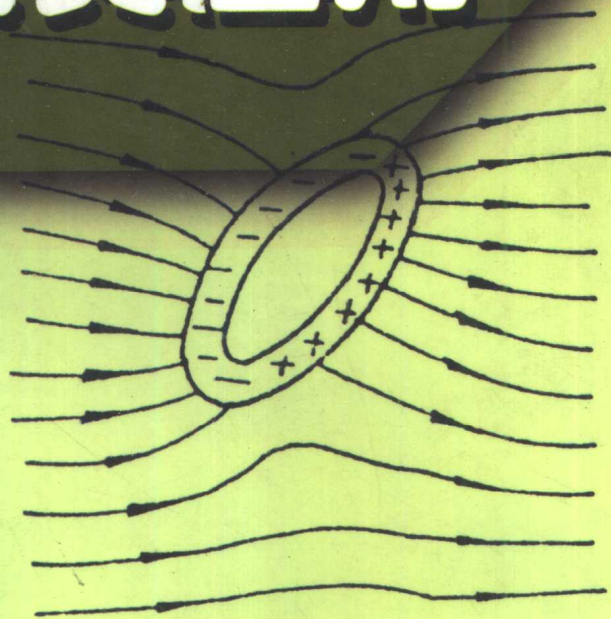


教育部高等工程专科电工、电子系列改革教材

# 电磁学 及其应用

戴琳  
侯文  
徐熙文  
编



中国电力出版社

教育部高等工程专科电工、电子系列改革教材

---

# 电 磁 学 及 其 应 用

戴琳 侯文 徐熙文 编  
孔凡才 主编

中国电力出版社

## 内 容 提 要

本书系按教育部高等工程专科电工、电子系列改革教材的改革方案和基本要求编写的。

本书是以电磁学理论为主线,着重叙述电磁学理论在实际工程中的应用。它概括了普通物理中电磁学和电工基础的相关内容,包括静电场、电容器、静电现象及其应用、电流的磁场和电磁力、铁磁材料、直流磁路、直流电磁铁、电磁感应、自感和互感、交流铁芯线圈、电磁场以及电磁学单位制等内容。这些内容既是电气类专业重要的基础知识,也是电工基础、电子技术基础和电机学等技术基础课程必不可少的内容。因此它是高等工科院校电气类专业的一门结合实际应用的重要的公共基础课。教学时数为50~60学时。

本书可作为高等工程专科院校电气类专业适用教材,也可供有关科技人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

电磁学及其应用/戴琳等编. —北京:中国电力出版社,1998.6

ISBN 7-80125-730-8

I. 电… II. 戴… III. 电磁学-高等学校:专业学校-教材 IV. 0441

中国版本图书馆CIP数据核字(98)第10013号

中国电力出版社出版、发行  
(北京三里河路6号 邮政编码100044)  
北京市地矿印刷厂印刷  
各地新华书店经售

\*

1998年8月第一版 1998年8月北京第一次印刷  
787毫米×1092毫米 16开本 12.25印张 275千字  
印数0001—5560册 定价18.00元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

**教育部高等工程专科电工、电子系列  
改革教材编委会**

主任：牛维扬

委员：孔凡才      孙建三      胡宴如

李崇贺      陈小虎      石生

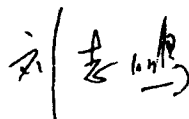
## 序 言

教学改革是一个系统工程，它涉及到专业设置改造，人才培养模式改革，课程体系、教学内容和方法改革以及教学组织管理改革等方方面面的工作，需要以转变教育思想和观念为先导，以主动适应社会主义现代化建设需要为目标，以提高教育质量和办学效益为根本目的，认真踏实地开展。其中，课程体系、教学内容和方法的改革是教学改革的难点所在。

为了集中专科学校集体的智慧，群策群力，协作攻关，高教司在第一教学改革试点专业学校中成立了数学等六个系列课改革课题组，希望汇集各校改革经验和人力，在基础性质的系列课改革上有所突破。电工、电子系列改革课题组就是其中之一。该课题组在中国电力企业联合会教培部的直接领导与支持下，在电工、电子校内实习基地建设上做了卓有成效的工作，进而从培养电类专业学生基本电工能力出发，按大电工技术的概念，研讨并构建了从电学物理基础直至基本电工技术应用范围的七门电工、电子系列课，并编写了相应的教材，希望以此培养学生的电工技术基础能力，这对高等工程专科电类专业的教学改革、做了切实的工作。

电工、电子系列改革课题组由南京电力高等专科学校、哈尔滨工业高等专科学校、沈阳电力高等专科学校、南京动力高等专科学校、太原电力高等专科学校等 16 所高等工程专科学校的电类试点改革专业教师组成。他们根据各自改革的实践，通过反复研讨，提示“以工程原理为核心，增强工程原理应用，讲授与实践紧密结合，着眼培养工程素质”的教材编写原则，并付诸实施。因此，电工、电子系列改革教材应当是符合高等工程专科教育培养“第一线”“应用性”人才要求的，是切实可行的。

但是，完成课程体系和教学内容的改革，绝不可能一蹴而就，尚需反复实践和修改，经过反复锤炼。希望参加课题组的 46 个专业，尤其是已批准试点的 46 个电类专业共同实践，集思广益，协作修订，推陈创新，最终创造出面向 21 世纪、面向实际，适用于应用性人才培养、具有高等工程专科特色的系列课程教材。



1998 年 4 月

## 前 言

本书是根据教育部高等工程专科电工、电子系列改革课题组主持下起草的《电磁学及其应用》改革方案，在系列课程改革课题组指导下编写的。

本书从工程原理出发，以电工基础为核心，将物理、电工、实际应用三者有机地结合起来。系统地介绍了电磁学中各物理量及其单位、量纲的定义过程和它们的物理含义，详细地阐述了电磁学的基本定律、定理和它们在工程实际中的应用。

本书在编写中，力求阐明概念，突出重点，注意理论与实际的联系，注重方法论的叙述，并编排了例题、实验、小型实际课题设计，以及一些与工程实际应用相联系的阅读材料。以便于学生自学，也便于教师组织学生进行讨论、上台宣讲和实践训练。书中有些实例可能涉及后续章节的内容，列入是为了拓宽读者视野，也有利于学生将前后内容联系起来，因为在工程实际中，各种知识都是相互渗透、相互交叉的。学习时请读者注意，虽然书中内容较为丰富，涉及的面也比较广，但全书的主干内容并不多，望读者牢固掌握其中的主干内容，并把着眼点放在能力培养和技术知识的应用上。此外，书中各章末均有指导复习的小结、思考题与习题。以期通过学习，使学生可获得必要的基础知识和较强的技术应用能力。文中小号字为选学内容。

本课程部分内容涉及到高等数学中的矢量代数和一元微积分基础知识，请学习时注意数学表达式的物理含义和高等数学的运用。

根据有关规定，本书使用我国法定计量单位和工程技术上仍在使用的单位。

本书可供高等工程专科学校学生使用，也可以供有关科技人员参考。

本书的改革方案由上海理工大学孔凡才教授起草；本书的第一、二、三、十章及附录由南京动力高等专科学校戴琳编写；第四、五、六章由上海理工大学侯文编写；第七、八、九章由南京电力高等专科学校徐熙文编写。全书由戴琳统稿，孔凡才教授主审。

参加本书编写大纲研讨会和审稿会议的代表有：教育部高等工程专科电工、电子系列改革课题组长、南京电力高等专科学校牛维扬副校长，上海理工大学孔凡才教授，南京动力高等专科学校李顺汀副校长、陈小虎副校长、王永止副教授、王克勤副教授、李晓惠副教授、谈苏庆副教授，承德石油高等专科学校徐军副教授，合肥联合大学闫继红副教授，太原电力高等专科学校韩肖宁副教授等，他们对编写大纲及书稿提出了许多宝贵的意见与建议。在此，我们表示衷心的感谢。由于我们的改革还处于探索阶段，加上缺少经验和限于水平，书中难免有疏漏和不妥之处，殷切期望使用本书的读者、教师和专家提出批评和建议。

编 者

1998年3月

# 目 录

序 言

前 言

第一章 静电场 .....	1
第一节 电场强度 .....	1
第二节 电位能与电位 .....	5
第三节 电场线与等位面 .....	8
第四节 静电场中的导体 .....	10
第五节 静电场中的电介质与电介质的极化 .....	11
第六节 高斯定理 .....	14
本章小结 .....	18
思考题与习题 .....	19
第二章 电容器 .....	22
第一节 电容 .....	22
第二节 电容器的连接 .....	26
第三节 电容器的分类及在工程中的应用 .....	29
第四节 分布电容 .....	41
本章小结 .....	43
思考题与习题 .....	44
第三章 静电现象及其应用 .....	47
第一节 静电干扰的生成及影响 .....	47
第二节 静电干扰的抑制与屏蔽 .....	49
第三节 静电电位的测量 .....	50
第四节 静电及其应用(阅读材料) .....	52
第五节 静电危害的防治与清除(阅读材料) .....	55
本章小结 .....	57
思考题与习题 .....	57
第四章 电流的磁场与电磁力 .....	59
第一节 磁感应强度 .....	59
第二节 磁感应线与磁通量 .....	63
第三节 磁介质 .....	65
第四节 磁场强度与安培环路定理 .....	67
第五节 洛仑兹力、安培力和安培定律 .....	70
第六节 磁性的新应用(阅读材料) .....	75
本章小结 .....	77

思考题与习题 .....	78
第五章 铁磁材料 .....	81
第一节 铁磁物质与磁畴 .....	81
第二节 磁化曲线与磁滞回线 .....	82
第三节 铁磁材料的分类 .....	84
本章小结 .....	86
思考题与习题 .....	87
实验 用示波器测定交流磁滞回线 .....	88
第六章 直流磁路 .....	91
第一节 磁路定律 .....	91
第二节 直流磁路的计算 .....	94
第三节 直流电磁铁 .....	98
本章小结 .....	100
思考题与习题 .....	101
小型课题设计 .....	103
永磁体的充磁与退磁(阅读材料) .....	103
第七章 电磁感应 .....	105
第一节 电磁感应的基本定律 .....	105
第二节 动生电动势 .....	110
第三节 涡旋电场 .....	114
第四节 涡流 .....	115
第五节 电磁感应的应用 .....	116
本章小结 .....	118
思考题与习题 .....	119
第八章 自感和互感 .....	122
第一节 自感 .....	122
第二节 互感 .....	133
第三节 理想变压器 .....	138
本章小结 .....	141
思考题与习题 .....	142
实验一 自感应电动势的测定与抑制方法 .....	145
实验二 互感线圈同名端的测定 .....	146
第九章 交流铁芯线圈 .....	147
第一节 交流铁芯线圈中的电压、电流和磁通 .....	147
第二节 交流铁芯线圈中磁滞与涡流的影响 .....	151
第三节 交流电磁铁 .....	153
第四节 电抗器 .....	156
本章小结 .....	160
思考题与习题 .....	160
实验 铁芯线圈等效电感的测定 .....	161



大型作业 .....	162
第十章 电磁场 .....	163
第一节 电磁场的基本理论(麦克斯韦方程组) .....	163
第二节 电磁波简介 .....	166
第三节 电磁干扰及电磁屏蔽 .....	170
本章小结 .....	173
思考题与习题 .....	174
附录 A 电磁学单位 .....	176
附录 B 矢量代数知识简介 .....	178
附录 C 矢量场 .....	181
附录 D 电阻器、电容器等电子元件的标称值 .....	182
附录 E 常用铁磁材料磁场强度 .....	183
附录 F 常用电感计算公式 .....	185
参考文献 .....	186
部分习题答案 .....	187

# 第一章 静 电 场

## 本 章 提 要

本章主要阐述电场 (Electric Field) 的性质和相关物理量 (Physical Quantity) 的建立。介绍反映电场内规律的环路定理 (Circuital Theorem) 和高斯定理 (Gauss Theorem) 以及它们在实际中的应用; 讨论电场中的导体 (Conductor) 和电介质 (Dielectric) 的特点和它们对电场的影响。

相对于观察者为静止的电荷 (Charge) 在它周围空间所产生的电场, 叫做静电场 (Electrostatic Field)。描述静电场的基本物理量是电场强度 (Electric Field Strength) 和电位 (Electric Potential), 它们都满足叠加原理 (Superposition Principle)。静电场和场中的导体及电介质有相互的作用, 静电场的技术应用就是在这种相互作用的基础上建立起来的。在学习本章时所遇到的处理问题的方法, 其中不少对研究其他场 [如磁场 (Magnetic Field)] 也适用, 所以本章是整个电磁场 (Electromagnetic Field) 理论很重要的基础。

## 第一节 电 场 强 度

电荷之间相互作用是通过电场来传递的。电场具有两个重要属性, 即力 (Force) 的属性和能 (Energy) 的属性。这两个重要属性构成了研究电场的两条主要线索。

### 一、库仑定律 (Coulomb Law)

电磁学最初研究的对象是带电物体。带电物体有别于一般物体的基本属性是它带有电荷, 而表征一个带电体所带电荷多少程度的物理量, 叫做电量 (Quantity of Electricity)。常用符号  $Q$  或  $q$  表示。在国际单位制中, 电量的单位是库仑, 符号为 C, 其量纲 (Dimension) 式<sup>①</sup> 为

$$[q] = [I][t] = IT$$

大量实验表明, 自然界中只存在两种电荷, 即正电荷和负电荷。电荷最基本的特性是: 同号电荷相互排斥, 异号电荷相互吸引。法国物理学家库仑 (Coulomb) 在实验的基础上得到的结论是: 真空中两个相对静止的点电荷 (Point Charge)  $q_1$  和  $q_2$  之间的相互作用力的大小与  $q_1$  和  $q_2$  的乘积成正比, 与它们之间距离  $r$  的平方成反比。作用力的方向沿着它们的连线, 同号相斥, 异号相吸。这一结论叫做库仑定律。其数学表达式为

<sup>①</sup> 本书中各个物理量的量纲式均见附录 A。

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2} \cdot \mathbf{r}^0 \quad (1-1)$$

式中： $\mathbf{F}$  为两点电荷间的相互作用力； $\mathbf{r}^0$  是  $\mathbf{r}$  方向的单位矢量 (Unit Vector)； $\epsilon_0$  为真空的介电常数<sup>①</sup> (Permittivity of Vacuum)。在国际单位制中

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{C}^2 / (\text{N} \cdot \text{m}^2)$$

$\epsilon_0$  的量纲式为

$$\begin{aligned} [\epsilon_0] &= [q]^2 [F]^{-1} [r]^{-2} \\ &= (IT)^2 (LMT^{-2})^{-1} (L)^{-2} \\ &= L^{-3} M^{-1} T^4 I^2 \end{aligned}$$

从式 (1-1) 中可以看出：当  $q_1$  与  $q_2$  同号时， $\mathbf{F}$  与  $\mathbf{r}^0$  同向，表示斥力；当  $q_1$  与  $q_2$  异号时， $\mathbf{F}$  与  $\mathbf{r}^0$  反向，表示为引力。点电荷  $q_1$  对点电荷  $q_2$  的作用力如图 1-1 所示。

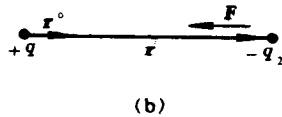
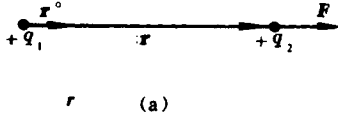


图 1-1 点电荷  $q_1$  对点电荷  $q_2$  的作用力

(a)  $q_1$ 、 $q_2$  同号；(b)  $q_1$ 、 $q_2$  异号

库仑定律只适用于点电荷。

## 二、电场和电场强度

### 1. 电场和电场强度的定义

19 世纪初，英国物理学家法拉弟 (Faraday) 提出：电荷间的相互作用力也是一种物质间的相互作用，即认为在带电体周围空间，因带电体的出现而产生出一种特殊形态的物质，叫电场。相对于观察者为静止带电体所产生的电场，称为静电场。因为静电场是电荷间相互作用力的传递者，所以我们可以根据静电场对场中的电荷所施的力来研究电场中各点的性质。

设在一个静止分布的电荷  $Q$  所产生的电场中某点  $P$  (叫做场点) 放置一个静止的试探电荷  $q_0$ <sup>②</sup>，则  $q_0$  要受到电场力  $\mathbf{F}$  的作用。由于  $\mathbf{F}$  不仅与产生电场的电荷  $Q$  及场点的位置有关，而且还与  $q_0$  的符号及数值有关。若以  $\mathbf{F}$  除以  $q_0$ ，则得到的比值将与  $q_0$  的大小无关，而仅与  $q_0$  所在点的电场性质有关，于是我们就可用它来作为描述静电场中给定点的客观性质的物理量，定义为电场强度 (简称场强)，用符号  $\mathbf{E}$  表示，即

$$\mathbf{E} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\mathbf{F}}{q_0} \quad (1-2)$$

从式 (1-2) 中可看出，电场中某点的电场强度就等于单位正电荷在该点所受的力，其方向即为正电荷在该点受力的方向。在国际单位制中，场强的单位是  $\text{N/C}$  (牛/库)，也可写为  $\text{V/m}$  (伏/米)。其量纲式为  $LMT^{-3}I^{-1}$ 。

若电场中某点的  $\mathbf{E}$  为已知时，我们就可很容易地求出放在该点的电量为  $q$  的点电荷所受的静电力

① 介电常数又称为电容率 (Permittivity)。

② 首先， $q_0$  的电量要求足够小，否则它会改变原来带电系统的电荷分布，从而改变原来电场的分布；其次， $q_0$  的几何尺寸 (相对于带电体之间的距离来说) 应足够小，小到可以把它看成点电荷。

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} \quad (1.3)$$

若  $q > 0$ , 则  $\mathbf{F}$  与  $\mathbf{E}$  同方向; 若  $q < 0$ , 则  $\mathbf{F}$  与  $\mathbf{E}$  反方向。

如果电场是由点电荷  $q$  产生, 则电场中某点的电场强度可由库仑定律和电场强度的定义式得出

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0} = \frac{\frac{qq_0}{4\pi\epsilon_0 r^2} \mathbf{r}^0}{q_0} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \mathbf{r}^0 \quad (1.4)$$

上式表明: 真空中, 点电荷所产生的电场中任一点的电场强度与该点电荷的电量成正比, 与它到场点的距离的平方成反比, 方向则由场源电荷的符号所决定。如图 1-2 所示。

由式 (1-4) 可知, 点电荷的电场具有球对称分布的特点。也就是说, 在以该点电荷为中心的同心球面上, 各点电场强度的大小相等, 方向都与球面垂直。

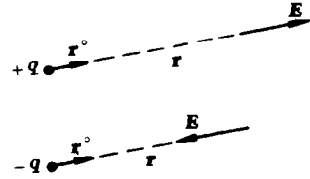


图 1-2 点电荷的电场

同时由式 (1-4) 还可知, 离  $q$  越远的场点, 电场强度就越小; 当  $r \rightarrow \infty$  时,  $\mathbf{E} = 0$ 。但当  $r = 0$  时, 不能说  $\mathbf{E}$  就为无穷大, 因为此时任何一个带电体在物理上都意味着它不再是点电荷, 从而式 (1-4) 已失效。

## 2. 场强的叠加原理

由于力的可叠加性, 因此在多个点电荷 (如  $i$  个) 共同产生的电场中, 电场强度也是可叠加的, 即

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{r_i^2} \mathbf{r}_i^0 \quad (1.5)$$

式 (1-5) 表明, 若干个电荷在空间某点的合场强, 就等于各个点电荷单独存在时, 在该点电场强度的矢量和。这就是场强的叠加原理。利用这一原理, 可以计算任意带电体

所产生的场强, 因为任何带电体都可看作许多点电荷的集合体。

**【例 1-1】** 有两个电量相等的正、负电荷 ( $+q$ ) 与 ( $-q$ ), 相距为  $l$ , 求这两个点电荷连线的中垂线上任一点  $P$  的电场强度。

**解:** 选取坐标系, 如图 1-3 所示。设  $P$  点与  $O$  点的距离为  $r_0$ 。根据式 (1-4) 知, ( $+q$ ) 与 ( $-q$ ) 在  $P$  点产生的场强  $E_+$ 、 $E_-$  的大小为

$$E_+ = E_- = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r_0^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2}$$

其方向如图 1-3 所示。根据场强叠加原理, 在  $P$  点的场强  $E_p$  为

$$\mathbf{E}_p = \mathbf{E}_+ + \mathbf{E}_-$$

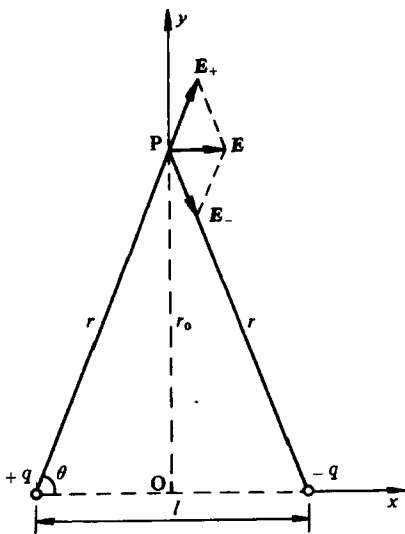


图 1-3 中电偶极子的场强

由图可见,  $E_+$  与  $E_-$  在  $x$  方向与  $y$  方向的分量分别为

$$E_{+x} = E_{-x} = E_+ \cos\theta$$

$$E_{+y} = E_{-y} = E_+ \sin\theta$$

式中:  $\theta$  为矢径  $r$  与  $x$  轴的夹角。

所以

$$\begin{aligned} E_x &= E_{+x} + E_{-x} = 2E_+ \cos\theta \\ &= 2 \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r_0^2 + (\frac{l}{2})^2} \cdot \frac{l}{2(r_0^2 + \frac{l^2}{4})^{1/2}} \\ &= \frac{ql}{4\pi\epsilon_0(r_0^2 + \frac{l^2}{4})^{3/2}} \end{aligned}$$

$$E_y = E_{+y} - E_{-y} = 0$$

故 P 点的电场强度大小为

$$E_P = \frac{ql}{4\pi\epsilon_0(r_0^2 + \frac{l^2}{4})^{3/2}}$$

其方向沿  $x$  轴正向。

当  $r_0 \gg l$  时, 这样的电荷系统叫做电偶极子 (Electric Dipole)。从  $-q$  指向  $+q$  的矢径  $l$  叫做电偶极子的轴线, 电荷  $q$  与  $l$  的乘积称为电偶极矩 (简称电矩), 用  $p$  表示, 即  $p = ql$ , 是个矢量, 其方向由负电荷指向正电荷。

### \* 3. 带电体的电场

如果带电体的电荷是连续分布的, 可认为该带电体的电荷是由许多电荷元  $dq$  组成的。任意一个电荷元  $dq$  在电场中某点产生的场强为

$$dE = \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 r^2} r^0$$

式中:  $r$  为电荷元  $dq$  到该点的距离;  $r^0$  为  $dq$  指向该点的单位矢量。

由场强叠加原理可求出整个带电体的场强为

$$E = \int_V dE = \int_V \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{dq}{r^2} r^0 \quad (1-6)$$

式中, 积分号下的  $V$  表示对电荷系的整个电荷分布范围求积分。

**【例 1-2】** 电荷  $Q$  均匀分布在半径为  $R$  的圆弧上, 圆弧对圆心所张的圆心角为  $\alpha$ 。求圆心处的电场强度。

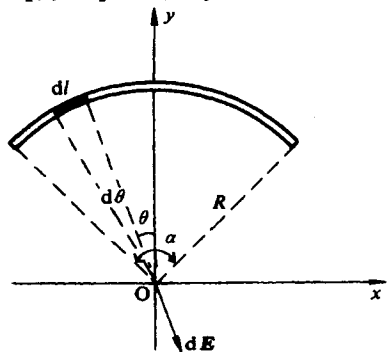


图 1-4 例 1-2 图

解: 如图 1-4 所示, 以圆心为坐标原点, 建立坐标系。在圆弧上任取一线元  $dl$ , 其电量为

$$dq = \lambda dl = \frac{Q}{R\alpha} R d\theta = \frac{Q}{\alpha} d\theta$$

则  $dq$  在圆心处产生的电场强度大小为

$$dE = \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 R^2} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 \alpha R^2} d\theta$$

方向如图 1-4 所示。

由于具有对称性, 所有线元沿  $x$  轴的场强分量之和为

零, 即  $E_x=0$ 。沿  $y$  轴的场强分量为

$$dE_y = -dE \cos\theta = -\frac{Q}{4\pi\epsilon_0\alpha R^2} \cos\theta d\theta$$

故得

$$E = E_y = \int dE_y = -\frac{Q}{4\pi\epsilon_0\alpha R^2} \int_{-\frac{\alpha}{2}}^{+\frac{\alpha}{2}} \cos\theta d\theta = -\frac{Q}{2\pi\epsilon_0\alpha R^2} \sin \frac{\alpha}{2}$$

方向沿  $y$  轴负向。

讨论: (1) 若  $Q$  为负电荷, 则  $E$  沿  $y$  轴的正方向;

(2) 若圆弧为半圆, 则  $\alpha=\pi$ , 此时

$$E = -\frac{Q}{2\pi^2\epsilon_0 R^2}$$

(3) 若圆弧为圆, 则  $\alpha=2\pi$ , 此时

$$E = 0$$

通过上述例题可以看到, 利用场强叠加原理求电场中某点的场强时, 由于场强是矢量 (Vector), 所以矢量叠加实际上归结为在所选坐标轴上各分量的叠加<sup>①</sup>。

## 第二节 电位能与电位<sup>②</sup>

在上节中引入了电场强度  $E$  来描述电场的力的属性。当带电体受电场力作用而移动时, 电场将对它做功, 这表明电场还具有能的属性。为此, 我们将引入电位  $V$  来描述电场的能的属性。

### 一、静电场力做功 静电场的环路定理

设在任意电场中有一点电荷  $q$ , 由  $a$  点沿任意路径运动到  $b$  点, 如图 1-5 所示, 则电场力对  $q$  所作的功, 写成标量积<sup>③</sup>的形式为

$$A_{ab} = q \int_a^b \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = q \int_a^b E \cos\theta dl \quad (1-7)$$

若场源电荷为  $q'$ , 则可求得功为

$$\begin{aligned} A_{ab} &= q \int_a^b \frac{q'}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cos\theta dl = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0} \int_{r_a}^{r_b} \frac{1}{r^2} dr \\ &= \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{r_a} - \frac{1}{r_b} \right) \end{aligned} \quad (1-8)$$

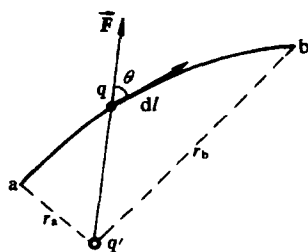


图 1-5 静电场力做功

式中:  $r_a$ 、 $r_b$  分别表示  $q'$  到始点  $a$  和终点  $b$  的距离。由此可见, 在点电荷的电场中, 电场力对电荷所作的功仅与始点和终点位置有关。根据场强叠加原理, 上述结论亦可推广到任意电荷的电场。

同时由式 (1-8) 可知, 当电荷  $q$  从电场中某点沿任意闭合路径  $L$  再回到原来位置时,

① 关于矢量代数的知识简介, 参见附录 B。

② 电位又称为电势, 在物理学中, 通常都采用“电势”一词; 而在工程中 (如电工学中), 通常采用“电位”一词, 本书将采用后者。

静电场力作功为零。即

$$A = q \oint_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0$$

因移动的电荷  $q \neq 0$ , 所以有

$$\oint_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0 \quad (1-9)$$

上式称为静电场的环路定理 (Electrostatic Field Circuital Theorem)。它表示: 在静电场中, 电场强度沿任意闭合路径的线积分恒为零。这是静电场的重要特性, 这意味着电场力所作的功仅与始点和终点位置有关, 而与路径无关。从而可引入“位”的概念, 所以静电场是有位场<sup>①</sup>。

## 二、电位能

由于静电场是有位场, 因此可以引入电位能 (又称电势能) 的概念。电荷在静电场中某位置时, 将具有一定的电位能, 电场力所作的功就是电位能改变的量度。设  $W_a$  和  $W_b$  分别表示电荷  $q$  在  $a$  点和  $b$  点的电位能, 则有

$$W_a - W_b = A_{ab} = q \int_a^b E \cos \theta \, dl \quad (1-10)$$

电位能是一个相对量, 为了说明电荷在电场中某一点的电位能的大小, 必须有一个作为参考的“零点”。若设式(1-10)中的  $b$  点电位能  $W_b$  为零, 这样电荷在  $a$  点的电位能为

$$W_a = A_{a0} = q \int_a^0 E \cos \theta \, dl \quad (1-11)$$

在实用中, 可以取无限远、大地或公共参考物作为“零点”。

## 三、电位

由式 (1-11) 可知, 电荷  $q$  在电场中某点  $a$  处的电位能与  $q$  的大小成正比, 若以  $W_a$  除以  $q$ , 则比值  $W_a/q$  与  $q$  无关, 而仅取决于电场的性质及场中给定点  $a$  的位置, 所以这一比值是表征静电场中给定点的能的性质的物理量, 称为电位。用符号  $V_a$  表示  $a$  点的电位, 有

$$V_a \stackrel{\text{def}}{=} \frac{W_a}{q} \quad (1-12)$$

式 (1-12) 表明, 静电场中某点的电位, 在数值上就等于单位正电荷在该点所具有的电位能。电位是从能量角度来描述电场性质的物理量, 它是标量。在国际单位制中, 它的单位是 V (伏), 其量纲式为

$$[V] = \frac{[W]}{[q]} = \frac{L^2 M T^{-2}}{I T} = L^2 M T^{-3} I^{-1}$$

电位也是一个相对量, 只有在规定参考零点之后, 才能确定该点的电位值。与电位能相同, 在实用上, 可取无限远、大地或公共参考物为零点。

**【例 1-3】** 求在点电荷  $q'$  的电场中任一点的电位。

<sup>①</sup> 凡是作功与路径无关的力场, 均称为有位场或保守力场。

解：由式 (1-8) 可知，电荷  $q$  在电场中  $a$  点的电位能为

$$W_a = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0 r_a}$$

则由式 (1-12) 可得电场中  $a$  点的电位为

$$V_a = \frac{W_a}{q} = \frac{q'}{4\pi\epsilon_0 r_a}$$

因  $a$  点为电场中任取的一点，故可略去  $r_a$  的下标，得点电荷  $q'$  的电场中电位分布的公式

$$V = \frac{q'}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (1-13)$$

#### 四、电位差 (电压) 与电动势

##### 1. 电位差 (电压) (Electric Potential Difference)

在静电场中，任意两点 ( $a$  和  $b$ ) 的电位之差，称为电位差，用  $(V_a - V_b)$  表示，它亦称为电压，用  $U_{ab}$  表示，即

$$U_{ab} = V_a - V_b = \frac{W_a}{q} = \frac{W_b}{q} = \frac{A_{ab}}{q} \quad (1-14)$$

式中： $A_{ab}$  为电场力移动电荷  $q$  由  $a$  点至  $b$  点所作的功。由此可得

$$A_{ab} = q(V_a - V_b) = qU_{ab} \quad (1-15)$$

【例 1-4】如图 1-6 所示， $AB = 2R$ ， $OCD$  是以  $B$  为圆心，以  $R$  为半径的半圆。 $A$  点有正电荷  $+q$ ， $B$  点有负电荷  $-q$ ，求：把正电荷  $q'$  从  $O$  点沿  $OCD$  移到  $D$  点时电场力作的功。

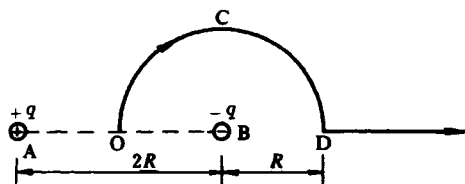


图 1-6 例 1-4 图

解：本题可利用式 (1-13) 分别求出  $O$  点、 $D$  点的电位，再根据式 (1-15) 求得电场力作的功。即

$$V_O = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R} + \frac{-q}{4\pi\epsilon_0 R} = 0$$

$$V_D = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 (3R)} + \frac{-q}{4\pi\epsilon_0 R} = -\frac{q}{6\pi\epsilon_0 R}$$

故 
$$A_{OD} = q'(V_O - V_D) = \frac{qq'}{6\pi\epsilon_0 R}$$

##### 2. 电动势 (Electromotive Force)

要在电路 (导体) 内形成稳恒的电流 (Current Flow)，必须在电路两端维持恒定的电位差。产生和维持这个电位差的装置称为电源 (Power Supply)，每个电源都有正、负两个电极，如图 1-7 所示。

在图 1-7 中，由于静电力  $F$  只能使正电荷从高电位移向低电位处，因此在电源内部必须有一种外力 (非静电力，如图中的  $F'$ )，才能把正电荷从低电位处移向高电

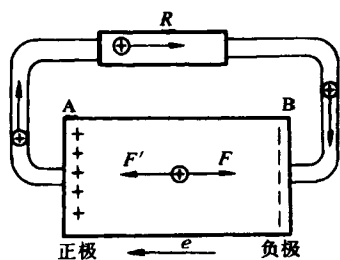


图 1-7 电源示意图



位处。为了反映电源中非静电力做功的能力，引入了电动势这个物理量。我们把正电荷  $q$  从负极（B点）移至正极（A点），外力所作的功  $A_{\text{out}}$  与电量  $q$  的比值定义为电源的电动势，用符号  $e$ <sup>❶</sup> 表示，即

$$e \stackrel{\text{def}}{=} \frac{A_{\text{out}}}{q} \quad (1-16)$$

式 (1-16) 表明，电动势在数值上等于外力移动单位正电荷所作的功。电动势的方向规定为：在电源内部由负极指向正极（参见图 1-7）。电动势是一个标量，它的单位和量纲与电压相同。

### 第三节 电场线与等位面

电场强度和电位是描述电场性质的两个基本物理量。在电场中，电场强度的情况可以用电场线来描绘，而电位的分布则可用等位面来描绘。

#### 一、电场线 (Electric Field Lines)

为了形象地描述电场，我们引入电场线这个辅助概念。为了使电场线能表达场强  $E$  的方向和大小，我们规定：电场线上每一点的切线方向即为该点场强  $E$  的方向。该点处通过垂直于  $E$  的单位面积的电场线数即等于该点处  $E$  的量值。这样，我们便可以根据电场线上每一点切线的方向来判定该点  $E$  的方向，同时也可根据电场线的疏密程度来判断电场中各点场强的相对大小。

因为不同带电体周围的电场不同，所以电场线的分布也不一样。图 1-8 即为按上述规定画出的几种典型电场的电场线分布图。从图中可以看出，电场线具有如下两个共通的特性：

- (1) 电场线起始于正电荷，终止于负电荷，不形成闭合曲线。
- (2) 任何两条电场线都不相交。这说明静电场中每一点的场强只有一个确定的方向。

#### 二、等位面 (Equipotential Surface)

一般说电场中的电位值虽然是逐点变化的，但总有一些点的电位值是相同的。在电场中，由电位相等的各点组成的曲面，称为等位面。等位面有如下性质：

- (1) 当电荷沿等位面移动时[如图 1-9(a)中 a 点至 b 点]，由式  $A_{ab} = q(V_a - V_b)$  可知，因电位相等， $V_a = V_b$ ，则  $A_{ab} = 0$ ，电场力作功为零。
- (2) 由以上分析亦可知，当  $A_{ab} = 0$  时，电场线应与等位面处处正交。
- (3) 由于电场线的方向为正电荷受力的方向，所以当正电荷沿电场线方向由 a 点移至 b 点[如图 1-9(b)所示]时，电场力作正功，则  $A_{ab} = q(V_a - V_b) > 0$ ，可知  $V_a > V_b$ ，这表明电场线是指向低电位方向的。

- (4) 对于给定的电场，可以作出无限多个等位面。若我们规定，在电场中，任意两个

❶ 电动势的符号，在物理学中，常用  $E$  表示，而在电工学中用  $E$  或  $e$  表示。为与介电系数  $\epsilon$ 、电场强度  $E$  符号区别，本书中采用  $e$  表示。