

电 工 基 础

(上 册)

清华大学电力系

1976. 7.

目 录

緒论	1
第一章 直流电路的基本知识	8
第一节 电路的基本知识	8
第二节 欧姆定律及其应用	14
第三节 电流的功率和电能	19
第四节 含有反电动势负载的电路	23
第五节 导体的电阻与电阻元件	28
第二章 直流电路的分析与计算	42
第一节 电阻的串联	42
第二节 电阻的并联	51
第三节 电阻的复联	57
第四节 电路中电位的计算	63
第五节 基尔霍夫定律	66
第六节 复杂电路的计算	71
第七节 迭加原理	79
第三章 交流电的基本概念	91
第一节 什么是交流电	91
第二节 交流电的产生	93
第三节 交流电的周期和频率	100
第四节 相位与相位差	105
第五节 交流电的有效值	113
第六节 只含有电阻的交流电路	116

第七节 正弦波的矢量表示法	121
第四章 电感及电阻-电感串联电路	131
第一节 电磁感应定律	132
第二节 电感及电感中电压与电流的关系	136
第三节 正弦交流电路中的电感	146
第四节 电阻-电感串联电路	157
第五章 电容及电阻-电容串联电路	172
第一节 电容	172
第二节 电容电路中的电流	180
第三节 正弦交流电路中的电容	186
第四节 电阻-电容串联电路	193
第六章 复数符号法。功率	212
第一节 复数法的应用	212
第二节 电阻-电感-电容电路。复数阻抗	222
第三节 并联电路。复数导纳	230
第四节 交流电路的功率及其量测	241
第七章 复杂交流电路的计算	256
第一节 复联电路的分析和计算	256
第二节 用支路电流法计算复杂交流电路	263
第三节 交流电路的参数	266
第四节 功率因数的提高	270
第五节 无功功率	276
第八章 多频率电源电路及非正弦交流电路	291
第一节 不同频率电源同时作用于一个电路的问题	291
第二节 串联谐振电路	292
第三节 选择性问题的进一步讨论	298
第四节 并联谐振电路概念	301

第五节	非正弦周期性电压、电流的谐波分析	303
第六节	非正弦电源作用于线性电路的分析方法	309
第七节	非正弦电压、电流的有效值。平均功率	317
第八节	非线性电路里容易出现非正弦电压或电流	322
第九章	三相交流电路	329
第一节	对称三相电压	329
第二节	三相电源的联接方式	331
第三节	星形联接的对称三相负载	336
第四节	三角形联接的对称三相负载	342
第五节	对称三相电路的功率	349
第六节	功率(續)	351
第七节	三相功率的量测	353
第八节	不对称三相电路	357
第九节	中点位移	363
第十节	两线一地制及一线一地制的输电线路	366
附录	复数及其四则运算	374
第一节	什么是复数	374
第二节	复数的两种表示式	376
第三节	复数两种表示式的互相转换	381
第四节	复数的四则运算	386
第五节	复数的算尺算法	390

緒 论

毛主席语录

“中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。”

“人民，只有人民，才是创造世界历史的动力。”

在学习本课程之前，为了帮助大家更好地了解电能在生产中的应用，明确学习本课程的目的，在这里向大家简单介绍以下三个问题：

1. 电能的应用和生产；
2. 我国发展中的电力工业和电子工业；
3. 关于本课程的说明。

第一节 电能的应用和生产

“电”我们都很熟悉，它在日常生活和工农业生产中应用非常广泛。电的主要用途有以下一些方面：

(1) 电气照明 这是最常见的应用，如白炽灯和日光灯，把电能变成光能。

(2) 电热设备 实验室中常用的电烙铁就是一个最简单的电热设备，它是应用电流通过电阻发热而制成的。这种电能变成热能的现象叫电流的热效应。工业中常用的电阻炉，炼钢用的大型电弧炉，电子工业中用的高温扩散炉等也都是应用这种电流热效应而制

成的电热设备。电焊也是利用电流的发热来焊接金属。

(3) 电动机 电动机通电时，它就转动起来，这表明电流在电动机内部产生了作用力，电流的这种作用称之为电流的力效应。在工农业中都广泛应用电动机来带动各种机械。例如工厂中的各种机床、地下铁道、电车以及农村中灌溉用水泵和许多农业机械等，都是用电动机来带动的。电动机把电能变成机械能，是一种主要的动力机械。

(4) 电在自动化中的应用

实现工农业生产过程的自动化，可以提高劳动生产率和产品质量，把人类从繁重的劳动中解放出来。在自动化技术中，电具有重要的地位。

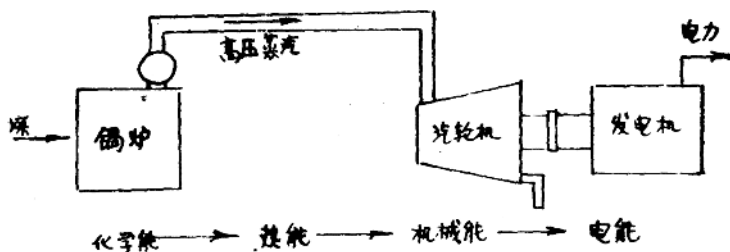
工厂中广泛应用着按钮、接触器来实现电气自动控制，可以方便地操作机器。伴随着电子技术的发展，生产过程自动化更向着高级的程度发展，例如可控硅控制系统、电子计算机、程序控制等等的出现，都使复杂的生产过程得以实现自动化。

还可以举出电的许多用途，例如无线电技术（无线电通信、广播、电视、雷达等），电化学的应用（如电解、电镀）等等。

在上述各种电的应用中，通常可分为两类电路：一类是电力电路，应用的目的在于传送电能，及将电能变成其它能量（如热能、光能、机械能、化学能等等）。另一类是电子电路，其中也有能量的传送，但应用的目的主要在于传送、放大或转换各种信号（如无线电、电子计算机等）。

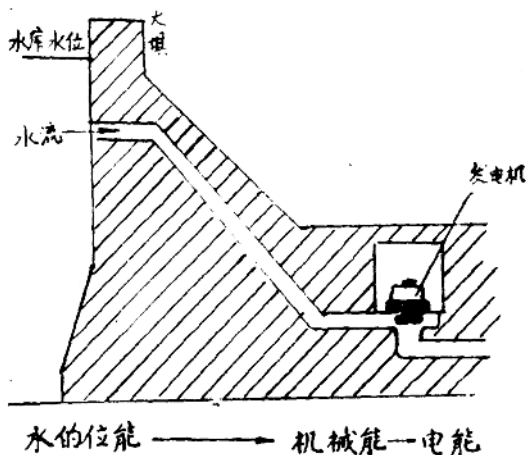
不管是电力电路还是电子电路，都需要有电源，就是要有电能的来源。干电池、蓄电池就是最常见的电源。在工业上应用的电源大体上可分为直流电源和交流电源两类。发电厂发的电都是交流电。一般的直流电源也是由交流电变换而得的。下面我们简单的示意图叙述一下火力发电和水力发电生产电能的概念。

火力发电是由锅炉燃烧煤产生高压蒸汽，将化学能变成热能，推动汽轮机旋转，变成机械能，带动发电机旋转，机械能变成电能输出。



火力发电过程

水力发电则是由高水位的水力冲动水轮机，将水位能变成机械能，再带动发电机旋转，机械能就变成电能输出。



水力发电过程

发电厂发出的强大的电力可以方便的经过输电线送到远方用户。为了减少输电过程的能量损失，长距离输电线都采用高电压三相输电线。最近我国已架设成功 33 万伏的高压输电线路。对于近距离送电，电压就不必用那么高，例如我校的高压配电线是 1 万伏电压。在用电时可以利用变压器把电压降低为常用的 380 伏、220 伏电压。我们实验室的交流电源就是这样传送来的。“从发电到用电的电力输送过程，可以用下面的示意图表示。



如果我们参观一下我校发电厂及校内的输电情况，我们对从发电到用电的全过程就能够有一个较清楚的了解。由于电能的传送方便，利用输电线就可以长距离的输送强大电能。这样发电和用电就可以不在同一个地方，我们可以在水力及火力资源丰富的地方建造大型电站，发出电来送到远处去用。同时也可以“遍地开花”，在农村搞小水电站，就地发电，就地使用。这样就可以充分利用各种资源。

总起来说，电能有如下一些优越性：实现电能的转换，即把其它能量变成电能和把电能变成其它能量，都比较容易。电能的传输比较方便。电能的使用容易实现自动控制。电信号的传送速度很高，并可以方便地把微小信号进行放大。由于这样一些优越性，使得电能在现代技术中占有极重要的地位。

马克思在1850年就指出：“在过去一百年间，扭转乾坤的蒸汽的统治已告结束，代之而起的是具有无穷尽的更革命的力量—电力。”

一百多年来人类的生产斗争历史已经说明了这一点。在我国社会主义建设，社会主义工业化，农业电气化，国防现代化和改善人民生活中，电力都起着重要的作用。

第二节 我国发展中的电力工业和电子工业

在毛主席的“中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平”的号召下，我国工人阶级和广大群众破除迷信，解放思想，坚持独立自主、自力更生的方针，为我国电力和电子工业的发展，作出了巨大贡献。下面我们介绍一下电力、电子工业中我国工农兵的一些创造。

1. “洋人有的我们要有，洋人没有的我们也要有”

在国庆二十周年前夕，由上海工人和技术人员设计、制造、安装的世界第一台十二万五千千瓦的双水内冷汽轮发电机组正式发电了。这种双水内冷发电机比世界上目前采用的氢冷却发电机体积小、重量轻。如美国一台十二万五千千瓦的氢冷却发电机重 392 吨；英国一台十二万五千千瓦氢冷却发电机重 204 吨；而我国这台十二万五千千瓦双水内冷发电机的重量仅有 135 吨。

早在 1958 年，上海电机厂的工人和技术人员，响应毛主席“破除迷信，解放思想”的号召，首创成功了我国第一台体积小、出力高的一万二千千瓦的双水内冷发电机。在无产阶级文化大革命中批判了“先仿后制”的洋奴哲学爬行主义的思想后，克服了重重困难，在不到一年的时间内就完成了十二万五千千瓦的双水内冷发电机组的试制任务，为电力工业赶超世界先进水平作出了重要的贡献。

2. “向洋设备开刀，向老机组要电”

在全国工农业生产蓬勃发展的形势下，要求电力工业以更快的速度发展，这就需要在建设新电厂的同时，在老电厂开展技术革命

运动。石家庄发电厂首先实现的“超出力发电”就是群众性技术革命的丰硕成果。在科学实验基础上，他们战胜了种种保守思想，采取了各种措施，突破了旧机组的“额定出力”的定额限制，使老机组超出力发电。现在全国许多发电厂都在推广石家庄发电厂的经验，很多工厂都作到了超出力发电。“超发”是我们工人阶级根据我国电力工业具体情况而采取的革命措施，反映了我国工人阶级自力更生艰苦奋斗的坚强意志。

3. “科学技术出于实践，科学技术来自群众”

资产阶级宣扬电子技术神秘论。但一切科学技术都来自实践，来自群众。我国北京上海一些小厂也破除迷信，先后制造出了单晶硅，晶体管及可控硅管等。我国电子技术工作者奋起赶超世界先进水平，先后制成功了许多先进产品，例如大面积集成电路元件等。我校电子系生产出了中规模集成电路，在一个面积仅为 $12\text{mm} \times 6\text{mm}$ 的半导体片中制造成功了包括 120 个晶体管的电子电路，可代替七八块印刷电路板插件，体积缩小到三千分之一左右。并成功地应用来制造了电子计算机，使计算机体积大为缩小，还提高了工作的可靠性。

4. “急农业之所急，想农业之所想”

伟大领袖毛主席早就指出：“凡是能够发电的水利建设，应当尽可能同时进行中小型的水电建设，结合国家的大中型的电力工程建设，逐步增加农村用电”在 1971 年的野营拉练中，我校工农兵学员了解了北京郊区某生产队建设“小水电”的情况。这个生产队在一个深山沟里，只有 30 多户人家。在某工厂师傅的帮助下，利用了村前小水沟的水流，修建了一个 10 千瓦的小水电站。发电量虽小，可是起的作用很大，深山沟起了大变化：队里用上了电磨、电刨草机，家家有了电灯照明，装上了有线广播，可以召开小队广播会。这样的小水电站，深受贫下中农的欢迎。

现在我国农村正在普遍发展这种中小水电站，例如江苏省，在文化大革命前，农村小水电站只有 8 处，发电量只有 200 千瓦，到 1970 年已发展到 7000 千瓦。不少地方农村中还正在试行采用“二线一地”输电线路，以节省导线器材，来加速农村电气化。

第三节 关于电工学课程的简单说明

我们将来要很好地为祖国的电气化自动化建设服务，就需要学习电工学课。由前两节可见，电气化自动化建设包括的内容是比较广泛的，例如电机制造，发电厂的设计安装，自动控制系统的调整以及电子仪器设备的研制等等。要从事这些工作，需要学习这方面的专门知识，而这都需要一些电工知识作为基础。这是因为各种电气设备常常离不开电路与磁路。例如要制造、操作各种电气设备，要掌握各种电气设备的性能，就需要掌握电路与磁路的基本规律，要善于对电路与磁路中的各种过程进行分析与计算。例如在设计计算晶体管交流放大器时，就需要掌握直流电路与交流电路的分析计算方法；在设计电机时，要在电机内产生一定强度的磁场，就需要掌握磁路的分析计算方法。

电工学课的任务就是在物理学所阐述的电磁规律的基础上，联系电工的工程实际，进一步叙述电路与磁路的基本规律及分析计算和实验研究的方法，从而培养和提高分析电工问题和解决电工问题的能力；为今后学习专业知识，进行专业的科研生产工作打好基础。

旧电工基础课程，和其他课程一样，渗透着资产阶级偏见和传统势力，例如宣扬“理论至上”，“个人至上”，“技术至上”等唯心主义思想，以及教学中的注入式方法等。在今后的教学过程中，我们要和大家一起进一步肃清这些封资修流毒，改革旧的教学内容和教学方法，为把教育革命进行到底共同奋斗！

第一章 直流电路的基本知识

像緒论中讲的那样，电是现代工农业生产和日常生活所不可缺少的东西。例如軋鋼机、起重机、电气火车及灌溉水泵等各种机器，都需要电力来推动。无线电通信、电视、计算机和各种复杂的自动控制系统，则需要各种电子仪器来进行工作。无论是电力设备，还是电子仪器，它们的运行都依靠电流的作用。为要产生电流，需要构成电路。因此我们要研究电路中电压、电流、电功率的规律及其计算方法。直流电路是研究其他复杂电路的基础，我们将分两章来讲解。本章是在复习物理的基础上引导到电工工程中的电路问题。重点是：复习电路中的一些基本物理量，如电压、电流、电动势、电位、电阻、电功率等的意义；熟练掌握欧姆定律及其应用；介绍最简单的含反电动势的电路；介绍一些电工工程实际问题，如电器的额定值，开路与短路，元件的伏安特性等。下一章的重点是直流电路的分析与计算。

第一节 电路的基本知识

(1) 电路的构成

要产生电流，需要构成电路。最简单的用电电路如图 1—1 所示。从图中的两个例子可以看到，一个电路的组成主要有三部分：

① 电源：它的内部具有推动电流流动的原动力，是电路中电能的来源。干电池、蓄电池、直流发电机，以及电子技术中常用的直流稳压电源等，都是最常用的直流电源。

② 负载：就是各种用电设备，如图 1—1 中的灯泡、电烙铁等。

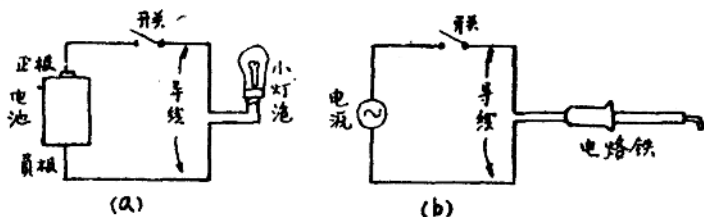


图 1—1 电路的构成

③ 联接导线：它把电源和负载联成一个通路。常用的电线是用铜或铝做的。

我们知道要使电路中有电流，通常需要有两个条件：

① 电源能正常供电。如果电路中没有电流，首先就要检查一下电源是否良好。

② 电路必须是一个闭合的通路。如果开关接触不好，联接导线断裂，焊点脱落，或负载内部有断线，这些都叫做“开路”，都会使电路中没有电流。

(2) 电路中电流的产生，电位差与电动势

那么有了电源，又构成了闭合的通路，为什么就能产生电流呢？这是由于电源的存在，使电路产生电位差，因而在导线中建立电场，使导体中的电荷在电场力的作用下发生定向移动，就形成电流。当如图 1—2 接成电路时，和电池正极相接的导线 A 处于高电位，和电池负极相接的导线 B 处于低电位，导线中的正电荷就会从 A 处经负载

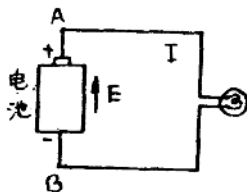


图 1—2

定向移动到 B 处去。但是要使电流连续不断，就需要依靠电源内部的非静电力的作用，把正电荷不断地从低电位（负极）推到高电位（正极）处，因而能始终保持 A 点电位比 B 点电位高，才能形成连续不断的电流。电池所以有这种能力，是由于它内部的化学材料的作用，能产生化学力（这是一种非静电力）推动正电荷移动的缘故，这时化学能就转变成电能。电源内部这种能把正电荷从低电位推到高电位的能力，我们称之为电动势，用符号 E 来表示。电动势 E 的大小表示能把电荷提高多少电位。正如物理中所述，电动势 E 等于单位正电荷在电源内部的非静电力作用下通过电源时所获得的能量。 E 的单位是“伏特”，或简称“伏”，符号是“ V ”。电动势 E 的方向是指从负极（低电位）到正极（高电位）的方向，即电位升高的方向。电源内部有了电动势，就能在正极和负极之间保持有一定的电位差。这个电位差又叫做电压，用符号“ U ”来表示，单位和电动势一样，也是“伏”。电压可以用电压表来测量，如图 1—3，用电压表“+”端接干电池正极，“-”端接电池负极，电压表上就有 $1.5V$ 的读数，这就是说电池正极和负极间的电压（或电位差）是 1.5 伏。

电压 U 的方向是指正极（高电位）到负极（低电位）的方向，即电位降低的方向，在这一点上和电动势 E 是电位升的含义刚好相反。上图中，分别用箭头代表 U 和 E 的方向。

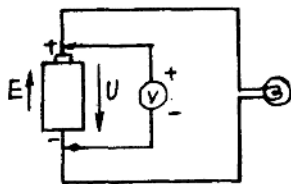


图 1—3 用电压表测量电压

有的电压很低，常用毫伏 (mV) 作单位：

$$1mV = \frac{1}{1000}V = 10^{-3}V.$$

有的电压很高，常用千伏 (KV) 作单位：

$$1KV = 1000V = 10^3V。$$

下面我们再谈一谈关于电流的问题。正如物理中所述，金属导线中的电流是由带有负电荷的电子定向移动形成的，照理应该把电子流动的方向，定做电流方向。但是在历史上由于那时人们还不知道有电子的存在，误以为电流是正电荷在移动，所以就把正电荷移动的方向（即和电子移动方向相反的）定为电流的方向。由于这种假定，对解决电工问题并无妨碍，又已成为习惯，所以直到今天我们还都按照这个习惯来定电流的方向（图 1-4）。

电流，通常用符号 I 来表示，也用箭头标出电流的方向。电流的大小则是根据每单位时间里导体截面上有多少电量移过来衡量的。如果每单位时间里导体截面上移过的电量多，电流 I 就大。

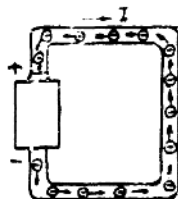


图 1-4 导体中电流的示意图

如果在足够长的时间里，电流的大小和方向都不变化，则这种电流叫做直流电流。对于直流电流来说，若以 Q 表示在时间 t 内移过导体截面的总电量，则电流的大小为：

$$I = \frac{Q}{t}。 \quad (1-1)$$

电量 Q 的单位是“库仑”。电流的单位是“安培”，或简称“安”，用字母“ A ”或“ a ”来表示。导线里每秒鐘有 1 库仑的电量移过，叫做 1 安；

$$1\text{安} = \frac{1\text{库仑}}{1\text{秒}}$$

有时电流很小，如在电子线路中就常采用毫安 (mA) 或微安 (μA) 作单位。

1 安 = 1000 毫安 = 10^3 毫安,

1 安 = 1,000,000 微安 = 10^6 微安。

或 $1mA = 10^{-3}A$, $1\mu A = 10^{-6}A$ 。

测量导线中电流的大小, 可以用电流表。如图 1—5 接入电流表, 使电流从电流表的正端流入, 负端流出, 电流表的指针即能指示出电流 I 的大小来。

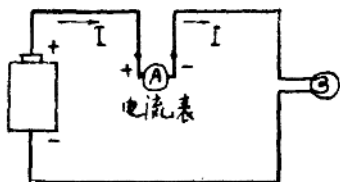


图 1—5 用电流表测量电流

(3) 电阻

自由电子在金属导体里运动时会遇到阻力, 这种阻力是自由电子和导体中的原子发生碰撞而产生的。这种阻碍电流通过的阻力称为电阻, 用符号“ R ”或“ r ”表示。电阻不同, 电路中在同一个电压作用下的电流也不同。

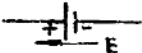
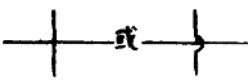
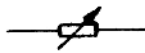
电阻的单位是“欧姆”, 或简称为“欧”, 用符号“ Ω ”表示。有时遇到很高电阻值 (如电子线路中有的炭膜电阻, 和绝缘材料的电阻), 常用千欧 ($K\Omega$) 或兆欧 ($M\Omega$) 作为单位,

$$1K\Omega = 1000\Omega = 10^3\Omega,$$

$$1M\Omega = 1,000,000\Omega = 10^6\Omega.$$

任何导体均具有电阻(注)。对于很多用电设备, 如输电线、电机和变压器内部用的导线, 电阻大了, 会造成电能损失和电压损失

注: 由于近代技术的发展, 已出现了超导技术, 就是在极低温条件下, 某些导体材料的电阻可以完全消失。由此原理制成的超导电机, 其重量和体积可以大大缩小, 目前正处在研制阶段。

元件名称	符 号	说 明
直流电源		长线表示正极，短线表示负极。
导 线		用直线表示，认为它是没有电阻的导线，若有电阻，则应另用电阻符号标出。
		两线交叉并相联接，则交叉处涂以黑点。
		两线交叉但不联接。
开 关		
电 阻		
可变电阻		
电位器	