

中等专业学校教学用书

# 电工学及选矿厂电气设备

鞍山冶金专科学校編



中国工业出版社

本书是按冶金系统中等专业学校及专科学校一九五九年指导性教育计划中金属矿石精选专业四年制所要求的程度和规定教学时数（189学时）而编写的。

本书共分两部分，前一部分包括一到十章，主要叙述电路、电磁、电测、电机和工业电子学等电工学的基本理论和实际知识。后一部分包括十一到十六章，主要叙述电动机选择方法、控制器和生产机械的电气设备及电工学在选矿厂的应用等。

书中总结了在教学中所遇到的问题和经验，编写时着重电工学中的电机部分与电气设备部分中的电力拖动问题的有机结合问题，力求消除不必要的重复，并尽可能地根据专业的需要和特点取舍了内容，使之符合培养对象和培养目标的要求。

本书可作中等专业学校金属矿石精选专业四年制和三年制教材，也可供选矿厂中等技术人员自学参考。

本书是由鞍山冶金专科学校工业企业电气化教研组邱凤义、电工基础教研组徐增祿和选矿教研组李广祿等负责选编的。

## 电工学及选矿厂电气设备

鞍山冶金专科学校编

\*

冶金工业部图书编辑室编辑（北京猪市大街78号）

中国工业出版社出版（北京佟麟阁路丙10号）

（北京市书刊出版事业许可证出字第110号）

中国工业出版社第三印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

\*

开本  $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ ·印张  $16\frac{1}{4}$ ·字数 378,000

1961年8月北京第一版·1962年1月北京第二次印刷

印数 1,838—2,417·定价（9—4）1.55元

\*

统一书号：15165·481（冶金—139）

## 緒 論

在現代工業、農業、交通運輸業、通訊、國防以及日常生活各方面都廣泛的應用着電能。

電能所以能被廣泛的應用，是因為它具有下列優點：

- 1) 輸送簡便；
- 2) 可以很方便的與其他形式的能量互相轉換；
- 3) 便于根據需要而分成任何大小；
- 4) 電能的控制、測量和調整也是很方便的。

由於電能有上述優點，它在社會主義經濟建設中，起着極為重要的作用。

黨和政府對電力事業是非常重視的。解放十餘年在發電量、電器設備、發電設備等方面都取得了巨大的成績。

我國的水力資源和燃料資源非常豐富，是發展電力事業的有利條件。

現代選礦廠是生產過程高度機械化的企業，從原料進廠至選礦產品出廠要經過多種生產過程，其中任何一個工藝環節的工作制度受到破壞，就會嚴重的影響整個生產過程。

“電工學與選礦廠電氣設備”就是講述電的現象和原理，並將其應用在選礦廠中的一門課程。選礦專業的同学學習這門課程，就是在獲得了基礎知識的基礎上，了解與掌握選礦廠電氣設備的性能及實際操作技術，以便在工作中能正確地使用和維護這些電氣設備。

# 目 录

## 緒 論

## 第一篇 电 工 学

### 第一章 直流电路

|                    |    |
|--------------------|----|
| § 1-1 电场           | 1  |
| § 1-2 电压与电位        | 2  |
| § 1-3 导体与电介质       | 4  |
| § 1-4 电流           | 5  |
| § 1-5 电动势          | 5  |
| § 1-6 电路及电流在电路中的形成 | 6  |
| § 1-7 电流的功和功率      | 7  |
| § 1-8 欧姆定律及应用      | 9  |
| § 1-9 电阻及电阻与温度间的关系 | 11 |
| § 1-10 电能转换为热能     | 12 |
| § 1-11 克希荷夫第一定律    | 13 |
| § 1-12 电阻的串联与并联    | 14 |
| § 1-13 克希荷夫第二定律    | 17 |
| § 1-14 导线上电压降落的计算  | 19 |
| 复习思考题              | 20 |
| 习题                 | 21 |

### 第二章 电磁

|                   |    |
|-------------------|----|
| § 2-1 磁场的概念       | 23 |
| § 2-2 磁场对载流导体的作用  | 25 |
| § 2-3 磁感应强度和磁通    | 26 |
| § 2-4 导磁系数和磁场强度   | 27 |
| § 2-5 全电流定律和线圈的磁场 | 28 |
| § 2-6 铁磁性物质的磁化    | 30 |
| § 2-7 电磁铁         | 32 |
| § 2-8 电磁感应及感应电动势  | 33 |
| § 2-9 机械能转变为电能    | 36 |
| § 2-10 电能转变为机械能   | 37 |
| § 2-11 涡流         | 38 |
| § 2-12 自感应        | 39 |
| 复习思考题             | 40 |
| 习题                | 41 |

### 第三章 单相交流电路

|                  |    |
|------------------|----|
| § 3-1 概述         | 42 |
| § 3-2 正弦波形电动势的产生 | 42 |
| § 3-3 相位与相位差     | 45 |
| § 3-4 正弦量的图示法    | 46 |

|                    |    |
|--------------------|----|
| § 3-5 交流电的有效值      | 47 |
| § 3-6 具有电阻的交流电路    | 48 |
| § 3-7 具有电感的交流电路    | 49 |
| § 3-8 具有电阻和电感的交流电路 | 50 |
| § 3-9 交变电流的功率      | 52 |
| § 3-10 电容器         | 54 |
| § 3-11 具有电容的交流电路   | 55 |
| § 3-12 线圈与电容器的并联电路 | 57 |
| § 3-13 功效因数的意义及其提高 | 59 |
| 复习思考题              | 61 |
| 习题                 | 61 |

### 第四章 三相交流电路

|                      |    |
|----------------------|----|
| § 4-1 概述             | 62 |
| § 4-2 发电机绕组的星形和三角形连接 | 63 |
| § 4-3 发电机的相压和线压      | 65 |
| § 4-4 负载的星形连接和中线的作用  | 66 |
| § 4-5 负载的三角形连接       | 68 |
| § 4-6 三相电功率          | 70 |
| 复习思考题                | 72 |
| 习题                   | 72 |

### 第五章 电工测量和仪表

|                       |    |
|-----------------------|----|
| § 5-1 概述              | 73 |
| § 5-2 电工仪表的测量机构       | 76 |
| § 5-3 电流和电压的测量        | 79 |
| § 5-4 电功率的测量          | 81 |
| § 5-5 三相交流电路中功率的测量    | 82 |
| § 5-6 单相和三相交流电路中电能的测量 | 83 |
| § 5-7 电阻的测量           | 85 |
| 复习思考题                 | 87 |

### 第六章 直流电机

|                     |    |
|---------------------|----|
| § 6-1 概述            | 87 |
| § 6-2 直流发电机原理       | 87 |
| § 6-3 直流电机的构造       | 89 |
| § 6-4 直流电机的电势、转矩和功率 | 90 |
| § 6-5 电枢反应          | 91 |
| § 6-6 直流发电机         | 92 |

|                               |     |                        |     |
|-------------------------------|-----|------------------------|-----|
| §6-7 直流电动机.....               | 98  | §8-10 感应电动机的启动.....    | 130 |
| §6-8 直流电机的损耗与效率.....          | 107 | §8-11 特殊籠型感应电动机.....   | 133 |
| 复习思考题.....                    | 107 | §8-12 感应电动机的轉速調节.....  | 134 |
| 习题.....                       | 108 | §8-13 感应电动机的制动.....    | 135 |
| <b>第七章 变压器</b>                |     | §8-14 感应电动机的损失和效率..... | 137 |
| §7-1 概述.....                  | 109 | 复习思考题.....             | 137 |
| §7-2 变压器的构造.....              | 109 | 习题.....                | 138 |
| §7-3 变压器空载时的情况.....           | 110 | <b>第九章 同步电机</b>        |     |
| §7-4 变压器有负载时工作情况.....         | 111 | §9-1 同步发电机.....        | 138 |
| §7-5 变压器的电压变动率.....           | 113 | §9-2 同步电动机.....        | 140 |
| §7-6 变压器的功率和效率.....           | 114 | §9-3 同步电动机的功率因数.....   | 142 |
| §7-7 三相变压器.....               | 114 | §9-4 同步电动机的启动.....     | 143 |
| §7-8 自耦变压器.....               | 115 | 复习思考题.....             | 144 |
| §7-9 仪表用变压器.....              | 116 | <b>第十章 工业电子学</b>       |     |
| §7-10 多繞組变压器.....             | 119 | §10-1 概述.....          | 144 |
| 复习思考题.....                    | 119 | §10-2 逸出功与电子发射.....    | 144 |
| 习题.....                       | 119 | §10-3 二极电子管.....       | 145 |
| <b>第八章 感应电动机</b> .....        | 120 | §10-4 整流电路和滤波器.....    | 146 |
| §8-1 感应电动机的构造.....            | 120 | §10-5 三极电子管.....       | 147 |
| §8-2 旋轉磁场的产生.....             | 123 | §10-6 电子管放大器.....      | 148 |
| §8-3 感应电动机旋轉原理.....           | 124 | §10-7 多极管.....         | 150 |
| §8-4 轉差率.....                 | 125 | §10-8 气体中的电流.....      | 150 |
| §8-5 感应电动机在轉子<br>不动时的物理量..... | 125 | §10-9 充气二极管.....       | 151 |
| §8-6 感应电动机轉动时的各物理量.....       | 126 | §10-10 閘流管.....        | 151 |
| §8-7 感应电动机的工作过程.....          | 127 | §10-11 水銀整流器.....      | 152 |
| §8-8 感应电动机的轉矩.....            | 128 | §10-12 半导体整流器.....     | 153 |
| §8-9 感应电动机的机械特性.....          | 128 | 复习思考题.....             | 154 |

## 第二篇 选矿厂的电气設備

|                                |     |                                 |     |
|--------------------------------|-----|---------------------------------|-----|
| <b>第十一章 电动机及其容量选择</b>          |     | §12-5 控制继电器.....                | 173 |
| §11-1 电机的发热与冷却.....            | 155 | §12-6 保护电器.....                 | 177 |
| §11-2 連續运用电动机容量的选定.....        | 156 | §12-7 制动电磁鉄.....                | 181 |
| §11-3 短时运用下电动机容量的选择.....       | 159 | §12-8 成套电器.....                 | 182 |
| §11-4 重复短时运用时电动机<br>容量的选择..... | 160 | §12-9 自动控制与自动控制<br>綫路的基本知識..... | 184 |
| §11-5 按构造特点及技术条件<br>选择电动机..... | 162 | §12-10 电动机启动的自动控制.....          | 187 |
| <b>第十二章 控制电器与自动控制原理</b>        |     | <b>第十三章 选矿厂机械的电气設備</b>          |     |
| §12-1 控制电器的用途和分类.....          | 164 | §13-1 起重运输机械的电气設備.....          | 193 |
| §12-2 手控电器.....                | 164 | §13-2 泵类机械的电气設備.....            | 201 |
| §12-3 操縱电器.....                | 168 | §13-3 压缩机、鼓风机及<br>送风机的电气設備..... | 205 |
| §12-4 接触器.....                 | 171 | §13-4 碎矿与磨矿机械的电气設備.....         | 209 |

## 第十四章 选矿工艺过程的

### 自动检查与调整

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| § 14-1 概述.....            | 213 |
| § 14-2 原料及精选产品重量的统计.....  | 213 |
| § 14-3 贮矿仓充满率的检查.....     | 214 |
| § 14-4 矿浆浓度的自动调整.....     | 215 |
| § 14-5 矿浆 pH 值的检查与自动调整... | 216 |
| § 14-6 自动取样.....          | 218 |
| § 14-7 金属探测器及其他信号.....    | 219 |

## 第十五章 选矿厂的供电与照明

|                      |     |
|----------------------|-----|
| § 15-1 选矿厂的供电系统..... | 222 |
|----------------------|-----|

|                     |     |
|---------------------|-----|
| § 15-2 短路电流的概念..... | 224 |
|---------------------|-----|

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| § 15-3 选矿厂变电所的电气设备..... | 225 |
|-------------------------|-----|

|                      |     |
|----------------------|-----|
| § 15-4 电力网路及其计算..... | 232 |
|----------------------|-----|

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| § 15-5 电气照明的基本知识..... | 239 |
|-----------------------|-----|

|                     |     |
|---------------------|-----|
| § 15-6 电气照明的光源..... | 241 |
|---------------------|-----|

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| § 15-7 选矿厂用的照明装置..... | 243 |
|-----------------------|-----|

## 第十六章 选矿厂的电能指标

### 与安全技术

|                     |     |
|---------------------|-----|
| § 16-1 耗电量与耗电率..... | 247 |
|---------------------|-----|

|                      |     |
|----------------------|-----|
| § 16-2 选矿厂的功率因数..... | 248 |
|----------------------|-----|

|                    |     |
|--------------------|-----|
| § 16-3 电气安全技术..... | 250 |
|--------------------|-----|

# 第一篇 电 工 学

## 第一章 直流电路

### § 1—1 电 场

自然界中的任何物质都由原子构成，而原子又是由原子核和围绕原子核运行的电子所组成的。原子核的质量比电子的质量大很多，所以原子的质量差不多全都集中在原子核内。

电子带负电，它的电量 $e_0=1.6\times 10^{-19}$ 库仑，电子的电荷是最小的带负电的微粒。围绕原子核运行的全部电子所具有的总的负电荷，等于带正电的原子核的电量，所以原子是呈现中性的。

由于摩擦或其他某种原因使物体（或物体的一部分）内，正电荷或负电荷增多或减少，则此物体称为带电体。

实验证明，电荷与电荷之间，或者是带电体与带电体之间，相互有作用力存在，同性电荷相互排斥，异性电荷互相吸引。

把一个带电体放到另一个带电体周围，那么这个带电体便受到力的作用。这说明带电体的周围存在着电力，我们把存在电力的空间称为电场。电场是带电体所产生的，带电体的周围必定存在电场。

带电体与电场有着密切的联系，电场内存在电力的事实，说明电场也是一种物质形态，但这种物质不同于由原子所组成的物质，所以我们称它是一种特殊形式的物质。电场内由于存在着电力，因此当电荷在电场内时，电场就有对电荷做功的本领，这说明电场内有能量分布着。电场具有连续性，并且以很高的、完全可以确定的速度传播着（在真空的传播速度等于光速即 $3\times 10^8$ 公里/秒）。

带电体所受电场力的大小与带电体所带电量成正比。同时具有同样电量的带电体放在同一电场中的不同点上，则带电体所受电场力的大小也不相同。因此电场内各点具有强弱不同的特性。为了表示电场中各点强度不同的性质，用电场强度这样一个量来表示电场内各点的特性。

带电体在电场内某点所受的电场力（ $F$ ）与带电体所带电量（ $Q$ ）的比值，就称该点的电场强度（用 $\varepsilon$ 表示）即：

$$\varepsilon = \frac{F(\text{牛頓})}{Q(\text{庫倫})} \quad (1-1)$$

电场强度是一个矢量。是以正电荷在电场内某点所受电场力的方向，作为该点电场

强度的方向。

电场强度是表征电场中某点客观存在着一定性质的物理量，对于处在该点的带电体的电量多寡及有无带电体毫无关系。电场的方向和电场强度可以用电力线表示。

电力线的构成，是使线上任一点的切线方向就是该点电场强度的方向。电场强度的强弱是用垂直通过单位面积的电力线的数目来表示的，电力线密，则电场强，反之则电场弱。

电力线由正电荷开始，而终止于负电荷，电力线互不相交。各简单带电体的电力线分布情况如图（1-1）所示。

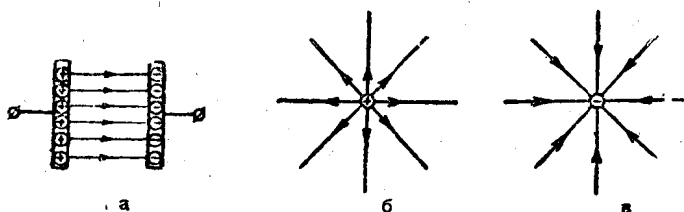


图 1-1 用电力线表示带电体周围的电场

如果电场内各点的电场强度大小都相同，而且方向一致，则该电场称为均匀电场，如图 1-1a 所示。两个带不同电荷的平行板之间的电场，就是均匀电场（设该板上电荷的密度是均匀的）。如果放置一个电荷  $Q$  在均匀电场中，它所受的力是  $F$  的话，则均匀电场内各处的电场强度都是

$$\varepsilon = \frac{F}{Q}$$

## § 1-2 电压与电位

设有一正电荷  $Q$  在均匀电场中受到电场力的作用，沿着电场力的方向从 A 点移到 B 点，经过距离  $l$ （图 1-2），电场力对电荷  $Q$  所做功（用  $A$  表示）：

$$A = Fl$$

由

$$\varepsilon = \frac{F}{Q} \quad \text{得 } F = \varepsilon Q$$

所以

$$A = Fl = \varepsilon Ql \quad (1-2)$$

用电压来表示电场内两点之间电场所能做功的性质。

电场力把电荷从一点移到另一点（由 A 移到 B）电场所做的功与被移动电量的比值称为这两点间的电压，（用  $U$  表示），即

$$U = \frac{A}{Q} = \frac{\varepsilon Ql}{Q} = \varepsilon l \quad (1-3)$$

换句话说，AB 两点间的电压就是电场力移动单位正电荷由 A 点移到 B 点所做的功。

从(1-3)式可以看出电压大小与被移动的电荷的多少无关，而与电场强度成正比。因为电压是表示两点间的性质，所以用电压表测量电压时，必须将电压表连接在所测量的两端。

在实用单位制中，功的单位是焦耳（简称焦），电荷的单位是库仑（简称库），因此电压的单位是焦耳/库仑：我们简称为伏特。即：

$$1 \text{ 伏} = \frac{1 \text{ 焦}}{1 \text{ 库}}$$

较大的电压单位是千伏：1 千伏 =  $10^3$  伏，较小的电压单位用毫伏：1 毫伏 =  $10^{-3}$  伏。由公式(1-3)可以推出：

$$\varepsilon = \frac{U}{l} \quad (1-4)$$

由上面的关系可确定电场强度的单位是：

$$[\varepsilon] = \frac{\text{伏}}{\text{米}} \quad \text{常用的单位是：} \frac{\text{伏}}{\text{厘米}}$$

电场内任一点与地面上任一点之间的电压，称为电场内该点的电位，我们认为地面的电位是零，所以电场内任一点的电位等于电场力把单位正电荷从该点移到电位为零的一点所做的功。

电位的单位也是伏特。

图1-3所示，是我们经常见到的两根低压配电线，A 和 B 两线之间的电压为220伏。如果把这两根线中的任一线 B 接地的话，则 B 线的电位为 0，A 线的电位就是220伏（以大地做为零电位）亦即 A 线和大地之间电压为 220 伏。

如图1-4所示，设负极板的电位为零电位（因与大地相联接）。电场内任一点 A 和负极板 0 之间的电压为  $U_{AO}$ ，则电场内 A 点的电位  $\varphi_A$  在数值上也等于  $U_{AO}$ ，即  $\varphi_A = U_{AO}$ 。

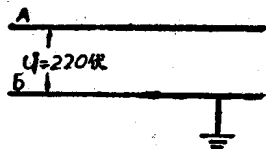


图 1-3 电压与电位的关系

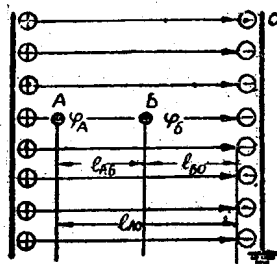


图 1-4 两点之间的电位差

同理电场内 B 点的电位

$$\varphi_B = U_{BO}$$

所以

$$\varphi_A = U_{AO} = \varepsilon l_{AO}$$

$$\varphi_B = U_{BO} = \varepsilon l_{BO}$$

由公式1-3 知  $U_{AB} = \varepsilon l_{AB}$

因之 A, B 两点之电位差为

$$\varphi_A - \varphi_B = U_{AO} - U_{BO} = \varepsilon l_{AO} - \varepsilon l_{BO} = \varepsilon l_{AB} = U_{AB}$$

由上式知，在电场内 A, B 两点之间的电位差就等于 AB 两点间的电压，因此两点间的

电位差和两点间的电压是一回事儿，只是叫法不同而已。电位是代数量，它的值可以是正值也可以是负值。

例1—1 已知电场内AB两点的电位是 $\varphi_A=20$ 伏，

$\varphi_B=-20$ 伏，试求AB两点间的电压。

解： $U_{AB}=\varphi_A-\varphi_B=20-(-20)=40$ 伏

### § 1—3 导体与电介质

所有物体依照电的性质通常分为两类——导体和电介质（绝缘体）。导体的特征是带电的质点（电子或离子），可以在导体内部自由移动。导体可分为两类：

第一类导体是金属，在金属导体内，原子外层的电子受原子核的束缚力比较小，因此这部分电子容易脱离自己的原子核，而在原子与原子之间，从一个原子核的作用范围移到另一个原子核的作用范围。这些电子就象气体分子似的杂乱无章的运动着，这样的电子称为自由电子。

在正常的情况下，电子处于不规则的热运动状态，缺少电子的正电荷（失去电子的原子）仅能在它自己的位置作微弱的振动。它是构成金属的骨架，它的活动性不大。

第二类导体是电解液（酸、硷、盐的水溶液）。溶质溶解在溶剂中后，在溶剂的作用下形成离子。它们都是带电的微粒。带正电的称为正离子，带负电的称为负离子。它们能在电解液中移动，因而也是导体。

除导体外还有一些物体其内部的原子核对其周围的电子束缚的较紧，即使是最外层的电子也不容易脱离原子核的束缚而变成自由电子，所以这类物体内部的自由电子非常少，我们称这一类的物体为绝缘体或者电介质。例如：橡胶、瓷类、云母、纸类及空气等都是属于这一类物质。绝缘材料是电气工程中不可缺少的材料。

应当指出，导体和非导体之间没有非常明显的界限，它们是相对而言的。

在电介质内，电场强度未达到某限值以前，电介质可以认为是不导电的（导电性极微可以忽略），这是因为原子核外的电子不能脱离原子核的束缚成为自由电子参加导电的缘故。但是当电介质内电场强度足够强时，电介质也可以导电，这时电介质的绝缘性能便遭到破坏而变成了导体，这种现象称为电介质击穿，介质击穿的原因是由于当电场强度足够强时，把原子的电子拉出来成为自由电子参加了导电。

使某介质击穿所需要的电场强度，称为击穿强度，各种介质的击穿强度各有不同，现在举几种绝缘材料的击穿强度如下：空气 30，矿物油 50—150，电纸板 100，瓷 80—150，云母 800—2000 千伏/厘米。

用在电气设备中的电介质，其容许承受的电场强度值称为容许电场强度，常常比击穿强度小好几倍。

在导体与电介质之间，尚有一种物体称作半导体。如碳化矽、氧化铜、硒、锗、硅等。关于半导体的应用将在工业电子学一章中讲到。

例1—2 两块平行板，用厚度 $d=0.1$ 厘米的电纸板隔开，求电纸板被击穿时两板间的电压。

解： $U_{\text{击穿}}=\varepsilon_{\text{击穿}}d=100\times 0.1=10$ 千伏

## § 1—4 电 流

在正常情况下，金属导体内部的自由电子处于无规则的运动状态，通过导体任何截面的电量平均是零，故导体中无电流。

如果有电场作用于导体，则导体中的自由电子在电场力的作用下，其运动的速度在作用力的方向上有所增加，因之自由电子产生定向而有规则的运动，导体的截面就有一定的电量通过。这就是说，导体内部产生了电流。

习惯上公认，电流的方向是正电荷移动的方向。亦即公认电流的方向与电子运动的方向相反。

电流的大小是用电流强度来度量的，电流强度简称电流。电流强度在数值上等于单位时间内通过导体横截面的电量。

根据上述定义，电流

$$I = \frac{dq}{dt} \quad (1-5)$$

式中的  $dq$  是在时间  $dt$  内，通过导体横截面的电量。

如果电流的量值和方向在足够长的时间内都保持不变，则这种电流称为直流，用字母  $I$  表示。

因此 
$$I = \frac{Q}{t} \quad (1-6)$$

电流的单位是安培（简称安）

$$1 \text{ 安} = \frac{1 \text{ 库}}{1 \text{ 秒}}$$

也就是说，如果1秒钟内通过导体横截面的电量等于1库，导体内的电流就等于1安。电流较小的单位是毫安，1毫安 =  $10^{-3}$  安。

电流与导体截面积  $S$  的比率称为电流密度  $\delta$ ，即

$$\delta = \frac{I}{S} \quad (1-7)$$

电流密度通常用安/毫米<sup>2</sup>来度量。

## § 1—5 电 动 势

当导体在磁场中运动时（参看本书§2—8节），就有外力  $F_0$ （非静电力）作用于导体  $AB$ （图1—5a）内每个正负的电荷上。在外力的作用下，自由电子移向  $B$  端（图1—5a）而在该端形成过多的负电荷。在导体另一端  $A$ ，由于缺少电子而出现了正电荷（因带正电荷的原子核是导体的骨架，故正电荷虽然受外力，但不移动）。这两端的正负电荷在导体内形成了电场，这时导体内的电子不但受外力作用，同时也受到与外力相反的电场力  $F_e$  的作用（图1—5b）。

在外力作用下，自由电子移向  $B$  端越多，则反方向作用在电子的电场力也就愈大。

当电场力增大到与外力相等时，导体内自由电子即停止移动，此时我们就说导体建立了电动势。产生电动势的导体称为电源，所以电动势是表征电源使电荷升高电位的本

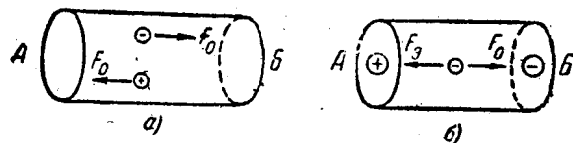


图 1—5 电荷上电场力的作用和外力作用

量的量，在数值上等于外力在 AB 一段上搬运单位正电荷所做的功称为电动势（用  $\mathcal{E}$  表示），即

$$\mathcal{E} = \frac{A}{Q} = \frac{F_o l_{AB}}{Q} \quad (1-8)$$

电动势的单位与电压的单位一样，也是伏特。

作用在正电荷上的外力方向规定为电动势的方向。

电源断路时，电源两端电压（或电位差）为

$$U = \mathcal{E} l_{AB} = \frac{F_o l_{AB}}{Q}$$

即然

$$F_o = F_e$$

所以

$$U = \frac{F_o}{Q} l_{AB} = \mathcal{E} \quad (1-9)$$

上式说明断路时，电源两端的电压在数值上等于电动势。

## § 1—6 电路及电流在电路中的形成

如上所述，在电源建立电动势的过程中，其内部电子移动，暂时有电流出现，当电场力和外力平衡时，电流即等于零。

若用导体将负载（例如电灯）连接到电源的两端来组成所谓的电路（图1—6），则电路内部（电源）以及电路的外部（包括连接导线和负载）将不断的有电流流过。电路中电流形成的过程如下：

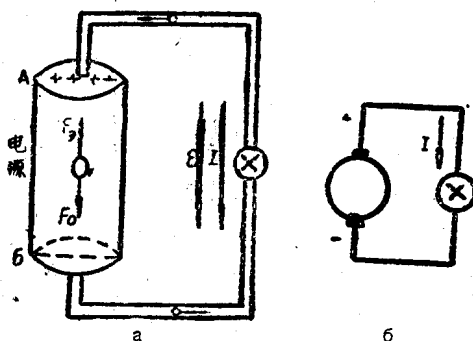


图 1—6 电流在电路中的形成过程

在电场的作用下，外部电路导体内的电子以及电源 B 端的负电荷都要经外部电路向着正端 A 移动，因之，外电路产生了电流。与此同时，由于电源 B 端负电荷的减少以及 A 端正电荷的被中和，而电源内部电场减弱，结果使电源内部的电场作用力小于外力 ( $F_e < F_o$ )，于是外力又使电子在电源内部移动（由 A 向 B）。由此可见，在闭合电

路內将产生連續不断的电流。

在外电路中，电流的方向与电场的方向一致（图1—6a）而电场的方向是由正电荷指向负电荷，即由高电位指向低电位，因此，流过連接导线及負載的电流是由高电位流向低电位（图1—6b所示）。

电流的大小与电源电动势，构成电路的导体，負載的物理性質，几何形状都有关。

在无分支的电路（串联电路）內，通过导体各处截面的电流具有相同的值。如果通过截面  $S_1$  与  $S_2$ （图1—7）的电流不是一样的話，那么，在单位時間內通过  $S_1$  的电量将不等于同时間內通过  $S_2$  的电量，这样，在截面  $S_1$  与  $S_2$  間的导体体积內必将有正电荷或负电荷积累起来。在稳定电流的情况下，将无止境的有电荷累积起来，这显然是不可能的。所以，在无分支电路內，各处截面上通过的电流必定相等。

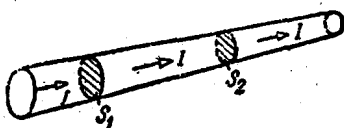


图 1—7 无分支导体內的电流

就因为无分支电路的电流到处相同，因此我們就可以用电流表来測量綫路的电流，以及可以用保險絲来保护綫路，因为它们都通过了与綫路相同的电流。

### § 1—7 电流的功和功率

根据公式（1—8），在电源内外力移动电荷所做的功以  $A$  表示，即

$$A = EQ$$

因为

$$Q = It$$

所以

$$A = EIt \quad (1-10)$$

上式表示电源内外力在時間  $t$  內所做的功。它等于机械能或其他形式的能量在  $t$  時間內轉換为电能量的数值。

公式（1—10）可以决定电源发出电能的大小。按照能量不灭定律，电源在  $t$  時間內发出的电能等于同一時間內电路各段所消耗的能量。

在外电路，电能轉換为其他形式的能量，等于电场在外电路所做的功，以  $A_1$  表示，即

$$A_1 = UQ$$

或

$$A_1 = UI t \quad (1-11)$$

式中的  $U$  是电源端电压（或負載端电压）。

在电源内部，轉換为热的电能量損失为  $A_2$ 。按照能量不灭定律，

$$A_2 = A - A_1 = (E - U) It$$

或

$$A_2 = U_0 It \quad (1-12)$$

式中  $U_0$  表示电动势和电源两端电压之差，称作电源内部电压降，即

$$U_0 = E - U$$

故

$$E = U + U_0 \quad (1-13)$$

就是說电源电动势等于电源两端电压与它的内部电压降之和。

能量变换的速率或做功的速率，称作功率，用  $P$  表示。因此，功率就是功与做功所

需要的時間的比率，用下式表示：

$$P = \frac{A}{t} \quad (1-14)$$

在电源內部，由机械能或其他形式的能量轉換为电能的速率为电源产生的功率，即

$$P_{\text{电源}} = \frac{A}{t} = \frac{EIt}{t} = EI \quad (1-15)$$

在負載內，电能变换成其他种能量的速率，称为負載功率，即

$$P_{\text{負載}} = \frac{A_1}{t} = \frac{UIt}{t} = UI \quad (1-16)$$

不能利用的功率，如損失在电源內部的功率称做損失功率，即

$$P_{\text{損失}} = \frac{A_2}{t} = \frac{U_0 It}{t} = U_0 I \quad (1-17)$$

按照能量不灭定律，电源功率等于負載所消耗的功率和电源內損失功率之和。

$$\text{即} \quad P_{\text{电源}} = P_{\text{負載}} + P_{\text{損失}} \quad (1-18)$$

如果在电路內有許多电源和負載，那么

$$\Sigma P_{\text{电源}} = \Sigma P_{\text{負載}} + \Sigma P_{\text{損失}} \quad (1-19)$$

我們不仅應該知道发电机发出的电功率等于負載需用的功率加上損耗掉的功率这种关系，而且还應該知道，在这一关系中起主导作用的是負載需用功率，因为其他两部分是随着它的变化而变化的，也就是說在发电机額定容量內发出的功率将随着負載功率的增減而增減。

功率的单位是瓦特（简称瓦），每秒产生一焦耳电能的电源具有的功率是1瓦（瓦特以字母W表示），即

$$1 \text{ 瓦} = \frac{1 \text{ 焦耳}}{1 \text{ 秒}}$$

因为  $1 \text{ 焦耳} = 1 \text{ 伏特} \times 1 \text{ 庫仑}$ 。

$$\text{故} \quad 1 \text{ 瓦特} = \frac{1 \text{ 伏特} \times 1 \text{ 庫仑}}{1 \text{ 秒}} = 1 \text{ 伏特} \times 1 \text{ 安培}$$

1瓦特就是在1伏特电压之下，通过1安培电流的功率。較大功率的单位是：1仟瓦 =  $10^3$ 瓦，电能量的单位为瓦秒或焦耳， $1 \text{ 焦耳} = 1 \text{ 瓦} \times 1 \text{ 秒}$ 。

較大的能量单位是瓦特小时和千瓦小时，1仟瓦小时等于 $3.6 \times 10^6$ 瓦秒。

单位的选用和被度量的功率大小有关。例如，通常电灯的功率用瓦特来度量，电动机和发电机的功率用仟瓦来度量。

下面是不同单位制中，能量和功率单位間的关系：

$$1 \text{ 仟克米} = 9.81 \text{ 焦} = 9.81 \text{ 瓦秒}$$

$$1 \text{ 焦耳} = \frac{1}{9.81} \text{ 仟克米} = 0.102 \text{ 仟克米}$$

$$1 \frac{\text{仟克米}}{\text{秒}} = 9.81 \frac{\text{焦}}{\text{秒}} = 9.81 \text{ 瓦}$$

$$1 \text{ 馬力} = 75 \frac{\text{仟克米}}{\text{秒}} = 736 \text{ 瓦} = 0.736 \text{ 仟瓦}$$

$$1 \text{ 仟瓦} = \frac{1}{0.736} \text{ 馬力} = 1.36 \text{ 馬力}$$

$$1 \text{ 卡} = 0.427 \text{ 仟克米}.$$

$$1 \text{ 焦耳} = \frac{0.102}{0.427} = 0.24 \text{ 卡}$$

例1—3 接在电压为 220 伏的供电綫上的电爐，取用 5 安培的电流。假設电能量每仟瓦小时为 9 分錢，求电爐使用 3 小时所消耗的电能及电费。

解：电爐消耗的功率

$$P = UI = 220 \times 5 = 1100 \text{ 瓦}$$

电热器在 3 小时内消耗的能量

$$A = Pt = 1100 \times 3 = 3300 \text{ 瓦特小时} = 3.3 \text{ 仟瓦小时}$$

$$\text{电费} = 9 \times 3.3 = 29.7 \text{ 分} \approx 30 \text{ 分} = 3 \text{ 角}.$$

例1—4 接在电压为 110 伏的电源上的电动机，取用功率 11 仟瓦，求电动机电流。

解：因为

$$P = UI$$

所以

$$I = \frac{P}{U} = \frac{11 \times 1000}{110} = 100 \text{ 安}.$$

## § 1—8 欧姆定律及应用

假設在导体两端加上直流电压  $U$ ，則在导体內形成了电場。由于电場力的作用，导体中的电子作定向移动而形成了电流。

导体两端的电压愈大，即导体内部电場力愈强，則电子移动的速度也愈大，即电流也愈大。反之若导体两端电压愈小，則电流也愈小。通过导体的电流与该导体两端电压成正比，这就是欧姆定律。它是电工学的基本定律之一。这样欧姆定律确定了电压与电流間的直綫关系。导体两端电压与流过导体电流的比例关系就是导体的电阻，以  $R$  表示。电阻是由导体的材料和几何尺寸决定的。

欧姆定律的数学表示为

$$I = \frac{U}{R} \quad (1-20)$$

由上式移項得

$$U = IR \quad (1-21)$$

即导体的两端电压等于流过导体的电流与导体电阻的乘积。

欧姆定律是分析或計算电路的一个最基本的定律。欧姆定律还告訴我們：任何一个电阻倘若有电流通过，这电阻两端必有电压（电位差）存在。倘若通过电阻的电流发生变化时，則电阻两端的电压也必然发生变化。反之，倘若电阻两端的电压发生变化时，則通过电阻的电流也发生变化。倘若电阻两端的电压不变，而其本身电阻又不变化时，則其通过的电流就不会发生任何变化。

例1—5 在电路的某一段中有一电灯，已知它的两端电压为 100 伏特，消耗的功率为 50 瓦（图1—8），求流过电灯的电流和电灯的电阻。

解：我們知道，功率

$$P = UI;$$

$$I = \frac{P}{U} = \frac{50}{100} = 0.5 \text{ 安培};$$

根据欧姆定律，电灯的电阻为

$$R = \frac{U}{I} = \frac{100}{0.5} = 200 \text{ 欧姆}$$

由（图1—9）所示是最简单的电路，以前我們曾經証明过电路中的端电压和电动势之間的关系为

$$E = U + U_0$$

根据欧姆定律，负载电阻  $R$  两端的电压（或电源端电压）为

$$U = IR$$

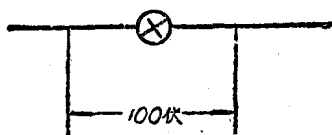


图 1—8 电路中的一段

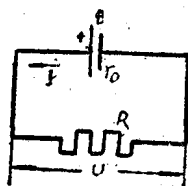


图 1—9 最简单的电路

而电源内部电阻  $r_0$  的电压降  $U_0$  等于

$$U_0 = I r_0$$

因此

$$E = IR + I r_0 = I (R + r_0)$$

由此可知：

$$I = \frac{E}{R + r_0} \quad (1-22)$$

上式得出的关系就是欧姆定律应用在整个闭合电路上的形式。

电源端电压（负载两端电压）的一般形式是：

$$U = E - U_0 = E - I r_0 \quad (1-23)$$

电路断开时，相当于外电路电阻为无穷大，在这种情况下，电流等于零，所以，

$$U = E - I r_0 = E_0。$$

上式的结果与公式（1—9）的結論相同。

如果连接导线或负载的絕緣损坏时，就要发生所谓的短路现象，如图 1—10 所示，在 AB 处发生了短路。

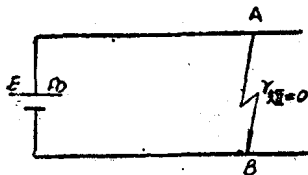


图 1—10 短路

因为短路处导线的电阻很小，可以认为近似等于零。即  $r_{短} \approx 0$

按照欧姆定律，这时的电流为

$$I = \frac{E}{\gamma_0 + \gamma_{短}} = \frac{E}{\gamma_0}$$

通常电源内部电阻  $\gamma_0$  很小，因此，短路时的电流很大。当短路电流较电器设备额定电流（所能容许的电流的最大值）大好多倍时，可能造成设备的毁坏。因之，在电路中必须装有熔断保险丝。

## § 1—9 电阻及电阻与温度间的关系

电子在导体内运动时，运动着的自由电子之间要引起碰撞，它们在原子间通过时，也要引起碰撞，因而阻碍了电子的运动，这种阻碍电子运动的物理量就是电阻，以  $\gamma$  表示。

电阻的单位是欧姆，以字母  $\Omega$  表示。

导体愈长，电阻愈大，导体截面愈大，则电阻愈小。因之，导体的电阻与其长度成正比，与其横截面积成反比。此外，电阻又与导体材料有关。所以

$$\gamma = \rho \frac{l}{S} \quad (1-24)$$

式中  $l$  ——导体的长度，米；

$S$  ——导体横截面积，毫米<sup>2</sup>；

$\rho$  ——电阻系数， $\frac{\text{欧姆} \times \text{毫米}^2}{\text{米}}$ 。

对金属导体来说，电阻系数  $\rho$  不是一个常数，它与温度有关。因此，导体的电阻是随着温度的改变而改变的。导体的电阻随温度变化的原因如下：

一方面导体的温度增高时，电子的动能加大，电子与分子碰撞的次数增多阻力增加。因此温度增高可使导体电阻增大。

但另一方面，温度增高时电子的动能加大，容易脱离原子的自由电子数目增多，促使电流加大，这种情况相当于阻力减小。因此，温度增高时，电阻是加大还是减小，这得根据那一方面的原因起主要作用来决定。当温度增高时，各种纯金属的电阻加大，炭及电解液的电阻减小，锰铜和康铜的电阻可大致不变。

金属导体电阻的相对增量，在由  $0^\circ$  到  $100^\circ\text{C}$  的温度范围内，可以足够准确的认为和温度的变动成正比，就是

$$\frac{\Delta\gamma}{\gamma_1} = \alpha (\theta_2 - \theta_1), \text{ 或 } \frac{\gamma_2 - \gamma_1}{\gamma_1} = \alpha (\theta_2 - \theta_1)$$

因此  $\gamma_2 = \gamma_1 + \gamma_1 \alpha (\theta_2 - \theta_1)$

或  $\gamma_2 = \gamma_1 [1 + \alpha (\theta_2 - \theta_1)] \quad (1-25)$

上式中的  $\alpha$  是电阻温度系数，等于温度升高  $1^\circ\text{C}$  时导体电阻的相对增量， $\gamma_1$  是在温度为  $\theta_1$  时的电阻； $\gamma_2$  是在温度为  $\theta_2$  时的电阻。

几种材料的电阻温度系数  $\alpha$  和电阻系数  $\rho$  列在表1—1中。

化学纯金属的电阻温度系数都接近于  $0.0041/^\circ\text{C}$ ，即为当温度改变  $1^\circ\text{C}$  时，它的电阻改变  $0.4\%$ （当温度改变  $10^\circ\text{C}$  时，电阻改变  $4\%$ ）。有几种合金（康铜、锰铜）的