

SHIYONG
DIANGONGXUE
ZHISHI

实用 电工学知识

王清葵 主编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

SHIYONG DIANGONGXUE ZHISHI

实用

电工学知识

主编 王清葵 参编 肖世友 马黎仁

中国电力出版社出版

(北京三里河路2号 100044) <http://www.cepp.com.cn>

中国电力出版社发行

各地新华书店经售

2008年1月第1版 2008年1月北京第1次印刷
787毫米×1095毫米 16开本 18印张 480千字
印数0001—3000册 定价37.00元

音 音 音

中国电力出版社
www.cepp.com.cn



内 容 提 要

本书全面、定性地讲述了电工学知识。全书分七章,包括:第一章 电场与电路;第二章 磁场与磁路;第三章 交流电路(上)——正弦交流电路;第四章 交流电路(下)——非正常状态交流电路;第五章 变配电设备的一次部分;第六章 变配电设备的二次部分;第七章 电子学知识。

本书作者终身从事电力技工职业教育,所写内容由浅入深,循序渐进,便于掌握。

本书可作为电力系统的非电类专业(如输配电线路、热能动力装置、化学水处理等专业)和非电力系统的电类专业(如建筑电气安装、工企自动化等专业)的工人培训教材;对希望浅显、全面了解电气知识的读者,也是一本易学易懂的科技书。

图书在版编目(CIP)数据

实用电工学知识/王清葵主编. —北京:中国电力出版社, 2008

ISBN 978-7-5083-6525-1

I. 实… II. 王… III. 电工学-基本知识 IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 205820 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2008 年 4 月第一版 2008 年 4 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 18 印张 439 千字

印数 0001—3000 册 定价 37.00 元

敬 告 读 者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前言

实用电工学知识

本书可作为电力系统非电类专业（如输配电线路、热能动力装置等专业）和非电力系统电类专业（如建筑电气安装、工企自动化等专业）的工人培训教材，对希望浅显、全面了解电气知识的读者，也是一本易学、易读、易懂的科技书。

本人1965年大学毕业后，曾较长时间和线路工人同吃、同住、同劳动，一直在思考，线路工人，究竟应该掌握多少电工知识为宜，带着这个问题，我在线路工人中做了大量调查研究的基础上，主编了本书。全书有三部分内容，第一部分是电工基础知识，包括第一章电场与电路，第二章磁场与磁路，第三章交流电路（上）——正弦交流电路，第四章交流电路（下）——非正常状态交流电路；第二部分是变配电设备，包括第五章变配电设备的一次部分，第六章变配电设备的二次部分；第三部分是第七章电子学知识。

参加本书编写的有浙江省电力培训中心副主任马黎仁和江苏省电力培训中心肖世友讲师。全书经顾学珍高级工程师审稿。本书的出版得到杨富生、陈勇、罗慰擎、冯文秀等时任部省电力教学部门领导的支持。江苏省送变电公司的领导、技术人员和线路工人是提供本书创意的源泉。在此一并表示谢意。

主编 王清葵

2007年12月

目 录

实用电工学知识

前言

第一章 电场与电路	1
第一节 电场	1
第二节 电路	10
第三节 直流电路的计算	20
第四节 电介质与电容	29
第二章 磁场与磁路	39
第一节 磁场	39
第二节 磁路	48
第三节 电磁感应	56
第四节 电磁感应的一些物理量	62
第三章 交流电路(上)——正弦交流电路	71
第一节 正弦交流电路的基本概念	71
第二节 交流电路中的理想二端元件	80
第三节 理想元件的串、并联电路	87
第四节 三相正弦交流电路	101
第四章 交流电路(下)——非正常状态交流电路	110
第一节 非正弦交流电路	110
第二节 不对称三相正弦交流电路	119
第三节 线性电路的过渡过程	127
第四节 均匀传输线及行波理论	137
第五章 变配电设备的一次部分	143
第一节 变压器	143
第二节 异步电动机	155
第三节 常用小型发电机	168
第四节 开关电器	178
第五节 绝缘子、母线、避雷器和电缆	190
第六章 变配电设备的二次部分	201
第一节 电工仪表及其测量	201
第二节 控制电路	218

第三节	保护、监视和自动控制电路简单介绍.....	225
第七章	电子学知识.....	228
第一节	直流电源.....	228
第二节	放大电路.....	244
第三节	无线对讲机及收音机电路.....	263
第四节	数字电路及其应用的基本知识.....	271

电场与电路

在各种形式的能量中,电能占有重要的地位。在工农业生产、国防、科技以及日常生活中,电能得到了极其广泛的应用。随着我国社会主义现代化建设事业的蓬勃发展,对电工技术的掌握也越来越显得迫切。因此,认识电现象的本质和规律是十分必要的。这一章主要定性分析静电场,讨论电路的主要物理量和基本定律,介绍直流电路的基本计算方法。

第一节 电 场

一、静电场与库仑定律

1. 电荷

自然界中任何物体都是由分子组成,分子由原子组成。原子又是由质子、中子和电子等基本粒子组成,质子和中子构成原子核,电子绕原子核旋转。原子核中的质子带正电荷、中子不带电,绕原子核旋转的电子带负电荷。每个质子所带的正电荷,在数量上与每个电子所带的负电荷相等。在未受外界影响的情况下,原子的质子数和电子数相同,原子内的正电荷与负电荷数量相等,两种电荷恰好中和,对外不显电性,即物体不带电,或者说不带电荷。如果用摩擦或其他方法使一个物体失去一些电子,那么这个物体便带了正电;如果使一个物体获得一些电子,那么这个物体便带了负电。带正电的物体所失去的电子数目,必定等于带负电的物体所获得的电子数目。如果带正电的物体获得等量电子、带负电的物体失去等量电子,就重新成为中性物体。由此可知,电荷是一种客观存在的物质,即不能创造,也不能消失,只能从一个物体转移到另一个物体,这叫做电荷守恒定律。物体带电的过程,就是物体之间的电子重新分配的过程。

物体所带电荷数量的多少叫做电量,用符号 Q 或 q 表示。在法定单位制中,电量的单位为库仑,简称库,单位符号为 C 。 $1C$ 的电量相当于 6.25×10^{18} 个电子所带的电量,即一个电子的电量为 $-1.6 \times 10^{-19}C$,一个质子所带的电量则是 $+1.6 \times 10^{-19}C$ 。一个电子或一个质子所带的电量叫做基本电量,以 e 表示 ($e=1.6 \times 10^{-19}C$)。电量有时也用较小的微库作计量单位,单位符号为 μC 。

$$1\mu C = 10^{-6}C \quad (1-1)$$

带正电或带负电的物体称为带电体。实验证明:当带电体互相靠近时,同性带电体互相排斥,异性带电体互相吸引,这表明电荷之间存在“同性相斥、异性相吸”的作用力。电子所以被束缚在原子核的周围旋转而构成原子,是因为原子核和电子带有异性电荷而互相吸引的缘故。当一个带电体与图 1-1 所示验电器的金属球 C 相接触时,其所带电荷的一部分就会经金属杆 D 传到两片薄金属箔 $E1$ 和 $E2$ 上,金属箔由于带了同性电荷便互相排斥而张开。

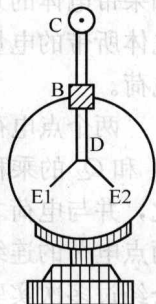


图 1-1 金属箔验电器

2. 电场

两个带电体(如验电器的两片金属箔)并没有直接接触,为什么会有相

互作用力呢？这是因为电荷周围的空间存在着一种特殊的物质，这种物质就叫电场。电荷间的相互作用力就是通过电场传递的。电荷和电场是一个统一的整体，有电荷存在，它的周围就一定有电场存在，并且几个电荷的电场可以同时存在于同一空间中。静止电荷（相对于观察者）周围的电场叫做静电场。本节所讲的电场都是指静电场。

电场作为一种物质，它具有物质的一般属性。例如，它是客观存在着的；它具有质量、能量和动量；电场里面所进行的物理过程与实物中所进行的物理过程一样，服从质量守恒及转换定律、能量守恒及转换定律；它的产生与消失必然伴随着其他物质的消失与产生等。然而电场又不同于一般实物，没有一定的体积，不是由原子、分子组成，其质点（光子）的静止质量为零等，故称它是物质的一种特殊形态。

电场有两个基本特征：①电场对处在电场内的其他电荷有力的作用，这个力称为电场力。②电荷在电场内顺着电场力的方向移动时，电场力要对电荷做功，这表明电场具有能量。

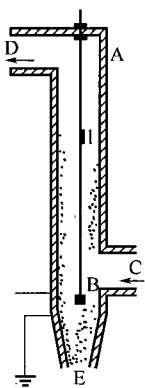


图 1-2 静电除尘器

静电现象在生产、生活及科学研究中有着广泛的应用，静电除尘就是一例。图 1-2 所示是管式静电除尘器的原理示意图。A 为外壳接地的金属管，管中有一根下端悬有重锤 B 的金属线 1，它的上端与高压直流电源的电极相连，使其周围产生很强的静电场。从进口 C 处进入管中的含尘气体因受静电场作用而与 1 接触，接触后尘粒便得到与导线 1 所带的相同的电荷。根据同种电荷互相排斥的原理，尘粒就被排斥而飞向管壁，到达管壁后放电，而停留在管壁上。机械振动装置定时振动管壁，使灰尘落入灰斗 E，从出口 D 处流出的便是无尘气流了。管式静电除尘器适用于低温气体的除尘，效率很高；热气体的除尘则须使用板式静电除尘器，其原理与管式相同，但效率较低。

静电有时也会给人们带来危害。静电最大的危害是可能因静电火花点燃某些易燃物质，引起爆炸事故。为了避免这种事故的发生，制药厂、化工厂的设备外壳都接地，这样可以把电荷引入大地，避免静电积累。油罐车的尾部常拖一条铁链，目的就是把油罐接地。另外调节空气的湿度，也是防止静电危害的一种方法。湿度增大时，产生的电荷无法积累，静电的危害性也就消除了。

3. 库仑定律

电荷间存在着同性相斥、异性相吸的作用力。这个作用力的大小，除了与带电体所带电量的多少以及它们之间的距离有关外，还与带电体的形状、大小及带电体所在的介质有关。如果带电体的几何尺寸比相互间的距离小得多，则可以忽略它们的形状和大小，即可以把带电体所带的电量看成是集中在一个“点”上，而视其为点电荷。

两个点电荷之间的相互作用力 F ，与它们所带的电量 Q_1 和 Q_2 的乘积成正比，与它们之间的距离 r 的平方成反比，并与电荷之间的电介质的性质有关。作用力的方向在两点电荷的连线上（图 1-3）。这个结论是法国物理学家库仑经过多次实验得出的，故称之为库仑定律。其数学表达式为

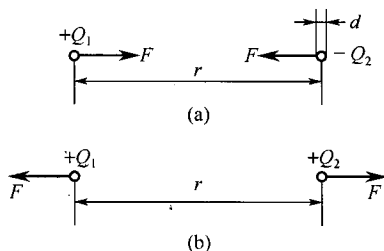


图 1-3 电荷间的相互作用力
(a) 异极性电荷；(b) 同极性电荷

$$F = K \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \quad (1-2)$$

其中 K 为比例常数。在法定单位制中, 电量 Q_1 、 Q_2 的单位为库, 单位符号为 C; 距离的单位为米, 单位符号为 m; 力的单位为牛顿, 简称牛, 单位符号为 N。若两个点电荷处在真空中, 比例常数

$$K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \quad (1-3)$$

式中 $\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} \frac{\text{C}^2}{\text{N} \cdot \text{m}^2}$, 叫做真空的介电常数。如果两个点电荷不在真空中, 而处在无限大而且均匀的电介质 (如空气、水、玻璃、云母等) 中, 那么比例常数

$$K = \frac{1}{4\pi\epsilon} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r}$$

式中的 ϵ 是介质的介电常数。 ϵ_r 叫做介质的相对介电常数, 其值为介质的介电常数与真空介电常数之比, 即

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

现将几种常见的电介质的相对介电常数列于表 1-1 中。

表 1-1 几种常见电介质的相对介电常数

电介质	相对介电常数 ϵ_r	电介质	相对介电常数 ϵ_r
真 空	1	电容器纸	3~5
空气 (0℃, 101325Pa)	1.00059	纯 水	81.5
氢气 (0℃, 101325Pa)	1.000264	玻 璃	8
云 母	6~8	聚苯乙烯	2.5
陶 瓷	6	聚四氟乙烯	2.2

这样可得到库仑定律的一般表达式

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \quad (1-4)$$

由库仑定律决定的电荷之间的相互作用力称为静电力或库仑力。

二、电场强度与电力线

1. 电场强度

电场对电荷有力的作用, 可以用电荷受到的电场力来描述电场的强弱性质。

将一个带微小电量的点电荷放入电场中 (这样的点电荷称为试验电荷, 它对原来的电场几乎不产生任何影响), 则同一试验电荷在电场中的不同点上所受电场力的大小一般是不同的, 这表明电场中的不同点电场的强弱程度不一样。如果在电场中的同一点上进行试验, 当改变试验电荷的电量时, 所受电场力的大小也随之改变, 且受力的大小与试验电荷所带的电量成正比。可见, 电场力的大小不仅与试验电荷所在点的电场强弱有关, 而且还与试验电荷的电量多少有关。因此, 不能直接用电场力的大小来衡量电场中各点的强弱。

由于电场力与试验电荷所带的电量成正比, 所以它们的比值是个恒量, 只决定于试验电荷在电场中的位置, 而与试验电荷所带的电量无关, 可以用来衡量试验电荷所在点的电场强弱。把试验电荷在电场中某点所受的电场力 F 与这个电荷的电量 q 的比值, 定义为该点的电场强度, 用符号 E 表示, 即

$$E = \frac{F}{q} \quad (1-5)$$

也就是说, 电场中任意一点的电场强度, 在数值上等于单位试验电荷在该点所受电场力的大小。由于电场力是有方向的, 所以电场强度也有方向, 即电场强度是个向量。电场中某点的电场强度的方向, 规定为正试验电荷在该点所受到的电场力的方向。在法定单位制中, 电场强度的单位为牛顿/库仑, 单位符号为 N/C。电场强度还有一个常用的单位为伏/米, 单位符号为 V/m, $1\text{V/m}=1\text{N/C}$ 。

如果知道了电场中某一点的电场强度, 那么位于该点的电荷 q 所受的电场力为

$$F = Eq \quad (1-6)$$

若受力的电荷 q 是正电荷, 则电场力 F 的方向与电场强度 E 的方向相同; 若 q 为负电荷, 则电场力 F 的方向与电场强度的方向相反。

在图 1-4 所示单个点电荷 Q 产生的电场中, 任意一点 P 的电场强度的大小可按式 (1-4) 及式 (1-3) 推导出

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{Q}{r^2} \quad (1-7)$$

如果同时有几个点电荷存在, 那么在它们周围的空间里就有几个点电荷的电场叠加在一起。若要求某一点的电场强度, 则应先求出各个电场在该处的电场强度, 然后再用向量合成的方法求它们的合电场强度。

2. 电力线

通过计算, 可以定量地知道电场中某点的电场强度。但是要了解电场中电场强度的分布情况, 却不能求出电场中每一点的电场强度来解决。鉴于电场中每一点的电场强度都有一定的方向, 可以在电场中画出一系列的几何曲线 (或直线), 来形象化地描述电场强度的分布情况, 这些曲线就叫做电力线。应当指出, 电力线是人为地在电场中画出来的, 不是电场中真的有这种线存在。

为了使电力线不仅能表示电场的方向, 而且能同时表示电场的强弱, 电力线的画法应遵循如下的规则: 电力线上任一点的切线方向与该点的电场强度方向一致; 在与电力线垂直的单位面积上的电力线根数与那里的电场强度成正比。

图 1-5 (a)、(b) 表示孤立点电

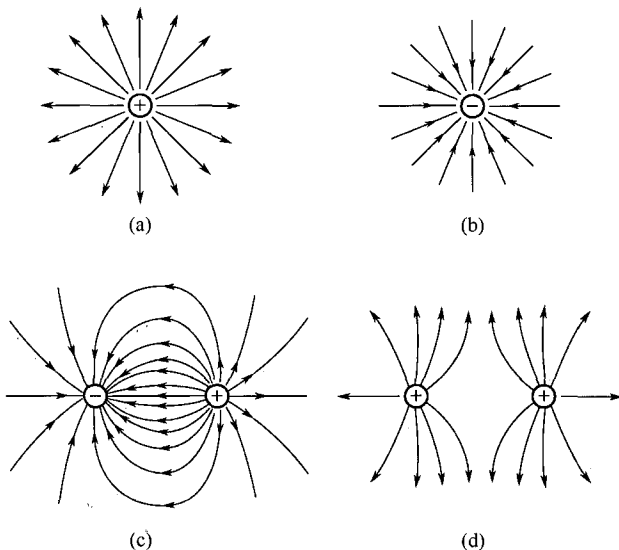


图 1-5 几种典型电场的电力线分布图形

(a) 正极性电荷; (b) 负极性电荷; (c) 异极性电荷之间; (d) 同极性电荷之间

荷周围的电场；图 1-5 (c)、(d) 表示两个电量相等的点电荷周围的电场。从它们的电力线分布情况可以看出，电场中不同的各点，其电力线的方向与电力线的疏密程度是不同的。这种电场称为不均匀电场。

图 1-6 所示为两块相距较近的带有异性电荷的金属平行板之间的电场。除两端外，平行板中间的电力线是互相平行的直线，而且电力线的疏密程度相同。也就是说在平行板中间的电场内，所有各点的电场强度大小相等、方向相同。这样的电场称为均匀电场。均匀电场在科学技术上应用很多。

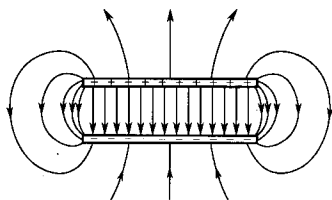


图 1-6 两块带电平行板间电场的电力线分布图形

从上几种简单电场的电力线分布图可以看出，电力线具有以下两个特点：①电力线是不封闭曲线，它总是起始于正电荷，而终止于负电荷，或由正电荷发出至无穷远，或从无穷远处终止于负电荷；②电力线必须垂直于带电体的表面，而且任何两条电力线都不能相交，这是因为电场中每一点的电场强度只有一个确定方向的缘故。

电力线可以定性地表示电场的总体情况，对于分析某些实际问题很有帮助。例如某些复杂的电场，如高压电气设备附近的电场等，常采用模拟方法把电力线画出来，以便形象地显示这些复杂电场的分布情况。

三、电位与等位面

从电荷在电场中要受到电场力的作用这一事实，引进了电场强度这个物理量来描述电场力方面的性质。以下从电场能对电荷做功这一角度，来讨论电场能量方面的性质。

1. 电位能

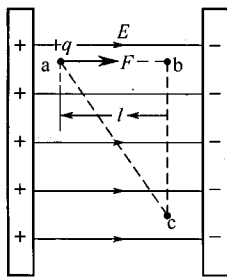


图 1-7 电荷的电位能

受电场力的作用，电场中的电荷具有位能，这个位能叫做电位能，用符号 W 表示。

图 1-7 所示为一电场强度为 E 的均匀电场，试验电荷 $+q$ 在电场力 F 的作用下，顺电场方向从 a 到 b 作匀加速运动，电荷在 b 点的速度比在 a 点的速度大，这表明电场力作了正功，使电荷的动能增加了，而这时电荷的电位能却相应地减少了。由此可见，电荷在 a 点所具有的电位能 W_a 高于在 b 点所具有的电位能 W_b 。当电荷 q 由位置 a 移到位置 b 时，电场力作的功 A_{ab} ，应等于电荷在这两个位置时所具有的电位能之差，即

$$A_{ab} = W_a - W_b \quad (1-8)$$

式中 $A_{ab} = Fl_{ab} = qEl_{ab}$ ，是电场力 F 将电荷 q 沿电场方向位移 l_{ab} 所作的功。可以证明，在静电场中，电场力作的功只与电荷 q 的电量和始末位置有关，而与电荷移动的路径无关。例如，在图 1-7 中，同一电荷不论是从 a 点直接移到 b 点，还是从 a 点经由 c 点或其他路径移到 b 点，电场力所做的功 A_{ab} 是一样的。

物体在不同的位置具有不同的重力位能。与此相似，电荷在电场中的不同位置上也具有不同的电位能。和力学中的重力位能的大小只有相对意义一样，电位能的大小也只有相对意义。要确定电荷 q 在电场中某一确切位置所具有的电位能的大小，首先必须选定某个位置作为零电位能的参考点。在图 1-4 所示的电荷 $+Q$ 的电场中，按规定选择试验电荷在距 $+Q$ 无

穷远处时的电位能为零。因此,电荷 $+q$ 在P点的电位能大小,就等于 $+q$ 在电场力作用下,由P点移到无穷远处时电场力所做的功。但实用上,却总是选定电场中某一点作为零电位能的参考点。例如在图1-7的均匀电场中,可以选取电荷 $+q$ 在带负电的极板上时的电位能为零。那么 $+q$ 在a点时的电位能 W_a 就等于 $+q$ 从a点移动到负极板上电场力所作的功。 $+q$ 在b点时的电位能 W_b 就等于 $+q$ 从b点移动到负极板上电场力所作的功。

在法定单位制中,电位能的单位和功的单位都是焦耳,简称焦,单位符号为J。

2. 电位

由上述可知,同一个试验电荷在电场中的不同位置上所具有的电位能一般说来是不同的。如图1-7所示电场中,电荷 $+q$ 在a点处的电位能就比在b点处的电位能高。这表明电场中不同位置的能的性质不同。如果将带不同电量的正试验电荷分别置于电场中的同一点上,并且用电场力将它们从该点移到零电位能处所作的功来量度它们在该点时所具有的电位能的大小,结果发现电位能与试验电荷所带的电量成正比,即它们的比值是一个恒量。由于这个比值只决定于试验电荷在电场中的位置,而与试验电荷所带电量无关,所以能客观反映电场中各点在能量方面的性质。把正试验电荷在电场中某一点所具有的电位能 W 与这个电荷的电量 q 的比值,定义为该点的电位,用符号 V 表示,即

$$V = \frac{W}{q} \quad (1-9)$$

电场中任意一点的电位,在数值上等于单位正电荷在该点时具有的电位能。根据电场力的功与电位能的关系,也可以说,电场中某点的电位,等于单位正电荷从该点移动到零电位能处电场力所作的功。显然,所选定的零电位能处,也就是零电位处。在实用中,把地球的电位作为零电位的,因此任何一个与大地相连的导体,它的电位也是零。

电位是个标量,只有大小,没有方向。电位的正、负,是根据单位正电荷移动时电场力作正功还是作负功来决定的。电位的大小、正负也只是相对于所选定的零电位而言的。在实用中,电场中某一点的电位比大地的电位高,则为正;比大地的电位低,则为负。

在法定单位制中,电位的单位是焦耳/库仑,单位符号为J/C,也称做伏特,简称伏,单位符号为V。

3. 电位差

一个电场中各点的电位相对于所选定的零电位来说,都有确定的值。电场中任意两点间电位值的差,叫做该两点间的电位差,简称电压,用符号 U 表示,单位也是伏,单位符号为V。如果电场中a点的电位是 V_a ,b点的电位是 V_b ,则a、b两点间的电位差 U_{ab} 为

$$U_{ab} = V_a - V_b = \frac{W_a}{q} - \frac{W_b}{q} = \frac{A_{ab}}{q} \quad (1-10)$$

可见,电场中两点间的电位差等于单位正电荷由某一点移动到另一点时电场力所做的功。由此可知,电场中两点之间的电位差具有确定的值,与零电位的参考点选在哪里无关。

式(1-10)还可以写成

$$A_{ab} = q(V_a - V_b) = qU_{ab} \quad (1-11)$$

上式表明,电荷 q 从电场中的一点移到电场中的另一点,电场力的功等于电荷的电量与始末两点的电位差的乘积。电场力作正功时,正电荷总是从高电位移到低电位处。若电场力作负功,则情况正好相反。

4. 等位面

在一个电场中, 电位同电场强度一样也有确定的分布。由于电位只有大小, 没有方向, 所以电位的分布是指电位按大小在电场中不同地方的分布情况, 通常用等位面来描述。

在电场中电位相同的点所连成的空间曲面叫做等电位面, 简称等位面。由于等位面上各点的电位都相等, 所以电荷沿等位面移动时电场力不作功。从公式 $A_{ab} = q(V_a - V_b)$ 来看, 若 $V_a = V_b$, 则电场力的功 $A_{ab} = 0$ 。电场强度的方向总是沿着电力线的切线方向的, 而在电场中, 只有沿着跟电力线垂直的方向移动电荷时, 电场力的功才等于零。如图 1-7 中, 当电荷 $+q$ 从 c 点移到 b 点时, 电场力作的功 $A_{cb} = 0$ 。由此即可得出结论: 等位面处处与电力线相垂直。显然, 等位面之间也不能相交。

为了能对电场的分布有一明晰而形象的概念, 往往在用电力线描述电场强度的分布的同时, 还用等位面来图示电位的分布。方法上可先在图形中作出各个等位面, 并使相邻等位面之间具有相同的电位差, 然后再根据等位面必须与电力线相垂直的原则画出电力线。一般情况下, 多用平面图形来图示空间分布的电场, 这时反映在图形上的是等位面 (系空间曲面) 与图形平面的截交线, 故等位面有时也称等位线。

在点电荷的电场中, 凡是离开点电荷距离相等的点的电位都相等, 所以等位面是以点电荷为中心的许多同心球面, 如图 1-8 (a) 所示。在均匀电场中, 等位面必然是一些跟电力线垂直的间距相等的平行平面, 如图 1-8 (b) 所示。两个电量相等的异性点电荷的电场图形如图 1-8 (c) 所示。

在图 1-8 中, 实线代表电力线, 虚线代表等位面。从图中还可以看出, 电力线和等位面愈密的地方, 电场强度也愈大。

四、电场中的导体

已经讨论了电场的力的性质和电场的能的性质。实际上, 在电场中总是有导体或电介质 (绝缘体) 存在, 它们会受到电场的作用, 同时也会影响电场。下面分析电场中导体的情况。

1. 静电感应

导体与介质的不同在于其中有大量的自由电子, 这些自由电子可以在导体内部自由地运动。如果把导体放入电场中, 导体中的自由电子在电场力的作用下, 就要作有规则的运动, 引起电荷的重新分布。如图 1-9 所示, 不带电的导体 B 放在带负电物体 A 的电场中 [图 1-9 (a)], 导体 B 中的自由电子受到电场的斥力, 移向远离带电体的一端, 使这一端得到多余的电子而带负电, 而靠近带电体 A 的一端

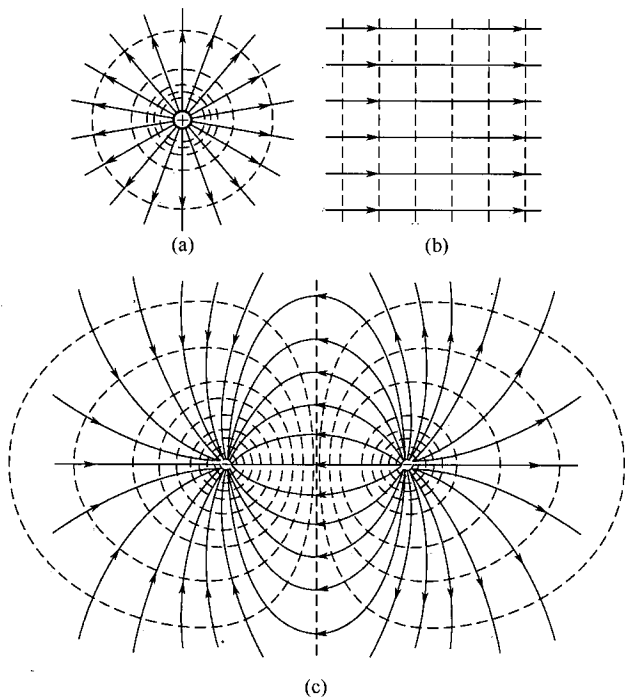


图 1-8 电力线与等位面

(a) 正极性电荷; (b) 均匀电场; (c) 异极性电荷间

就因为缺少电子而带正电。这种导体中的电荷因受电场作用而重新分布,使不带电导体两端的表面出现等量异性电荷的现象,叫做静电感应。这时产生的电荷叫做感应电荷。

静电感应的结果,使原来不带电的导体两端分别带上了等量异性电荷,但从整体来看,导体内部正、负电荷的总量仍是相等的。在图 1-9 (a) 中,若把带电体 A 移去,导体 B 两端的等量正、负电荷就会中和而重新呈现为电中性。如果如图 1-9 (b) 所示将导体 B 接地,其远端所带的与带电体相同的感应电荷就会移至更远的大地。这时先断开导体 B 的接地线,再拿走带电体 A,那么原来不带电的导体 B 上,便留下了与原带电体 A 相异的电荷而成为带电体 [图 1-9 (c)]。这种利用静电感应现象使导体带电的方法,叫做感应起电。

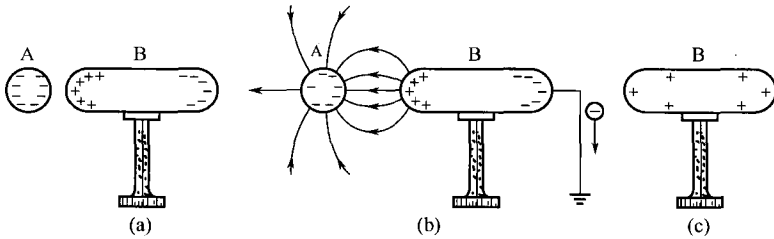


图 1-9 静电感应现象

(a) 不带电导体 B 放在带负电物体 A 电场中; (b) B 接地时;
(c) 断开 B 接地体, 并移走 A 时

2. 静电平衡

静电感应现象是由于电场对导体内自由电子作用的结果,但导体中的自由电子在电场力作用下产生的定向移动不会无休止地继续下去。把一块金属导体 G 放入图 1-10 所示的均匀电场中。开始时,导体 G 内部的电场强度就是外部均匀电场强度 E [图 1-10 (a)]。在外部

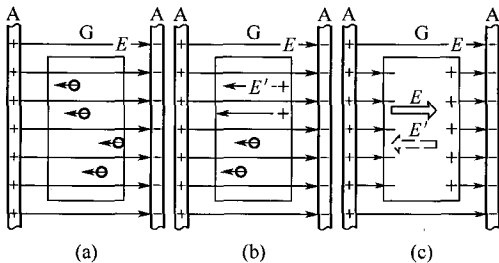


图 1-10 导体的静电平衡

(a) G 放入均匀电场中; (b) G 中的附加电场;
(c) 静电平衡状态

电场 E 的作用下,导体 G 中的自由电子逆着电力线的方向自右向左移动,因而使导体 G 的左面有了过多的电子而带负电,右面缺少电子而带上等量的正电,于是在导体 G 内部建立了与外部电场 E 相反的附加电场 E' [图 1-10 (b)]。附加电场使得导体 G 内原来的电场强度削减为 $E - E'$ 。 E 是恒定不变的, E' 则随着电子的迁移在不断地加强,直到 $E - E' = 0$,导体 G 中的自由电子才停止定向移动 [图 1-10 (c)]。这种导体上没有电荷作定向运动的状态,叫做导体处于静电平衡状态。

在静电平衡时,导体表面也应跟内部一样没有电荷作定向运动,这就要求导体表面场强的方向与表面垂直 [图 1-10 (c)]。如果导体表面处电场强度的方向与导体表面不垂直,自由电子就要受到电场力的作用而沿表面作定向运动,这样就不再是静电平衡状态了。因此,导体静电平衡必须满足以下两个条件:①导体内部任何一点的电场强度等于零;②导体表面上任何一点的电场强度都垂直于该点的表面。

导体静电平衡的条件,也可以用电位来表述:在静电平衡时,导体上任意一点的电位都

相等,即导体的表面是一个等位面,整个导体是一个等位体。如图 1-11 (a) 所示是一个球形带电导体的电力线和等位面的分布情况,它的电位分布曲线见图 1-11 (b)。

3. 静电屏蔽

把一导体放到电场中,它将产生静电感应,在静电平衡条件下,导体内部的电场强度为零。所以,如果把一空腔导体放在静电场中,如图 1-12 所示,导体内部和空腔中的电场强度便会处处为零,电力线将终止于导体的外表面而不能穿过导体进入内腔。这种空腔导体内部不会受到外部电场影响的性质,叫做静电屏蔽。对比较精密的仪器、仪表及电子元器件等,为了避免外电场的影响,时常采用这种静电屏蔽法。

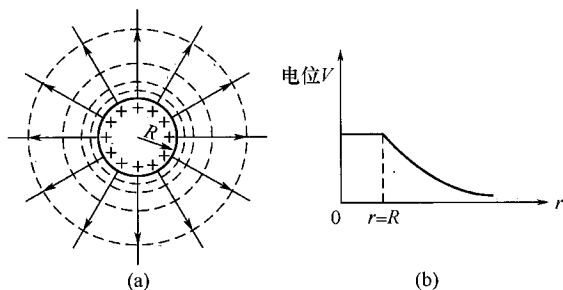


图 1-11 球形带电导体的电力线(实线)与等位面(虚线)以及电位分布曲线

(a) 球形带电导体; (b) 电位分布图
 r —离球心距离

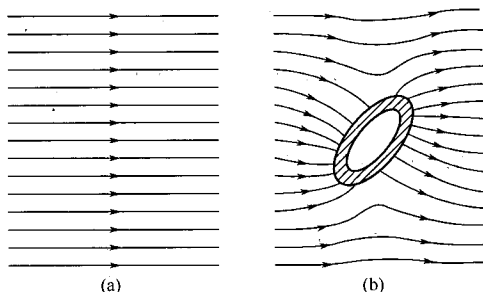


图 1-12 空腔导体内部场强为零
(a) 均匀电场; (b) 空腔导体放在静电场

还可以把带电体放入不带电的空腔导体内,使带电体产生的电场不影响外界物体。如图 1-13 所示,把一个带正电的物体放在空腔导体内,由于静电感应,空腔的内表面将感应负电荷,空腔的外表面将感应正电荷 [图 1-13 (a)]。如果将空腔导体的外表面接地,地球上的电子就会同空腔外表面的正电荷中和,空腔导体外表面便不带电了 [图 1-13 (b)]。这样,空腔导体内部的带电体所产生的电场便不会影响到外界物体,这也是一种静电屏蔽作用。如为避免高压设备的电场影响人身安全,常采用这种屏蔽法。

综上所述,一个接地的空腔导体,可以隔离内、外电场的影响,这就是静电屏蔽的原理。在工程上,常用金属网罩或栅网等做空腔导体。带电作业用的屏蔽服、直流测试仪表的屏蔽罩都是利用静电屏蔽的实例。

4. 尖端放电

在静电平衡时,导体所带的感应电荷只能分布在导体的外表面。因为电荷只有分布在导体的外表面,才能使导体内部任何一点电场强度为零,并使导体表面上任何一点的电场强度都垂直于该点表面,这样,自由电子不再受到电场力的作用而作定向运动,从而处于静电平衡状态。

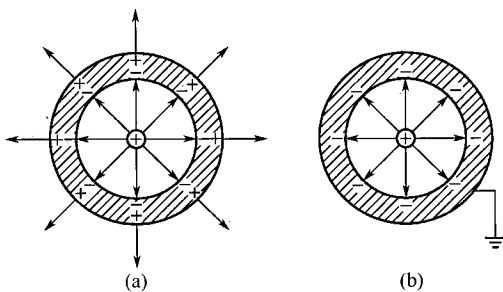


图 1-13 静电屏蔽

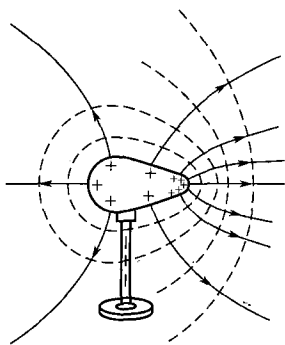


图 1-14 曲率最大的地方电荷面密度也最大

实验证明，电荷在导体表面的分布情况决定于导体表面的形状，表面曲率越大之处，电荷分布越多。图 1-14 所示是一个不规则形状的带电体，它表面各处的电荷分布是不均匀的。导体尖端处的曲率最大，在静电平衡时，该处的电荷最集中，电场强度最强。如果使尖端更尖，那么尖端处的电场强度就会大到足以使附近的气体电离（不导电的气体变成具有自由电子和正、负离子的导体的现象，称为气体的电离。静电除尘器所以能使气体中的灰尘带电，就是由于进入除尘器的含尘气体被高压强电场电离的结果）。当空气电离时，带电导体尖端就迅速放出电荷并和气体中的异性电荷发生中和，这种现象叫做尖端放电。

避雷针、避雷线是应用尖端放电原理防止雷击建筑物、电气设备及输电线路的例子。当有雷云接近时，避雷针、线是接闪器，该处感应的电荷最多，电场最强。利用尖端放电效应，雷云首先对避雷针、线放电，巨大的雷电流由此经接地线引入大地，使被保护范围内的设施避开雷击而受到保护。特别要注意的是避雷针、线必须良好接地。未接地或接地不良的避雷针、线，将使被保护物更易遭受雷击。

高压电气设备的尖角处极易放电，形成电晕或者击穿，所以应尽可能使其表面光滑平坦，不出现尖角，以避免或减小电晕，从而减少能量损失和避免发生事故。例如 SF₆ 断路器的触头就做得很简单而圆滑。

第二节 电 路

一、电路的概念

为了获得电流而把有关的电气设备加以适当的组合所构成的总体叫做电路。简单地说，电路就是电流经过的路径。电路的又一名称为电网络，通常它们是相互通用的，但网络具有“复杂”的意思，可以概括各种各样的电路。

1. 电路的组成

一个完整的电路包括电源设备、负载设备和中间设备三个部分，如图 1-15 (a) 所示。

电源设备：产生电能或电信号的设备，又称激励源。常用的电源设备有电池、发电机、各种信号发生器等。它们或者把别种形式的能量（如化学能、机械能等）转换为电能，或者把一种波形的信号转换为另一种波形的信号。通常称前者为电源，称后者为信号源。

负载设备：用电设备的总称，简称负载。电灯、电炉、电动机等都是负载，它们分别将电能转换为光能、热能和机械能。

中间设备：包括传输电能的连接导线；控制电路通、断的开关；对电路进行测量、保护用的设备，等等。

2. 电路图

任何实际电路都是由实际设备组成的，

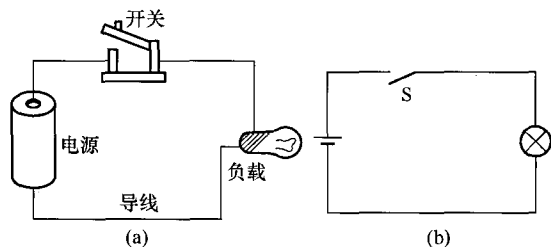


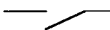
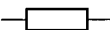
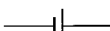
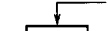
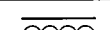
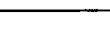
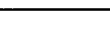
图 1-15 电路及电路图

(a) 电路；(b) 电路图

这些实际设备的电磁性能一般比较复杂，不便于用数学方法分析。因此，在分析和研究电路的工作状态时，总是把构成电路的实际设备抽象成一些理想化的模型，这些理想化的模型叫做理想电路元件，简称元件。电路理论中引用的基本元件有电阻、电容、电感及电源等，它们都是具有两个端钮的二端元件，其中电阻、电容、电感称为无源二端元件，电源叫做有源二端元件。

在工程上，为了讨论和计算的方便，往往用统一规定的图形符号来代表电路中的各种具体元件。表 1-2 中是一些常用电工图形符号。应用这些图形符号，就可以把图 1-15 (a) 所示的实际电路画成图 1-15 (b) 所示的电路模型图，简称电路图。

表 1-2 部分电工图形符号

图形符号	名称	图形符号	名称	图形符号	名称
	开关		电阻		接机壳
	电池		电位器		接地
	一般电源		电容		端子
	线圈		电流表		连接导线
	铁心线圈		电压表		不连接导线
	直流发电机		直流电动机		熔断器
	直流发电机		直流电动机		电灯

3. 常用电路名词

以图 1-16 所示电路为例，介绍几个有关电路的常用名词。

(1) 支路：电路中的每一分支电路叫做支路。如图 1-16 中的 bcd、bad 和 bd 都是支路。其中支路 bad 和 bcd 中含有电源，称为有源支路；支路 bd 中没有电源，称为无源支路。

(2) 节点：三个或三个以上支路相连接的点叫做节点。如图 1-16 中的 b 点和 d 点都是节点。

(3) 回路：电路中任一闭合路径叫做回路。如图 1-16 中 abda、bcd b 和 abcd a 都是回路。

(4) 网孔：内部不存在支路的回路叫做网孔。如图 1-16 中的 abda 和 bcd b 便是网孔。网孔是一种特殊的回路，只对平面电路有效。

(5) 独立回路：一般来说，凡是含有其他回路没有用过的新支路的回路为独立回路。图 1-16 中 abda、bcd b、abcd a 三个回路只有两个是独立的，因为其中有一个不符合独立回路的条件。网孔都是独立回路。

图 1-15 (b) 所示的电路只有一个回路，没有节点和支路，称为无分支电路或单回路电路。

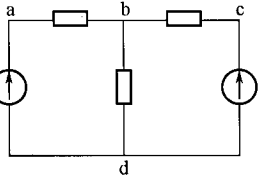


图 1-16 电路示例