



全国电力职业教育规划教材
职业教育电力技术类专业培训用书

实用电工

黄院臣 编著



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>



全国电力职业教育规划教材
职业教育电力技术类专业培训用书

内 容 要 点

本书为电力行业职业技能鉴定教材，也是电力行业职业技能鉴定题库的主要来源。本书共分五章，第一章为绪论，第二章为直流电路，第三章为交流电路，第四章为电机，第五章为电力电子技术。本书可作为电力行业职业技能鉴定教材，也可作为电力行业职业技能鉴定题库的主要来源。

实用电工

常州大学图书馆
藏书章



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为全国电力职业教育规划教材。全书共分为两篇 11 章, 主要包括第一篇准备知识——电学和磁学, 第二篇电工学包括电流及电路、直流电路分析、电路的一般分析方法、电路的网络原理(定理)及等效变换、交流电及正弦电路分析、电路中的共振、三相电路、非正弦周期电路、简单(线性)电路中的过渡过程概述。

本书旨在普及实用电工知识, 既可作为高职高专院校电力技术类专业的教材, 也可作为电力工程生产现场的培训教材, 还可作为对电工知识有兴趣的读者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

实用电工/黄院臣编著. —北京: 中国电力出版社, 2010. 2
全国电力职业教育规划教材
ISBN 978-7-5123-0060-6

I. ①实… II. ①黄… III. ①电工—职业教育—教材 IV. ①TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 016127 号

中国电力出版社出版、发行

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

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2010 年 2 月第一版 2010 年 2 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 17.5 印张 425 千字

定价 28.00 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

电的发明在人类发展史上具有划时代意义，是人类认识自然、文明进步的一次飞跃。电的瑰丽和神奇，奠定了现代文明的今天。

然而，电是微观世界运动的一种表象，它的奥妙也使人们对它的了解较为困难。

鉴于此，作为一名实践多年的电气工程师，编者有责任为普及和传播电的知识不懈耕耘，试图在揭开电的奥妙方面做些努力，共建一座通往知识彼岸的宽阔桥梁。

编者认为，学习不仅应继承，更应当发展。在传播知识的同时，重要的是传递一种科学的思维方式和学习方法。编者在多年的实践中，着重于对事物认知方法的探索创新，在问题的分析和表述上开辟蹊径，逐步在认识论和方法论上形成一些积累，在此奉献给大家共享。

现代电学是一个广泛的知识领域，但无论强电或弱电，都是基于电学基本理论。本书与先期出版的《电力系统基础》是编者近年来编著的两部姐妹篇，旨在从浩瀚的知识海洋中捋出一条“实用”主线，致力于基础性、系统性、实用性、通俗性题材的创作，望能为大家提供一些可读性较强的读物。

在本书编写过程中，编者欲达初衷，争取在创作上博采众长又具有特色。

(1) 本书虽以教科书的体例编写，但尽量与实际融合，明确一个定位为“大众化”，贯穿一条主线于“实用性”，体现“三个结合”即学用结合、教学结合、理论与实际结合。

(2) 集多年的探索与思考，力求分析透彻，理性清晰，逻辑规律，物理意义明确，表述通俗，便于理解。

(3) 在内容的组成上，以基本内容为主，并在相关方面作了适当必要的关联和外延，力求完整与全面，以达到知识结构的体系性和主体突出原则。

(4) 在内容的组合上，注重系统性运用并繁简相融，以体现知识内容更好地有机连接和主线突出原则。

(5) 在表现手法上适当运用语言文学技巧，如比喻、对比、伏笔、呼应诸方法，尽力使内容贯通、叙说生动，既不失教科书的严谨性，又力求雅俗共赏，为大多数人所理解。

(6) 在普及知识基础上接续了适当的知识提高部分，启发大家进一步学习。

希望本书能为大家的学习带来裨益，也望其成为一个共同学习的连接纽带。

本书由长沙电力职业技术学院李高明教授主审并提出了很多宝贵意见，在此向其表示衷心的感谢。本书在编写过程中参阅了相关文献，并得到有关人士的大力支持，在此一并向他们致谢。

由于编者经验和能力所限，书中难免有不足之处，敬请读者批评指正。

本书基于普及读物，比较适合作为电力行业职业教育教材和生产现场培训教材。在使用中可根据需要有所选择，如书中带*号的章节和第二篇第八、九章可作为选修内容或高级培训人员的培训内容等，本书还可作为广大学生的参考书籍。

编者

2010年3月

目 录

前言

第一篇 准备知识——电学和磁学

第一章 电学	1
第一节 电现象及其物理本质	1
第二节 电荷间相互作用力的确定——库仑定律	3
第三节 电场强度、电力线和电位	4
第四节 电场中的导体及电动势、电介质极化	14
第五节 电容现象	20
第二章 磁学	24
第一节 磁现象及磁学知识	24
第二节 磁感应强度、磁力线和磁通量	26
第三节 电流与磁感应强度关系	29
第四节 磁场间的相互作用力	31
第五节 电磁感应现象及其定律——磁生电关系	33
第六节 互感与自感	38
第七节 涡流及趋肤效应	41

第二篇 电 工 学

第三章 电流及电路	45
第一节 电流	45
第二节 电路与电源	48
第三节 物质的导电性及其机理	52
第四节 电导、电阻现象及其参数计算	53
第五节 理论电路概念及电路模型	55
第四章 直流电路分析	59
第一节 电路概述及其基础定律	59
第二节 负载元件的典型连接及等效值计算	62
第三节 电网络概念及电流、电压的参考方向	69
第四节 电路的基本定律——基尔霍夫定律	72
第五节 电路计算概述	76
第六节 电功率和电功量（电能量）计算	82
第五章 电路的一般分析方法	87
第一节 KCL、KVL 的独立方程数	87

第二节	支路电流法	89
第三节	回路电流法	91
第四节	节点电位(压)法	96
小结		101
第六章	电路的网络原理(定理)及等效变换	103
第一节	叠加原理	103
* 第二节	对偶原理	107
* 第三节	特勒根原理	109
* 第四节	互易原理	110
第五节	等效变换的总体概念及相关定理	112
小结		119
第七章	交流电及正弦电路分析	122
第一节	概述	122
第二节	正弦交流电的产生	123
第三节	正弦交流量的特征及要素	124
第四节	正弦交流量的表示法	127
第五节	正弦交流量的平均值和有效值	131
第六节	正弦交流电路的基本分析	135
第七节	正弦交流电路计算概述	153
第八节	改善功率因数的意义和方法	172
第八章	电路中的共振	176
第九章	三相电路	187
第一节	对称三相电动势概念及三相电路	187
第二节	对称三相电路分析	189
第三节	对称三相电路的计算	194
第四节	不对称三相电路的概念	202
第十章	非正弦周期电路	207
第一节	概述	207
第二节	周期函数分解为傅里叶级数简介	209
* 第三节	非正弦周期量的有效值、平均值及相关因数	213
* 第四节	非正弦周期电流电路的计算法	215
* 第五节	电路参数对电流、电压波形的影响及滤波	221
第六节	对称三相电路中的高次谐波分析	223
第十一章	简单(线性)电路的过渡过程	230
第一节	电路中的过渡现象	230
第二节	R - C 串联电路接至直流电源的过渡过程	232
第三节	R - L 串联电路接至直流电源的过渡过程	239
第四节	R - C 及 R - L 串联电路接至交流电源的过渡过程	245
第五节	R - L - C 串联电路的过渡过程	252
第六节	R // L // C 并联电路的过渡过程	269
参考文献		272

第一篇 准备知识——电学和磁学

关于电学的研究是从物理学开始的,通过对静电现象和动电现象的逐步研究,最终形成了完整的电磁学理论,并在此基础上发展出各个学科分支。电学的研究和发展,既是物理学的基础理论,也是工程技术方面的基础知识。因此在学习电工学知识之前,首先应了解电磁学的相关内容,才能打好基础,建立完整的知识体系。

电的广泛应用是和电能的各种特性紧密联系着的。

(1) 电能可以很容易地转变为机械能、光能、热能、化学能等其他形式的能量,所以利用电能作为能源最为简便。

(2) 电能可以在瞬息之间从发电的地点,经过很长的距离,传输到另一地点去,功率大而且能量的散逸少,这就为大生产提供了有利的条件。

(3) 电能还可由电磁波的形式在空间传播,能够在极短的时间内把信号传送到遥远的地方,缩短了时空距离,克服了空间遥远的困难。

(4) 电能便于远距离控制和自动控制,使工业自动化和自动化成为可能。

(5) 电能可以方便地从其他一次能源转换而来,为人类提供了一种全新的能源。

因为电能具有这些优越的特性,所以它在近代技术上创造了许多“奇迹”。

第一章 电 学

第一节 电现象及其物理本质

1. 电现象

人类对“电”的认识是从电现象开始的。远古时期就有“雷公电母”之说,实践中发现物体的带电现象也很早。纪元前7世纪古希腊的哲学家就描述过:“用布摩擦过的琥珀能够吸引轻小的东西”。我国东汉时期的学者王充在他的《论衡》一书中,也有“琥珀拾芥”的记载。但是进一步的认识却很迟缓,直到1600年,英国医生吉伯(Gilbert)又发现玻璃、硫黄、松香等也具有与琥珀同样的性质。人们把处于这种状态中的物体称为电化了的或带了电的物体。

事实上,任何两种不同质料的物体相互摩擦后,都能带电,只是因为绝缘体(如前文提到的琥珀、玻璃等)不易传电,容易显出局部带电现象而已。可见,电现象是物质的一种普遍现象。科学家罗蒙诺索夫认为雷电也是由于空气中的粒子随气流运动相互摩擦而产生的。

之后,人类经过不断的实践和研究,对物质世界的认识进入了更高层次的阶段,特别是对微观世界的探索,才揭开了“电的本质之谜”。系统的电学研究是在欧洲文艺复兴时期后开展起来的,到19世纪才建立起完整的电学理论,为现代电学奠定了基础。随着科学的不断发展,人类逐步进入了电的瑰丽世界……

2. 物质的电结构理论——电的物质性学说

从物质的宏观认识到微观认识,是人类认识史上的飞跃。电现象的物理本质其实就是物质微观世界中作用力的一种表现。

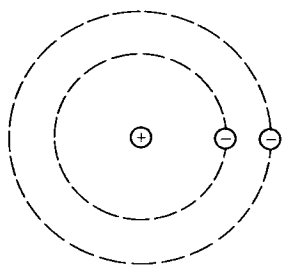


图 1-1 原子模型图

由近代物理学可知，任何物质元素都是由分子、原子组成的。而原子又由原子核（中子、质子）和绕核运转的若干个电子组成（见图 1-1），其核内质子和核外电子数量相等，且相互之间有一种吸引力——电性力。电性力与万有引力、磁性力和原子核力等，都是物质之间相互作用的基本形式。

这就回答了“电”是什么的问题：电是一种物理现象，是物质中原子核与电子间存在的一种作用力（电性力）；电现象就是这种电性力在特定情况下的外向表现；由电性力而形成的能量称为“电能”。

物质在正常状态时，原子核对电子的向心力与高速运转的电子产生的离心力相平衡，原子状态稳定，对外不显电性力，呈现电中性状态。

但是，如果原子由于“外来原因”而失去或吸收了部分电子，使原子状态发生变化，这时的原子就不再是中性状态，对外就显现出了“电性力”——吸引或排斥，即物质带了电。由于原子核和外围电子间的相互作用力随物质的不同而有强弱，故有的物质容易失去（或吸收）电子，即容易起电。

物理学规定：失去电子的原子带正电；多余电子的原子带负电。即原子核带正电（质子带正电、中子不带电），电子带负电，二者所带的正、负电是相等的，正常状态时处在一个原子内相互吸引而中和。因此可以清楚地知道：电的含义指的是原子核与电子间的一种相互作用力；电子（名词）则是微粒家族中的一员。

以上就是物质的电结构理论及其带电过程描述。若物体受到某种特定的外力：失去了部分电子的物体带上了正电；获得了多余电子的物体带上了负电。如摩擦起电（是因为摩擦时的热能增加了物体中的热运动，使电子增加动能而逸出）等。

总之，电是物质本身存在的一种属性，是一种物理现象，是物质微观世界运动的一种表象，是物质微观粒子（电子）在其他力的作用下发生特定运动而表现出来的一种能量形式。从哲学观点讲，物质的电结构是内因，而外力则是外因，外因通过内因而起作用。人们对电本质的认识是对物质世界的进一步认识。

3. 电荷

为了形象地表达物质的电现象，人们用一个特定的词——电荷来表示。这样，对于物质的带电，即认为它带有了电荷。电荷是“电性作用力”的体现，而电性力的载体就是“质子和电子”。由此可见，质子带正电性力为正电荷；电子带负电性力为负电荷。实验证明，在自然界中只存在两种电荷，即正电荷（ $+q$ ）和负电荷（ $-q$ ）。

有了电荷的概念，就可以定性地描述物质的电现象。由此可以进一步说，物质在正常状态时，也总是有等量的正、负电荷同时存在。即原子核（质子）所带的正电荷和所有电子所带的负电荷数量相等而相互中和，所以对外不显“电性”，称为电中性状态。

而使物体带电，就是使物体所带的正电荷或负电荷超过中和时的数量（过剩电荷或净电荷），打破原来的中性状态，成为带电状态。处于带电状态的物体称为带电体，带电体就是带有了“过剩电荷”的物体（相对于正常状态时）。显然，带有过剩正电荷的物体称为正带电体；带有过剩负电荷的物体称为负带电体。

电荷是一种客观存在的物质，电荷既不能被创造，也不能被消灭，它们只能从一个物

体上转移到另一个物体上，或者在一已知物体内移动。这一结论符合物理学的基本定律——物质守恒定律。

电荷间，同性电荷互相排斥、异性电荷互相吸引（即电性力，简称电力）——这是电学中的一个基本规律。任何带电现象，都是两种电荷的分离过程所形成的，在分离过程中需要付以某种形式的能量（如摩擦），以反抗电荷间的相互作用力而做功，从而转变成电能（外力做功）；相反地，两种电荷的互相中和过程中电能量转变为其他形式的能量（电能做功）。所以，伴随着物体的带电和中和过程，必定有电能和其他能量形式间的转换，符合物理学基本定律——能量转换和守恒定律。

如何确定物体的带电程度，即带有多少电荷量呢？电荷量的“自然”单位应该是一个电子或一个质子。但这个单位太小，或者说我们不可能去尽数电子或质子的数量。电荷量的多少归根到底还是要用作用力的大小来表示。下面要讲的“库仑定律”即通过作用力赋予了电荷“实用定量意义”。

实验中，有一种最简单的电荷测量仪——金箔验电器（见图 1-2），当带电体接触其上部金属球时，下部的可动金箔片就会受到同号电荷的斥力而张开，可以观察物体的带电情况。

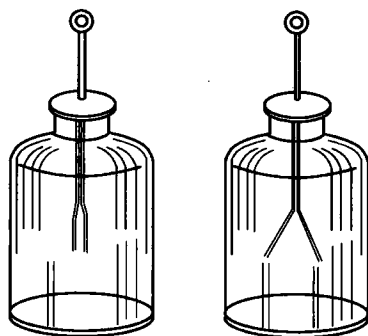


图 1-2 金箔验电器

4. 电力场（简称电场）

物理学认为，任何物质之间的相互作用不能“超距作用”。那么，电荷间的作用是通过什么“中间媒介”传递的呢？人们经过长期的实践，认识到“电荷”的周围存在着“电场”，二者是一个统一的整体。电荷间的相互作用力（电力）就是通过电场来作用的，所以也叫电场力（现代科学证明，凡是有质量或占空间的东西都是物质，所以“场”是一种特殊物质，虽然无形不可见，但却是一种实在的东西）。

第二节 电荷间相互作用力的确定——库仑定律

1785 年，法国物理学家库仑（Coulomb）通过实验，首先定量地确定了电荷间相互作用的基本规律——库仑定律：在真空中，两个“点电荷” q_{01} 与 q_{02} 之间的相互作用力的方向沿着它们的连线，其作用力的大小和电荷 q_{01} 与 q_{02} 的乘积成正比，而和它们之间的距离 r 的平方成反比

$$F = k \frac{q_{01} q_{02}}{r^2} \quad (1-1)$$

式中 k ——比例系数，其值取决于式中各量的单位，在静电系单位—— $\text{cm} \cdot \text{g} \cdot \text{s}$ 制中 $k=1$ 。

如果两个电荷是同种的，则 q_{01} 与 q_{02} 的符号相同，公式中的力 F 就是正的，表示两个电荷互相排斥；如果两个电荷是异种的，则 q_{01} 与 q_{02} 的符号相反，力 F 就是负的，表示两个电荷互相吸引。

即在真空中两个相等的点电荷，相距为 1cm ，如果相互作用力为 1dyn （达因， $1\text{dyn}=10^{-5}\text{N}$ ）时，则每一个点电荷规定为电荷量的单位（1静电系电荷量单位）。

这就是著名的库仑定律，它是电学的基础定律，确定了电荷间作用力的大小和方向，并且通过作用力描述了物体所带电荷量的多少。

根据这一定律，电荷的概念就有了定量的意义。有了电荷的定量概念，就可以定量地表示物体的带电程度。通过实验测定：一个电子所带的电荷量为 4.8×10^{-10} （静电系电荷量单位）。

工程上采用较大的实用系单位（或叫电磁系单位）—— $m \cdot kg \cdot s$ 制。在这种单位制中，长度的单位为 m （米），力的单位为 N （牛顿），电荷量的单位为 C （库仑）。由此，一个电子所带的电荷量为 $1.6 \times 10^{-19} C$ ； 6.25×10^{18} 个电子所带的电荷量为 $1C$ 。

虽然不同的物质元素有不同的原子结构，但无论哪一种元素的原子，它的原子核所带的正电量（质子所带的正电量），总是等于它的核外所有电子所带负电量的总和。

必须指出，库仑定律是在真空中用点电荷作用得到的最简单也是最基本的结论。在一般情况下，其相互作用和点电荷的大小、形状以及周围电介质都有关系，情况很复杂。如果是在非真空中（即考虑电介质的影响）研究两个点电荷的作用力，其定律式子应变为

$$F = \frac{q_{01}q_{02}}{\epsilon r^2}$$

式中 ϵ ——介电常数或电容率，各种物质有不同的 ϵ 值，真空的 $\epsilon=1$ 。

而对于“点电荷”，理论上是指这样的带电体：它们的大小（线度）和它们之间的距离相比小到可以忽略，以至其大小和形状对相互作用力的影响小到可以忽略不计。但在一般情况下不能任意地把两个带电体当作点电荷处理。实验证明，带电体应是许多点电荷的集合，带电体之间的相互作用力应是各点电荷之间相互作用力的矢量和。即求出两个带电体上每一对点电荷之间的相互作用力，再求矢量和，就可得到两个带电体之间总的作用力，这说明电力服从于力的矢量和法则。

第三节 电场强度、电力线和电位

在一定情况下，物体上所带的电荷可以暂时处于相对静止状态，称为静止电荷（简称静电）。静止电荷产生的电场为静电场。我们将讨论静电场的基本性质，即根据“主电场中放入一电荷”时所发生的物理现象，引入反映电场性质的两个物理量——电场强度和电位的概念。

电场有两种重要表现：①处于电场中的电荷都要受到电场的施力——电场力（静态情况）的作用；②电荷在电场中移动时，电场力要做功——电场功（动态情况）。这都表明电场具有能量。

1. 电场强度

这里先以电场的第一种表现——电场力的角度研究电场的性质，引入反映电场性质的第一个物理量——电场强度。

设在真空中一带电体 Q 周围产生电场系统，将一个“试验电荷” q_0 放到电场系统里，根据它所受电场力的大小和方向来认识电场的性质。

[试验电荷在理论上是指一个电量很小的点电荷，是为了使它的自身电场不致影响原电场。]

实验表明，对同一个试验电荷 q_0 来说，在电场中不同点所受力 F 的大小一般是不同的，在靠近 Q 的地方所受力较大，在远离 Q 的地方所受力较小；其方向一般也不同。这就反映

了在场中的不同点，电场的强弱程度是不同的（见图 1-3）。

由“库仑定律”可知道：电荷受力 F 的大小不仅与试验电荷所在点的电场强弱程度有关，且还与试验电荷自身所带的电量有关

$$F = \frac{Q}{r^2} q_0 \quad (\text{与 } q_0 \text{ 电量成正比})$$

可见，只有在忽略试验电荷自身电量因素影响的情况下，才能唯一地表示出电场中某一点的强弱程度。

进一步研究表明，力 F 和试验电荷 q_0 的比值 $F/q_0 (=Q/r^2)$ 只和 Q 电场位置点有关，而与试验电荷 q_0 电量无关，在某一点它是一个恒量。

由此可认识电场的一种（力的）性质：对电场中的任何一点来说，放在某点的试验电荷所受的力跟它的电量的比总是一个恒量，因此该比值可以表征电场的情况。

为了表示电场的这种性质，引入一个新的物理量——电场强度 $\vec{E}$

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} = \frac{Q}{r^2} \quad (1-2)$$

电场中某点的电场强度，就是该点电场对电荷的施力大小，是电场力的表度。在数值上就是放在该点的试验电荷所受的力跟它的电量的比值。即令 $q_0=1$ ，则 $|\vec{E}| = |\vec{F}|$ ，等于单位电荷在该点所受到的电场力。电场强度是从对电荷施力的角度描述电场的物理量。

就电场系统 Q 而言，其场强值与距离的平方成反比关系，离 Q 越远的地方场强越弱。并且电场强度是具有方向的，其方向规定为正电荷在那点所受电场力的方向。因此，电场强度是一个（具有数值和方向的）矢量，用 $\vec{E}$ 表示 [电场强度可以认为是（单位试验电荷时）电场施力能力的标度]。

根据公式 (1-2) 可以确定电场强度的单位：在实用系单位制中，力的单位是 N（牛顿），电量的单位是 C（库仑），场强的单位是 N/C（或 V/m）。即在电场中某一点上 1C 电量所受力是 1N，则该点的场强就是 1N/C（或 V/m）。

必须指出，电场强度 $\vec{E}$ 与电场力 $\vec{F}$ 是互相联系区别的两个概念。场强是描述电场中各点电场的强弱和方向的物理量，电场中某点“不因是否放有试验电荷”而影响该点的场强情况。而电场力则是电荷在某电场中所受的力，放入其他电荷时方能显出“有力的现象”，且它的大小不仅与所在点的电场强弱程度有关，还与电荷本身的电量成正比。

2. 电力线——电场的图示

电场虽然是物质，但是不可见。为了形象而量化地表示电场的存在及其分布情况，帮助人们了解电场这个概念，英国物理学家法拉第引用了一个辅助概念——“电力线”图示法来表示电场。电力线的可行性是可以用实验验证的，如图 1-4 所示为石膏小晶体在带异号电荷的两个锡箔圆片周围的排列情形，显示出了这个电场的力线图形。可以看出，电力线有始有终，发于正电荷归

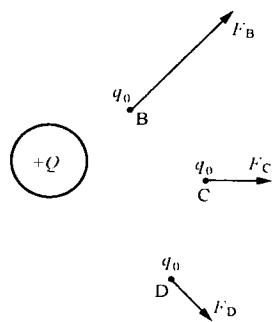


图 1-3 带电体通过电场发生相互作用

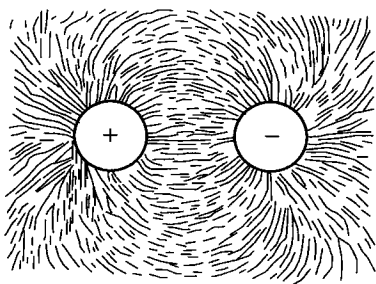


图 1-4 石膏小晶体在带异号电荷的两个锡箔圆片周围的排列情形

于负电荷，意味着电荷是可以单独存在的。静电场是“有源场”，这是电场的一个重要性质。

为了准确地表示电场及电场强度，既表示其大小又表示其方向，将电力线按一定规定画成的一系列曲线（简称力线或 $\vec{E}$ 线）。

(1) 采用几何的方法，规定使这些曲线上每一点的切线方向与该点的场强方向一致，也就是电力线决定了它所通过的每一点的电场强度的方向，即电力线每一点的切线方向表示了该点电场强度 $\vec{E}$ 的方向（见图1-5）。如果特殊情况时电力线是直线，则直线箭头就是场强方向。

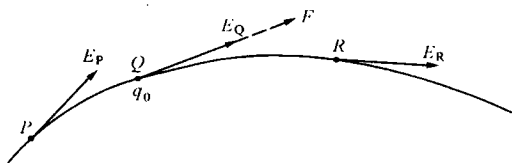


图1-5 一条电力线

(2) 按照电力线的本来含义它的数目应是无穷多的，但是为了使图形可行，规定将相对面积内力线的疏密程度与场强结合起来。即在电场中穿过垂直于某点场强方向的单位面积元 ΔS 内的力线条数 ΔN 与该点的强弱程度 $\vec{E}$ 成正比

$$\frac{\Delta N}{\Delta S} = \vec{E}$$

就是说，通过垂直于场强 $\vec{E}$ 的单位面积元内的电力线条数等于该面积上场强 $\vec{E}$ 的数值，即密度 $\Delta N/\Delta S$ 表示了某处场强 $\vec{E}$ 的大小。图1-6~图1-8所示为几种典型电场的电力线。

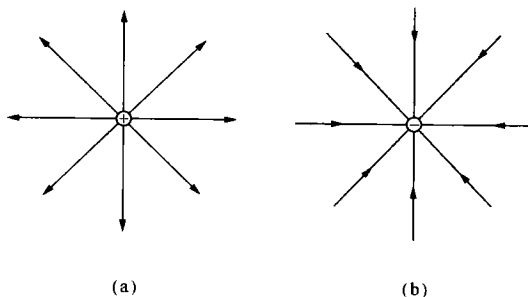


图1-6 点电荷的电力线
(a) 正电荷；(b) 负电荷

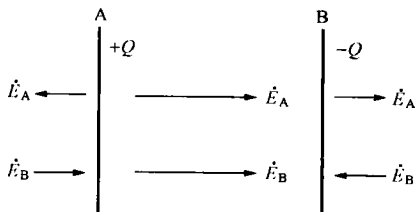


图1-7 平板匀强电场
(电源原理) 电力线

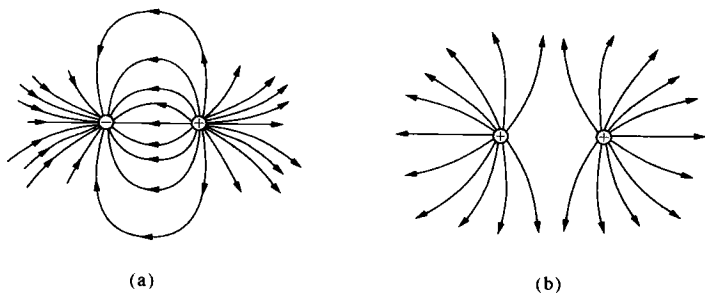


图1-8 两个电荷间的电力线
(a) 两个等值异号电荷；(b) 两个等值同号电荷

分析电力线的图形，它有两种性质。

(1) 因为静电场的电力线表示场强的方向，所以其中的任何一条电力线都是起自正电荷而终止于负电荷，或一直伸展到无限远处，决不会自行连起来形成闭合的回线，且不会中断（具有连续性）。

(2) 因为静电场中任何一点上只有一个场强的方向，所以任何两条电力线都不可能相交。

应该注意，电力线是假设存在的，目的是为了电场概念形象化，并不是电场中真有这些线的实质存在。由电力线可以判断出电场中各点的场强方向，即表示出了放在该点上的正电荷 q_0 所受的电场力 $\vec{F}$ 的方向。但在一般情形下，电力线并不是一个正电荷在电场中的运动轨迹。

另外，若在电场中某一区域内各点的场强数值相等、方向一致时，则称该区域的电场为均匀电场（也叫均强电场），均匀电场中的电力线是一组等距平行的直线（最简单的也是最重要的形式，在实验研究中经常要用到）。当两个带等量异号电荷的平行板之间的距离远小于板面几何尺寸时，称其为“无限大”均匀带电平板。从对称性讲，两平板除边缘附近外， $\vec{E}_A$ 和 $\vec{E}_B$ 是无限大均匀带电平面的场强，量值为 $2\pi\sigma/\epsilon$ (σ 为单位面积电荷)。即在两平板中间，因 $\vec{E}_A$ 和 $\vec{E}_B$ 都是从 $A \rightarrow B$ 的，其电场为均匀的（见图 1-7）， $\vec{E} = \vec{E}_A + \vec{E}_B = \frac{4\pi\sigma}{\epsilon}$ 。而在两板的外侧， $\vec{E}_A$ 和 $\vec{E}_B$ 是反方向的，则总场强 $\vec{E} = \vec{E}_A - \vec{E}_B = 0$ 。

3. 电位或电动势

继而以电场的第二种表现——电场功的角度研究电场的性质，引入反映电场性质的第二个物理量——电位。

从理论上讲，对于一般的电场系统（如图 1-9 所示点电荷电场系统），是一个“无限范围”概念，就好像太阳光一样，是以带电体为中心而无限辐射的。图 1-9 (a) 所示就是一个 $+Q$ 电场系统，可以想象随距离 r 的增大，“电力场”在逐渐减弱，直至“无限远处”（即到了电场之外），电场力为零。图 1-9 (b) 所示 $-Q$ 电场系统的电力线方向与之相反。

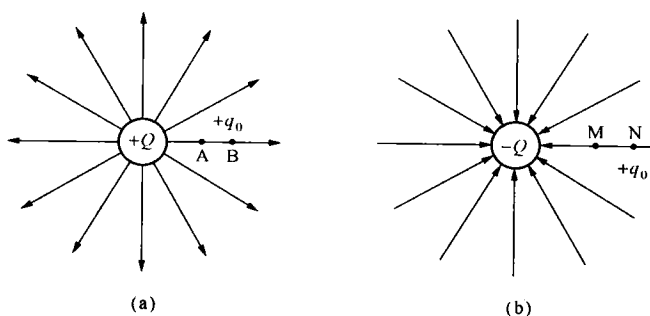


图 1-9 点电荷电场系统

(a) 正电荷；(b) 负电荷

处在电场中的电荷，要受到电场施力 $F = q_0 \vec{E}$ ，且移动时电场力要做功。我们先以真空中的 $+Q$ 电场系统，放入试验电荷 $+q_0$ 说明。电力场中移动电荷做功的情形，跟在重力场

中移动物体做功的情形很相似。

(1) 在重力场中, 要使物体由地面(或低处)移到高处时, 就一定要有外力作用到物体上, 反抗重力来使其移动。在物体移动过程中, 外力所做的功就等于物体增加(终点一起点)的位能或叫势能(相当于重力做负功)。

同样在电力场中, 要把 q_0 从无限远处(或 B 点)移到 A 点时, 就一定要有外力作用到 q_0 上, 反抗电场力来使其移动。在 q_0 移动过程中, 外力所做的功就等于 q_0 增加(终点一起点)的电位能或叫电势能(相当于电场力做负功)。

(2) 在重力场中, 位于一定高度的物体, 在重力吸引下由高处降落到低处(或地面), 在物体移动过程中, 重力所作的功就等于物体减少(起点—终点)的位能; 到达地面时, 物体所具有的位能为零。

同样在电力场中, 处于 A 点的 q_0 , 在电场力排斥下从 A 点移动到 B 点(或无限远处), 在 q_0 移动过程中, 电场力所做的功就等于 q_0 减少(起点—终点)的电位能; 到达无限远处时, q_0 所具有的电位能也为零。

通过一系列的证明得出结论: 试验电荷在任何电场中移动时, 电场力所做的功仅与这个试验电荷的大小以及起点和终点在电场中的位置有关, 而与路径的形状无关, 并且经过一个任意的闭合回路时, 电场力所做的总功为零。这与重力场中的特性是一样的。证明时总是先在最简单的均匀电场中, 如图 1-10 所示, 试验电荷 q_0 所受的电场力为 $F = q_0 \vec{E}$, 当电荷由 a 点移动距离 l_{ab} 而到达 b 点时, 电场力所做的功(力乘以距离等于功)为: $A_{ab} = Fl_{ab} = A_{ac} + A_{cb} = 0 + F \cdot \cos\theta \cdot l_{ab} = F \cdot l_{cb} = q_0 \vec{E} l_{cb}$; 进而再推广到一般电场, 如图 1-11 所示, 上述结论也是正确的(证明从略)。

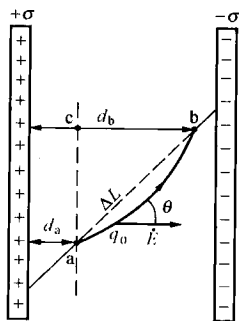


图 1-10 均匀电场中电力做功与
路径无关的证明用图

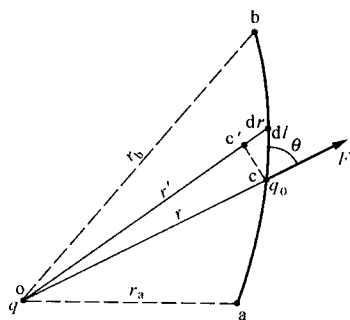


图 1-11 一般电场中电力做功与
路径无关的证明用图

可见, 电力场做功的这种特性和重力场做功完全相同。因此可以仿效重力位能那样, 认为电荷 q_0 在电场中任何一个位置都具有一定的电位能(电势能) W_a , 而电场力对该电荷 q_0 所做的功值就是它的电位能改变的量度值(注意正负)。所以通过求功即可以确定电场中某一点处电荷所具有的电位能。[即静电场和重力场一样都是“保守力场”, 可以认为电荷在电场中任一给定位置也具有一定的位(势)能, 称为电位能(或电势能) W]。

设想产生电场的电荷系统的分布是固定的, 则可知以下两点。

(1) 在斥力场 [$Q(+)$ $\longleftrightarrow +q_0$; $Q(-)$ $\longleftrightarrow -q_0$] 中, 则当 q_0 在电场力推动下, 逐渐离

开这一电荷系统时，电场力做正功，电位能逐渐减小，到 q_0 离开这电荷系统无限远处时（电场之外），所受的电场力为零，电位能为最小（见图 1-12）。

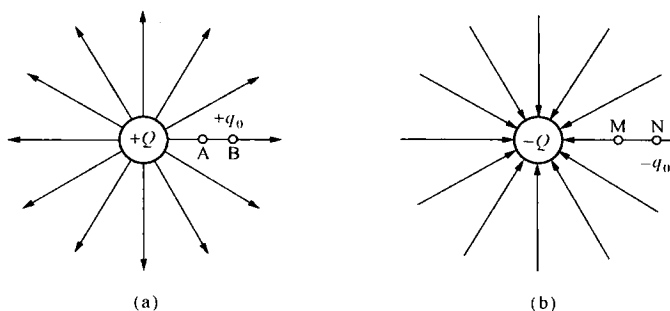


图 1-12 斥力场

(a) 正电荷电场；(b) 负电荷电场

(2) 而在吸力场 $[Q(+)\rightarrow\leftarrow q_0; Q(-)\rightarrow\leftarrow +q_0]$ 中，则当 q_0 在外力推动下（反抗电场吸力），逐渐离开这一电荷系统时，电场力做负功，电位能逐渐增大，到 q_0 离开这电荷系统无限远处时（电场之外），所受的电场力也为零，但电位能为最大（见图 1-13）。

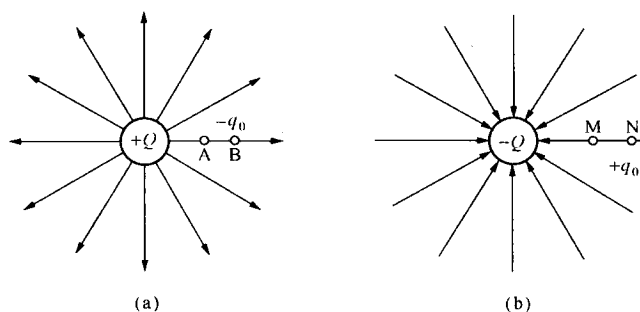


图 1-13 吸力场

(a) 正电荷电场；(b) 负电荷电场

通常就取试验电荷离开产生电场的电荷系统无限远处作为量度电位能的起点，即取 $W_\infty = 0$ 。按照这个规定，可见电荷 q_0 在电场中任一点 a 的电位能为

$$W_a - W_\infty = W_a = A_{a\infty} = q_0 \int_a^\infty \vec{E} d\vec{l} \cos\theta \quad (1-3)$$

式中 q_0 ——试验电荷；

$\vec{E}$ ——场强；

$d\vec{l}$ ——位移元；

θ ——位移元 $d\vec{l}$ 与场强 $\vec{E}$ 之间的夹角。

式 (1-3) 即为是电场中某一点 a 处电荷所具有的电位能（因为是非均匀场，所以用积分）。

我们看到：在斥力场中的电位能是正的，因为电场力和试验电荷是同号，也表明离电场系

统越远时, 试验电荷所具有的电位能越小; 而在吸力场中的电位能是负的, 因为电场力和试验电荷是异号, 也表明离电场系统越远时, 试验电荷所具有的电位能越大 (其绝对值越小)。

可见, 电位能 W_a 是对于试验电荷 q_0 的概念。且试验电荷所具有的电位能不仅与所在电场有关, 还正比于 q_0 所带电量。

[上面用到积分, 因为 $\vec{E}$ 是变化的, 积分可用来求非均匀变化的总体量。]

但是, 我们的最终目的是探求电场的性质: 所以比值 $\frac{W_a}{q_0}$ 只与电场中给定点 a 的位置有关, 而与试验电荷 q_0 的自身因素无关, 在某一点它是一个恒量。

这样, 我们又认识了电场的一种 (做功的) 性质: 对电场中的任何一点来说, 放在某点的电荷所具有的电位能跟它的电量的比, 总是一个恒量, 因此可以用该比值表征电场的情况。为了表示电场的这种性质, 引入另一个新的物理量——电位 (或电动势) U

$$U_a = \frac{W_a}{q_0} \left(= \frac{A_{a\infty}}{q_0} = \int_a^\infty E dl \cos\theta \right) = \frac{Q}{r} \quad (1-4)$$

电场中某点的电位, 就是该点相对于无穷远处 (参考点) 的电位置高低, 是电场功的表度。在数值上就是放在该点的电荷的电位能跟它的电量的比, 即令 $q_0=1$, 则 $U_a=W_a$, 就是单位正电荷在该点所具有的电位能, 等于单位正电荷从该点经过任意路径到无限远时电场力所做的功 (无限范围概念), 是从对电荷做功的角度描述电场的物理量。

就电场系统 Q 而言, 其电位与距离成反比关系。

由电位的定义式 (1-4) 可见, 如果 Q 是正的, 电位也是正的, 离开电荷越远, 电位越低, 到无限远处为零, 这是最小值; 如果 Q 是负的, 则电位也是负的, 离开电荷越远, 电位越高 (其绝对值越小), 到无限远处为零, 这是最大值。

图 1-14 (a) 所示为一个正电荷 ($+Q$) 的电场, 试验电荷 $+q_0$ 受的是电场斥力, 要把它从 B 点移到 A 点的时候, 外力要反抗电场力而做功, $+q_0$ 的电位能就要增加, 这表示 $+q_0$ 在 A 点的电位能大于它在 B 点的电位能。由此可见, A 点的电位高于 B 点电位, 即表示电场力斥动试验正电荷从 $A \rightarrow \infty$ 所做的功, 比 $B \rightarrow \infty$ 所做的功大。一般说来, 在正电荷 ($+Q$) 的电场中, 离 Q 越近的地方电位越高, 而在 ∞ 处电位最低。

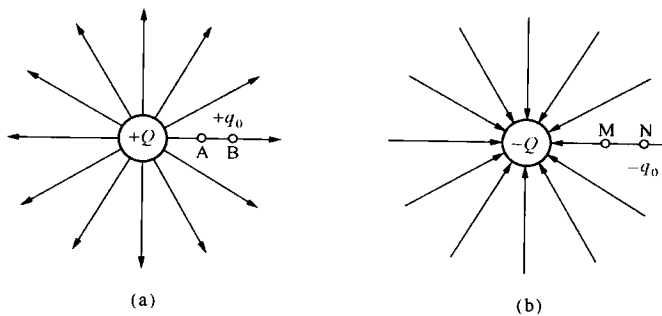


图 1-14 电位能、电位说明

(a) 正电荷电场中的电位能及电位; (b) 负电荷电场中的电位能及电位

图 1-14 (b) 所示为一个负电荷 ($-Q$) 的电场, 试验电荷 $+q_0$ 受的是电场吸力, 要把它从 M 点移到 N 点的时候, 外力要反抗电场力而做功, $+q_0$ 的电位能就要增加, 这表示

$+q_0$ 在 N 点的电位能大于它在 M 点的电位能。由此可见, N 点的电位高于 M 点电位, 即表示电场力吸动试验正电荷从 $-Q \leftarrow N$ 所做的功, 比 $-Q \leftarrow M$ 所做的功大。一般说来, 在负电荷 ($-Q$) 的电场中, 离 $-Q$ 越近的地方电位越低, 而在 ∞ 处电位最高。

[图 1-9 中可直观地看到, 逆着电力线方向的地方电位高; 顺着电力线方向的地方电位低。]

根据公式 (1-4) 可以确定电位的单位: 在实用系单位制中, 电位能的单位是 J (焦耳), 电量的单位是 C (库仑), 电位的单位是 V (伏特), 即在电场中某一点上 1C 电量的电位能是 1J, 则该点的电位就是 1V。即 $1V = 1J/1C$ 。1V 等于用 1J 能量移动 1C 电荷所变动的电位。

[显然, “电位” 是用一点量来描述电场的性质的, 可以认为是 (单位试验电荷时) 电场做功能力的标度。]

至此, 我们已经认识了电场的两种重要性质: 电场强度和电位。这两个性质特别是电学的基础。场强是电场的力的性质, 知道了场强就可以知道电荷在电场中所受的力; 电位是电场的能的性质, 知道了电位就可以知道电荷在电场中的电位能及电场的做功能力。[关于电场强度、电位这些概念的理论实验都是在真空中进行的, 如果是在非真空中 (即考虑电介质的影响), 则情况更为复杂, 公式一般为

$$E = \frac{Q}{\epsilon r^2}$$

$$U_a = \frac{Q}{\epsilon r}$$

式中 ϵ ——介电常数或电容率, 各种物质有不同的 ϵ 值, 真空的 $\epsilon=1$ 。

我们应清楚, 在概念分析中电位是从电场中某一点相对于无穷远处 (电位=0) 的电位位置高度。但在理论上讲, 一点的位置高度本来就是“相对的”, 是相对于“参考点”而言的, 随参考点选的不同其相对高度也发生变化。可见, 电位也只具有相对的意义, 而在实际应用我们更注重的是场中两点之间的“电位之差”, 而对于各点的电位绝对值则不一定需要知道。因此, 常选择一些实用的电位参考点作为分析问题的基点。

我们生活的地球是一个导体, 可以认为它的电位是一个恒量 (据测定其数值约为 $-8.2 \times 10^8 V$)。所以常取大地作为量度电位的起点 (0 电位参考点, 与以海平面为零高度测量空间高度的情况相类似), 有时还可能取电路中某一点作为 0 电位参考点 (理论上讲可以是任意的, 但有一定惯例)。这样的思路是不会影响问题的分析的。

4. 电位差——电压

电学中, “电位理论” 是很重要的概念, 但由于它的相对性, 一般不便直接应用。有实际应用意义的, 即需要的是两点间的电位差——电压。某两点 a、b 间的电压可写为

$$U_a - U_b = U_{ab} \left(= \frac{W_a - W_b}{q_0} = \frac{A_{ab}}{q_0} \right) \quad (1-5)$$

即电场中 a、b 两点间的电压, 就是 a、b 两点间的电位之差, 是电场在有限范围内做功能力的标度。在数值上等于单位电荷从 a 点移动到 b 点时, 电场力所做的功 (有限范围概念)。

根据公式 (1-5) 可以确定电压的单位: $1J/1C = 1V$ 。

电压单位在实用制单位中也是 V (伏特)。1V (电压) 为: 电场力推动 1C 电荷由 a 点移到 b 点, 所做的功为 1J 时, 则 a、b 间电压就是 1V。同样的, 若所做的功为 nJ, 则电压为 nV。大的单位有 kV (千伏)、MV (兆伏); 小单位有 mV (毫伏)、 μV (微伏)。