

高等学校试用教材

# 电 路

(电工原理 I)

西安交通大学邱关源主编

人民教育出版社

高等学校试用教材

# 电 路

(电工原理 I)

西安交通大学邱关源主编

人 民 教 育 出 版 社

## 内 容 提 要

本书系根据1977年11月在合肥召开的全国高等学校工科基础课电工、无线电教材编写会议所通过的编写大纲编写的,并经1978年2月在西安召开的审稿会议审查通过,作为试用教材,供高等工业院校电力类专业使用,同时也照顾到电子类专业的需要。

本书共包括十八章,即电路的基本概念和基本定律、直流电路的分析方法、正弦电流电路的基本概念、符号法、电路中的谐振、互感、三相电路、非正弦周期电流电路、简单电路中的过渡过程、傅里叶变换与拉普拉斯变换、二端口网络、多端元件和受控电源、矩阵、网络图论和网络方程、状态方程、计算方法、非线性电阻电路、磁路和铁心线圈。每章均有习题,书末有习题答案。

本书定名为《电路》,括号中的电工原理 I 是为照顾传统名称而附注的。

高等学校试用教材

电 路

(电工原理 I)

西安交通大学邱关源主编

\*

人民教育出版社出版

新华书店上海发行所发行

浙江洛舍印刷厂印装

\*

1978年5月第1版 1981年4月第4次印刷

书号 15012·054 定价 1.65元

## 序 言

本书系根据1977年11月在合肥召开的高等学校工科基础课电工、无线电教材编写会议所通过的编写大纲编写的。

本书内容分为两大部分。第一部分(一至十一章、十八章)包括直流电路、正弦电流电路、非正弦周期电流电路、线性电路的过渡过程(经典法和运算法)、二端口网络以及磁路等,这部分属于电路理论的传统内容。第二部分(十二至十七章)包括多端元件和受控电源、网络图论、状态方程和计算非线性电阻电路的牛顿-拉夫逊法等,还有两章有关数学的内容即矩阵和计算方法,这部分反映了现代网络理论的某些新内容,以计算机辅助分析的基础知识和有源电路的初步分析为主。

书中对传统内容进行了精选,保证了必须的常用基础知识,删去了一些不常用的和陈旧的内容。在体系安排上,第二部分内容全部放在后面,可供选用,以便在使用时具有一定的灵活性。

本书只讨论集中参数电路;分布参数电路移至电磁场(电工原理II)。

本书的基本部分为一至十一章,其中个别节如§10-9网络函数和§10-10复频率平面、极点和零点可作为参考内容。十二、十四两章也建议作为基本内容,但§12-6密勒定理可以不讲。十五章一般作为参考内容。十八章带有附录性质,如这部分内容放在有关后续课程中进行较为合适,可以不讲。十三章属于数学内容,但为学习以后几章所必须。十六章的内容是电路的计算机辅助分析所必须具备的基础知识。这两章究竟在那门课程中讲授为宜,以及如何处理,都尚待进一步研究,本书暂集中为两章且保留在正

文中。十七章可灵活处理。

估计总的讲课时数(包括本书全部内容)约 110 学时。

本书的一至九章和十八章是以我校 1973 年在校内发行的《电工基础》上、下册的一至十一章为基础进行改写的,参加该书这些部分编写工作的有:邱关源、范丽娟、刘国柱、夏承铨、宁超、肖衍明、周佩白、黄东泉、刘正兴、潘经慧等同志。这些部分的改写以及本书其余部分均由邱关源负责执笔。书稿最后的文字润色工作由黄东泉负责。

本书承哈尔滨工业大学周长源和刘润两位同志初审,提出了宝贵的修改意见,谨致以衷心的感谢。书稿经 1978 年 2 月在西安召开的审稿会议讨论通过。参加会议的有二十余单位,其中有哈尔滨工业大学、清华大学、重庆大学、浙江大学、南京工学院、中国科技大学、上海交通大学、北京工业大学、河北电力学院、成都工学院、吉林电力学院、河北水利水电学院以及其他(包括西安地区)十余所高等院校的代表。会上承兄弟院校的代表们提出宝贵修改意见,谨致以衷心的感谢。

限于我们的水平以及时间仓促,书中不妥和错误之处恐不在少数,希望读者予以批评指出。意见请寄西安交通大学电工原理教研室。

编者

1978 年 3 月

# 目 录

<b>第一章 电路的基本概念和基本定律</b> .....	1
§ 1-1 电路 .....	1
§ 1-2 电流、电压和电动势 .....	2
§ 1-3 电流、电压的参考方向 .....	8
§ 1-4 理想电路元件、电路、电网络 .....	10
§ 1-5 欧姆定律、电阻和电导 .....	12
§ 1-6 焦耳-楞次定律、功率 .....	16
§ 1-7 基尔霍夫定律 .....	19
§ 1-8 电阻的串联 .....	25
§ 1-9 电阻的并联 .....	26
§ 1-10 电阻的串并联 .....	30
§ 1-11 电流源 .....	32
§ 1-12 电源的等值变换 .....	34
习题 .....	36
<b>第二章 直流电路的分析方法</b> .....	44
§ 2-1 直流电路的一般分析方法 .....	44
§ 2-2 支路电流法 .....	45
§ 2-3 回路电流法 .....	50
§ 2-4 节点电压法 .....	56
§ 2-5 迭加原理 .....	64
§ 2-6 戴维南定理 .....	72
§ 2-7 诺顿定理 .....	82
§ 2-8 $\gamma$ 形网络与 $\Delta$ 形网络的等值互换 .....	83
习题 .....	89
<b>第三章 正弦电流电路的基本概念</b> .....	96
§ 3-1 交流电的基本概念 .....	96
§ 3-2 正弦电流和电压 .....	99
§ 3-3 周期电流的有效值 .....	104
§ 3-4 电阻中的正弦电流 .....	106

§ 3-5	电感	109
§ 3-6	电感中的正弦电流	114
§ 3-7	电容	118
§ 3-8	电容中的正弦电流	123
§ 3-9	电阻、电感、电容的串联	127
§ 3-10	正弦电流电路的功率	134
§ 3-11	实际电路元件	138
	习题	142
<b>第四章</b>	<b>符号法</b>	<b>145</b>
§ 4-1	复数	145
§ 4-2	复数的运算	148
§ 4-3	符号法的理论	153
§ 4-4	应用符号法计算电阻、电感、电容串联电路·复阻抗	162
§ 4-5	应用符号法计算电阻、电感、电容并联电路·复导纳	168
§ 4-6	复阻抗和复导纳的等值互换	172
§ 4-7	应用符号法计算正弦电流电路	174
§ 4-8	复功率	183
§ 4-9	功率因数的提高	187
	习题	192
<b>第五章</b>	<b>电路中的谐振</b>	<b>198</b>
§ 5-1	串联电路的谐振	198
§ 5-2	串联谐振电路的谐振曲线和选择性	206
§ 5-3	并联电路的谐振	212
§ 5-4	串并联电路的谐振	216
	习题	218
<b>第六章</b>	<b>互感</b>	<b>222</b>
§ 6-1	互感	222
§ 6-2	具有互感电路的计算	232
§ 6-3	空心变压器	239
	习题	242
<b>第七章</b>	<b>三相电路</b>	<b>245</b>
§ 7-1	对称三相电动势的产生·三相电路	245
§ 7-2	星形联接和三角形联接	249
§ 7-3	对称三相电路的计算	256
§ 7-4	不对称三相电路的概念	262
§ 7-5	三相电路的功率	265
	习题	270

<b>第八章 非正弦周期电流电路</b> .....	275
§ 8-1 非正弦周期电流.....	275
§ 8-2 周期函数分解为傅里叶级数.....	277
§ 8-3 有效值、平均值和平均功率.....	286
§ 8-4 非正弦周期电流电路的计算.....	290
§ 8-5 对称三相电路中的高次谐波.....	296
习题.....	300
<b>第九章 简单电路中的过渡过程</b> .....	305
§ 9-1 出现过渡过程的原因.....	305
§ 9-2 经典法概述.....	310
§ 9-3 $R$ 、 $C$ 短接时的过渡过程.....	312
§ 9-4 $R$ 、 $C$ 电路与直流电压接通后的过渡过程.....	317
§ 9-5 $R$ 、 $C$ 电路的实例.....	324
§ 9-6 $R$ 、 $L$ 电路中的过渡过程.....	326
§ 9-7 $R$ 、 $L$ 、 $C$ 电路的放电过程.....	334
§ 9-8 $R$ 、 $L$ 、 $C$ 电路的充电过程.....	349
习题.....	356
<b>第十章 傅里叶变换与拉普拉斯变换</b> .....	363
§ 10-1 傅里叶级数的复数形式.....	363
§ 10-2 傅里叶积分.....	368
§ 10-3 拉普拉斯变换.....	372
§ 10-4 拉普拉斯变换的基本性质.....	375
§ 10-5 单位阶跃函数和单位脉冲函数及其拉氏变换.....	379
§ 10-6 电路定律的运算形式.....	383
§ 10-7 拉氏反变换.....	388
§ 10-8 实例.....	394
§ 10-9 网络函数.....	398
§ 10-10 复频率平面、极点和零点.....	401
§ 10-11 卷积.....	408
习题.....	412
<b>第十一章 二端口网络</b> .....	415
§ 11-1 二端口网络.....	415
§ 11-2 二端口网络的方程和参数.....	417
§ 11-3 二端口网络的开路阻抗、短路阻抗、特性阻抗和传播系数.....	424
§ 11-4 二端口网络的转移(传递)函数.....	431
§ 11-5 二端口网络的等值电路.....	433
习题.....	435



<b>第十二章 多端元件和受控电源</b> .....	437
§ 12-1 多端元件 .....	437
§ 12-2 受控电源 .....	438
§ 12-3 运算放大器 .....	442
§ 12-4 理想变压器 .....	449
§ 12-5 回转器 .....	450
§ 12-6 密勒定理 .....	451
习题 .....	454
<b>第十三章 矩阵</b> .....	457
§ 13-1 矩阵的基本定义 .....	457
§ 13-2 矩阵的加法 .....	461
§ 13-3 矩阵的乘法 .....	461
§ 13-4 矩阵的逆 .....	469
§ 13-5 二端口网络方程的矩阵表示 .....	472
习题 .....	476
<b>第十四章 网络图论和网络方程</b> .....	478
§ 14-1 概述 .....	478
§ 14-2 网络的图*及一些基本定义 .....	479
§ 14-3 关联矩阵 .....	483
§ 14-4 节点法 .....	487
§ 14-5 回路法 .....	494
§ 14-6 割集和割集法 .....	498
§ 14-7 具有受控电源的电路的分析 .....	507
§ 14-8 特勒根定理* .....	514
习题 .....	519
<b>第十五章 状态方程</b> .....	523
§ 15-1 电路的状态和状态变量 .....	523
§ 15-2 状态方程的直观编写方法 .....	525
§ 15-3 状态方程的系统编写方法 .....	528
§ 15-4 状态方程的求解 .....	537
习题 .....	540
<b>第十六章 计算方法</b> .....	551
§ 16-1 高斯消去法 .....	551
§ 16-2 主元高斯消去法 .....	556
§ 16-3 高斯-约当消去法·矩阵的求逆 .....	558
§ 16-4 迭代法 .....	562
§ 16-5 微分方程的数值解法 .....	565

习题 .....	570
<b>第十七章 非线性电阻电路</b> .....	<b>572</b>
§ 17-1 非线性元件的概述 .....	572
§ 17-2 非线性电阻电路的图解法 .....	580
§ 17-3 牛顿-拉夫逊法 .....	583
§ 17-4 非线性电阻电路的分析 .....	590
§ 17-5 电力系统潮流计算简介 .....	595
习题 .....	597
<b>第十八章 磁路和铁心线圈</b> .....	<b>599</b>
§ 18-1 磁场 .....	599
§ 18-2 铁磁物质 .....	601
§ 18-3 磁路和磁路定律 .....	604
§ 18-4 恒定磁通无分支磁路的计算 .....	609
§ 18-5 恒定磁通分支磁路的计算 .....	613
§ 18-6 交变磁通下的铁心损失 .....	614
§ 18-7 交变磁通磁路中电流和磁通的波形 .....	615
§ 18-8 铁心线圈 .....	617
习题 .....	621
<b>习题答案</b> .....	<b>623</b>

# 第一章 电路的基本概念和基本定律

## 内 容 提 要

本章复习电流、电压和电动势的基本概念,以及欧姆定律,焦耳-楞次定律,介绍基尔霍夫两定律,并对电阻串并联电路进行了分析。另外引进了电路理想元件,电压源和电流源,电流、电压的参考方向等重要基本概念。

## § 1-1 电 路

电路是由电工设备组成的总体,它提供了电流通过的途径。在电路中,随着电流的通过,进行着从其他形式的能量转换成电能、电能的传输和分配、以及把电能转换成所需要的其他形式能量的过程。典型的例子是电力系统,发电厂的发电机把热能或原子能或水能等转换成电能,通过变压器、输电线等输送给各用电单位,那里又把电能转换成机械能、光能、热能等。这样构成了一个极为复杂的电路或系统。我们把供给电能的设备称为电源,而把用电设备称为负载。

电路的另一重要作用是信号的处理,通过电路把施加的信号(称为激励)变换或“加工”成为其他所需要的输出(称为响应)。举例来说,微弱的信号需要经过放大后才能满足工作的要求,象收音机或电视接收机在接收无线电信号时就是如此。因而有专为放大信号用的电路,称为放大器。在收音机或电视接收机中还有所谓调谐电路,其功能是从许多接收到的由各个发射台发出的不同信

号中专门选择出所需要的信号而排除其他信号。象放大器和调谐电路的作用就是处理激励信号使之成为所要求的响应。

在其他许多场合,如自动控制设备,计算机,通讯设备等方面,有种类繁多,形形色色的各种电路。

本书主要内容是电路的分析,它研究电路中所发生的电磁现象和过程,探讨决定电路性状\*的基本规律,并介绍各种电路的定量计算方法。在电路问题中是用电流、电荷、电压或磁通等物理量来描述其中的过程的,例如各种信号就是用随时间变化的电压或电流来表示的。同时,在分析研究时是把实际的具体电路抽象为由一些理想电路元件所构成的电路来进行的。值得提出的是电路的基本定律只有几个,理想的电路元件也只有几个;但是无论简单的还是复杂的具体电路都可以通过这些少量元件所构成的整体来充分地描述;同时依据这些少量的基本定律就足以对它们进行分析和计算。

## § 1-2 电流、电压和电动势

带电质点有规则的运动这一物理现象称为电流。在导体中,带电质点将在电场作用下作有规则的运动。如在金属导体中,带电质点是带负电的自由电子,它在电场作用下将逆着电场方向运动;而在电解液体中,带电质点则是带正电和带负电的离子,在电场作用下,正离子顺着电场方向运动,负离子则逆着电场方向运动,于是形成了电流。导体中的这种电流叫做传导电流。

用来衡量电流强弱的物理量是“电流强度”。电流强度在数值上等于单位时间内穿过导体某截面 $S$ (见图 1-1)的电量的代数和;并以正电荷运动的方向作为电流的实际方向(显然,这方向与负电

\* 含有性能,状态,表现等意思。

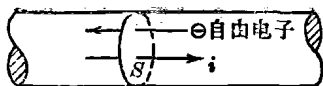


图 1-1 电流的图示

荷运动的方向相反)。设在极短的时间  $dt$  内穿过导体某截面  $S$  的电量的代数和为  $dq$ ，则电流强度

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

现在，工程上逐步采用国际单位制 SI。这种单位制，以米(M)为长度的基本单位，千克(kg)为质量的基本单位，秒(s)为时间的基本单位和安培(A)为电流强度的基本单位。这时电荷量的基本单位是库仑(C)，用国际制基本单位表示时则为秒·安培(s·A)。

电流强度的单位是安培，简称“安”。有时安培这个单位嫌小，如计量大容量发电机的电流和电力系统中的短路电流时，常取千安(kA)为电流强度的单位。但在计量微弱电流，如晶体管电路中的电流时，又嫌安培这个单位太大，而用毫安(mA)，微安( $\mu$ A)或纳安(nA)为单位。它们之间的换算关系是：

$$\begin{aligned} 1 \text{ 千安} &= 10^3 \text{ 安} & 1 \text{ 毫安} &= 10^{-3} \text{ 安} \\ 1 \text{ 微安} &= 10^{-6} \text{ 安} & 1 \text{ 纳安} &= 10^{-9} \text{ 安} \end{aligned}$$

因为电流强度是电工中常用物理量之一，为了简便，通常简称为电流。这样，电流一词不仅代表一种物理现象，而且也代表一个物理量。

电流可能随时间变动，也可能不随时间变动。随时间而变的电流就叫做变动电流，用小写字母  $i$  表示。大小和方向都不随时间变化的电流则称为恒定电流，简称直流，用大写字母  $I$  表示。

在图 1-2 中， $a$  和  $b$  是电池的两个电极， $a$  是正极带有正电荷， $b$  是负极带有负电荷。这些电荷在空间产生了电场。在这个电场

的作用下,正电荷便从电极  $a$  通过导体 1 移到了电极  $b$  (实际上是

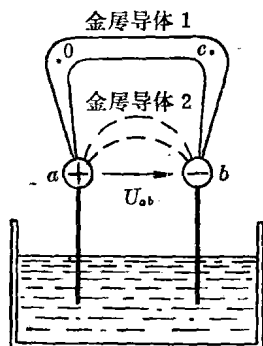


图 1-2 电压

负电荷在电场作用下,由电极  $b$  移到电极  $a$ , 两者是等效的)。我们知道,在电场中,电荷在电场力作用下移动了一段距离,电场力就做了功,做功的能量来源就是电场中的能量。反过来,如果电荷逆着它所受电场力的方向移动,就需要外力克服电场力做功,而把外界能量转换成电场能储存在电场之中。这样在图

1-2 中,由于电场作用,正电荷通过导体 1 从电极  $a$  移到电极  $b$ ,电场对正电荷做了功。设电场把正电荷  $q$  从  $a$  点移到  $b$  点所做的功为  $A_{ab}$ ,则电场中  $a$  点到  $b$  点间的电压

$$U_{ab} = \frac{A_{ab}}{q} \quad (1-2)$$

也就是说,  $a$  点到  $b$  点间的电压在量值上等于电场把单位正电荷从  $a$  点移到  $b$  点所做的功。电压的极性是  $a$  点为正,  $b$  点为负;有时,也讲到电压的方向,在图 1-2 中,电压的方向则由  $a$  点指向  $b$  点。

如果在电场中,把单位正电荷从  $a$  点移到  $b$  点电场力做了功,电场能量有所减少;那么在外力作用下,逆着电场的方向,把单位正电荷从  $b$  点移到  $a$  点的过程中,外力做了功,电场能量将有所增加。或者说,电场对单位正电荷作了负功。这两部分功的大小应该相等但符号相反。所以  $b$  点到  $a$  点的电压 (其方向由  $b$  点指向  $a$  点)

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

这样看来,对两点间的电压,必须讲明哪个点是起点,哪点是终点。在采用双下标记法时 (例如  $U_{ab}$ ), 前一个下标 (例如  $a$ ) 代表起点,

后一个下标 (例如  $b$ ) 代表终点。电压的方向则由起点指向终点。初学时对此常易忽视, 应加以注意并养成习惯。

同样, 按电压随时间变动的情况, 我们把电压分成“变动电压”和“恒定电压”。如果电压的大小和方向都不随时间而变动, 这样的电压就叫做恒定电压或直流电压, 用大写字母  $U$  来表示。

在恒定电场 (例如图 1-2 电池两个电极上电荷所产生的电场) 中, 电场强度的大小和方向都不随时间而变。在这种电场中, 任意两点间的电压都是直流电压。可以证明: 在恒定电场中, 任意两点间的电压只和这两个点 (始点和终点) 的位置有关, 而和电荷移动的路径无关。如图 1-2 中, 在电场作用下, 不论正电荷沿导体 1, 还是沿导体 2, 从  $a$  点移到  $b$  点, 它们的电压都是  $U_{ab}$ 。

为了便于分析, 在恒定电场中, 常选一点  $O$  为参考点, 而把任意点  $a$  与参考点  $O$  之间的电压  $U_{a0}$  称为  $a$  点的电位  $\varphi_a$ 。在这样规定下, 参考点  $O$  的电位  $\varphi_0 = 0$ 。参考点  $O$  常称为电位参考点。参考点的选择是任意的, 选取不同的点作为电位参考点, 场中各点的电位数值也就不同了。但是, 电位参考点一经选定后, 那么各点的电位就只能有一个数值, 这就是所谓的“电位单值性”。

现在来讨论电场中  $a$ 、 $b$  两点的电位  $\varphi_a$ 、 $\varphi_b$  和两点间电压  $U_{ab}$  的关系。因为

$$\varphi_a = U_{a0} \quad \varphi_b = U_{b0}$$

而

$$\varphi_a - \varphi_b = U_{a0} - U_{b0} = U_{a0} + U_{0b}$$

这个  $U_{a0} + U_{0b}$  就是电场将单位正电荷从  $a$  点经过电位参考点  $O$  移到  $b$  点所做的功。前面已经指出, 电场两点间的电压是和移动电荷的路径无关的, 所以  $U_{a0} + U_{0b}$  便是  $U_{ab}$ 。这样一来, 我们可以写出

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b \quad (1-3)$$

亦即电场中  $a$  点到  $b$  点间的电压等于  $a$ 、 $b$  两点电位的差。所以,

电压又有“电位差”之称。

在国际单位制中，电压和电位的单位都是伏特（焦耳/库仑），简称伏（V）。计量高电压（如高压输电线电压）时，常取千伏（kV）为单位；计量微小电压（如晶体管电路中某些电压）时，则取毫伏（mV）或微伏（ $\mu\text{V}$ ）为单位。它们之间的换算关系是：

$$1 \text{ 千伏} = 10^3 \text{ 伏} \quad 1 \text{ 毫伏} = 10^{-3} \text{ 伏} \quad 1 \text{ 微伏} = 10^{-6} \text{ 伏}$$

**例 1-1** 图 1-2 中，设  $U_{ab} = 3$  伏， $U_{ac} = 2$  伏。如分别取  $b$  点和  $a$  点作电位参考点，求  $a$ 、 $b$ 、 $c$  三点的电位。

**解** (1) 取  $b$  点为电位参考点，则  $\varphi_b = 0$ ，而

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b$$

所以 
$$\varphi_a = U_{ab} + \varphi_b = 3 + 0 = 3 \text{ V}$$

又 
$$U_{ac} = \varphi_a - \varphi_c$$

所以 
$$\varphi_c = \varphi_a - U_{ac} = 3 - 2 = 1 \text{ V}$$

(2) 如取  $a$  点为电位参考点，则  $\varphi_a = 0$ ，而

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b$$

所以

$$\varphi_b = \varphi_a - U_{ab} = 0 - 3 = -3 \text{ V}$$

又

$$U_{ac} = \varphi_a - \varphi_c$$

所以

$$\varphi_c = \varphi_a - U_{ac} = 0 - 2 = -2 \text{ V}$$

可见，电位参考点变了，各点电位亦随之而变。但电位参考点一经选定后，各点的电位就只有一个数值。至于电位差当然不随电位参考点而变。从上面例中还可以看出，不论选哪一点作为电位参考点， $c$  点的电位总是低于  $a$  点的电位（ $\varphi_c < \varphi_a$ ），这是因为  $U_{ac} > 0$  的关系。所以电压为正时，沿着电压的方向电位在降落。因而有的书上又把电压叫做电位降（或习惯上常称为“电压降”）。



虽然,对直流电压,它有许多别的名称,如电位差,电压降,电位降等,但这些名称统统代表的是电压,只要我们对电压的物理概念弄清楚,这些名词也就不难记住了。

从上面的讨论中,我们知道正电荷在电场作用下,总是从高电位处(如正极  $a$ )向低电位处(如负极  $b$ )移动的。如果只有电场力对电荷作用,那么正电荷移动的结果,势必改变电荷的分布。随着时间的推移,正、负极上的电荷只会越来越少,它所产生的电场也就越来越弱,最后等于零,于是导体中的电流也只能是短暂的,不能持续地流动。

为了要维持导体中的电流,必须有一种外力源源不断地把正电荷从低电位处(如负极  $b$ )移到高电位处(如正极  $a$ )。在电源内部,就存在着这种外力。如在电池中,由于电极和电解液的化学反应,在它们的接触处就有这种外力存在。在电源内部,同样也有电场,但是外力超过了电场力,因此形成正电荷从低电位到高电位的连续运动。在正电荷运动过程中,外力对正电荷做了功。把单位正电荷在电源内部从负极  $b$  移到正极  $a$ ,外力所做的功在数值上等于电动势,用字母  $e$  表示。电动势  $e$  的方向由负极  $b$  指向正极  $a$ ,也就是从电源的低电位处指向电源的高电位处。换句话说,电动势  $e$  是正时,电动势的方向是电位升高的方向。

在国际单位制中,电动势的单位也是伏特。

直流电源的电动势的大小和方向,都是不随时间改变的(直流电动势用大写字母  $E$  来表示)。如蓄电池的电动势约为 2 伏,干电池的电动势约为 1.5 伏。

当电源的正负极外部没有接通导体时,电源处于“开路”状态。电源开路时,电源中没有电荷在移动,这时电场力刚好和外力相平衡。换句话说,电场力和外力对正电荷作功的本领是相同的。这样,电源开路时,电源正负极间的电压数值上与电动势相等。