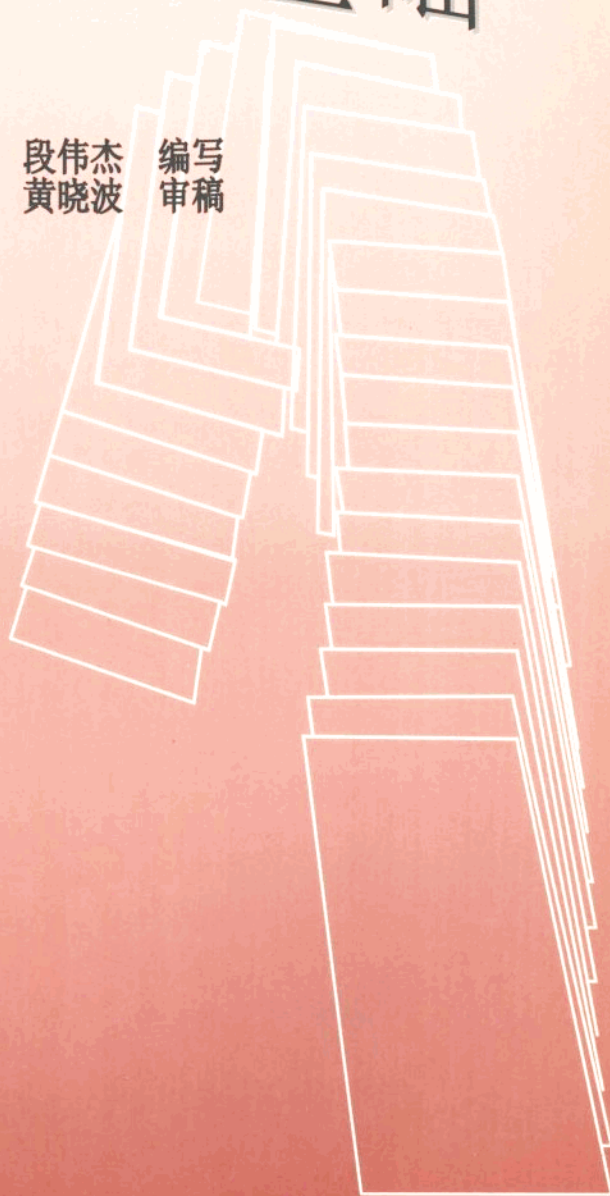


数据通信基础

段伟杰 编写
黄晓波 审稿



华强职业技术学校自编教材系列

前言

数据通信是现代网络技术专业的基础。互联网的急速发展给我们的生活和学习带来了极大的方便，我们学好现代网络技术，可以更好的使用互联网。为了使学生更好的学好网络技术，并针对职高学生的特点，我们经国外的数据通信教材为蓝本编写了本教材。这本数据通信基础教材，着重介绍的是国际标准化组织（ISO）推广的覆盖了网络通信的各个方面的开放系统互连模型（OSI）中的物理层的完成的任务。

本教材以Behrouz Forouzan（美）等著《数据通信与网络》为蓝本，其特点：图文并茂，没有深奥的数学理论公式的推导，以实用和易学的观点为主。本教材包括电路基础知识、数据通信原理两部分内容：第一部分主要学习了解简单和复杂交直流电路的一些基本概念、基本定理（如基尔霍夫电压定律、电流定律、戴维南定理等）；第二部分数据通信原理主要学习数据通信传输中开放系统互连模型（OSI）的层的概念、信号的概念、信号的编码、信号的传输媒介、数据传输的接口、数据传输的复用技术概念、最后简单介绍当前流行的通信技术。

这本教材由段伟杰、黄晓波策划，段伟杰完成编写，黄晓波主审。本教材在原稿试用两次的基础上完成修改。

编者

2003年9月

目 录

第 1 章 电工学简介	1
电工学与通信的发展史话	1
1.1 电路基本概念	4
1.2 电流和电阻	6
1.3 电源和电动势	7
1.4 基本定律	8
练习一	10
1.5 正弦交流电的基本概念	12
1.6 电容和电感	15
1.7 正弦交流电的功率	16
1.8 非正弦波形与分析	17
练习二	19
第 2 章 数字通信的概念	21
2.1 数字通信的概念	22
2.2 计算机的协议和服务	24
2.3 开放系统互联 (OSI) 模型	28
2.4 线路配置	36
2.5 拓扑结构	37
2.6 传输模式	41
2.7 总结	42
2.8 习题	43
小测验	46
第 3 章 信号	47
3.1 模拟和数字信号简介	47
3.2 周期性和非周期性信号	48
3.3 模拟信号	49
3.4 数字信号	55
3.5 总结	61
3.6 习题	61
第 4 章 编码	64
4.1 数字—数字编码	64
4.2 模拟—数字编码	70
4.3 数字—模拟编码	73
4.4 总结	76
4.5 习题	76
第 5 章 传输媒介	79

5.1	有向媒介	79
5.2	无向媒介	87
5.3	总结	90
5.4	习题	91
第 6 章	复用	93
6.1	多合一 / 一分多	93
6.2	复用类型	93
6.3	总结	99
6.4	习题	99

第1章 电工学简介

电工学与通信的发展史话

一、电学发展史

1600年,英国人吉尔伯特总结了多年来关于磁的实验成果,出了本名为《论磁学》的书。书中指出地球本身就是一块大磁石,并且阐述了罗盘的磁倾角问题。他还研究了摩擦琥珀吸引羽毛的现象,指出这种现象不仅存在于琥珀上,而且存在于硫磺、树脂、玻璃、水晶、钻石等物质。现在,人们已经知道,毛皮、绒布、陶瓷、火漆、玻璃、纸、丝绸、琥珀、金属、橡胶、硫磺、赛璐珞等是摩擦起电物质系列。把这个系列中的两种物质互相摩擦,系列中排在前面的物质将带正电,排在后面的物质将带负电。

在公元前的中国,打雷被认为是神的行为。打雷就是雷公在天上敲打鼓,闪电就是电母用两面镜子把光射向下界。到了亚里斯多德时代,人们对雷电的认识就已经比较科学了。认为雷的发生是由于大地上的水蒸气上升,形成雷雨云,雷雨云遇到冷空气凝缩而变成雷雨,同时伴随出现强光。

认为雷是由静电而产生的是英国人沃尔,那是亚里斯多德之后很久的1708年的事。1748年,富兰克林基于同样的认识设计了避雷针。前面提到摩擦起电有正电和负电两种,给出正电和负电这两个名字的正是富兰克林(1747年)。

能不能用什么办法把静电收集起来?这个问题很多科学家都考虑过。1746年,莱顿大学教授缪森布鲁克发明了一种存贮静电的瓶子,这就是后来很有名的“莱顿瓶”。

缪森布鲁克本来想,像往瓶子里装水那样把电装进瓶子里,他首先在瓶子里灌上水,然后用一根金属丝把摩擦玻璃棒通到水里。就在他手接触到瓶子和棒的一瞬间,他被重重地“电击”了一下。据说他曾这样说过:“就算是国王下命令,我也不想再做这种可怕的实验了”。

富兰克林联想到往莱顿瓶里蓄电的事,于1752年6月做了一个把风筝放到雷雨云里去的实验。其结果,发现了雷雨云有时带正电有时带负电的现象。这个风筝实验很有名,许多科学家都很感兴趣,也跟着做。1753年7月,俄罗斯科学家利赫曼在实验中不幸遭电击身亡。

电击曾被用于治疗疾病,1700年以后,电击疗法一度很流行。意大利波洛尼亚大学教授伽伐尼在解剖青蛙时发现,手术刀一碰到青蛙腿上的肌肉,肌肉就痉挛。当时正是电击疗法盛行的时代,于是他就想,青蛙肌肉痉挛的原因就是电吧?此后,他给这种电起了个“动物电”的名称,并于1791年以同一名称为题发表了论文。

意大利帕维亚大学教授伏打,在重复了伽伐尼实验的过程中,对“动物电”产生了疑问,经过进一步研究,于1800年发表了题为“论不同导电物质接触起电问题”的论文,阐明了两种不同金属接触带电的现象。通过用各种金属进行实验,他证明了锌、铅、锡、铁、铜、银、金、石墨是个金属电压系列,当这个系列中的两种金属相互接触时,系列中排在前面的金属带正电,排在后面的金属带负电。他把铜和锌作为两个电极置于稀硫酸中,从而发明了伏打电池。电压的单位“伏特”就是以他的名字命名的。

19 世纪初，正是法国大革命后进入拿破仑时代。拿破仑从意大利归来，在 1801 年把伏打召到巴黎，让他做电学实验，伏打也因此获得了拿破仑授予的金质奖章和莱吉诺·多诺尔勋章。

伏打电池的利用与电磁学的发展

伏打电池发明之后，各国利用这种电池进行了各种各样的实验和研究。德国进行了电解水的研究，英国进行了从氯化钾中提取钾、从氯化钠中提收钠的研究，英国化学家戴维把 2000 个伏打电池连在一起，进行了电弧放电实验。戴维的实验，就是用于照明的开始。

1820 年，丹麦哥本哈根大学教授奥斯特在一篇论文中公布了他的一个发现：在与伏打电池连接了的导线旁边放上一个磁针，磁针马上就发生偏转。俄罗斯的西林格读了这篇论文，他把线圈和磁针组合在一起，发明了电报机（1831 年），这可说是电报的开始。其后，法国的安培发现了关于电流周围产生的磁场方向问题的安培定律（1820 年），法拉第发现了划时代的电磁感应现象（1831 年），电磁学得到了飞速发展。

另一方面，关于电路的研究也在发展。欧姆发现了关于电阻的欧姆定律（1826 年），基尔霍夫发现了关于电路网络的定律（1849 年）等，从而确立了电工学。

二、有线通信的历史

有人说科学技术是由于军事方面的需要而发展起来的。

在拿破仑时代，英国害怕拿破仑进攻，曾用桁架式通信机向自己的部队通报法国军队的动向。将这种通信机改造成电通信方式的构想就是有线通信的开始。

在 1831 年俄罗斯的西林格发明了电报机后，电报机出现了各种各样的形式，有音响式、印刷式、指针式、钟铃式等。1837 年，莫尔斯电报机在美国研制成功，发明人就是以莫尔斯电码而闻名的莫尔斯。莫尔斯电码是一种以点、划来编码的信号。

莫尔斯本来想当一名画家，他为此在伦敦留学。1815 年，他在回美国的船上听了波士顿大学教授杰克逊关于电报的一席谈话，萌发了莫尔斯电码和电报机的构想。为了铺设电报线，莫尔斯成立了电磁—电报公司，并于 1846 年在纽约—波士顿、费城—匹兹堡、多伦多—布法罗—纽约之间开通了电报。莫尔斯的事业获得了极大成功，于是就在美国各地创办电报公司，电报业务逐渐扩大起来。1846 年，莫尔斯电报机装上了音响收报机，使用也更加方便。

1876 年 2 月 14 日，美国的两位发明家贝尔和格雷分别递交了电话机专利的申请，贝尔的申请书比格雷的申请书早两个小时到达，因而贝尔得到了专利权。

1878 年，贝尔成立了电话公司，制造电话机，全力发展电话事业。

从发展电话业务开始，交换机就担负着重要任务。1877 年前后的交换机称为传票式交换机，话务员收到通话请求，得把传票交给另一位话务员。

其后，经过反复改进，开发出了框图式交换机，进而又开发出了自动交换方式（1879 年）。

1891 年，史端乔式自动交换机研制成功。至此，自动交换的愿望就算实现了。之后研究仍在继续，又经过了几个阶段才达到了现在的电子交换机，程控交换机。

陆上通信网日渐完备，人们开始考虑在海底敷设通信电缆来实现跨海国家之间的通信。

1845 年，英吉利海峡海底电报公司成立，开始了从英国到加拿大并跨过多佛尔海峡到达法国的海底电缆敷设工程。海底电缆敷设中碰到了电缆断裂等大难题，但敷设海底电缆是时代的要求，各国都为此投入了力量。

1851 年，最早的加来—多佛尔海底电缆敷设完毕，成功地实现了通信。以此为契机，欧洲周边和美洲东部周边也敷设了许多电缆。

现在，世界上的大海里遍布着电缆，供通信使用。

三、无线通信的历史

世界上任何地区的信息都能显示在电视机上，这种方便是电波带给我们的。

最早的电波实验是德国的赫兹在 1888 年进行的。通过实验，赫兹弄清了电波和光一样，具有直线传播、反射和折射现象。频率的单位赫兹就是来自他的名字。

1、马可尼的无线电装置

1895 年意大利人马可尼，研制出了最早的无线电装置，利用这一装置在相隔大约 3 公里远的距离之间进行了莫尔斯电码通信实验。他想到了要把无线通信企业化，就成立了一个无线电报与信号公司。

1899 年，跨越多佛尔海峡的通信得以成功，1901 年又成功地在距离英国 2700 公里的纽芬兰接收到了莫尔斯信号。

尽管马可尼在无线通信领域获得了诸多成功，但由于与海底电缆公司的利益相冲突，他想在纽芬兰设立无线电报局的事遭到了反对，马可尼的反对者还不在少数。

2、高频电磁波的产生

要实现无线通信，首先要产生稳定的高频电磁波。

达德尔采用由线圈和电容器构成的电路产生出了高频信号，但频率还不到 50kHz，电流也只有 2~3A，比较小。

1903 年，荷兰的包鲁森利用酒精蒸气电弧放电产生出了 1MHz 的高频波，彼得森又对其进行改进，制成了输出功率达到 1kW 的装置。

其后，德国设计出了机械式高频发生装置，美国的斯特拉和费森登、德国的戈尔德施米特等人开发出了用高频交流机产生高频波的方法等，很多科学家和工程师都曾致力于高频波发生器的研究。

3、无线电话

如果传送的不是莫尔斯信号而是人的语言，那就需要有运载语音信号的载波。载波必须是高频波。

1906 年，美国通用电气（GE）公司的亚历山德森制成了 80kHz 的高频信号发生装置，首次成功地进行了无线电话实验。

用无线电话传送语音，并且要收听它，这就需要有用于发送的高频信号发生装置和用于接收的检波器。费森登设计了一种外差式接收装置，并于 1913 年试验成功。

达德尔设计出了以包鲁森电弧发送器为发送装置、以电解检波器为接受装置的受话器方式。在当时，由于都是采用火花振荡器，所以噪声很大。实验阶段可说是成功了，但离实用化还很远。

要想使产生的电波稳定，接收到的噪声小，还得等待电子管的出现。

4、二极管和三极管

1883 年，爱迪生发现从电灯泡的热丝上飞溅出来的电子把灯泡的一部分都熏黑了，这种现象被称为爱迪生效应。

1904 年，弗来明从爱迪生效应得到启发，造出了二极管，用它来进行检波。

1907 年，美国的 D.福雷斯特在二极管的阳极和阴极之间又加了一个叫做栅极的电极，发明了三极管。这种三极管既可用于放大信号电压，也可配以适当的反馈电路产生稳定的高频信号，可说是一个划时代的电路元件。

三极管经过进一步改进，能够产生短波、超短波等高频信号。此外，三极管具有能控制电子流的功能，随后出现的阴极射线管和示波器与此有密切的关系。

四、电力设备的历史

可以说，1820 年奥斯特所发现的电磁作用就是电动机的起源。在 1831 年法拉第所发现

的电磁感应就是发电机和变压器的起源。

1、发电机

1832 年，法国人毕克西发明了手摇式直流发电机，其原理是通过转动永磁体使磁通发生变化而在线圈中产生感应电动势，并把这种电动势以直流电压形式输出。

1866 年，德国的西门子发明了自励式直流发电机。

1869 年，比利时的格拉姆制成了环形电枢，发明了环形电枢发电机。这种发电机是用水力来转动发电机转子的，经过反复改进，于 1874 年得到了 3.2kw 的输出功率。

1882 年，美国的戈登制造出了输出功率达 447kW、高 3 米、重 22 吨的两相式巨型发电机。

美国的特斯拉在爱迪生公司的时候就决心开发交流电机，但由于爱迪生坚持只搞直流方式，因此他就把两相交流发电机和电动机的专利权卖给了西屋公司。

1896 年，特斯拉的两相交流发电机在尼亚加拉发电厂开始营运，3750kw、5000 V 的交流电一直送到 40 公里外的布法罗市。

2、电动机

1834 年，俄罗斯的雅可比试制出了由电磁铁构成的直流电动机。1838 年，这种电动机曾开动了一艘船，电动机电源用了 320 个电池。此外，美国的达文波特和英国的戴比德逊也造出了直流电动机（1836 年），用作印刷机的动力设备。由于这些电动机都以电池作为电源，所以都未能广泛普及。

1887 年，前面所讲过的特斯拉两相电动机，作为实用化感应电动机的发展计划开始启动。

1897 年，西屋公司制成了感应电动机，设立专业公司致力于电动机的普及。

3、变压器

发电厂在向外输送交流电的时候，要先把交流电压升高，到了用电端，又得把送来的交流电压降低。因此，变压器是必不可少的。

1831 年，法拉第发现磁可以感应生成电，这就是变压器诞生的基础。

1882 年，英国的吉布斯获得了“照明与动力用配电方式”专利，其内容就是将变压器用于配电。当时所用的变压器是磁路开放式变压器。在 1884 年，英国的霍普金森制成了闭合磁路式变压器。

4、电力设备和三相交流技术

两相交流电是用四根电线输电的技术。德国的多勃罗沃尔斯基在绕组上想出了窍门，从绕组上每隔 120° 的三个地方引出抽头，得到了三相交流电。1889 年，利用这种三相交流电的旋转磁场，制成了功率为 100W 的最早的三相交流电动机。

同年，多勃罗沃尔斯基又开发出了三相四线制交流接线方式，并在 1891 年的法兰克福输电实验（150vA 三相变压器）中获得了圆满成功。

1.1 电路基本概念

一、电路

由电气装置与元器件按一定方式连接所构成的电流的通路叫电路。任何复杂的纯电阻电路可以归结为由四部分组成：电源、用电器、开关和导线。如图 1-1 所示。

1. 电源

把其他形式的能量转变成为电能的装置叫做电源。常见的直流电源有干电池、蓄电池和直流发电机等。

2. 用电器

把电能转变成其他形式能量的装置称为用电器，也常把它们称为电源的负载，如电灯、电铃、电动机、电炉等利用电能工作的设备。

3. 导线

连接电源与用电器的金属线称为导线，它把电源产生的电能输送到用电器，常用铜、铝等材料制成。

4. 开关

它起到把用电器与电源接通或断开的作用。

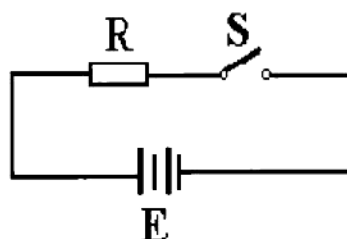


图 1-1 电路结构

二、电路的状态

电路的状态有如下几种。

1. 通路（闭路）

电路各部分联接成闭合回路，有电流通过。

2. 开路（断路）

电路断开，电路中没有电流通过。

3. 短路（捷路）

当电源两端的导线直接相连，这时电源输出的电流不经过负载，只经过连接导线直接流回电源。这种状态称为短路状态，简称短路。一般情况下，短路时的大电流会损坏电源和导线，应该尽量避免，有时，在调试电子设备的过程中，将电路某一部分短路，这是为了使与调试过程无关的部分没有电流通过而采取的一种方法。

三、电路图

在设计、安装或修理各种设备和用电器等的实际电路时，常要使用表示电路连接情况的图。这种用规定的符号表示电路连接情况的图，称为电路图，其图形符号见国家标准。几

名称	符号	名称	符号	名称	符号	名称	符号
发电机		开关		可变电阻		电压表	
电池		接地点		电位器		导线 连接	
电灯		保险丝		电感器		导线 不连接	
固定电阻		电流表		理想电压源		电容器	
				理想电流源			

图 1-2 常用电器元件符号

种常用的标准图形符号，如图 1-2 所示。

1.2 电流与电阻

一、电流

1、电流

电荷的定向移动叫做电流，电流的方向规定为正电荷定向移动的方向。

2、电流的大小

①定义式：电流强度（简称为电流）就是通过导体横截面的电量 q 和其通过此截面所需时间 t 的比值，即：

$$I = \frac{q}{t}$$

式中若电荷量 q 的单位用 C（库），时间 t 的单位用 s（秒），则电流 I 的单位用 A（安）。常用的电流的单位还有 mA（毫安）、 μ A（微安）等。

$$1\text{A} = 1000\text{mA}; 1\text{mA} = 1000\mu\text{A}$$

②电流是标量，电流的大小可用安培表直接测量

3、直流电流与交变电流

电流的方向和大小都不随时间而变化的电流称为恒定电流；通常称为直流。

电流的方向和大小都随时间作周期性变化的电流称为交变电流；

电流的方向不变，但大小随时间而变化的电流称为脉动电流。如图 1-3。

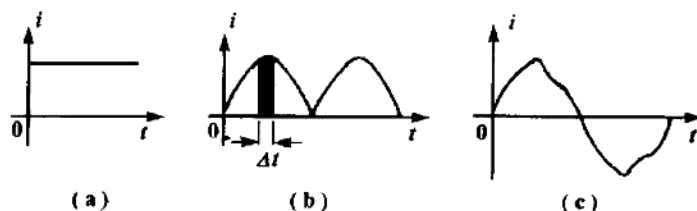


图 1-3 (a) 直流电流、(b) 脉动电流、(c) 交变电流

二、电阻

金属导体中的电流是自由电子的定向移动形成的，自由电子在运动中要跟金属正离子频繁碰撞。这种碰撞阻碍了自由电子的定向移动，我们把表示这种阻碍作用的物理量叫做电阻。不但金属导体有电阻，其他物体也有电阻。

(1) 电阻是表示导体对电流阻碍作用的物理量。

(2) 金属导体电阻的大小是由它的长短、粗细及材料的性质等因素决定的。它们之间的关系为

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

即在温度不变时，导体的电阻和它的长度成正比，而和它的横截面积成反比。式中 ρ 是一个反映材料导电性能的物理量，称为电阻率，单位为欧姆·米。式中其它各物理量的单位为：电阻 R 的单位用 Ω （欧），长度 L 的单位用 m（米），横截面积 S 的单位用 m^2 （米²）。

(3) 金属导体的电阻还与温度有关

1.3 电源与电动势

一、电源

电源是把其他形式的能量转变成电能的装置。电源内部具有能把正电荷从低电位处（电源的负极），经电源内部移动到高电位处（电源正极）的外力，这种外力称为非静电力。非静电力可以是电磁力、化学力等。正是由于有非静电力的存在，才使得电源能提供持续不断的电流，维持电源两端有一定的电动势。

二、电动势

1、电动势的概念

电动势是衡量非静电力搬运正电荷做功本领的物理量。电动势在电源内部把正电荷从负极移到正极所做的功 $W_{源}$ 与被移动的电量 q 的比值称为电源的电动势，用符号 E 表示：

$$E = \frac{W_{源}}{q}$$

电源电动势的大小主要决定于组成电源本身材料的性质和内部构造。电动势是标量。单位是伏特。

所谓电动势的方向只是说明电源电位高低的指向，通常把经由电源内部从负极（低电位端）指向正极（高电位端）的方向，规定为电动势的实际方向，即为电位升高的方向，它和路端电压的实际方向恰好相反。（图 1-4）

在电路图中，电源的符号如图 1-5，电动势的正方向可用正负极性的符号标出。

2、理想电压源

如果电源的内阻为零，始终输出恒定的电压并等于电动势，这样的电源称为理想电压源。我们利用电动势的符号作为理想电压源的符号。

3、电源电动势和电源端电压

对一个电源来说，电源电动势和电源端电压都可以用来描述它对外部两端点之间的电位差。端电压的实际方向是沿电位降低的方向（规定为由高电位一端指向低电位一端）；电源电动势的实际方向是沿电位升高的方向（规定为经电源内部由低电位一端指向高电位一端）。电动势和端电压实际方向相反，但他们对外部表现的效果是一致的。

例题 1、求下列各段电路中 a、b 两端的电压 U_{ab} 。

解：图示符号表示理想电压源（内阻为 0），电动势和电压的正方向在图上以按符号規約标出。

（1）如图 1-6（a）所示， U_{ab} 与 E_1 的正方向相反

$$U_{ab} = V_a - V_b = E_1 = 10 \text{ V}$$

（2）如图 1-6（b）所示， U_{ab} 与 E_2 的正方向相同

$$E_2 = V_b - V_a = U_{ba} = 10 \text{ V}$$

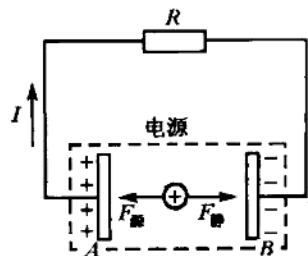


图 1-4 电源的内外电路

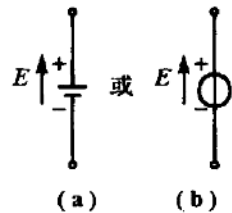


图 1-5 理想电源符号

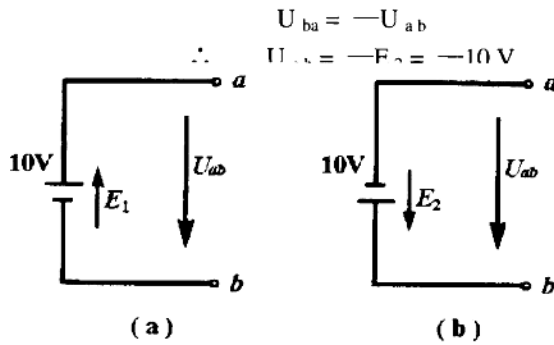


图 1-6 电源电压与电动势的数值关系

1.4 基本定律

一、闭合电路欧姆定律

闭合电路欧姆定律：闭合电路内的电流，跟电源的电动势成正比，跟整个电路的电阻成反比（如图 1-7 所示）

$$I = \frac{E}{R + r}$$

符号的约定：凡是电动势正方向与电流的正方向一致的，电动势取正值；凡是电动势正方向与电流的正方向相反的，电动势取负值。

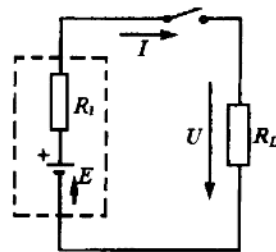


图 1-7 闭合电路

例题 2、 在图 1-8 中， $E_1=24$ 伏， $R_{11}=2$ 欧， $E_2=12$ 伏， $R_{12}=1$ 欧， $R=3$ 欧。试求（1）回路电流；（2）电压 U_{ab} 和 U_{cd} 。

解：（1）设回路电流为 I ，并设电流正方向沿顺时针方向，取电流正方向为电路的绕行方向。

$$I = \frac{\sum E}{\sum R} = \frac{E_1 - E_2}{R + R_{11} + R_{12}} = \frac{24 - 12}{3 + 2 + 1} = 2.0(\text{安})$$

正值，表示电流的实际方向与正方向一致。

$$(2) U_{ab} = V_a - V_b = -E_1 + IR_{11} = -24 + 2 \times 2 = -20 (\text{伏})$$

式中负号表示 V_b 高于 V_a ；

$$U_{cd} = E_2 + IR_{12} = 12 + 2 \times 1 = 14 (\text{伏})$$

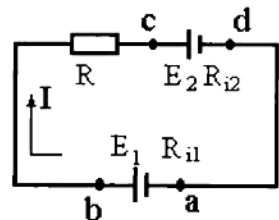


图 1-8

二、基尔霍夫定律

基尔霍夫定律是确定电路中有关电量的基本定律，它包括**电流定律**和**电压定律**。

1、节点电流定律 (KCL)

基尔霍夫电流定律又叫节点电流定律，它指出：在电路中任意一个节点上，流入节点的电流之和，等于流出节点的电流之和。如果规定流入节点的电流为正，流出节点的电流为负（如图 1-9），则基尔霍夫电流定律可写成

$$\sum I = 0$$

亦即**在任一电路的任一节点上，电流的代数和等于零**。

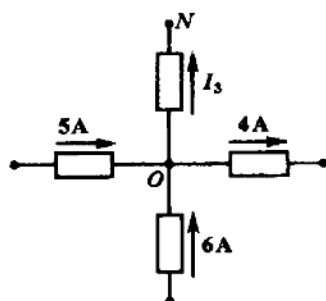


图 1-9 通过节点的电流

基尔霍夫电流定律通常用于节点，但对包围几个点的闭合面也是适用的，即通过任一闭合面的电流的代数和也等于零。

2、电压定律 (KVL)

基尔霍夫电压定律又叫回路电压定律，它指出：在电路中，从一点出发绕回路一周回到该点时，各段电压的代数和等于零。即

$$\sum U = 0$$

基尔霍夫电压定律也可表示为另一种形式，即在任意一个闭合回路中，各段电阻上电压降的代数和等于各电源电动势的代数和。写成一般式为

$$\sum I R = \sum E$$

应该指出：

①在用表达式 $\sum U = 0$ 时，电动势是作为电压来处理的，所以电压、电动势均集中在等式一边。各段电压的正、负号是这样规定的：如果在绕行过程中从元件的正极点到负极点，此项电压便是正的；反之从元件的负极点到正极点，此项电压则是负的。

②在用表达式 $\sum IR = \sum E$ 时，电压与电动势分别写在等式两边，那么电压的正、负规定和①相同，而电动势的正、负号则恰灯相反，也就是当绕行方向与电动势的方向（即由电源负极通过电源内部指向正极）一致时，该电动势力正，反之则为负。

例如 3、如图 1-10，当绕回路一周，电动势代数和与电阻上的电位降代数和有什么数量关系？

解：假设回路的绕行方向为顺时针方向，电压和电流的参考方向选取一致，并以 a 点为电位参考点。

根据基尔霍夫电压定律可得： $\sum U = U_{ab} + U_{bc} + U_{cd} + U_{da} = 0$

$$IR_1 + (-E_1) + IR_2 + (-E_2) = 0$$

$$IR_1 + IR_2 = E_1 + E_2$$

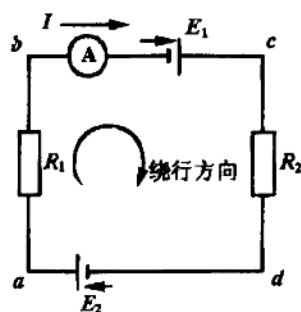


图 1-10 闭合电路各段电压

即

$$\Sigma IR = \Sigma E$$

上式表明：各段电阻上电压降的代数和等于各电源电动势的代数和。

$$E_1 = I_1 R_1 + I_3 R_3 = I_3 (R_1 + R_3) = 1 \times (4 + 40) = 44V$$

(3) $E_1 = 20V$ 时, R_3 中的电流 I_3 , 将以知的条件代入①、②、③式, 整理后为

$$\left. \begin{aligned} I_1 + I_2 &= I_3 \\ I_1 + 10I_3 - 5 &= 0 \\ I_2 + 4I_3 - 4 &= 0 \end{aligned} \right\}$$

解方程组可得:

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= -1A \\ I_2 &= 1.6A \\ I_3 &= 0.6A \end{aligned} \right\}$$

其中 I_1 为负值, 表示 I_1 的实际方向与标定的方向相反。

三、解题方法

复杂直流电路分析方法的理论依据是基尔霍夫定律、欧姆定律、叠加原理、戴维南定理以及等效变换的概念。分析方法一般有两条途径, 一是利用电路图等效化简, 使计算简化, 这类方法有: 叠加原理、电源的等效变换和戴维南定理; 二是选取不同的未知量, 有支路电流法、回路电流法等。

练习一

一、思考题

1. 电路主要由哪几部分组成? 它们在电路中各起什么作用?
2. 什么是电流? 存在持续电流的条件是什么?
3. 电流的方向是怎样规定的? 电动势的方向如何确定?
4. 导体为什么会存在电阻? 电阻定律的内容和公式是怎样的?
5. 有一根导线每小时通过其横截面的电荷量为 900 c, 问通过导线的电流多大? 合多少毫安? 多少微安?
6. 有一个电阻, 两端加上 50m V 电压时, 电流为 10m A; 当两端加上 10 V 电压时, 电流值是多少?
7. 用横截面积为 0.6mm^2 , 长 200m 的铜线绕制一个线圈, 这个线圈允许通过的最大电流是 8 A, 这个线圈两端至多能加多高的电压?

二、是非题

- (1) 当电路处于通路状态时, 外电路负载上的电压等于电源的电动势。()

- (2) 电源电动势的大小由电源本身的性质所决定, 与外电路无关。()
- (3) 导体的长度和截面都增大一倍, 其电阻值也增大一倍。()
- (4) 电阻两端电压为 10V 时, 电阻值为 10Ω ; 当电压为 20V , 电阻值将为 20Ω 。()
- (5) $110\text{V } 60\text{W}$ 的灯泡在 220V 的电源上能正常工作。()
- (6) $220\text{V } 60\text{W}$ 的灯泡在 110V 的电源上能正常工作。()
- (7) 我们规定自负极通过电源内部指向正极的方向为电动势的方向。()
- (8) 若选择不同的零电位点时, 电路中各点的电位将发生变化, 但电路中任意两点间的电压却不会改变。()
- (9) 电路中任意节点上, 流入节点的电流之和, 一定等于流出该节点的电流之和。()
- (10) 基尔霍夫电流定律是指沿任意回路绕行一周, 各段电压的代数和一定等于零。()
- (11) 任意的封闭电路都是回路。()
- (12) 用支路电流法求解各支路电流时, 若电路有 n 条支路, 则需要列出 $n-1$ 个方程式来联立求解。()

三、选择题

- (1) 如图 1-11 所示, 电源电动势 $E_1 = E_2 = 6\text{V}$, 内电阻不计, $R_1 = R_2 = R_3 = 3\Omega$, 则 a, b 两点间的电压是 ()

① 0 ; ② -3V ; ③ 6V ; ④ 3V 。

- (2) 在图 1-12 所示电路中, 开关 S 合上和断开时各灯的亮度变化是 ()。

① 没有变化;
② S 合上时各灯亮些, S 断开时各灯暗些;
③ S 合上各灯暗些, S 断开时各灯亮些;
④ 无法回答, 因为各灯的电阻都不知道。

- (3) 通过一个电阻的电流是 5A , 经过 4min , 通过这电阻的一个截面的电荷量是 ()

① 20C ; ② 50C ; ③ 1200C ; ④ 2000C 。

- (4) 有二根同种材料的电阻丝, 长度之比为 $1:2$, 横截面积之比为 $2:3$, 则它们电阻之比是

① $1:2$; ② $2:3$; ③ $3:4$; ④ $4:5$ 。

四、填充题

- (1) 图 1-13 的电路中有 _____ 节点, _____ 条支路, _____ 个回路。

- (2) 在图 1-14 的电路中, 方框代表电源或电阻, 各支路上电流的参考方向如图所示, 则 $I_1 =$ _____, $I_2 =$ _____。

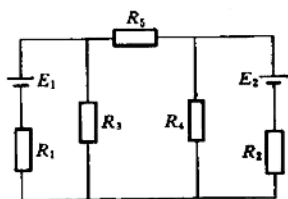


图 1-13

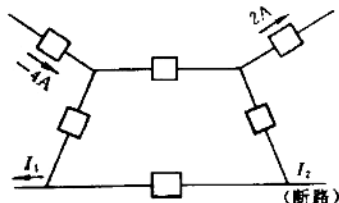


图 1-14

1.5 正弦交流电的基本概念

一、正弦交流电的产生

所谓**交变电流**（简称**交流电**）就是它的大小和方向随时间而作**周期性交替变化**的电流。图 1-15（a）所示是正弦规律变化的交变电流。当时间 $t = 0$ 时，瞬时电流为零；随着时间的增加，电流逐渐增大，当达到最大值后，又逐渐减少到零；然后电流反方向流动（此时电流为负值，曲线在横轴的下方），逐渐增大到最大值，而后又减少到零；这样周而复始地进行，称为周期变化。大小、方向按正弦规律变化的电流称为正弦交变电流。

图 1-15（b）所示的交变电流，其变化是周期性的，但变化规律不是正弦的，所以称为非正弦交变电流。

发电机产生的正弦电动势可表示为：

$$e = E_m \sin(\omega \cdot t + \varphi)$$

电压和电流的正弦函数表达形式如下：

$$u = U_m \sin(\omega \cdot t + \varphi)$$

$$i = I_m \sin(\omega \cdot t + \varphi)$$

上述表达式称为交流电的解析式或瞬时方程式。

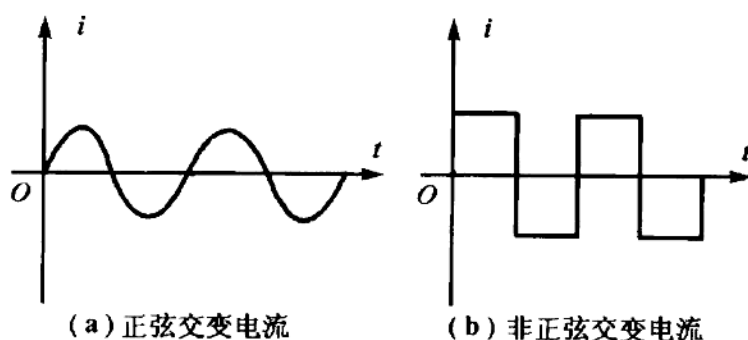


图 1-15 交变电流

二、表征正弦交流电的物理量

1、瞬时值、最大值和有效值

①瞬时值

正弦交流量的大小和方向是随时间变化的。某一时刻交流量的大小称为交流量在该时刻的瞬时值，分别用 e 、 u 和 i 来表示电动势、电压和电流的瞬时值。

在交流量的正弦曲线上，不同时刻，在其对应的纵轴上可以找到某一量，这就是交流量在该时刻的瞬时值。

②最大值

正弦量在一次交变中出现的最大瞬时值,称为正弦量的最大值(或叫幅值)。用符号 E_m 、 U_m 、 I_m 表示最大值。

③有效值

交流电的有效值是根据电流的热效应来规定的。让交流电和某一直流电通过同样阻值的电阻,如果它们在同一时间里产生的热量相等,就把这一直流电的数值叫做这个交流电的有效值。用符号 E 、 U 、 I 表示交流量的有效值。

④交流电的有效值和最大值之间的关系是

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = 0.707 E_m; \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0.707 U_m; \quad I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0.707 I_m$$

我们平常所说的交流电的电压或电流的大小,都是指交流电的有效值。一般交流电流表和交流电压表测量的数值,也都是交流电的有效值。

2、周期、频率和角频率

(1)周期

交流量的大小和方向是随时间作周期性变化的。交流量变化一周所需要的时间,称为交流量的周期,用符号 T 表示,单位是 s (秒)。也常用 ms (毫秒)、 μs (微秒)或 ns (纳秒)作单位。

(2)频率

交流量每秒变化的周期数称为交流量的频率,用符号 f 表示。显然,

$$f = \frac{1}{T}$$

频率的单位是“ $1 / \text{秒}$ ”,称为赫[兹],用符号 $H z$ 表示。当频率很高时,常用千赫($k H z$)或兆赫($M H z$)作单位,

(3)角频率

瞬时值表达式 $u = U_m \sin \omega t$ 中的 ω 表示交流量在单位时间内变化的角度(电角度)叫做角频率,交流量每完成一次交变,相当于经历 2π 弧度的角度的变化,故它和周期、频率的关系是

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

ω 的单位为 rad/s (弧度/秒)。对于一对磁极的交流发电机,角频率和转子的角速度相等。

另外描述正弦交流电的物理量还有相位、初相和相位差。

如正弦电动势的解析式(即瞬时表达式):

$$e = E_m \sin(\omega \cdot t + \varphi)$$

其中 $(\omega t + \varphi)$ 称为正弦交流量的相位角,简称相位。 φ 是 $t = 0$ 时的相位角,叫做正弦交流量的初相角,简称初相。它反映了正弦交流量在计时起点的状态。

两个同频率正弦量相位之差称为相位差,用字母 $\Delta \varphi$ 表示。如设两个交流电流为

$$i_1 = I_{1m} \sin(\omega \cdot t + \varphi_1) \quad i_2 = I_{2m} \sin(\omega \cdot t + \varphi_2)$$