附有思考题,每章末有提要 and 习题,书末有习题答案。

本书分上下两册出版。上册内容包括电路的基本概念和基本定律、电阻电路、网路分析和网络定理、含受控源的电路、非线性电阻电路、正弦电流电路、三相电路,下册内容包括二端口网络和多端元件、非正弦周期电流电路、磁路和有铁心的交流电路、电路的时域分析、电路的复频域分析、分布参数电路。

本书是根据电类(不包括无线电技术类)各专业教学大纲编写的,同时考虑了未设电机学作为后续课各专业的要求,增加了铁心变压器等内容,因此也可适用于无线电技术类各专业。本书除作为职工高等工业专科学校教材外,还可供其他高等工业专科学校选用或作为工程技术人员参考。

职工高等工业专科学校教材

电路及磁路

上 册

俞大光 主编

寇仲元 应铜城 朱经天 编

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京印刷三厂印装

开本 850×1168 1/32 印张 11.875 字数 280,000

1988年11月第1版,1988年11月第1次印刷

印数 00,001—8,150

书号 15010:0802 定价 2.15 元

序 言

原教育部于一九八三年十一月在无锡召开了职工高等工业专科学校(以下简称职工大专)教学大纲审定会议。会上审定了适用于电类(不包括无线电技术类)各专业的《电路及磁路教学大纲》(以下简称《大纲》),并由高等教育出版社于同年十二月出版。本书就是遵照《大纲》,依据无锡会议确定的任务,组织编写组集体编写的。

由于职工大专所要求的理论水平应与大学本科有所不同,而过去长期套用对本科生的教学大纲而由任课教师酌情取舍,往往难于统一教学要求,所以制定一个规范性的试用《大纲》是非常必要的。但是,《大纲》仍然只能大体上规定教学的深度和广度,故在其所附说明部分除推荐了邱关源教授主编的《电路》(修订本)上、下册作为借用教材外,又附了借用教材的使用说明:建议某些章节不作要求;某些定理找另外的方法证明;某些内容还得另编补充讲义等。但这样做给教学带来了很多不便。由于当时国内尚无适用于职工大专的本课程教材出版,所以无锡会议决定一方面继续推荐使用借用教材;另一方面立即着手组织力量编写本教材。

职工大专的教学总的说来应反映“三个面向”的要求,即面向现代化;面向世界;面向未来。近年来电路理论在国内外已经有了许多新的发展。但本教材编入的内容仍然绝大部分属于经典内容。这是由于考虑到职工大专的培养目标是在生产第一线从事技术工作的人员,而本课程是属于电类专业的一门共同的技术基础课。在有限的学习时间内,首要任务仍是掌握这些经典内容并赖以解决一般生产技术问题;而且学生牢固掌握这些经典内容后就

有了进而自学一些新的电路理论和分析计算方法的基础。

编写本书在指导思想上希望体现出与本科相比属于不同的层次,因此本书除在二端口网络、多端元件的约束关系和网络的状态方程上书列了矩阵方程(为了使读者开阔眼界,同时也是《大纲》的要求)外,其余部分均未涉及矩阵,网络图论的要求也比本科教材低得多。由于电子技术的广泛应用,集成电路的迅速发展,受控源已成为电路分析中常见元件之一。一些本科教材均将受控源贯穿全书以突出其地位;但本书只作一专章讲述,其它只在二端口网络和多端元件一章中有所涉及,起一点复习作用。

由于职工大专毕业生将在生产第一线从事技术工作,而本课程又是电类专业的第一门电类工程课,故在教学上应该让学生多联系电工实际知识。本书除以分析计算电路模型为主要要求外,还适当安排了如何建立电路模型(如对实际电源、实际元件模型的选定)的内容。为了培养学生定性地对生产实际问题作出分析判断的能力,本书企图多对电磁过程的物理图象进行描述,并安排了较少的思考题,后者也同时为了巩固概念和加深理解。例题和习题中引用的数据也力求符合实用范围,并希望通过习题培养学生工程计算的能力。

《大纲》未考虑无线电技术类各专业的要求。虽然我国目前尚无适用于职工大专无线电技术类各专业的相应课程的教学大纲,但考虑到编写、审定并出版一种教材比起草、审定并出版一种教学大纲所耗费的人力与时间要大得多,故编写本书时希望将适用面再扩大一些,对不设电机学作为后续课的专业编入了一些供选学的内容,如单相、三相发电机的简单原理,频率与极对数的关系和铁心变压器的电路模型等,这些内容均以正楷体字排印。此外,《大纲》上规定的加深加宽内容(带*标的)和某些内容中的少量较深入只供选学的部分,则均以小字体排印。本书在章节或习题标

号(或标题)前冠有 $\triangle$ 标记的即为部分专业应选学的内容,例如分布参数电路一章为电力类专业应选学的内容;而冠有*标的为加深加宽内容,仅供学习成绩优秀的学生或班级选用,一般可不作要求。在例题、思考题和习题前面的这些标记,其含义也与此相同。

本书所采用量的名称和符号、单位的名称和符号均遵照我国法定计量单位和有关国家标准,采用国际单位制(SI)。国家标准GB 3101-82规定:凡量的符号都是代表某一数值和相应单位的乘积的,量的方程、等式在等号两方的量纲必须相同;在数值方程中,用某单位量度某量得到的数值,其符号必须写作带大括弧“{ }”的量的符号,这样往往显得繁琐。为了简单清晰起见,本书在等式后面加括弧星号“(*)”来标示这类数值方程,而且当采用非SI主单位时加注单位。

本书基本上采用《大纲》编写的次序,只对个别内容上作了小的调整,这只是为了强调某些内容的密切联系或为讲授上的方便。当然,为了考虑与其它课程的衔接配合,使用本教材教学时也完全可以变动某些次序。

为了便于读者较好地掌握重点,本书中重要的公式均加方框;重要的结论均加波纹线;并在每章之末编有提要。由于书末未附中英名词对照表,在正文中酌情在一部分名词初次出现时加注了英语。

《大纲》中规定有30学时的实验课,其中包括对常用仪器仪表的讲解时间。对实验课的要求中并规定学员应学会正确使用某些仪器仪表。为了方便教学和联系实际,本书在相应的节次中安插了一些常用电表的简单原理和使用方法的介绍。

本书选用了一部分联系实际的例题和习题,通过它们介绍一些在其它课程一般也难涉及到的某些实际知识,同时培养运用已学理论分析计算实际问题的能力。书末附有习题答案,以便读者

解题完毕作自我校核。但希各方不要编写出版本书的题解，因编者认为那样不但不能帮助读者学习，反而容易造成较多的依赖而妨碍了独立解决问题能力的培养。

本书的编审工作是在四川省高等教育局主持下进行的。参加本书编写组的有上海电业职工大学寇仲元同志(分工编写第一至五章、第九、十三及十四章)、石油部管道局职工学院应铜城同志(分工编写第六、十及十二章)和本溪钢铁公司职工工学院朱经天同志(分工编写第七、八及十一章)。全书经西安交通大学邱关源教授主审、湘潭电机厂职工大学刘巨民同志和峨眉机械厂职工大学秦积安同志参加审阅，他们都对本书提供了宝贵的意见。湖南省职工高等学校电工基础协作组讨论了对全书书稿的意见，并核算了全书例题。另外上海第二工业大学臧亨同志、成都电力职工大学陈容康同志和北京半导体器件二厂职工大学刘宝群同志也应邀参加了审稿会议，这些都对提高本书质量作出了贡献。本书交稿前又承石油部管道局职工学院冯奂奇、徐吉生两同志进行校阅。所有以上各同志所在单位都对本书的编写、审阅工作给予了大力支持。为此编写组对参与审稿各同志和各编审同志所在单位一并表示衷心的感谢！

由于对编写职工大专教材缺乏经验，编写组人员水平有限，有不当或错误之处，敬希各界不吝指正！

曙光机械公司职工工学院俞大光

1985年12月

目 录

第一章 电路的基本概念和定律	1
§ 1-1 电路.....	1
§ 1-2 电路的基本物理量.....	6
§ 1-3 电流和电压的参考方向.....	13
§ 1-4 电阻和欧姆定律.....	18
§ 1-5 网络图 基尔霍夫定律.....	25
§ 1-6 实际电源的电路模型.....	34
本章提要.....	43
习题.....	44
第二章 线性电阻电路	49
§ 2-1 最简单的电路.....	49
§ 2-2 线性电阻的串联.....	54
§ 2-3 线性电阻的并联.....	57
§ 2-4 线性电阻的串并联.....	60
§ 2-5 线性电阻星形联结和三角形联结的等效互换.....	66
§ 2-6 电源的串联和并联.....	70
§ 2-7 有源支路的电压电流关系.....	79
本章提要.....	86
习题.....	87
第三章 线性网络的基本分析方法和定理	94
§ 3-1 支路法.....	94
§ 3-2 网孔法.....	100
§ 3-3 节点法.....	105
§ 3-4 回路法.....	114
§ 3-5 割集 *割集法.....	119
§ 3-6 叠加定理.....	121
§ 3-7 等效电源定理.....	126

§ 3-8 特勒根定理.....	133
*§3-9 替代定理和对偶原理.....	135
本章提要.....	138
习题.....	140
第四章 含受控源的线性电阻电路	147
§ 4-1 受控源.....	147
§ 4-2 含受控源有源二端网络的等效电路.....	153
§ 4-3 含受控源电路的网孔法和节点法.....	156
§ 4-4 含运算放大器的电路.....	158
本章提要.....	163
习题.....	163
第五章 非线性电阻电路	166
§ 5-1 非线性电阻电路的图解法.....	166
§ 5-2 折线法.....	174
§ 5-3 小信号法.....	177
本章提要.....	182
习题.....	183
第六章 正弦电流电路	185
§ 6-1 正弦电流电路的基本概念.....	185
§ 6-2 正弦量的相量表示法.....	198
§ 6-3 电容元件.....	204
§ 6-4 电感元件.....	212
§ 6-5 正弦电流电路中的电阻、电感和电容.....	217
§ 6-6 正弦电流电路中的基尔霍夫定律.....	228
§ 6-7 电阻、电感、电容串联电路及复数阻抗.....	231
§ 6-8 电阻、电感、电容并联电路及复数导纳.....	235
§ 6-9 阻抗的串并联电路.....	238
§ 6-10 无源二端网络及实际元件的电路模型.....	245
§ 6-11 正弦电流电路中的功率.....	253
§ 6-12 提高功率因数的意义及方法.....	262
§ 6-13 正弦电流电路的分析.....	265
本章提要.....	273

习题	276
第七章 正弦电流电路(续)——谐振和互感	283
§ 7-1 串联谐振	283
§ 7-2 并联谐振 *串并联谐振	291
§ 7-3 互感	296
§ 7-4 耦合电感的串联和并联	305
§ 7-5 空心变压器	310
本章提要	314
习题	315
第八章 三相电路	319
§ 8-1 对称三相电压源	319
§ 8-2 星形联结负载及其电路计算	330
§ 8-3 三角形联结负载及其电路计算	338
§ 8-4 含多组对称负载的对称三相电路	343
§ 8-5 三相电路中的功率	347
本章提要	357
习题	358
各章习题答案	361

第一章 电路的基本概念和定律

电是我国实现工业、农业、国防和科学技术现代化的重要技术基础,是发展生产的主要能源之一,又是通讯、控制、快速计算的重要条件。各种电气设备中都存在着由一些电气器件通过导线联接而组成的电路,有的还存在着由铁磁性物质构成的磁路。本课程研究电路及磁路中的一些基本规律和分析计算方法。这些内容是电工、电子、无线电、自动化等各类专业共同的重要理论基础。本章首先讨论电流、电压等电路基本物理量和它们的相互关系;然后研究反映电阻、电源等元件特性的基本规律(元件约束)和反映元件联结特性的基本规律(拓扑约束)——基尔霍夫定律。这些都是本书重要的基本知识,其中“参考方向”和“两种约束”的概念将贯穿全书,读者应牢固掌握。

§ 1-1 电 路

电路、网络 和系统

在现代生产和国防中,应用着各种各样的电气设备,如发电机、电动机、变压器、电炉、雷达、电子计算机和仪器仪表等。在日常生活中,也应用着电灯、电话、收音机、录音机、电视机、录像机等越来越多的电气设备。这些电气设备又常常是由电池、电阻器、电容器、线圈、开关、晶体管、集成电路、继电器等电气器件组成的。电气器件相互联接的整体,构成了电流可以流通的路径,称为电路(circuit)。电路常用于传输和转换电能和电信号,因而是一个电能和电信号的传输系统。这里所谓系统(system),是指由若干单元组成并

达到某种目的的有机整体,如电力系统、通讯系统、计算机系统等。比较复杂的电路呈网状,常称为**网络(network)**。一般网络也就是指电路。

电路的另一个重要作用是进行电信号的处理、存贮、控制和测量等。电信号一般是指反映信息(语言、图象、文字、数码等)特征的电流和电压,有时简称为**信号(signal)**。电路中的外施信号或输入信号常称为**激励信号**或简称**激励(excitation)**,而输出信号则称为**响应信号**或**响应(response)**。

电路的组成

图 1-1-1(a)、(b) 分别为最简单电力系统和晶体管声音放大器的示意图。同图(c) 是一个更为简单的手电筒电路,它包括电池、小电珠、联结导线和开关等。由此可见,电路主要由以下三部分组成:

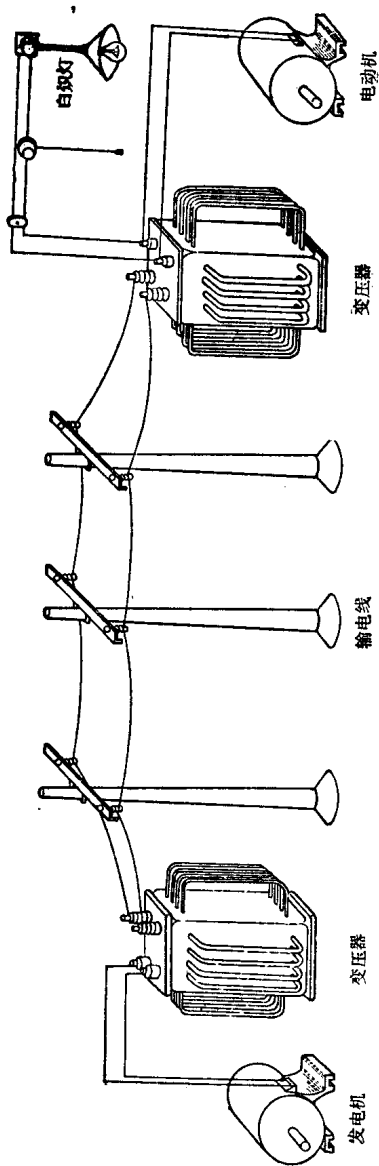
1. **电源(source)**: 是供给电能或发出电信号的设备,它把其它形式的能量转换成电能,或者把电能转换成另一种形式的电能或信号。例如,电池把化学能转换成电能,发电机把机械能转换成电能,信号发生器把电能转换成一定的电信号等。

2. **负载(load)**: 是用电或接收电信号的设备,它把电能转换成其它形式的能量。例如,小电珠把电能转换成光能和热能,电动机把电能转换成机械能等。负载有时也叫负荷。

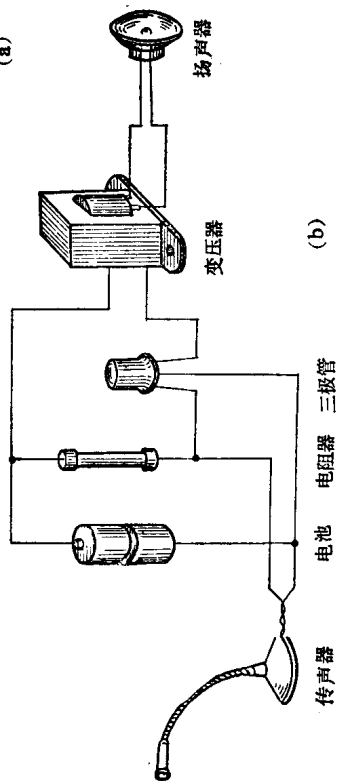
3. **联结导线**: 用于传输电能和电信号。

此外,电路中还可能包括开关、仪表、控制保护设备等。

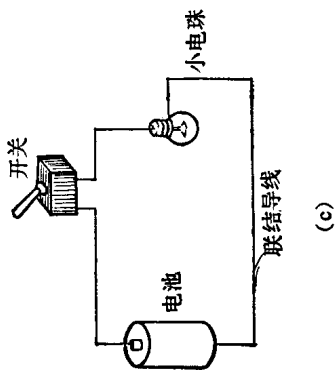
为了分析和计算方便,常常用一些简单的图形符号代表具体的电气设备和器件,联接起来画成**原理电路图**(简称电原理图),它通常只反映各器件间的联结关系,而不表示出实际电路的形状、尺寸和相互位置。图 1-1-2 是图 1-1-1 各电路的原理电路图。表 1-1 为我国国家标准中规定的一些常用的电路图形符号。



(a)



(b)



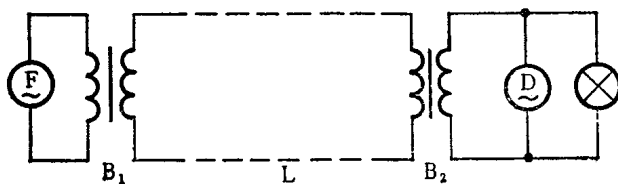
(c)

图 1-1-1

表 1-1 电工系统图形符号

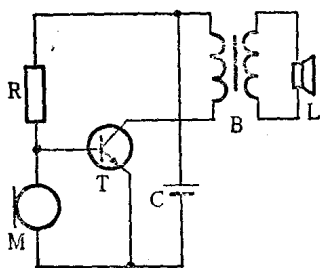
(根据国家标准 GB 312-64)

名 称	符 号	名 称	符 号	名 称	符 号
导线	—	直流发电机		电阻器	
联结的导线		电池		可变电阻器	
接地		开关		电容器	
安培表		熔断器		电感器	
伏特表		照明灯		变压器或互感器	
瓦特表		隧道二极管		铁心变压器	
晶体管	KK	稳压二极管		铁氧体心变压器	
传声器		二极管		绕 组	
扬声器		电动机			

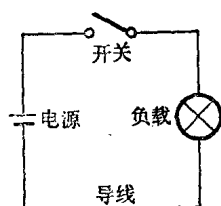


(a)

图 1-1-2



(b)



(c)

图 1-1-2

电 路 模 型

实际电气设备和器件往往比较复杂，其电磁性能的表现可能是多方面的。例如，实际日光灯镇流器的线圈周围不但存在着磁场，而且要发热，还有一定的电场。但在研究某些器件时，常常只考虑其中起主要作用的某些电磁现象，而将其它现象忽略（这样作所得结果与实际情况相差不大，在工程上是允许的）。例如：对电炉可以只考虑电能转换成热能；对电容器可以只考虑电场以及位移电流的存在等。把某些实际电路器件理想化所得到的只有某种单一电磁性能的元素称为**理想电路元件**，或简称为**电路元件**（circuit element）。例如：电阻元件是反映电能转换成热能之类能量的理想电路元件；电感元件是反映电路周围存在着磁场的元件；电容元件是反映电路及其附近存在着电场的元件等。电阻、电感、电容等具有两个引出端的元件称为**二端元件**。一般地说：具有 n 个引出端的元件称为 n 端元件。

实际电气设备、器件或系统可以用一个或若干个理想电路元件的组合来模拟，构成一个**电路模型**（circuit model）。例如，电阻元件就可以作为白炽灯或电热器的电路模型。实际电气设备和器件的种类繁多，而理想电路元件只有有限的几种。用理想电路元件建立电路模型，将使电气设备的研究大大简化。建立电路模

型时应使其外部特性与实际设备和器件的外部特性尽量接近，但两者的性能并不一定也不可能完全相同。同一设备或器件在不同条件下有时应以不同的电路模型来表示。例如，一个线圈在低频率时可以只考虑其中的磁场和发热，甚至只考虑磁场就行了。但当频率较高时还应考虑电场的影响，频率更高时还要考虑电磁辐射。一般地说，对电路模型的近似程度要求越高，电路模型也越复杂；但为了分析方便，我们又希望电路模型尽量简单。

建立电路模型有两种基本方法：一是分析器件内部的物理过程，二是研究它的外部特性。建立电路模型时一般应指出它的工作条件（如电压、电流、功率、频率、温度范围等）。为实际器件建立模型并运用模型作为手段分析问题是科学研究的重要方法之一。本书中虽对建立模型的问题略有涉及，但主要是从电路模型出发进行分析和计算，即分析由理想电路元件构成的电路。例如图 1-1-3 就是图 1-1-1(c) 电路的模型。图中电池用理想电压源 U_s 和电阻元件 R_s 的组合表示，小电珠用电阻元件 R 表示，联结导线和接通的开关则看成是无电阻的引线。

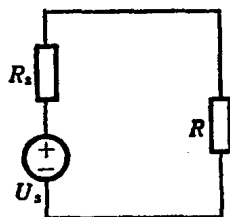


图 1-1-3

思 考 题

- 1-1-1 原理电路图和电路模型有何不同？
1-1-2 找出图 1-1-1(b) 电路中的激励和响应。

§ 1-2 电路的基本物理量

带电粒子(电子、离子等)的有秩序运动形成电流。电流是一种物理现象，又是一个表示电流强弱的物理量。电流 (electric current) 在量值上等于

电 流

穿过某一面积的电荷[量](electric charge)与所需时间之比,它实际是电流强度的简称。若在时间 Δt 内,从某面积的一方穿过到它的另一方的电荷代数和为 ΔQ ,则在此时刻 t 穿过该面积的电流为

$$I \stackrel{\text{def}}{=} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{dQ}{dt} \quad (1-2-1) \quad ①$$

式中 I 可能是随时间 t 而变动的,有时记为 $I(t)$ 。一般规定:以正电荷穿过某面积的指向作为电流的实际方向,它恰与电子运动的指向相反。

当电流的量值和方向都不随时间变动时,这种电流称为**直流电流**(direct current),简称直流(d.c.);它与时间的关系如图 1-2-1 中直线 a 所示。此时

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1-2-2)$$

式中 Q 为经历时间 t 流过的总电荷。

周期性变动且平均值^②为零的电流称为**交流电流**(alternating

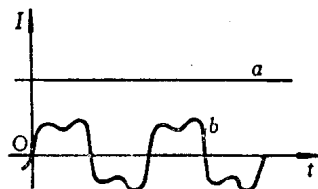


图 1-2-1

current),简称交流(a.c.),图 1-2-1 中曲线 b 所示的电流是交流。

本书中物理量采用国际单位制(SI)单位。电流的 SI 主单位为安[培]^③(ampere),符号为 A ,它是 SI 的七个基本单位之一^④。

将电流的主单位冠以 SI 词头(见表 1-2)即可得到电流的十进倍数单位和分数单位,常用的有微安(μA)、毫安(mA)、千安

① 国家标准 GB 3102.11-82 中规定“ $a \stackrel{\text{def}}{=} b$ ”表示“按定义 a 等于 b ”。

② 有关周期性和平均值的定义见第六章。

③ 本书文字中方括号内为可以省去的字,省去后为简称。

④ SI 的七个基本单位是: 米(m)、千克(kg)、秒(s)、安培(A)、开尔文(K)、摩尔(mol)和坎德拉(cd)。