

中等专业学校试用教材

电力类专业适用

电工基础

上册

张洪让 主编



人民教育出版社

中等专业学校试用教材

电力类专业适用

电 工 基 础

上 册

张 洪 让 主 编

人 民 教 育 出 版 社

内 容 提 要

本书系按中等专业学校三年制及四年制“发电厂及电力系统”专业及“电力系统继电保护”专业教学计划的要求编写的教材。

全书分电工理论基础和电工测量两篇。第一篇共十三章,以路为主体,依次阐述直流电路、正弦和非正弦交流电路、线性电路过渡过程、磁路及交流铁芯线圈、分布参数电路稳定状态,并介绍对称分量法及运算法等,电场和磁场的基本内容按路的需要介绍。第二篇共五章,从使用出发,介绍各种常用机电类电工仪表和测量方法。全书重视对物理意义的解释,重视有关“正方向”的叙述。书中配备较多例题,有适当的小结,各章附有较多习题,有助于读者自习和思考。

本书分上、下两册出版,上册包括第一章至第八章,下册包括第九章至第十八章及附录。

本书供中等专业学校电力类有关专业教学使用,也可供有关工程技术人员参考。

中等专业学校试用教材

电 工 基 础

上 册

张洪让 主编

*

人民教育出版社出版

新华书店上海发行所发行

浙江天台印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/32 印张 18.5 字数 404,000

1979年4月第1版 1981年4月第3次印刷

印数 100,001—130,000

书号 15012·0149 定价 1.35 元

前 言

本书系按中等专业学校三年制及四年制“发电厂及电力系统”专业及“电力系统继电保护”专业教学计划的要求编写的电工基础课的教材。全书分电工理论基础和电工测量两篇。第一篇以路为主体,电场和磁场的基本内容按路的需要介绍。第二篇从使用出发,按测量对象介绍各种常用机电类电工仪表和测量方法。学生学习本课程时,应具备物理课中的电磁学和数学课中的行列式、微积分、傅立叶级数、常系数线性常微分方程等基础知识。

本书由张洪让主编;初稿中,第一、二、五~八、十三章系张洪让编写,第三、九、十章系湖南电力学校刘汉川编写,第四、十一、十二章系哈尔滨电力学校陈介武编写,第十四~十八章系南京电力学校沈瑞华、张洪让合编。全稿经西安电力学校电工教研组审阅后,由张洪让、沈瑞华按照审阅意见作了修改。

在编写本书的全部过程中,水利电力部各有关中等专业学校电工教研组的同志们提过很多宝贵意见,又承金素娟同志绘制全书插图,统此致谢。

主编者水平有限,书中不妥及错误之处可能不少,希读者批评指正。

主 编

1978.12.25

目 录

前言

第一篇 电工理论基础

引言	1	3-7 电容器的并联和串联	98
第一章 直流电路的基本概念	2	3-8 电容器的质量标准和种类	100
1-1 电场和电场强度	2	小结	102
1-2 电压和电位	7	习题	102
1-3 电流	9	第四章 电磁与电感	105
1-4 电势	10	4-1 磁场和磁感应强度	105
1-5 电路	12	4-2 安培环路定律	109
1-6 电阻和电导	14	4-3 磁通	113
1-7 欧姆定律	16	4-4 电磁感应	115
1-8 克希荷夫第一定律	17	4-5 线圈的自感	120
1-9 克希荷夫第二定律	20	4-6 线圈的自感电势与电流的关系	123
1-10 电功率和电能	24	4-7 线圈的磁场能量	125
1-11 电源和反电势负载	26	4-8 互感和互感电势	126
1-12 叠加原理	29	小结	130
小结	30	习题	131
习题	31	第五章 正弦交流量	136
第二章 直流电路的分析计算	36	5-1 交流量和周期性交流量	136
2-1 电阻的串联	36	5-2 正弦交流量	138
2-2 电阻的并联	38	5-3 相位差	142
2-3 电阻的复联	40	5-4 有效值	144
2-4 支路电流法	43	5-5 用向量表示正弦量	146
2-5 回路电流法	45	5-6 同频正弦量相加减	147
2-6 结点电位法	49	小结	152
2-7 电势源和电流源的等效变换	52	习题	153
2-8 等效电源法	55	第六章 正弦交流电路的基本概念	156
2-9 星形和三角形电阻联接的等效变换	62	6-1 正弦交流电路中的电阻元件	156
2-10 四端网络	65	6-2 正弦交流电路中的电感元件	160
2-11 非线性串联电路的图解法	73	6-3 正弦交流电路中的电容元件	163
小结	75	6-4 交流电路的克希荷夫定律和叠加原理	166
习题	76	6-5 电阻、电感串联电路	169
第三章 电容器	84	6-6 电阻、电感、电容串联电路	174
3-1 电容器的充电和放电现象	84	6-7 串联谐振	182
3-2 电容器的电容量	86	6-8 电阻、电感串联再与电容并联的电路	186
3-3 电通·高斯定理	88	6-9 并联谐振	190
3-4 一些电容器的电容	90	6-10 功率因数的提高	192
3-5 电容器的电流与电压的关系	94	小结	195
3-6 电容器的电场能量和极间电场力	95	习题	196

第七章 符号法	203	8-2 三相电源和三相负载的连接	242
7-1 复数	203	8-3 三相电路中的相电压和线电压	244
7-2 用复数表示正弦量	207	8-4 三相电路中的相电流、线电流和中线电流	246
7-3 复数形式的欧姆定律·复数阻抗和复数导纳	211	8-5 三相电路中的功率	249
7-4 复数功率	217	8-6 对称三相电路的分析计算	252
7-5 符号法	219	8-7 中点电压法·中点位移	255
7-6 有互感的正弦交流电路的计算	228	8-8 三相电压和电流的对称分量	260
小结	232	8-9 对称分量法的应用	266
习题	233	小结	275
第八章 三相正弦交流电路	240	习题	276
8-1 对称三相正弦交流电势	240	部分习题答案	282

第一篇 电工理论基础

引 言

随着生产力的发展,电能工业、农业、交通运输业、各种科学技术部门以及日常生活中的应用越来越广泛,这是因为电能具有下列主要优点:

(1) 电能易于转换。电能可以方便地由热能、水能、化学能、原子能等转换而得,成为廉价的动力来源。电能又可以方便地转换为其它形式的能量,如机械能、热能、光能、化学能等。

(2) 电能易于输送。电能可以方便地输送到远距离的地方,方便地进行分配。而且设备简单,损失小,效率高。

(3) 电能易于控制。利用电磁原理控制和调节机器,准确而又迅速,能够做到自动控制、自动调整和自动保护。

电能的这些优点,使得电力工业成为先行的重要工业。大力发展电力工业,提高电工技术水平,实现自动化和电气化,对加速实现我国社会主义农业、工业、国防和科学技术四个现代化,提高人民的物质和文化生活水平,有极其重要的意义。

电工技术发展到现在,已经分成许多专业部门。本篇的内容乃是各电工技术专业共同的理论基础。本篇的内容不同于物理学,而是利用物理学方面的基本理论,按照工程需要适当发展,偏重于工程分析计算。本篇中并不具体分析每种电工设备,而只分析电工设备中所共有的电磁部分。本篇的内容是由物理学过渡到专业学科之间的桥梁。通过对本篇的学习,将使我们掌握电工设备中所发生的电磁现象和电磁过程的基本原理,基本分析计算方法和基本实验技能。

第一章 直流电路的基本概念

自然界中客观存在的一切都是物质。所有物质都在不断运动和变化着。电磁现象——电磁运动是物质的一种基本运动形式。电和磁之间是密切联系着的，它们是电磁场这个统一体的两个侧面。

所有电气设备的运行，都要依靠电流的作用。要产生电流，就要构成电路。一些电气设备中，为使磁场集中，就构成磁路。路是场的特殊情况。

电工理论的内容，总的说来，包含场和路两大部分。场的研究着重于从现象的本质阐明问题，路的方面着重于实用。场和路的知识都是不可缺少的，但路的知识是一般电气设备所离不开的，更有它实用上的重要性。本篇的内容以路为主。

电路有直流电路和交流电路之分。直流电路比交流电路简单。我们从直流电路开始介绍。在本章中，先概述物理学中一些电场的知识，然后围绕电流的形成和电路的作用，介绍直流电路中的基本物理量（电压和电位、电流强度、电势、电阻、电功率）和基本规律（欧姆定律、克希荷夫第一定律、克希荷夫第二定律、叠加原理）。关于直流电路的分析计算方法将在下章介绍。掌握电路的基本物理量和基本规律，是分析计算电路的基础，认识直流电路又是认识交流电路的基础，因此本章的内容是重要的。

电磁学有多种不同的单位制，现在国际上电气工程中，通用的单位制是国际单位制（用SI表示），本书也采用这样的单位制，工程上要用到的其它单位制中的某些单位也要介绍。同一规律，采用的单位制不同，其表达式就可能不同。关于国际单位制和其它单位制的关系，可参看附录一。

1-1 电场和电场强度

一、电荷

所有物体都是由分子组成的，各种分子又是由原子组成的。原子的直径大约为 $(1\sim 3)\times 10^{-8}$ 厘米。原子是由一个原子核和一些电子组成的，原子的质量几乎全部集中于原子核，电子围绕原子核不停地高速运动着，并且受到原子核的束缚。原子核又是由质子和中子组成的。

质子带有正电荷，中子不带电，电子带有负电荷。带电体所带电荷的多少叫做电量。国际单位制中，电量的单位是库仑（简称库，用符号C表示）。每一个电子所带的电量和每一个质子所带的电量相等，为 1.6×10^{-19} 库。1库约等于 6.24×10^{18} 个电子所带的电量。

电荷只有正电荷和负电荷两种。

正常情况下，原子的核外电子数目和原子核中的质子数目相等，原子总起来不显电性，

即呈中性。中性的原子如果失去或者获得电子，就带电了。带电的原子叫做离子。中性的原子失去电子，就带正电，成为正离子；中性的原子获得电子，就带负电，成为负离子。

一个物体中含有等量的负电荷和正电荷时，不显电性，即呈中性。中性物体失去电子，就带正电；中性物体获得电子，就带负电。例如：通过摩擦，可以使一切物体带电；通过静电感应，可以使导体带电。

物体带电的根源是物体中电子数的减少或者增加。一个物体失去一些电子，必定有其它物体得到这些电子。电荷是客观存在的物质，既不能创造，也不能消灭，只能从一个物体转移到其它物体，这一结论叫做电荷守恒定律。

二、库仑定律

同性的两个电荷之间有排斥的力量，异性的两个电荷之间有吸引的力量。这就使得两个带同性电荷的物体之间有排斥的力量，两个带异性电荷的物体之间有吸引的力量。这种力叫做电场力。

在研究带电体间的相互作用力时，如果带电体本身的大小比它们之间的距离小得多，就可以认为分布在带电体上的电荷是集中于一点的，这样的带电体叫做点电荷。库仑定律指出：两个点电荷之间相互作用力的方向是沿着它们的连线的方向；力的大小和两个点电荷电量的乘积成正比，和两个点电荷间距离的平方成反比，还和电荷所处空间的媒质有关。

图 1-1 中画出了两个点电荷之间相互作用力的方向，图 a 是同性电荷相斥的情况，图 b 是异性电荷相吸的情况。

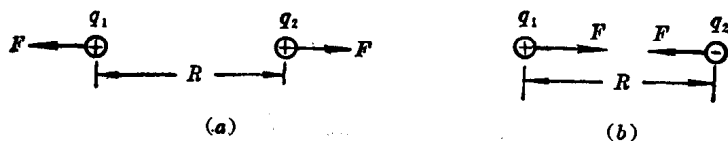


图 1-1

以 q_1 、 q_2 分别表示两个点电荷的电量， R 表示两个点电荷间的距离， F 表示两个点电荷间的相互作用力，则库仑定律的表达式如下：

$$F = k \frac{q_1 q_2}{R^2}$$

式中的 k 是比例常数，与电荷所处空间的媒质有关，并决定于所用的单位制。

国际单位制中，有四个与电磁学有关的基本物理量及相应的基本单位：长度以米(m)为单位；质量以千克(kg)为单位；时间以秒(s)为单位；电流强度以安培(A)为单位。其它量的单位则是根据其定义从这四个基本单位导出的。例如力的单位是牛顿(简称牛，1牛=1千克·米/秒²)，电量的单位是库(1库=1安培·秒)。

采用国际单位制时，即力 F 的单位为牛，电量 q_1 和 q_2 的单位为库，距离 R 的单位为米时，如果点电荷处在真空之中，根据实验结果，上式中的比例常数

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \times 10^9 \text{ 牛} \cdot \text{米}^2 / \text{库}^2$$

其中的

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \times 9 \times 10^9} = \frac{1}{36\pi \times 10^9} = 8.85 \times 10^{-12} \text{ 法/米}$$

叫做真空的介电常数,也叫真空的电容率。这里法是法拉的简称,法拉是电容的单位,在第三章中介绍。

这样,采用国际单位制时,真空中的库仑定律的表达式为

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{R^2} \quad (1-1)$$

当带电体不能看成点电荷时,它们之间的相互作用力不能按库仑定律计算,但它们的电量越大,相互作用力也越大;它们之间的距离越小,相互作用力也越大。

[例1] 物理学的静电学中所用的单位制也常用静电制,它以厘米、克、秒及静电制电量单位为四个基本单位。这一单位制中,真空中库仑定律的表达式为 $F = \frac{q_1 q_2}{R^2}$, 即规定 k 为一纯数且等于1,并以此来定电量的单位:真空中两个电量相同的点电荷相距1厘米,相互作用力为1达因时,每个电荷的电量为1静电制电量单位。试求国际单位制和静电制中两种电量单位间的关系。

解: 由式(1-1),真空中相距1米、电量同为1库的两个点电荷间的相互作用力为

$$F = 9 \times 10^9 \times \frac{1 \times 1}{1^2} = 9 \times 10^9 \text{ 牛}$$

因为1牛 = 10^5 达因,所以 9×10^9 牛 = 9×10^{14} 达因。

设1库 = x 静电制电量单位,按照静电制中的 $F = \frac{q_1 q_2}{R^2}$,并由1米 = 10^2 厘米,则

$$9 \times 10^{14} = \frac{x^2}{(10^2)^2}$$

$$x = 3 \times 10^9$$

所以

$$1 \text{ 库} = 3 \times 10^9 \text{ 静电制电量单位}$$

三、电场和电场强度

两个物体之间相互作用的机械力是靠直接接触来传递的。两个带电体并没有直接接触,却有相互作用力,是因为电荷周围的空间存在着一种特殊的物质,叫做电场。电场具有以下两个基本特性:(1)电场对处于其中的电荷有力的作用,即电荷在电场中要受到电场力;(2)电场中有能量分布着。如果电荷在电场力的作用下移动,电场就要对这个电荷做功,这就可以肯定电场中分布着能量。电荷间的相互作用力就是通过电场发生的。设有 q_1 、 q_2 两个电荷, q_1 在它周围的空间产生电场, q_2 处在这个电场中,受到电场力; q_2 也在它周围的空间产生电场,处在这个电场中的 q_1 就受到电场力;总起来就表现为两个电荷之间的相互作用力。

既然电场总是有电场力作用于处在其中的电荷,就可以通过试验电荷在电场中受力的情况来认识电场。所谓试验电荷,就是电量很小、体积也很小的正电荷。电量很小,才不致影响原来的电场;体积很小,才能检验电场中每点的情况。从实验可知:同一个试验电荷,在电场中不同点所受电场力的大小和方向一般都是不同的;在电场中一个固定点所受电场力的方向是一定的,大小和试验电荷的电量成正比。这就需要也可能引用一个与试验电荷无

关的向量从强弱方面来衡量电场, 这个向量叫做电场强度。

电场强度向量的定义如下: 电场中一点的电场强度的大小(用 $\mathcal{E}$ 表示)等于试验电荷在这一点所受电场力(F)和试验电荷的电量(q_0)的比值, 即

$$\mathcal{E} = \frac{F}{q_0} \quad (1-2)$$

电场中一点电场强度向量的方向为试验电荷在这点所受电场力的方向。

式(1-2)是电场强度向量的大小的定义式, 由式(1-2)可见, 由于 F 与 q_0 成正比, 所以 $\mathcal{E}$ 与 q_0 无关, 而电场强度的大小就相当于带 1 个单位电量的电荷(即“单位电荷”)所受电场力的大小。电场强度的方向也叫做电场的方向, 一点的电场方向也就是正电荷在这点所受电场力的方向。

国际单位制中, 电场强度的单位是

$$[\mathcal{E}] = \frac{[F]}{[q_0]} = \frac{\text{牛}}{\text{库}}$$

电场强度向量决定于产生电场的带电体电量的大小、带电体的形状和尺寸、电场空间媒质的种类。

根据库仑定律, 可以求出点电荷所产生电场的电场强度。设产生电场的点电荷电量为 q , 媒质是真空, 把电量为 q_0 的试验电荷放在距离 q 为 R 的一点, 由式(1-1)可得 q_0 所受的电场力为

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{R^2}$$

从而得到: 电量为 q 的点电荷在真空中所产生的电场里, 距离 q 为 R 的一点的电场强度

$$\begin{aligned} \mathcal{E} &= \frac{F}{q_0} \\ &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{R^2} \end{aligned} \quad (1-3)$$

由式(1-3)可见: 点电荷所产生电场中一点的电场强度和点电荷的电量成正比, 和这一点与点电荷间距离的平方成反比。

如果产生电场的不是点电荷, 式(1-3)是不适用的。但是, 带电体的电量越大, 它所生的电场也就越强; 距离带电体越远的地方, 电场也就越弱。

例 2 见图 1-2, 两个相隔微小距离, 带等量异号的点电荷所组成的总体叫电偶极子。电偶极子的每个点电荷的电量为 q , 两个点电荷之间的距离为 l 时, $p = q \cdot l$ 叫做电偶极子的电矩。试求电矩为 p 的电偶极子在真空中所产生的电场里, 电偶极子中垂线上一点 A 的电场强度。 A 到中垂线的距离 $R \gg l$ 。

解: 电偶极子中带正电的点电荷和带负电的点电荷在 A 点所生电场强度向量的大小是相等的, 由式(1-3)得

$$\mathcal{E}_+ = \mathcal{E}_- = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{R^2 + \frac{l^2}{4}}$$

但方向不同, 如图 1-2 中所示。

A点的电场强度向量(图中的 $\mathcal{E}_A$)由 $\mathcal{E}_+$ 和 $\mathcal{E}_-$ 两个向量所合成。从图中可见, A点电场强度向量的大小

$$\mathcal{E}_A = \mathcal{E}_+ \cos \alpha + \mathcal{E}_- \cos \alpha = 2\mathcal{E}_+ \cos \alpha$$

而

$$\cos \alpha = \frac{l}{2\sqrt{R^2 + \frac{l^2}{4}}}$$

所以

$$\mathcal{E}_A = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{ql}{\left(R^2 + \frac{l^2}{4}\right)^{\frac{3}{2}}}$$

由于 $R \gg l$, 所以 $\left(R^2 + \frac{l^2}{4}\right)^{\frac{3}{2}} \approx R^3$, 从而得到

$$\mathcal{E}_A = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{ql}{R^3} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p}{R^3}$$

A点电场强度的方向和电偶极子的负电荷到正电荷的方向相反。

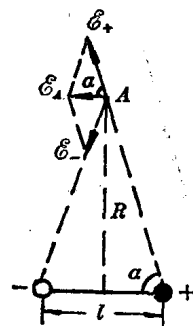
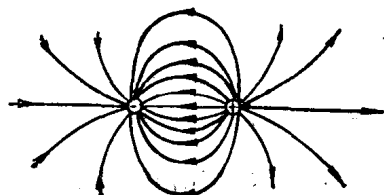


图 1-2

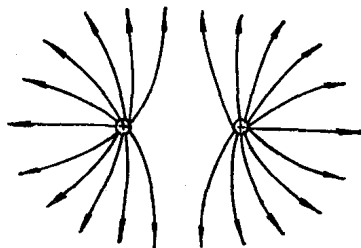
四、电力线

电力线是为了使电场情况形象化, 人为地在电场中画出的几何曲线。电力线是按照下述规定画出的: (1) 电力线上每一点的切线方向就是这一点的电场强度的方向; (2) 在与电场强度方向垂直(也就是与电力线垂直)的单位面积上穿过的电力线数目与该处电场强度的大小成正比, 也就是电场强度大的地方电力线密, 电场强度小的地方电力线疏。

电力线有两个特点: (1) 电力线是不闭合的, 总是从正电荷出发, 到负电荷终止; (2) 各电力线不相交, 因为每一点的电场方向只有一个。



(a)



(b)

图 1-3

图 1-3 中画出了带等量电荷的两个球体的电场的电力线。图 1-4 中画出了带等量异号的平行金属板的电场的电力线。

在电场的某一区域内, 如果各点的电场强度大小都相等(但不等于零), 方向都相同, 则这部分电场叫做均匀电场(也叫匀强电场)。图 1-4 所示电场中, 两板之间除边缘地方以外基本是均匀电场。均匀电场的电力线是一些均匀分布的平行直线。

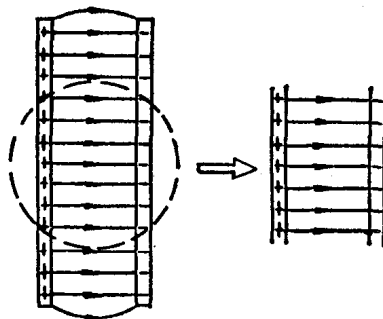


图 1-4

1-2 电 压 和 电 位

一、电压

如果电荷在电场力的作用下移动了一段距离, 电场力就做了功。从理论分析和试验都可以知道: 试验电荷在电场中移动时所做的功与试验电荷的电量成正比, 并且只和试验电荷的起点和终点在电场中的位置有关, 而与移动的路径无关。据此, 人们引用电压这个物理量, 从电场中移动电荷做功的大小来衡量电场。电压的定义如下: 如电场力把正电荷 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

$$U_{ab} = \frac{A_{ab}}{q} \quad (1-4)$$

由上列电压的定义式可见, 电场中 a 点到 b 点间的电压等于电场力把单位正电荷从 a 点移到 b 点所做的功。又因为 A_{ab} 与移动电荷的路径无关, 所以电场中两点间的电压只和这两点的位置有关。

国际单位制中, 功的单位为焦耳(简称焦, 1 焦 = 1 牛·米), 电量的单位为库, 所以电压的单位为

$$[U] = \frac{\text{焦}}{\text{库}} = \text{伏特}$$

伏特简称伏, 符号是 V。对较高或较低的电压, 还用千伏或毫伏为单位,

$$1 \text{ 千伏(kV)} = 10^3 \text{ 伏(V)}$$

$$1 \text{ 毫伏(mV)} = 10^{-3} \text{ 伏(V)}$$

如果单位正电荷从 a 点移到 b 点是电场力做功, 则单位正电荷从 b 点移到 a 点必是外力克服电场力做功, 或者说是电场力做了负功, 因为这两部分功差一个负号, 所以 b 点到 a 点的电压

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

这样, 对两点间的电压, 必须分清起点和终点, 因为有正、负之分。为此, 人们又规定, 如果正电荷从 a 点移到 b 点时电场力做功, 则 a 点到 b 点的指向叫做这两点间电压的方向。起点到终点的指向和电压的方向一致时的电压值为正值, 反之为负值。例如图 1-5 所示的均匀电场中, a, b 两点间电压的方向是由 a 到 b 的(图中用虚线箭头表示), $U_{ab} > 0$, $U_{ba} < 0$ 。

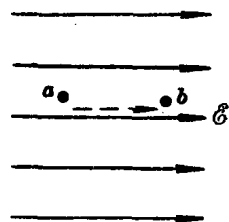


图 1-5

附带说明, 电压是有正负之分的代数量, 但不是向量, 所谓电压的“方向”, 有时还叫做真实方向或实际方向, 乃是习惯的说法(以后要陆续介绍的电流、电势、电通、磁通也是这样, 它们都不是向量, 也都有方向的规定)。

二、电位

分析电子电路时, 常用到电位这个量, 以便于分析许多点之中的两两之间的电压。在电

场中任选一点,叫做参考点。电场中某一点的电位等于这一点到参考点之间的电压。用 φ 表示电位,如参考点为 o 点,则 a 点的电位

$$\varphi_a = U_{ao} \quad (1-5)$$

电位实际就是电压,是对参考点的电压,所以也是有正负的代数量,单位也是伏。至于参考点本身的电位,就是参考点对参考点的电压,显然 $U_{oo}=0$,即参考点的电位为零,所以参考点又叫零电位点。

由于电场中两点间的电压只和这两点的位置有关,所以选定参考点后,各点电位的数值是一定的,这一结论叫做电位的单值性原理。但要注意,不选定参考点,是不好确定电位的。参考点选择得不同,同一点的电位就相应不同。至于选什么点为参考点,则要看分析计算问题的方便而定,例如电子电路中常选各有关部分的公共点为参考点。

现在分析两点的电位和这两点间电压的关系。设 a 、 b 、 o 为一个电场中的三点,选择 o 点为参考点时, $\varphi_a = U_{ao}$ 、 $\varphi_b = U_{bo}$ 。 U_{ao} 就是电场力把单位正电荷从 a 点移到 o 点所做的功,因为电场力移动电荷所做的功和移动电荷的路径无关,所以 U_{ao} 必定等于电场力把单位正电荷从 a 点移到 b 点所做的功(即 U_{ab})加上从 b 点移到 o 点所做的功(即 U_{bo}),即

$$U_{ao} = U_{ab} + U_{bo}$$

在上式中移项,就得到

$$\begin{aligned} U_{ab} &= U_{ao} - U_{bo} \\ &= \varphi_a - \varphi_b \end{aligned} \quad (1-6)$$

就是说,电场中 a 点到 b 点间的电压等于 a 点的电位减去 b 点的电位;简单地说,两点间的电压等于这两点电位的差,所以电压又叫电位差。

由式(1-6),如果 $\varphi_a > \varphi_b$,则 $U_{ab} > 0$;如果 $\varphi_a < \varphi_b$,则 $U_{ab} < 0$ 。所以,电压的方向是从高电位点指向低电位点,即电压的方向是电位降低的方向。因此,电压也叫电位降(俗称电压降)。正电荷沿电位降低的路径移动时电场力做功,沿电位升高的路径移动时外力做功。

电位相等的两点叫做等电位点,等电位点间的电压等于零。

参考点选择得不同,各点的电位相应不同,但两点间的电位差即电压是不变的。这从推导式(1-6)的过程可以看到,不论参考点选在哪里,都是能得到式(1-6)的结果的。这和测量高度一样,一定要先定出基准,基准定得不同,各处高度就不同;但不管基准如何,两个地方的高度的差是不变的。

〔例〕 电场中有 a 、 b 、 o 三点,已知 $U_{ab}=4$ 伏、 $U_{ao}=-7$ 伏。试计算:(1)选择 a 点为参考点时, b 点和 o 点的电位及 U_{bo} ;(2)选择 b 点为参考点时, a 点和 o 点的电位及 U_{ao} 。

解: (1)选择 $\varphi_a=0$ 时,

$$\varphi_b = U_{ba} = -U_{ab} = -4 \text{ 伏}$$

$$\varphi_o = U_{oa} = -U_{ao} = -(-7) = 7 \text{ 伏}$$

$$U_{bo} = \varphi_b - \varphi_o = -4 - 7 = -11 \text{ 伏}$$

(2)选择 $\varphi'_b=0$ 时,

$$\varphi'_a = U_{ab} = 4 \text{ 伏}$$

$$\varphi'_a = U_{ab} = \varphi_{ab} + U_{ab} = -U_{ao} + U_{ab} = -(-7) + 4 = 11 \text{ 伏}$$

$$U_{ao} = -U_{oa} = -11 \text{ 伏}$$

三、电压和电场强度的关系

电压和电场强度都是电场的物理量，它们之间必然有着一定的关系。先从均匀电场分析这个问题。见图 1-6，沿电场方向的 a 、 b 两点间的距离为 l ，根据以上的分析， a 点的电位高于 b 点的电位，所以沿电场强度方向的各点的电位是逐渐降低的。设电场强度为 $\mathcal{E}$ ，由于电场是均匀的，试验电荷 q_0 在电场中各处所受电场力都是 $F = q_0 \mathcal{E}$ 。 q_0 从 a 移到 b 点时电场力所做的功 $A = Fl = q_0 \mathcal{E} l$ 。所以 a 点到 b 点间的电压

$$U_{ab} = \frac{A}{q_0} = \frac{q_0 \mathcal{E} l}{q_0} = \mathcal{E} l$$

或

$$\mathcal{E} = \frac{U_{ab}}{l} = \frac{\varphi_a - \varphi_b}{l} \quad (1-7)$$

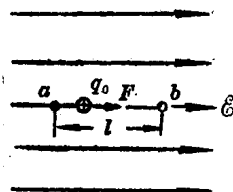


图 1-6

式(1-7)表明：均匀电场中，电场强度的大小等于沿电场强度方向的每单位长度间的电压(或电位差)。所以电场强度的单位又是伏/米，伏/米和牛/库是等同的，因为

$$[\mathcal{E}] = \frac{[F]}{[q_0]} = \frac{\text{牛}}{\text{库}} = \frac{\frac{\text{焦}}{\text{米}}}{\text{库}} = \frac{\text{焦}}{\text{库} \cdot \text{米}} = \frac{\text{伏}}{\text{米}}$$

电力工程上电场强度单位常用千伏/厘米。

在不均匀电场中，不能引用式(1-7)。但在一段极短距离间的电场可以认为是均匀的，这样，在电场强度为 $\mathcal{E}$ 的地方，沿电场强度方向的极短距离 dl 两端的电压便为 $\mathcal{E} dl$ 。

根据以上的结论，电场中某两点的距离不变时，可以通过改变电压来改变这两点间电场的强弱；两个带电体间的电压一定时，可以改变它们之间的距离来改变其间电场的强弱。

1-3 电 流

一、电流

物体中的电子、质子都是不断运动着的。在电场力的作用下，物体中可能有大量的带电粒子沿着一定方向作迁移运动。带电粒子的定向运动可以形成电流。形成电流的内在因素是物体中有可以作定向运动的带电粒子，形成电流的外界因素是有电场作用于物体，或者说是有电压作用于物体。

能够在物体中作定向运动而形成电流的带电粒子叫载流子。具有大量载流子的物质，也就是能够导电的物质，叫做导体。金属原子中，最外层的电子受原子核的束缚力较小，容易摆脱原子核的束缚，在各个原子之间自由运动，这种电子叫做自由电子。金属中存在着大量的自由电子，自由电子是金属导体中的载流子。电解液(酸、碱、盐的水溶液)以及电离了的气体也是导体，它们之中的载流子是正离子和负离子，正、负离子在同一电场的作用下作

相反方向的定向运动。向相反方向移动的正、负电荷所生的效应是相同的。有些物质,例如橡胶、塑料、云母、陶瓷、干燥的空气等,一般情况下,它们内部几乎没有载流子,很难形成电流,这类物质叫做电介质(简称介质),也叫绝缘体。各种电气设备中,总是某些部分是导体,另一些部分是绝缘体,以使电流沿人们要求的路径移动,使设备正常工作。导体和绝缘体之间没有绝对的界限,一定条件下,绝缘体可以转化为导体,例如空气在一般情况下是良好的绝缘体,在高电压的作用下就可能被击穿而转化为导体。

还有一些物质,如锗、硅等,叫做半导体。半导体的导电性能介于导体和绝缘体之间,而且很容易受温度、杂质、电磁场、压力、光照等外加条件的影响。半导体中的载流子是带负电的自由电子和带正电的空穴。自由电子和空穴的相反方向的运动,形成半导体中的电流。

由载流子在物体中作定向运动而形成的电流叫做传导电流。带电物体的机械移动,也形成电流,这种电流叫做运载电流。

二、电流强度

电流强度是衡量电流强弱的物理量。一个截面上电流强度的大小等于单位时间内通过这个截面的总电量;并规定正电荷移动的方向为电流强度的方向。

电流强度的大小和方向都不随时间变化的电流叫做恒定电流,也叫直流电流,简称直流。电流强度的大小和方向随时间变化的电流叫做交变电流,也叫交流电流,简称交流。

对于直流电流,如果以 I 表示电流强度,在时间 t 内通过截面的总电量为 q ,则

$$I = \frac{q}{t} \quad (1-8)$$

国际单位制中,电流强度的单位是安培,简称安,符号为 A。安培是国际单位制的基本单位之一,它的定义见附录一,而 1 库 = 1 安·秒。对于较大或较小的电流强度,还用千安、毫安或微安为单位,1 微安(μA) = 10^{-6} 安(A)。

电流强度简称电流。这样,电流既是一种物理现象的名称,又是一个物理量的名称。

〔例〕 见图 1-7,一段金属导体 ab 中,自由电子是从 b 流向 a 的,在 0.002 秒内通过截面 S 的电量为 0.001 库,试求电流的大小和方向。

解: 电流的大小

$$I = \frac{q}{t} = \frac{0.001}{0.002} = 0.5 \text{ 安}$$



图 1-7

电流的方向是正电荷运动的方向,自由电子(负电荷)从 b 流向 a ,相当于正电荷由 a 流向 b ,所以电流的方向是由 a 到 b 的,如图中虚线箭头所示。

1-4 电 势

一、电源力的作用

导体中形成电流的外界因素是导体中存在电场。设有两个导体 A 、 B , 分别带有等量异号的电荷,在空间产生电场,带正电荷的 A 的电位高于带负电荷的 B 的电位,如图 1-8 所示。

把这两个带电导体用导线连接起来(图中是经电灯相连的), 在电场力的作用下, 导体中的自由电子就从低电位的导体 B 流向高电位的导体 A , 形成了方向由 A 经电灯到 B 的电流。但是, 这样的电流只能短暂存在, 不能长久持续下去。因为随着电流的流通, A 上的正电荷越来越少, 流到 B 上的正电荷与 B 上的负电荷中和, B 上的负电荷也同样越来越少, 电场逐渐减弱, 到 A 、 B 间的电压减到零, 即 A 与 B 电位相等时, 就没有电流了。

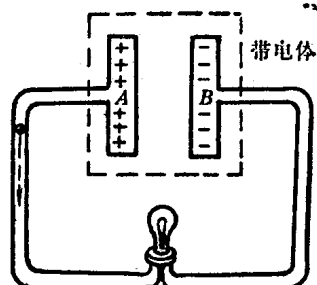


图 1-8

如果能把流到 B 的正电荷不断取走, 并送回到 A 去, 就能维持 A 、 B 间存在电压, 从而就能得到持续的电流。要使正电荷从低电位处移向高电位处, 电场力是做不到的, 因为电场力总是使正电荷从高电位处移向低电位处的。这就需要能把正电荷从低电位处移向高电位处的非电场力, 具有这样性质的力叫做电源力。具有电源力的导体叫做有源元件。所谓电源, 就是起维持电流存在作用的有源元件。

电源力的产生有多种不同的来源。例如: 电池中的电源力是由电解液和极板间的化学作用产生的; 一般发电机中的电源力是由电磁作用产生的。但是不同来源的电源力(用 F_y 表示, “ y ”表示“源”)的作用是一致的: 使正电荷聚积到有源元件的一端, 使负电荷聚积到有源元件的另一端, 如图 1-9a 所示。有源元件聚积正电荷的一端和聚积负电荷的一端分别叫做它的正极和负极, 正极的电位高于负极的电位。

正、负两极未经导体接通的有源元件叫做开路或空载。有源元件开路时, 在电源力的作用下, 两个极上的电荷不会无限制地聚积下去。因为电源力使正负极分别聚积的正电荷、负电荷在空间(包括有源元件的内部和外部)产生电场, 使有源元件内部除电源力 F_y 外, 还有着电场力 F , 见图 1-9b。在有源元件内部, 电源力 F_y 要把正电荷由负极推向正极, 电场力 F 则要把正电荷由正极推向负极。当 $F < F_y$ 时, 两极的电荷会继续增加。随着两极电荷的增加, 电场力也增加, F 大到与 F_y 相等时, 两极的电荷就不增加了。所以, 开路的有源元件中的电源力和电场力是平衡的。

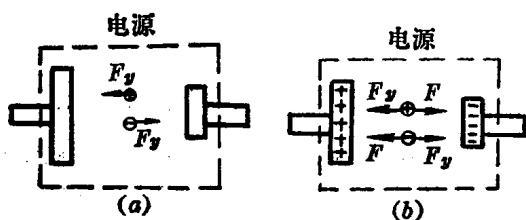


图 1-9

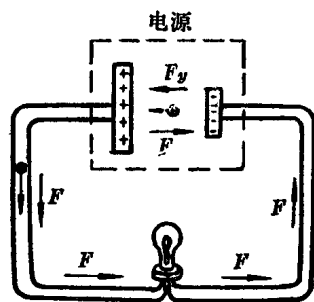


图 1-10

电源力只存在于有源元件内部, 其两极电荷所生电场的电场力则在它的内部和外部都存在。用导体把有源元件的两极接通, 如图 1-10 所示, 在电场力的作用下, 就有电流从它的正极经外部导体流向负极。随着电流的流通, 两极的电荷将要减少, 两极间的电场力也随之