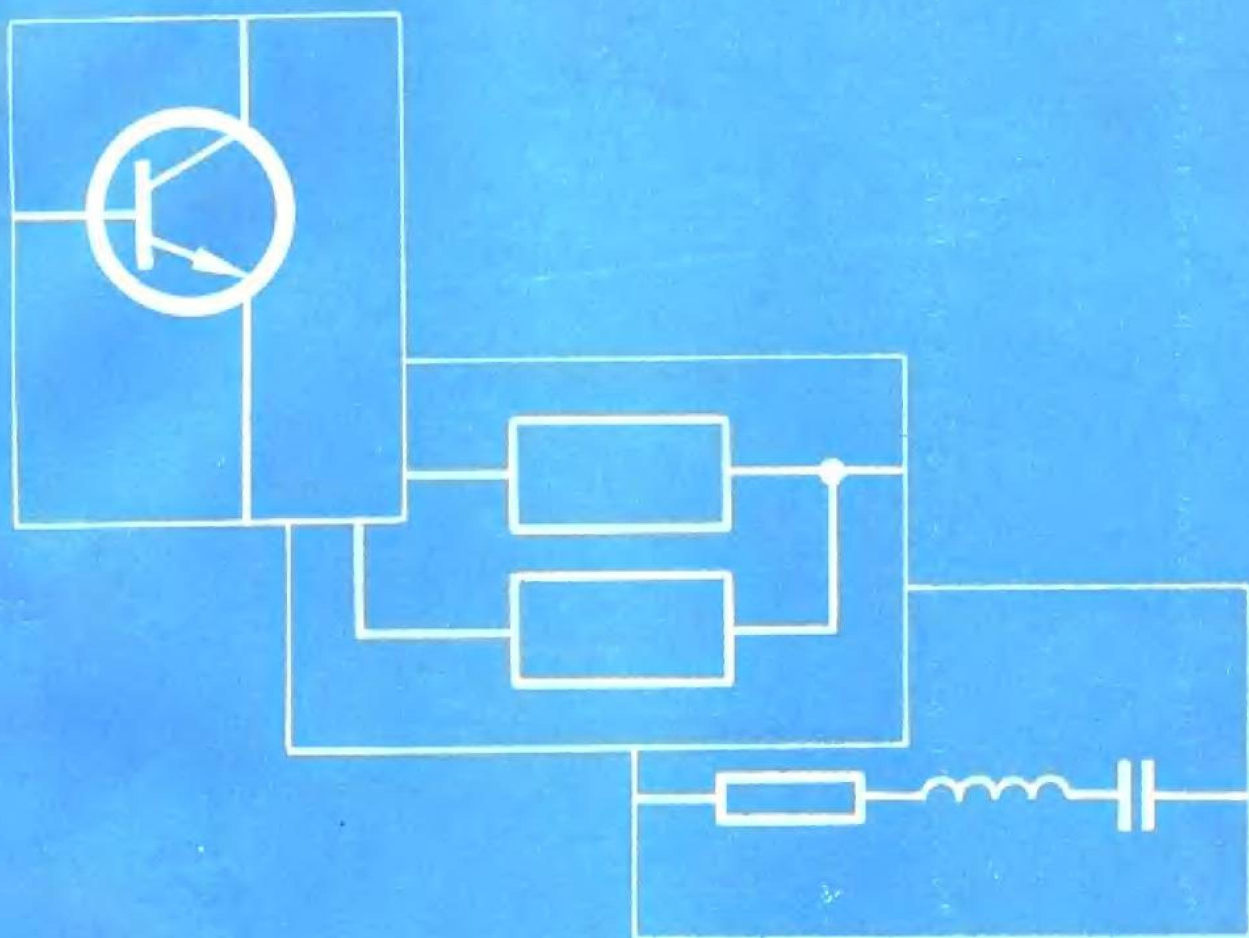




电工学导论

高等学校教学参考书 黄两一编 高等教育出版社

本书是高等学校工科电工教材编审委员会电工学教材编审小组拟定编写的电工学教学参考书之一。

本书按“立足电路,面向系统,加深理论”的课程体系,介绍电工学的基本原理,其中包括了双口网络、受控源、频谱、频率响应、复频域分析、反馈系统、模拟检测和控制系统等方面的内容,可使读者比较全面地对有关的现代工程科学概念和方法有概括的了解。

全书共分十七章,第一至第八章,均属电路理论基础;第九至第十七章,包括变压器和电机、模拟电子电路及系统以及数字电路等。

本书也可供有关科技人员参考。

本书责任编辑 胡淑华

高等学校教学参考书

电 工 学 导 论

黄 两 一 编

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

国防工业出版社印刷厂印装

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ 印张26.25 字数600 000

1987年3月第1版 1987年3月第1次印刷

印数0 001—4 750

书号15010·0864 定价4.50元



序 言

近一、二十年中,电气工程的技术和理论都有了新的突飞猛进,并正向各个非电领域乃至社会经济各方面渗透,对物质文明和精神文明的迅速发展起了巨大的促进作用。由此,人们愈益清楚地认识到,电气工程科学在现代社会中的价值,不仅在于它指导着一系列尖端和新颖的技术实践,而且还在于它形成了一整套具有普遍意义的现代工程科学方法。

在这样的形势下,“电工学”作为有关电气工程知识的一门技术基础课,并且几乎是工科非电类专业学生最早直接接触系统、信号、反馈和控制等现代工程概念的一门课程,它的基本内容不能再是只介绍一些技术性知识,而应转向着重在工程科学的高度上增加学生的理论储备,以改进他们的知识结构,提高他们适应现代技术发展的能力。

为了进行这方面的探索,编者从1980年起在姚海彬老师指导下试拟了“立足电路,面向系统,加深理论”的课程体系,编写了相应的试用讲义,并进行了多轮试讲。本书便是在试用讲义的基础上修改整理而成的。

与传统的《电工学》相比,本书加强了有关电路和系统的基本知识和基础理论。编者认为,这样才能使课程内容适应电气工程科学的现代水平,使学生在工作中涉及到电气自动化方面的技术问题时,能与有关专业人员有更多的共同语言,并且有助于电与非电学科的相互配合和促进。

由于半导体器件的发展,各行各业中都涌现出大量电子设备。于是,人们常常以电子化作为现代化的一种标志,并以此要求“电工学”。但是,电子技术愈发展,各种电子设备的整机线路便愈复杂而巧妙。实际上,对许多专业来说,要讲清专业常用的各种电子设备,在“电工学”这样的范围甚广而学时不多的课程中,是很难完成的。再则,集成器件的日益普及,使一般使用者不必要也不可能深入各个单元电路和电子部件的内部,而只需了解如何将它们组成具有某种功能的电子系统。所以,对于难得有条件钻研电子线路技巧的非电专业人员说来,可以并应该只是将这些线路纳入一般的电路和系统中加以考察。有鉴于此,本书对电子部分的取材和篇幅分配都作了调整。这样难免会影响学生对电子技术细节的了解,但是可以使他们对电子电路在生产和科研系统中的地位和功用有更清晰的印象,因而能达到较好的整体效果。

考虑到非电类与电类专业在学习要求上的区别,本书更多注意扩展论题的广度,而不追求各个论题的深度。同时,在论述问题的出发点和侧重点上,也力求适应非电类学生的情况,避免搬用电专业书籍中的程式。书中还包含有少量复习性和引伸性的内容,目的是为便于具有不同学习条件的学生参考阅读,也为教师根据专业特点选择内容提供方便。

从试用讲义使用的情况看,本书虽有较多的理论性内容,但是由于各部分有较强的内在联系,便于教师通过教学内容启发学生的思维活动,因而并不需要增加课程总学

时。一般说来，经过按专业特点适当取舍内容后，课堂讲授时数可在 100 学时左右，其中电路理论部分约占一半。

编者衷心感谢上海交通大学史淦森老师和上海大学马国琳老师。他们在百忙中严格细致地审阅了原稿，提出了许多极其宝贵的修改意见。

天津大学电工学教研室为本书的编写提供了各种帮助。特别是姚海彬老师，从开始构思课程体系方案，拟订教材编写提纲，直到逐章逐节的推敲，都作了详尽的指导。林圣灿老师也对本书的编写十分关心，并提供不少改进意见；张润生和林孔元老师曾使用过试用讲义，并根据他们的教学经验提出了有益的建议；赵婉瑜等同志协助抄写了部分书稿。编者谨向他们致以诚挚的谢忱。

电工学界的许多前辈和老师，曾对本书的编写给予关心和鼓励。编者特在此一并表示深切的谢意。

“电工学”课程涉及的范围非常广泛，以编者的浅陋菲薄，独力承担全书的编写工作，实是难以胜任。因而，书中论说疏漏，行文舛误之处在所难免。编者殷切期望得到广大读者，尤其是有兴趣使用本书的老师和同学们给予批评指正。

编 者

于天津大学

1986.6

绪 言

“电工学”是研究电磁现象及其规律在工程中的应用的一门科学。它的领域很广,包括电路学、电机学、工业电子学以及发电和输配电、电力拖动、电磁测量、电气自动检测和控制、电热、电气照明等等。

在当今的时代,无论是生产和科学研究,或是日常生活中,都越来越多地要用到电。这是因为电能有其独特的优越性,它最易于实现与其他形式能量的相互转换,并且极便于实现大功率、远距离的传输和分配。

电能源的经济性和灵活性,电动机的便于安装、使用和控制,使近代工业发展中首先遇到的动力问题得到相当圆满的解决。

随着社会的不断进步,人类活动的规模不断扩大,节律不断加快,因而需要在更大的深度和广度上及时了解生产情况乃至整个社会生活。这时,电又成为加强人类感受能力的有力手段。一方面是电气通信技术得到迅速发展。另一方面则是,愈益广泛地采用电测方法观察各种现象,以求更快速灵敏地获取信息。

在上述基础上,各种电气自动系统不断涌现。随后,高速度、大容量、微型化的电子数字计算机陆续问世。这些更使电成为强化人类思维能力的有力工具,普遍地得到日益重视。

在技术上不断更新的同时,“电工学”在理论上也有了长足发展。它已从单纯讨论电能的变换和传输规律,发展到形成以“电路-信号-系统-计算机”为主线的严密而完整的体系。它的研究方法和手段,尤其是在动态分析和信号处理方面,在现代科学技术中具有普遍的价值。它们正在渗透到各个技术科学领域中去,并为很多学科开辟出新的研究方向。

因此,非电专业的工程技术和科学研究人员学习“电工学”,也是很有意义的。

需要说明,电气通信技术和计算机技术,虽然也属于电磁现象的工程应用,但是它们都已形成宏大的独立学科。并且,使用电子计算机这样的设备,要求更多的是数学知识和逻辑思维能力。所以“电工学”课程中基本上不涉及这两方面的内容。

作为一本教学参考书,本书将着重讨论“电工学”的一些基本原理,并注意引介现代工程科学方法。学习和阅读本书,需有物理学和高等数学(包括线性代数和积分变换等方面)的基础。在学习过程中,注意不要停留在背诵若干结论,而应充分理解分析和解决问题的方法,力求在掌握新知识的同时,达到扩展眼界和开拓思路的目的。

目 录

绪言

第一章 电路分析的一般原理 1

- 1-1 工程中的电路 1
- 1-2 理想电路元件和电网络 3
- 1-3 电路分析的基本目的和方法 6
- 1-4 电路量的正方向 6
- 1-5 电阻元件 8
- 1-6 电压源和电流源 10
- 1-7 基尔霍夫定律 14
- 1-8 支路电流法 17
- 习题 20

第二章 线性电路的分析方法 24

- 2-1 线性电路的基本性质 24
- 2-2 叠加原理 25
- 2-3 等效变换和戴维南定理 28
- 2-4 网络函数 33
- 2-5 双口网络的端口特性 37
- 2-6 电阻网络的Y- Δ 变换 39
- 习题 42

第三章 非线性电阻电路的分析方法 45

- 3-1 非线性电阻和二极管 45
- 3-2 非线性电阻电路的特点 47
- 3-3 非线性电阻电路的图解法 48
- 3-4 动态电阻和微变电路模型 50
- 3-5 线性化电路模型 53
- 习题 56

第四章 受控源和有源网络 58

- 4-1 受控源及其参数 58
- 4-2 含受控源电路的分析 59
- 4-3 含受控源二端网络 63
- 4-4 有源双口网络 66
- 4-5 作为有源网络的放大器 68
- 习题 71

第五章 动态网络和时域分析方法 73

- 5-1 电容元件和电感元件 73
- 5-2 动态网络的基本特点 78

- 5-3 动态分析中的几种典型波形 80

- 5-4 电容的充电和放电 83

- 5-5 电感的通电和断电 87

- 5-6 动态网络的时域分析法 89

- 5-7 动态分析中的几个基本概念 91

- 5-8 RC网络的脉冲响应和指数响应 94

- 习题 98

第六章 正弦交流电路 101

- 6-1 周期信号 101

- 6-2 正弦交流量的三要素 102

- 6-3 正弦量的相位关系 104

- 6-4 正弦量的有效值 106

- 6-5 正弦量的相量表示 107

- 6-6 元件约束和平衡约束的相量形式 110

- 6-7 复数阻抗和导纳 115

- 6-8 相量法求解正弦交流电路 121

- 6-9 交流电路中的功率 129

- 6-10 对称三相交流电路 132

- 习题 137

第七章 频谱和频率响应 141

- 7-1 非正弦周期波形和谐波分解 141

- 7-2 非正弦波形的频谱 144

- 7-3 谐波分析法 148

- 7-4 频率响应的意义 152

- 7-5 一阶RC电路的频率响应 153

- 7-6 二阶RC电路的频率响应 155

- 7-7 LC谐振电路 162

- 7-8 对数频率特性 166

- 7-9 滤波器 170

- 习题 172

第八章 拉普拉斯变换和传递函数 175

- 8-1 拉普拉斯变换 175

- 8-2 电路约束的算子形式 179

- 8-3 动态分析的算子法 181

- 8-4 二阶网络的阶跃响应 183

- 8-5 传递函数 188

习题	193	第十四章 模拟电子检测系统	314
第九章 铁心线圈和变压器	195	14-1 模拟信号和模拟系统	314
9-1 铁心磁路	195	14-2 模拟电子检测系统的组成	316
9-2 磁路分析概述	197	14-3 模拟检测系统中的调制和解调	319
9-3 铁心线圈电路	200	14-4 模拟检测系统举例	323
9-4 变压器	204	习题	328
习题	208	第十五章 电子自动控制系统	329
第十章 电机和电器	210	15-1 自动控制系统的基本组成	329
10-1 电机的基本原理和特性	210	15-2 作为执行环节的晶闸管电路	330
10-2 三相异步电动机	213	15-3 自动控制系统举例	337
10-3 三相同步电动机	220	15-4 反馈系统的框图分析法	340
10-4 直流电动机	221	15-5 定值控制系统的品质指标	345
10-5 单相交流电动机	223	15-6 定值控制系统的静态误差	346
10-6 控制电机	227	15-7 自动控制系统的稳定问题	350
10-7 常用开关电器	230	习题	353
10-8 异步电动机的起停控制	234	第十六章 开关电路和门电路	355
习题	238	16-1 开关量和逻辑运算	355
第十一章 晶体管及基本放大电路	240	16-2 二极管门和矩阵电路	358
11-1 双极结型晶体管	240	16-3 晶体管门电路及其组合	361
11-2 晶体管的工作特性	243	16-4 门电路的反馈联接和触发器	366
11-3 晶体管的线性化电路模型	245	习题	370
11-4 晶体管基本放大电路	249	第十七章 数字电路	372
11-5 场效应晶体管及其基本放大电路	258	17-1 数码信号的意义	372
习题	264	17-2 脉冲控制触发器	374
第十二章 反馈电子电路	267	17-3 计数器	378
12-1 电子电路中的反馈	267	17-4 寄存器	382
12-2 负反馈对电路性能的影响	269	17-5 译码器和数字显示器件	384
12-3 负反馈用于稳定静态工作点	273	17-6 数字系统举例	386
12-4 负反馈电压放大电路	276	17-7 数模(D/A)转换	388
12-5 射极跟随器	281	17-8 模数(A/D)转换	390
12-6 正反馈放大和自激振荡	284	习题	393
12-7 负反馈放大器的稳定问题	288	附录一 单位的前缀	395
习题	292	附录二 几种非正弦周期波形的 谐波分解	396
第十三章 运算放大器	295	附录三 控制电路图中的图形 和文字符号	397
13-1 直流信号和直接耦合放大器	295	附录四 关于半导体器件主要参 数的说明	399
13-2 差动放大电路	297	索引(汉英术语对照)	404
13-3 集成运算放大器概述	302	参考书目	409
13-4 线性运算电路	305		
13-5 运算放大器在非线性电路 中的应用	308		
习题	311		

第一章 电路分析的一般原理

电路及其计算，是本课程的基本内容。虽然在物理学中也曾有所讨论，但在工程应用中仅仅了解那样一些内容是远远不够的。因此在本课程中还将更广泛深入地进行研究。

本章介绍在电路问题中普遍和经常要用到的基本概念、定律和方法。既是从作为基础科学的物理学向作为工程科学的电路学的过渡，也是以后各章的共同基础。

1-1 工程中的电路

简单说来，电流的流通过径就是电路。

图 1-1 是手电筒的电气结构示意图。当开关接通时，在电池内部化学反应产生的电动势作用下，将有电流沿“电池—电珠—开关—联接导体”的闭合回路流通。这就是一个很简单的电路。

现在，我们进而从工程应用的角度来考察电路的功能。

一、电路的能量传输作用

电流是电荷在电场作用下形成的定向运动。电荷在电场中的运动，伴随着一定的能量过程。因此，电流同能量的转换和传送有着内在的联系。这正是工程上应用电路的基本出发点。

电路工作时，随着电流的流通，电路中的某些部分将其他形式的能量转换为电能。实现这种能量转换，即提供电能，或者习惯上也说成是“产生”电能的设备，称为电源。图 1-1 中的电池就是一种常见的电源。

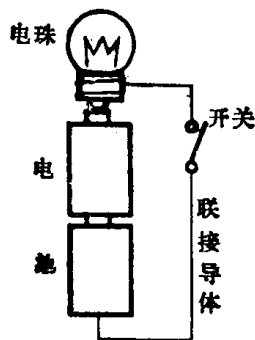


图 1-1 简单的电路

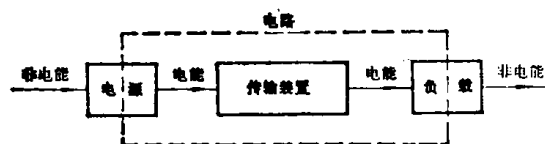


图 1-2 电路中的能量传输

电路中的某些部分，将电能转换为其他形式的能量。这种接受电能、吸收电能，或者说“消耗”电能的设备，称为负载。图 1-1 中的电珠，以及电炉和电动机等，都是大家熟悉的负载。

电源与负载间，还需要有其他一些装置，用以构成电流的通路，或者进一步还要实

现电能传送过程中的调整和分配工作，它们统称为**传输装置**。在比较简单的情况下，也就是通常所说的**传输线**。例如，图 1-1 中的开关和联接导体，就属于传输装置。

由电源先将某种非电能转换成电能，经传输装置将电能供应给负载，再通过负载转换成某种非电形式的能量，以满足我们对这种能量的需要，这就是电路中进行的能量传输过程。图 1-2 概略地表示了电路的能量传输作用。

二、力能电路

许多电路中，上述的能量传输过程是电路工作的基本内容。这样的电路称为**力能电路**。工厂中为生产设备提供电能的动力电路，教室和宿舍中为照明设备提供电能的照明电路，都属于力能电路。

力能电路常有很大的功率。大型发电厂生产的电功率可达几百万千瓦，大型用户消耗的电功率可达几十万千瓦。因此，力能电路是“强电”电路。

在力能电路中，主要考虑怎样便于电能的大规模生产和使用。因此要求各个电源提供统一的电能形式，并有统一的若干等级的电压数值，以便相互配合。目前应用最广泛的是正弦交流电，其次是直流电。

由于总功率很大，降低损耗和提高效率在力能电路的研究中是很突出的问题。

三、电信号和信号电路

另外还有一些电路也在进行着前述的能量传输过程，但传送能量并不是它的最终目的。如供晚间照明用的路灯和指挥交通的红绿灯，它们的电路在能量传输方面的作用是相同的，只是在数量上可能有所差别。然而大家都清楚，对于交通用灯，电不仅仅作为能源，它更重要的作用是传达交通指挥者的命令，这与电在路灯电路中的作用性质上是不一样的。

另一个例子是热电偶测温电路。如图 1-3 所示，待测温度作用于热电偶的热端，产生温差电动势，再通过输送导线将相应的电压传输到另一端，引起显示仪表的动作，以供肉眼观察读数，这同样也形成一个完整的电路。从传输能量的角度看，其中的过程仍是由电源（热电偶）产生电能，并经过传输线送到负载（显示仪表）。然而，这里的能量传输过程服务于传送温度信息，电能只是起到了传递信息的作用。

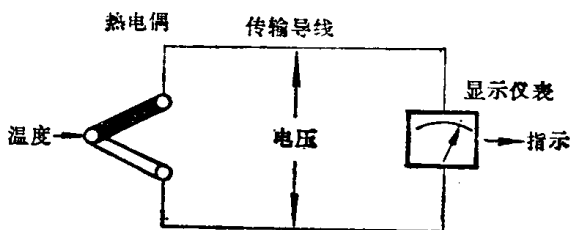


图 1-3 热电偶测温电路

象红绿灯电路和热电偶测量电路中那样传递信息的电动势、电压和电流，统称为**电信号**，而用于传递信息的电路就称为**信号电路**。信号电路中作为电信号来源的部件或设备，例如图 1-3 中的热电偶，称为**信号源**。

与力能电路中的电源不同，信号源输出的电压或电流，取决于所传递的信息。由于信息内容及其处理方式可以有多种多样，所以电信号不仅在数量上会有显著的差异，而且随时间变化的规律也千变万化。

多数情况下传递信息并不需要很多功率。例如，测量电路中的信号功率常以微瓦计量。因此，信号电路是“弱电”电路。对于这种电路主要应考虑怎样保证信号传输的质

量, 以及使负载得到尽可能强的信号。为了提高传输效果, 在传送过程中常常还要对信号进行放大和转换等加工处理, 因而信号电路的传输部分相当复杂。

信号在现代科学技术中占有极其重要的地位。信号变化规律的多样性, 以及信号加工的必要性, 又决定了讨论信号电路要涉及更广泛的内容。因此, 我们将用较多的篇幅讨论信号电路, 并且常常把信号与电压和电流看作是同义词。

四、电路问题的基本内容

虽然电路是由电源、负载和传输装置三个部分组成, 但是电源和负载实现电能与非电能转换的原理, 将作为专门课题另行讨论。在电路问题中, 则是以电能和电信号在电路中的传送和分配规律作为研究的基本内容。

讨论一个电路时, 要涉及许多量。考虑到电压与电流间的关系比较简单, 并且也能通过它们直接反映能量传输和转换过程的进行情况, 因此本书中将以电压和电流作为讨论电路问题时的基本变量。

需要指出, 这里的变量是从数学意义上说的, 也就是指函数表达式中的自变量和因变量而言。至于物理上随时间变化的量称为时变量。直流电流, 它的数值不随时间变化, 在物理上属于恒定量, 而在数学运算中它仍是一个变量。

按照数学规则, 变量都用字母表示。为了进一步表示出所涉及的变量在物理上是恒定的还是时变的, 我们规定: 时变量都用小写字母表示, 如 u 和 i , 大写字母则用于表示恒定量, 如 U 和 I 。

1-2 理想电路元件和电网络

实用电路是由若干实际的元件、器件和设备相互联接而成的。为了在理论上讨论电路问题, 需要先对这些元件、器件和设备中的物理过程进行考察, 概括出几个能表征它们的电路特性的要素, 并且还需要了解电路的结构, 即电路各部分之间互联的基本方式。

一、电路中能量转换过程的基本类型

从能量转换的角度看, 电路中出现电压或电流时, 会有以下几种物理过程。

1. 电流在构成电路的导体中流通时, 由于电流的热效应, 会有一些电能转换成热能。这种转换是不可逆的, 或者说是纯消耗性的。表征这一过程的是电阻 R , 它常常也用作耗能过程的一般代表。

2. 电路中存在电压时, 周围要出现电场。因此在对电路施加电压的同时, 要有一些电能转换成电场能。这种转换具有可逆性, 即在电压减小时, 电场能还会重新转换成电能。表征这一过程的是电容 C 。

3. 电路中有电流流通时, 载流导体周围会出现磁场。因此在建立电流的过程中, 要有一些电能转换成磁场能。这种转换也具有可逆性, 并且, 磁场中的能量不仅可以在原电路中转换成电能, 而且还可以向邻近电路进行转换。表征这些过程的是自感 L 和互感 M 。

4. 电路中可能有某些部分会受到促使电荷分离的外界因素的作用, 这些作用归结为建立一定的电压, 并可用电动势 E 来表征, 例如, 电池中电化学反应形成的电极电动势, 发电机中运动导体切割磁力线产生的动生电动势等。有电流流通时, 含电动势的这部分

电路中将有非电形式的能量与电能的相互转换，或者由外界做功产生电能，或者因需要克服外界的作用而消耗电能。

二、理想电路元件和电路模型

实际的电气元件、器件和设备中，常包含着多种能量转换过程。例如，一个用导线绕制成的电感线圈，除了有建立磁场的电感效应外，还存在导线本身的电阻效应，以及相邻导线间的电容效应。此外，实际的电气元件、器件和设备还有外形和尺寸等许多差别。因此，直接以它们为对象讨论电路问题，将是比较复杂和困难的。

为此，有必要象力学中引入理想化的质点那样，引入能够集中地反映电路中某一个过程的理想化的电气元件，即所谓**理想电路元件**。

例如，各种电阻器，电阻炉和白炽灯，都是以消耗电能为主的电气设备。与电能转换成热能所消耗的电功率相比，其他过程的功率都可以忽略不计。于是，我们可以用一个理想化的电阻元件作为它们的共同代表。也就是说，不论是庞大的加热炉还是精巧的小电珠，都与简单的电阻器同等看待。

另一方面，联接电源和负载的输电线，实际上是处处都有电阻的。但在一般的工程计算中，可认为整个输电线的电阻集中在输电线上的某一处，而其余部分都是没有电阻的理想导线。这是从实际设备抽象成理想化元件的又一个例子。

再如，发电机中切割磁力线的运动导体，实际上也是处处都受到动生电动势的作用，并且还含有一定的电阻。而在理想化的条件下，我们可以用集中的没有电阻效应的电动势 E 代表发电机中的外力作用。如果有必要，则再用一个理想电阻元件 R_s 代表发电机内部的电阻效应。这里的电阻 R_s ，称为**内阻**。



图1-4 用抽象电路表示实际电路

这样，图 1-4(a) 的实际电路便可用图 1-4(b) 所示的由理想元件组成的抽象电路作为代表。图中，电阻 R_l 和 R_L 分别代表输电线和电热器。

不难看出，图 1-1 的手电筒电路，同样可以表示成图 1-4(b)。这正是体现了理想电路元件和抽象电路的一般性。

理想电路元件分为两大类。一类反映外力对电路所起的作用，称为**有源元件**，例如图 1-4(b) 中的 E 。另一类则反映没有外力参与的过程，称为**无源元件**，包括电阻、电容和电感等。它们的意义和特性在物理学中已有说明，在以后有关章节中还将作进一步讨论。

代表实际电气元件、器件和设备所用的理想电路元件或元件的组合，称为**电路模型**。电路模型的建立，或者基于对内部物理现象的剖析，或者基于对外部电路特性的模仿，或者两者兼而有之。在图 1-4(b) 中， R_l 和 R_L 分别是输电线和电热器的模型， E

和 R_s 合在一起则是发电机的模型。

三、电网络 and 电路系统

在理想电路元件构成的电路中，各元件是按照支路和节点的结构形式实现互联的。所谓支路是指由若干元件联成的一段不分支电路，节点则是有三个或三个以上支路汇聚的点。例如在图 1-5 电路中， A 点， B 点和 C 点都是节点，电动势 E_2 以及电阻 R_2 和 R_3 都是只有一个元件的支路， E_1 和 R_1 以及 R_4 和 R_5 则分别构成有两个元件的支路。

同一支路中各元件的联接关系，称为串联。例如图 1-5 中的 E_1 与 R_1 以及 R_4 与 R_5 都是串联关系。同一对节点间的各元件或支路间的联接关系，称为并联。例如， R_2 与 R_3 是元件的并联，左侧与右侧这两个支路之间也是并联关系。

现代工程科学中，按支路和节点实现互联的结构形式称为网络。所以我们讨论的电路也称为电网络。并且在电工领域内，电路与网络常看作同义词。

一个网络可有若干条引到外部的接线，以便与其他网络互联。这种引出线称为网络的端钮。如果有两个端钮，由其中一个端钮流出的电流必定等于另一端钮流入的电流，则这样的成对端钮合称为网络的一个端口。端钮和端口常简称为端和口。例如在图 1-6 的三个网络中， N_A 既是二端网络也是单口网络， N_B 既是四端网络也是双口网络， N_C 则只是三端网络，它没有端口。

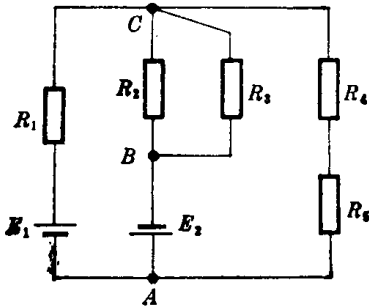


图1-5 节点和支路

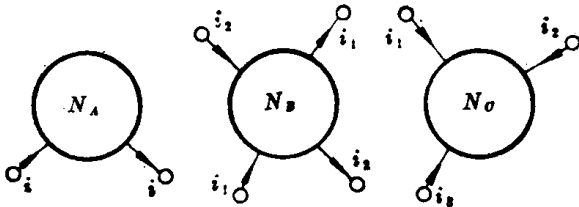


图1-6 网络的端钮

有时也按照系统学的观点，将用以实现预定功能的电路称为电路系统。这时，网络也可以看成是系统的组成部分，或者说系统是由若干网络互联而成。例如，对照图 1-2，可知图 1-4(b) 所示是一个基本的电路系统，它是由 E ， R_s ， R_l 和 R_L 四个元件所组成，同时也可以划分为一个含电动势的二端网络 N_A (电源部分)，一个无源元件组成的二端网络 N_B (负载部分)，以及一个双口网络 N_C (输电线部分)，如图 1-7 所示。

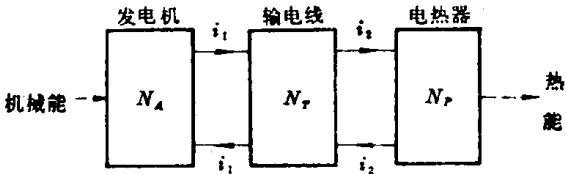


图1-7 由网络组成系统

网络一词着重于表明电路所具有的结构形式，系统一词则着重于表明电路应具有某种实用的功能，在这样的意义上两者是相容的。不过，电网络中只考虑电能的传输过程，而电路系统的功能则会涉及到非电形式的能量，所以系统的含义比网络更为广泛。基于这一点，我们常常将元件→支路→网络→系统之间的关系，理解为电路结构上的层次。

1-3 电路分析的基本目的和方法

一般地说, 系统受到的外来作用, 称为**激励**。在某个激励作用下系统发生的变化称为对该激励的**响应**。结合系统的功能, 激励也常常称为**输入**, 而系统的一部分响应则又可称为对应某个输入所引起的**输出**。

已知系统的组成, 包括其内部结构和参数, 要确定其对某种激励的响应, 这样的问题称为**分析**。为了得到预期的激励与响应的关系, 要确定系统的组成, 这样的问题称为**综合**。

分析问题的解答是唯一的, 而综合问题常有多种可能的答案, 必须参照其他条件, 例如经济条件等, 才能确定一个相对合适的结果。显然, 分析比综合简单得多, 同时分析又是讨论综合的基础。

以上这些, 同样也适用于电路问题。

由于研究电路时重点在于掌握电能和电信号的传送和分配规律, 所以电路问题中的激励和响应, 或者说输入和输出, 通常都是指电压和电流。向网络施加激励的基本方法, 是在网络端口上外接一个有源元件。这种用作激励的有源元件称为**激励源**。在激励源的作用下, 网络中各电压和电流的变化, 即为对激励的响应, 而网络各端口上的响应可视为输出。

需要注意, 当从系统中划分出某个网络时, 其中可能已包含有源元件, 例如图 1-7 中的网络 N_k 。这种包含有源元件的网络称为**有源网络**。如果网络中不包含有源元件, 则称为**无源网络**。有源网络的一个特点是, 即使未受激励, 在其内部有源元件的作用下, 该网络中也会出现电压和电流。但是, 这些电压和电流并不属于对某个激励的响应, 而只有外施激励在有源网络中引起的各电压和电流的变化才是我们所要讨论的响应。因此, 在涉及含多个有源元件的电路时, 必须区分哪一些有源元件是作用于网络的激励源, 哪一些是属于网络本身的组成部分。

根据本课程的基本性质, 我们主要讨论电路分析的问题。

电路分析的基本方法是, 先分别确定各理想元件上电压与电流的关系, 以及不同元件的电压、电流间的相互关系。再将这些关系联立起来构成一个方程组, 然后进行求解, 便得到所需的激励与响应的关系。

这里, 元件上电压与电流的关系, 由元件本身的特性所决定, 称为**元件约束**。不同元件的电压、电流间的关系, 由互联的规律性所决定, 称为**平衡约束**。两种约束联立构成的方程组, 称为电路的**数学模型**。

下面我们将从电阻网络入手, 说明从确定元件约束和平衡约束, 到建立数学模型的整个过程。

1-4 电路量的正方向

在着手建立数学模型前, 还有一些值得重视的问题需要说明。

一、电流、电压和电动势的“方向”

电流、电压和电动势都是标量, 但在讨论电路问题时, 常常要提到它们的“方向”。

这是有特定含义的。

电流的方向设定为正电荷从物体的一端移到另一端的流向。

电压的方向设定为从高电位点（例如电池的正极），指向低电位点（例如电池的负极），即电位降的指向。

电动势的方向设定为从电源的低电位点（负极）指向高电位点（正极），即电位升的指向。

二、电流、电压和电动势的正方向

作为标量，电流、电压和电动势的数值都有正负之分。很明显，变量的数值取不同的符号，对应于有不同的实际方向。但是，如果仅有数值的符号，并不能确定变量的实际方向。例如在图 1-8 中，只说 U 是 $+1\text{V}$ 或 -1V ，还确定不了电阻 R 的哪一端是高电位点。要使变量取值的正负号具有确定的物理意义，必须事先设定变量取正值时的实际方向。这个设定的方向，称为正方向或参考方向。正方向可用变量的双下标表示，也可以用箭头标绘在电路图上，如图 1-8 中所示。

在采用双下标时，对图 1-8(a)， U_{ab} 可以取正或负号，前者表示 a 点电位高于 b 点电位，而后者表示 a 点电位实际低于 b 点电位。用箭头标绘正方向时，对图 1-8(b)， U 可以取正或负号，前者表示上端电位高于下端电位，而后者表示上端电位实际低于下端电位。

显然，离开正方向，变量取值的正负号就失去确定的意义。因此在 进行 电路分析时，必须养成习惯，首先要为涉及到的各个电流、电压和电动势都设定正方向。

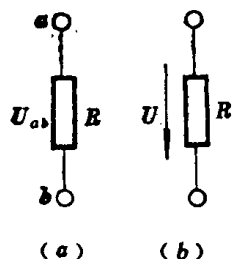


图 1-8 电压的正方向

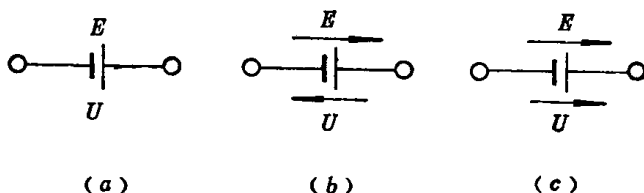


图 1-9 关联正方向示例

设定正方向还有另外一方面的意义。在对电路进行分析前，各变量的实际方向通常无法事先确定。尤其是在正弦交流电路以及其他时变量激励下的电路中，变量的实际方向是随时间变化的。然而在列写一个方程式时，又必须依据变量的方向才能确定各变量项前的正负号。在这种情况下，我们可以用正方向作为设定的变量方向，并按此列写方程式。进行这种设定时，不必顾虑是否与实际情况一致。因为如果实际方向与设定方向不符，则方程式求解的最终结果将得到一个负数。

例如，讨论电源的电动势与端电压的关系时，如果不设定正方向，如图 1-9(a) 所示，则将无从确定应该是 $E=U$ 还是 $E=-U$ 。当按图 1-9(b) 设定正方向后便可写出 $E=U$ ，这与我们在物理学中已经熟悉的端电压等于电动势的结论是一致的。如果改成图 1-9(c)，则将有 $E=-U$ 。这虽然与已有的结论在形式上有所不同，但并不是错误。因为若 $E=1.5\text{V}$ ，则按该图可得 $U=-1.5\text{V}$ ，而两者都对应于电池正极的电位高于负极 1.5V 。

由以上讨论还可以看到，设定的正方向不同，列写出的方程式在形式上也会有所差别。因此，为了使我们列写的方程式与通用的结论或公式一致，必须关联地设定各变量的正方向。这就是所谓关联正方向。

以后在讨论各个方程式时，将逐个说明相对应的关联正方向。读者在记住一些基本公式的同时，也必须记住关联正方向的要求，不能不加考虑地套用那些式子。

三、电功率的正负号

电功率是电压与电流的乘积，通用的计算公式为

$$p = ui \quad (1-1)$$

显然，功率的数值也有正负之分，对此我们作如下规定。

电路中视为电源的元件或网络如 N_A ，应按图 1-10 (a) 关联地设定电压和电流的正方向。这时，若求得某一瞬间的功率为正数，说明该瞬时 u 与 i 同号。按图示关联正方向，它对应于电流由低电位点流向高电位点，因而这部分电路确实起到电源的作用，即向外输出电能。若功率为负值，则说明该瞬时 u 与 i 异号，这部分电路实际是吸收电能，即起到负载的作用。

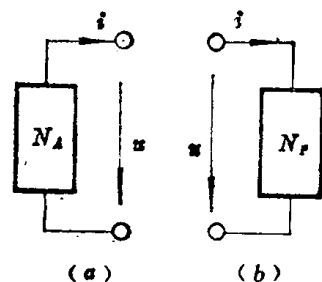


图1-10 电功率计算中的关联正方向

电路中不作为电源看待的元件或网络如 N_F ，则应按图 1-10 (b) 设定关联正方向。在这种条件下，若求得的功率为正值，则该瞬间 u 与 i 同号。而对于图 1-10 (b) 这时电流应由高电位点流向低电位点，即这部分电路是在吸收电能。反之，则该瞬间 u 与 i 异号，这部分电路实际上是起到电源的作用。

应该说明，电路中的某一部分被看作或不被看作电源是随意的。只要符合图 1-10 要求的关联正方向，不论这部分电路的内容如何，总能得到正确的结论。

1-5 电阻元件

电阻元件是无源元件中的一种。从内部作用看，它反映的是电路中电能不可逆地转换成热能的过程。

讨论电阻元件的外部特性时，约定按图 1-11 关联正方向设定电阻上的电压 u 和电流 i 的正方向。

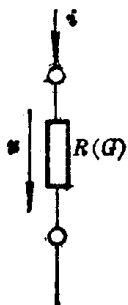


图1-11 电阻元件

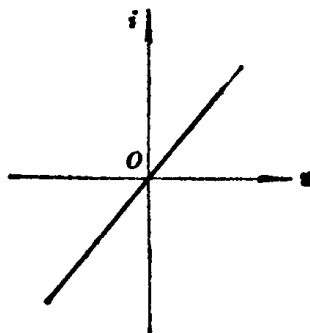


图1-12 线性电阻的伏安特性

电阻是单纯耗能元件，因而它的电路特性具有以下几个特点。(1) 流过电阻元件的电流与电阻上的电压，它们的实际方向始终保持一致，或者说 i 与 u 总是同号。(2) 当 $i = 0$ 时必有 $u = 0$ 。(3) 在任何瞬间，只要知道了当时的 i ，就可以确定对应的 u ，而不必顾及该瞬间前的情况；反之亦然。这称为电阻元件的**即时性**。

因此，用 $u-i$ 坐标平面上通过原点的一条曲线，便可以完全表示出电阻元件的特性，它称为**伏安特性**。

各种电阻元件的伏安特性曲线的形状可能有所不同，如图1-12所示的伏安特性是一条直线，具有这类特性的电阻元件，称为**线性电阻**。伏安特性呈弯曲形状的电阻元件，称为**非线性电阻**。

实际很难找到伏安特性严格保持直线的电阻器，因此线性特性是一种理想特性。只有用电阻温度系数极小的康铜丝制作的精密电阻，在小电流下工作时，才能有很接近理想的线性特性。不过，在工程应用中，常允许忽略比较微弱的非线性。以后我们还将说明，在一定条件下，非线性电阻电路的分析也可以转化为线性问题来分析。因此，我们主要是讨论线性电阻电路。并且，以后如不加说明，所有电阻都视为线性的。

在电路分析中，电阻还定义为伏安特性上某一点的两个坐标之比。即

$$R \triangleq \frac{u}{i} \quad (1-2)$$

式中，符号 $\triangleq$ 意为按定义等于。电阻的倒数即为电导，故同时有

$$G \triangleq \frac{i}{u} \quad (1-3)$$

线性条件下，伏安特性上对应各点的两坐标之比处处相等，因此线性电阻的电阻值不随 i 和 u 变化，是一个常数。线性电阻的伏安特性，或者说它的元件约束，则可简单地写成

$$u = Ri \quad \text{或} \quad i = Gu \quad (1-4)$$

这就是欧姆定律。

如果是非线性电阻，它的电阻值和电导值将随 i 和 u 变化，而元件约束应写成

$$u = R(i)i \quad \text{或} \quad i = G(u)u \quad (1-5)$$

电阻值为无穷大的电阻元件，或者说电路中理想地断开的地方，不论所加电压如何，电流恒等于零，如图1-13(a)所示。这种特殊的元件称为**开路元件**，它的元件约束可写成

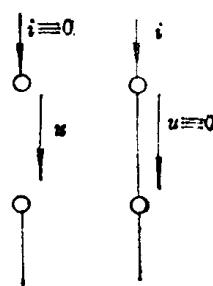
$$i \equiv 0 \quad (u \text{ 任意}) \quad (1-6)$$

电阻值为零的电阻元件，也就是电路中的一段理想导线，不论通过的电流如何，两端电压恒等于零，如图1-13(b)所示。这种元件称为**短路元件**，它的元件约束为

$$u \equiv 0 \quad (i \text{ 任意}) \quad (1-7)$$

电阻和欧姆定律，都是大家在物理学中早已熟悉的。在以上讨论中，我们又引入了许多新的概念和提法。这正反映了技术科学与基础科学的区别。在学习本课程之初，应充分注意到它们在讨论问题时的出发点和侧重点上的这些区别。

注： $\triangleq$ 代表按定义等于。



(a) (b)
图1-13 开路元件和
短路元件

1-6 电压源和电流源

物理学中用以反映电路所受外力作用的物理量是电动势，而在分析电路时，我们将引入两种理想元件，作为外力作用的代表。

一、电压源和电压源组合

按其物理意义，电动势的作用是要建立一个与其数值相等的电压。由此，电路中与电动势直接对应的理想元件称为**电压源**。其含义是，不论电路的工作情况如何，它总能保持一个由外力作用所决定的电压。电压源的作用，可以用它的内部电动势表示，也可以用它所建立的端电压表示。

电压源的电路图符号如图 1-14 所示，其中 (a) 只限于直流电压源。

图 1-14 同时标明了电压源的关联正方向要求。按该图，电压源的元件约束可写成

$$u \equiv e \text{ [外力给定]} \quad (i \text{ 任意}) \quad (1-8)$$

电动势为零的电压源称为零电压源。对照式 (1-8) 和式 (1-7) 可知，零电压源相当于短路元件。

图 1-15 所示为电压源与电阻的串联组合，称为**电压源组合**或**含源支路**，它是电路中常见的支路形式之一。不难看出，电压源组合可以认为是电源设备的一种电路模型，其中的电压源 E 对应于电源电动势，串联电阻 R_s 对应于电源内阻。

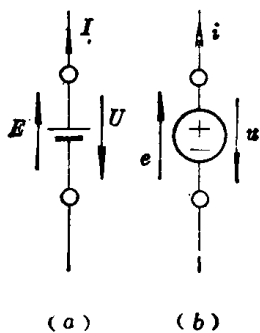


图1-14 电压源

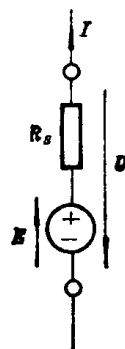


图1-15 含源支路

一般地说，支路两端的电压 U 与支路中的电流 I 间的关系，称为**支路约束**。含源支路的支路约束，按照讨论电源设备时所用的术语，也称为**外特性**。

根据物理学中一段含源电路的欧姆定律，按图 1-15 所示的关联正方向，电压源组合的外特性应为

$$U = E - R_s I \quad (1-9)$$

它是一条不通过原点的直线，如图 1-16(a)。外特性与纵轴的交点对应于电流等于零，即外接开路元件时的情况。这时的电压称为**开路电压** U_o ，而按式 (1-9) 应有

$$U_o = E \quad (1-10)$$

外特性在横轴上的截距则称为**短路电流** I_s ，且有

$$I_s = \frac{E}{R_s} \quad (1-11)$$