

# 电工技术基础

北京化工学院等合编

吕砚山 主编

科学技术文献出版社

# 电 工 技 术 基 础

北 京 化 工 学 院 等 合 编

吕 砚 山    主 编

科 学 技 术 文 献 出 版 社

封面设计：王铁民

### 电 工 技 术 基 础

编 辑 者：北 京 化 工 学 院 等 合 编  
吕 砚 山 主 编

出 版 者：科 学 技 术 文 献 出 版 社

印 刷 者：重 庆 印 制 第 一 厂

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

开本：787×1092  $\frac{1}{16}$  印张：28.25 字数：720千字

1980年10月北京第一版第一次印刷

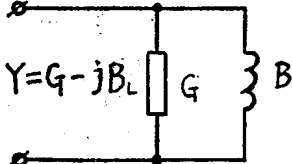
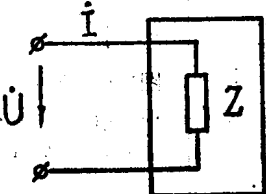
印数：1—28,870册

科技新书目：170—25

统一书号：15176·478 定价：3.20元

# 《电工技术基础》

## 勘 误 表

| 页   | 行          | 误                                                                                 | 正                                                                                   |
|-----|------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 39  | 倒 6        | …例题1—Z…                                                                           | …例题1—11…                                                                            |
| 66  | 正 6        | … $i_1$ 导前于 $i_1$ …                                                               | … $i_1$ 导前于 $i_2$ …                                                                 |
| 71  | 倒 2        | …复数的…                                                                             | …复数的…                                                                               |
| 80  | 正 12       | … $\int_0^{T/4} p dt$ …                                                           | … $\int_0^{T/4} p dt$ …                                                             |
| 82  | 倒 2        | … $\int_0^{T/4} p dt$ …                                                           | … $\int_0^{T/4} p dt$ …                                                             |
| 86  | 倒 2        | … $\dot{U}_X = (\dot{U}_L - \dot{U}_C)$                                           | … $\dot{U}_X = (\dot{U}_L + \dot{U}_C)$                                             |
| 87  | (图2—30(a)) | 图中 $\dot{U}_2$                                                                    | 应为 $\dot{U}_{12}$                                                                   |
| 87  | 倒 5        | $\dot{U}_2 = \frac{1}{2}\dot{U}_1$                                                | $U_2 = \frac{1}{2}U_1$                                                              |
| 88  | 正 4        | …式(2—26)…                                                                         | …式(2—62)…                                                                           |
| 88  | 倒 14       | …附合…                                                                              | …符合…                                                                                |
| 88  | (图2—33)    | 图中 $\dot{I}_X = \dot{I}_C - \dot{I}_L$                                            | 应为 $\dot{I}_X = \dot{I}_C + \dot{I}_L$                                              |
| 88  | 倒 7        | … $I$ 与 $\dot{I}_X = (\dot{I}_C - \dot{I}_L)$ …                                   | … $\dot{I}$ 与 $\dot{I}_X = (\dot{I}_C + \dot{I}_L)$ …                               |
| 91  | (图2—37)    |  |  |
| 91  | 正 5        | $I = \frac{U}{Z}$                                                                 | $I = \frac{U}{Z}$                                                                   |
| 95  | 正 2        | …虽然…                                                                              | …显然…                                                                                |
| 98  | 倒 11       | …图2—47(b)…                                                                        | …图2—48(b)…                                                                          |
| 115 | (表2—2)     | 第1项目中 $\dot{U} = -j\dot{I}X_C$                                                    | 应为 $\dot{U} = -j\dot{I}X_C$                                                         |
| 115 | (表2—2)     | 第2项目中 $u, i$ 波形图                                                                  | 应为 $u, i$ 波形图                                                                       |
| 115 | 倒 7        | …籍助于…                                                                             | …借助于…                                                                               |
| 134 | (表3—1)     | 联接方式中最后一项 $Y$                                                                     | 应为 $\Delta$                                                                         |
| 135 | (题3—3图)    | 图中 $D, i_D$                                                                       | 应为 $0, i_0$                                                                         |
| 137 | 正 6        | … $\dot{I}_b = 6.58 / -150^\circ \text{ A}$                                       | … $\dot{I}_B = 6.58 / -150^\circ \text{ A}$                                         |
| 137 | 正 14       | … $A_B = 20.1 / -161^\circ \text{ A}$                                             | … $\dot{I}_B = 20.1 / -161^\circ \text{ A}$                                         |
| 137 | 正 16       | … $A_{bc} = 3.80 / -120^\circ \text{ A}$                                          | … $\dot{I}_{bc} = 3.80 / -120^\circ \text{ A}$                                      |
| 152 | (图4—28)    | 图中 $i = 12 \cos \omega t$                                                         | 应为 $i' = 12 \cos \omega t$                                                          |
| 152 | 正5、6、7     | 式中 $\dot{I}''$                                                                    | 应为 $\dot{I}''_2$                                                                    |
| 181 | 正 6        | … $\omega = \dots = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$                                 | … $\omega = \dots = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$                                   |
| 181 | 倒 9        | $\sin \omega t = \frac{e^{j\omega t} - e^{-j\omega t}}{j2} \cos \omega t = \dots$ | $\sin \omega t = \frac{e^{j\omega t} - e^{-j\omega t}}{j2}; \cos \omega t = \dots$  |
| 206 | (题5—6图(d)) | 图中 $u = \sqrt{2} \times 10 \sin(314 + 30^\circ)$                                  | 应为 $u = \sqrt{2} \times 10 \sin(314t + 30^\circ)$                                   |

| 页   | 行           | 误                                                                                                                  | 正                                                                                                            |
|-----|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 213 | 正 18        | $\dots(e^{-s^2 t_1} - e^{-s^2 t_2})$                                                                               | $\dots(e^{-s^2 t_1} - e^{-s^2 t_2})$                                                                         |
| 214 | 正 2         | $\dots(1 - e^{-\frac{R}{L}t})\dots$                                                                                | $\dots(1 - e^{-\frac{R}{L}t})\dots$                                                                          |
| 230 | 正 8         | $\dots + \frac{\frac{A_{22}-1}{A_{21}^2-1}}{\frac{A_{22}-1}{A_{21}}}$                                              | $\dots + \frac{\frac{A_{11}-1}{A_{21}^2-1}}{\frac{A_{22}-1}{A_{21}}}$                                        |
| 230 | 正 10        | $\dots + \frac{\frac{A_{22}-1}{A_{21}^2-1}}{\frac{A_{22}-1}{A_{21}}}$                                              | $\dots + \frac{\frac{A_{22}-1}{A_{21}^2-1}}{\frac{A_{22}-1}{A_{21}}}$                                        |
| 259 | 倒 4         | $\dots + \frac{1}{j\omega C_5} j\omega L_6 \dots$                                                                  | $\dots + \frac{1}{j\omega C_5} + j\omega L_6 \dots$                                                          |
| 259 | 倒 5         | $\dots$ 方程(7-30) $\dots$                                                                                           | $\dots$ 方程(7-37) $\dots$                                                                                     |
| 269 | 正 5         | 0 0 0 1 0 1 - 1 0 0                                                                                                | 0 0 0 1 0 - 1 - 1 0 0                                                                                        |
| 276 | 倒 5         | $\dots(e^{40u_d} - 1)\dots$                                                                                        | $\dots(e^{40u_d} - 1)\dots$                                                                                  |
| 286 | 正 16        | $\dots 0.80 \times 10^8 B_0 \dots$                                                                                 | $\dots 0.80 \times 10^8 B_0 \dots$                                                                           |
| 292 | 倒 2         | $\dots \frac{I_a U}{I_2} \dots$                                                                                    | $\dots \frac{I_a U}{I_2} \dots$                                                                              |
| 295 | (图9-23)     | 图中 $U_o$ 方向                                                                                                        | 应向上                                                                                                          |
| 304 | 倒 3         | $\dots$ 式(10-14) $\dots$                                                                                           | $\dots$ 式(10-15) $\dots$                                                                                     |
| 323 | (图11-2)     | (c)中“接线柱布置”五个字                                                                                                     | 应接(a)“出线盒中”之后                                                                                                |
| 330 | 正 9         | $\times \sum_{i=1}^{m_2} \cos \left\{ 2\theta \left[ \alpha + (j-1) \frac{2\pi}{m_2} \right] - \varphi_2 \right\}$ | $\times \sum_{i=1}^{m_2} \cos \left\{ 2 \left[ \alpha + (j-1) \frac{2\pi}{m_2} \right] - \varphi_1 \right\}$ |
| 335 | 正 12        | $\dots$ 比其额定值降低了 $\sqrt{3}$ 倍, $\dots$                                                                             | $\dots$ 是其额定值的 $\frac{1}{\sqrt{3}}$ 倍, $\dots$                                                               |
| 356 | (表12-1)     | 额定电流<br>毫米                                                                                                         | 额定电流<br>毫安                                                                                                   |
| 364 | 正 2         | $\dots 3, 4, 5, 6 \dots$                                                                                           | $\dots 3, 4, 5, 6, \dots$                                                                                    |
| 379 | 倒 13        | $\dots$ 见13-6 $\dots$                                                                                              | $\dots$ 见图13-16 $\dots$                                                                                      |
| 406 | 倒 11        | $\dots$ 图14-213 $\dots$                                                                                            | $\dots$ 图14-13 $\dots$                                                                                       |
| 409 | 倒 7         | $R_1$ 与 $K_2$ $\dots$                                                                                              | $K_1$ 与 $K_2$ $\dots$                                                                                        |
| 410 | (图14-25)    | 图中 $V$                                                                                                             | 应为 $U$                                                                                                       |
| 434 | 表1下3行       | $\dots ZD-60 \dots$                                                                                                | $\dots DZ-60 \dots$                                                                                          |
| 411 | (图14-26(b)) | 图中8端应与 $R_{29}$ 上端相连, 而 $R_{30}$ 不与17端相连                                                                           |                                                                                                              |
| 413 | (图14-28)    | 图中 $R_{17}$ 下端应顺串二极管 $D_6$ 再与 $T_3$ 集电极相连                                                                          |                                                                                                              |
| 414 | (图14-29)    | 图中 $D_1$ 下面的 $T_1$ 应为 $T_2$                                                                                        |                                                                                                              |

# 前 言

本书是在化工部教育司的领导下，根据十二所高等院校于1979年2月在北京举行的“电工技术基础”教材编写会议的决定，按照一致通过的编写大纲编写的。可作为高等学校工业过程自动化及精密仪器仪表类专业试用教材，还可供有关工程技术人员参考。

“电工技术基础”是工业过程自动化及精密仪器仪表类专业的主要课程之一，总学时约为180（其中讲课时数为150）。根据这类专业教学计划的安排，“电子技术基础”单独设课。因此，本书内容由电路基础和电机与控制两大部分组成。考虑到专业的实际和今后发展要求，本书以传统的基本内容为主，加强基础理论，适当反映近代理论和先进技术内容，并结合专业的特点，为学习后续课程和从事实际工作打好基础。鉴于这类专业的情况不尽相同，书中有些内容（冠以\*号者）是供选授的，在教学上可以灵活掌握。

本书由北京化工学院和上海化工学院编写。其中北京化工学院吕砚山同志编写了第2章（1至14节）、第3章、第13章、第14章等内容。潘宝铭同志编写了第2章的15、16两节、第4章、第8章等内容。洪纯一同志编写了第11章、第12章。上海化工学院高敦嶽同志编写了第1章、第5章及第6章。梁天白同志编写了第7章。余宗廉同志编写了第9章、第10章。全书由主编吕砚山同志整理，并由北京工业学院沈世锐同志担任主审。王泽恕同志参加了书稿的部分初审工作。参加本书审稿会议的其他单位是（以校名笔划为序）：山东化工学院、天津大学、北京化纤工学院、华东石油学院、吉林化工学院、沈阳化工学院、河北化工学院、郑州工学院、南京化工学院、浙江大学、湖北化工石油学院。

在编写过程中，得到了清华大学唐统一同志和上海化工学院王春田同志的帮助和指导。特约编辑李诵雪同志为本书进行了编辑加工。北京化工学院张晏春、赵子江等同志为本书绘图。编者向他们表示衷心的感谢。

由于时间十分仓促，水平有限，不妥或错误之处难免，敬希读者批评指正。

编 者

1980年2月于北京

## 内 容 提 要

本书是根据1979年2月在北京召开的十二院校《电工技术基础》教材编写会议所通过的编写大纲编写的,并经1980年1月在北京召开的十四院校审稿会议通过,作为高等学校工业过程自动化及精密仪器仪表类专业的试用教材,并可供从事实际工作的工程技术人员参考。

本书共分两大部分。第一篇为电路基础,包括直流电路、正弦交流电路、三相电路、非正弦周期电路、电路中的过渡过程、双口网络、网络拓扑与网络方程、非线性电阻电路。第二篇为电机与控制,包括磁路和铁心线圈电路、变压器、电动机概述、微电机、常用电器和电动机的自动控制、自动信号联锁保护电路。共计十四章。每章均附有小结、习题和答案。

此外,还以附录形式介绍了常用电工测量仪表和电器等。

# 目 录

## 第一篇 电路基础

### 第一章 直流电路

|                                      |    |                                  |    |
|--------------------------------------|----|----------------------------------|----|
| § 1-1 电路及其构成 .....                   | 1  | § 1-10 支路电流法 .....               | 23 |
| § 1-2 电路的基本物理量, 电压和电流的<br>参考方向 ..... | 2  | § 1-11 网孔电流法 .....               | 26 |
| § 1-3 电路的基本定律 .....                  | 5  | § 1-12 节点电位法 .....               | 30 |
| § 1-4 电路的工作状态、额定值 .....              | 10 | § 1-13 迭加原理 .....                | 33 |
| § 1-5 负载获得最大功率的条件 .....              | 11 | § 1-14 置换定理 .....                | 37 |
| § 1-6 电阻的串联、并联和混联 .....              | 13 | § 1-15 戴维南定理与诺顿定理 .....          | 39 |
| § 1-7 电压源、电流源以及电源的等值互<br>换 .....     | 17 | § 1-16 Y- $\Delta$ 网络的等值变换 ..... | 42 |
| § 1-8 电桥电路 .....                     | 21 | § 1-17 受控源及含有受控源电路的分析 .....      | 45 |
| § 1-9 网络分析概述 .....                   | 22 | 本章小结 .....                       | 49 |
|                                      |    | 习题 .....                         | 50 |
|                                      |    | 习题答案 .....                       | 60 |

### 第二章 正弦交流电路

|                                  |    |                             |     |
|----------------------------------|----|-----------------------------|-----|
| § 2-1 正弦交流电的基本概念 .....           | 62 | § 2-10 电阻、电感、电容并联电路 .....   | 87  |
| § 2-2 正弦交流电的表示方法概述 .....         | 67 | § 2-11 复数阻抗和复数导纳的等值转换 ..... | 89  |
| § 2-3 复数符号法 .....                | 71 | § 2-12 正弦交流电路的功率和功率因数 ..... | 90  |
| § 2-4 正弦交流电路引言 .....             | 74 | § 2-13 正弦交流电路的分析计算 .....    | 94  |
| § 2-5 纯电阻电路 .....                | 76 | § 2-14 对偶电路 .....           | 99  |
| § 2-6 纯电容电路 .....                | 78 | § 2-15 谐振电路 .....           | 102 |
| § 2-7 纯电感电路 .....                | 81 | § 2-16 互感电路 .....           | 109 |
| § 2-8 欧姆定律和克希荷夫定律的复数形<br>式 ..... | 83 | 本章小结 .....                  | 114 |
| § 2-9 电阻、电感、电容串联电路 .....         | 85 | 习题 .....                    | 116 |
|                                  |    | 习题答案 .....                  | 121 |

### 第三章 三相交流电路

|                           |     |                     |     |
|---------------------------|-----|---------------------|-----|
| § 3-1 三相交流电路的基本概念 .....   | 123 | § 3-6 三相电路的功率 ..... | 133 |
| § 3-2 三相四线制电源及其特点 .....   | 124 | 本章小结 .....          | 135 |
| § 3-3 三相负载及其接入电源的原则 ..... | 127 | 习题 .....            | 135 |
| § 3-4 对称三相电路 .....        | 128 | 习题答案 .....          | 136 |
| § 3-5 不对称三相电路的概念 .....    | 131 |                     |     |

### 第四章 非正弦周期电流电路

|                                      |     |                          |     |
|--------------------------------------|-----|--------------------------|-----|
| § 4-1 概述 .....                       | 138 | § 4-4 非正弦周期电流电路的计算 ..... | 147 |
| § 4-2 周期函数分解为傅里叶级数 .....             | 139 | 本章小结 .....               | 152 |
| § 4-3 非正弦周期电流的平均值、有效值<br>和平均功率 ..... | 145 | 习题 .....                 | 153 |
|                                      |     | 习题答案 .....               | 154 |

## 第五章 电路中的过渡过程

|                             |     |                            |     |
|-----------------------------|-----|----------------------------|-----|
| § 5-1 概述 .....              | 155 | § 5-9 运算法 .....            | 193 |
| § 5-2 R 与 C 串联电路的过渡过程 ..... | 157 | * § 5-10 阶跃函数和阶跃响应 .....   | 197 |
| § 5-3 一阶电路过渡过程解的一般形式 .....  | 166 | * § 5-11 单位冲击函数和冲击响应 ..... | 201 |
| § 5-4 RC 电路的应用举例 .....      | 168 | * § 5-12 对任意形式激励的响应 .....  | 202 |
| § 5-5 R 与 L 串联电路的过渡过程 ..... | 172 | 本章小结 .....                 | 203 |
| § 5-6 R、L、C 串联电路的过渡过程 ..... | 178 | 习题 .....                   | 205 |
| § 5-7 拉普拉斯变换及其基本性质 .....    | 187 | 习题答案 .....                 | 212 |
| § 5-8 拉普拉斯反变换 .....         | 190 |                            |     |

## 第六章 双口网络

|                            |     |                         |     |
|----------------------------|-----|-------------------------|-----|
| § 6-1 概述 .....             | 215 | § 6-6 双口网络方程的矩阵形式 ..... | 231 |
| § 6-2 双口网络的基本方程和参数 .....   | 215 | 本章小结 .....              | 235 |
| § 6-3 双口网络的开路、短路入端阻抗 ..... | 225 | 习题 .....                | 235 |
| § 6-4 双口网络的特性阻抗 .....      | 228 | 习题答案 .....              | 237 |
| § 6-5 双口网络的等值电路 .....      | 229 |                         |     |

## 第七章 网络拓扑与网络方程

|                         |     |                     |     |
|-------------------------|-----|---------------------|-----|
| § 7-1 概述 .....          | 219 | § 7-7 网络方程 .....    | 252 |
| § 7-2 矩阵 .....          | 239 | * § 7-8 特勒根定理 ..... | 262 |
| § 7-3 网络的图 .....        | 243 | 本章小结 .....          | 265 |
| § 7-4 图的矩阵表示 .....      | 245 | 习题 .....            | 266 |
| § 7-5 克希荷夫定律的矩阵形式 ..... | 248 | 习题答案 .....          | 268 |
| § 7-6 通用支路方程 .....      | 250 |                     |     |

## 第八章 非线性电阻电路

|                           |     |            |     |
|---------------------------|-----|------------|-----|
| § 8-1 概述 .....            | 271 | 本章小结 ..... | 276 |
| § 8-2 非线性电阻电路的图解法 .....   | 272 | 习题 .....   | 276 |
| § 8-3 非线性电阻电路的解析法举例 ..... | 275 | 习题答案 ..... | 277 |

## 第二篇 电机与控制

### 第九章 磁路和铁心线圈电路

|                          |     |                           |     |
|--------------------------|-----|---------------------------|-----|
| § 9-1 磁场的基本物理量 .....     | 278 | § 9-6 具有直流励磁的交流铁心线圈 ..... | 294 |
| § 9-2 磁性材料及其磁化特性 .....   | 279 | * § 9-7 铁磁饱和稳压器 .....     | 296 |
| § 9-3 磁路及其基本定律 .....     | 282 | 本章小结 .....                | 298 |
| § 9-4 恒定磁通无分支磁路的计算 ..... | 284 | 习题 .....                  | 298 |
| § 9-5 交流铁心线圈电路 .....     | 288 | 习题答案 .....                | 300 |

## 第十章 变 压 器

|                      |     |                        |     |
|----------------------|-----|------------------------|-----|
| § 10—1 变压器的基本构造和工作原理 | 301 | * § 10—6 小功率电源变压器的设计计算 | 315 |
| § 10—2 变压器的等值电路和相量图  | 306 | 本章小结                   | 319 |
| § 10—3 变压器的特性        | 308 | 习题与思考题                 | 319 |
| § 10—4 干扰与屏蔽         | 310 | 习题答案                   | 321 |
| § 10—5 几种常用的变压器      | 311 |                        |     |

## 第十一章 电动机概述

|                |     |        |     |
|----------------|-----|--------|-----|
| § 11—1 三相异步电动机 | 322 | 本章小结   | 342 |
| § 11—2 同步电动机简介 | 336 | 习题与思考题 | 343 |
| § 11—3 直流电动机简介 | 337 | 习题答案   | 343 |

## 第十二章 微 电 机

|                        |     |               |     |
|------------------------|-----|---------------|-----|
| § 12—1 概述              | 344 | § 12—6 步进电动机  | 364 |
| § 12—2 单相异步电动机         | 345 | § 12—7 测速发电机  | 369 |
| § 12—3 微型同步电动机         | 349 | * § 12—8 自整角机 | 372 |
| § 12—4 两相交流伺服电动机       | 355 | 本章小结          | 375 |
| § 12—5 直流伺服电动机和直流力矩电动机 | 361 | 习题与思考题        | 375 |
|                        |     | 习题答案          | 376 |

## 第十三章 常用电器和电动机的自动控制

|               |     |                 |     |
|---------------|-----|-----------------|-----|
| § 13—1 概述     | 377 | § 13—5 电动机的自动控制 | 390 |
| § 13—2 继电器    | 377 | 本章小结            | 393 |
| § 13—3 接触器    | 383 | 习题与思考题          | 394 |
| § 13—4 其他常用电器 | 386 |                 |     |

## 第十四章 自动信号联锁保护电路

|                      |     |                        |     |
|----------------------|-----|------------------------|-----|
| § 14—1 概述            | 396 | § 14—5 联锁保护电路          | 404 |
| § 14—2 信号转换装置和声光报警电器 | 396 | * § 14—6 无触点自动信号联锁保护电路 | 408 |
| § 14—3 信号联锁电路的基本环节   | 399 | 本章小结                   | 415 |
| § 14—4 闪光信号报警电路      | 402 | 习题与思考题                 | 416 |

|                   |     |
|-------------------|-----|
| 附录 1 复数的算尺计算法     | 418 |
| 附录 2 电工测量仪表       | 420 |
| 附录 3 若干常用电器的型号规格  | 433 |
| 附录 4 常用电机、电器的图形符号 | 440 |
| 附录 5 GEIB 型硅钢片规格表 | 443 |
| 附录 6 几种圆形漆包铜线规格表  | 444 |

# 第一篇 电路基础

## 第一章 直流电路

### §1-1 电路及其构成

电流流通的路径叫电路。实际应用的电路种类很多，形式和结构也各不相同，但其作用不外以下两方面：一是应用电路进行信号变换、传输和处理，例如整流、滤波、放大电路等。电路的这种作用在自动控制和计算技术等领域中得到广泛的应用。二是进行电能量的传输和分配并实现与其他形式能量的互相转换，电力系统就是一个典型例子。

电路主要由电源，负载以及联接它们的导线构成。最简单的例子就是手电筒电路：由于电池通过开关及导体（起导线作用）与作为负载的小灯泡相联，如图1-1（a）所示。

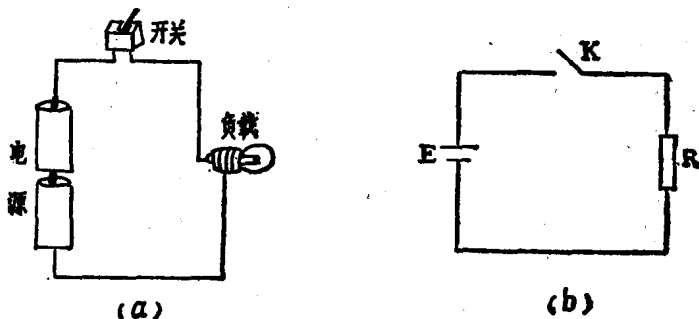


图1-1

电源是电路中供给能量的装置，它将非电的能量转换成电能，如发电机、蓄电池、光电池等。负载又称为用电设备，它是吸收电能的装置，它将电能转换成其他形式的能量，以达到用电的目的，如电灯、电炉、电动机等。电源与负载通过导线与开关等进行连接。

用图1-1（a）的画法来表示电路是不方便的，实际上为了便于分析计算，我们采用一些简化的图形符号来表示实际的电工装置并画出电路图。例如，图1-1（b）就是图1-1（a）的电路图。其中E、R、K文字及其图形分别代表电源、负载（电阻）和开关。

电路理论的内容包括分析和研究电路中所发生的电磁现象与过程，探讨电路的基本规律和计算方法等。

在分析和研究电路时，为了突出重点，抓住主要矛盾，我们把具体的实际电路抽象为理想元件电路。所谓理想电路元件，是指在理论上具有某种确定电磁性质的元件。例如电阻R是表征消耗电能的理想电路元件，当电流通过它时，将发生电能转换成热能的不可逆过程。所有的电阻器、电灯、电热器等实际元件，均可用电阻R来代替。同样，电感L是表征储存磁场能量的理想电路元件；电容C是表征储存电场能量的理想电路元件。

电路理论中所采用的术语“电感、电容、电阻”以及表示它们的符号“L、C、R”一方

面是表示电路元件本身，另一方面也是表示元件的参数。 $R$ 、 $L$ 、 $C$ 都是无源元件，其中 $L$ 、 $C$ 是储能元件， $R$ 是耗能元件。

## § 1—2 电路的基本物理量，电压和电流的参考方向

经常用到的电路基本物理量是：电流、电压、电位和电动势，下面简要地予以说明。

### 一、电流

带电质点的有规则运动形成了电流。电流是一种客观的物理现象，人们通过它的各种效应（如热效应、磁效应、机械力效应和化学效应等）觉察到它的存在。

电流的大小用“电流强度”来衡量。电流强度在数值上等于单位时间内通过导体某一截面的电量的代数和。习惯上将正电荷运动的方向定为电流的实际方向，由于金属导体中移动的是带负电的自由电子，因此它的电流的实际方向与电子移动的方向相反（如图1—2所示）。

设在极短时间 $dt$ 内穿过导体截面的电量代数和为 $dq$ ，则电流强度可以表示为

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

大小与方向都不随时间变化的电流称为恒定电流，简称直流，用大写字母 $I$ 表示。在许多电工装置上，直流用符号DC或—表示。

大小和方向随时间周期性变化的电流叫做交变电流，用小写字母 $i$ 表示。许多电工装置中，用符号AC或~表示交流。

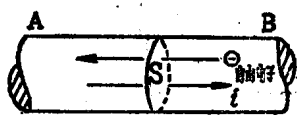


图 1—2

电流强度又常常简称为电流，因此，“电流”这个词不仅代表一种物理现象，而且也代表一个物理量。在国际单位制（SI）中，电量的单位是库仑，时间的单位是秒，电流的单位为“安培”简称安，记作A。电流较小的单位是毫安（mA）和微安（ $\mu A$ ），它们之间的关系是

$$1 \text{ 毫安} = 0.001 \text{ 安} = 10^{-3} \text{ 安}$$

$$1 \text{ 微安} = 0.000001 \text{ 安} = 10^{-6} \text{ 安}$$

### 二、电压

在图1—3中， $a$ 、 $b$ 两个电极上分别带有等量的正负电荷，因此 $a$ 、 $b$ 之间就存在着电场。如果我们用导线经过一个灯泡把两个电极连接起来，则在电场力的作用下，正电荷就要从 $a$ 电极经过灯泡移到 $b$ 电极（实际上是电子由 $b$ 电极移到 $a$ 电极），于是形成了电流，这时电场力移动电荷作了功，电场力做功的大小不仅与被移动的电荷量有关，而且与电场本身的情况有关。为了衡量电场力移动电荷做功的能力，引用了电压这个物理量，电场把单位正电荷从 $a$ 点移到 $b$ 点所作的功称为 $a$ 、 $b$ 间的电压，即

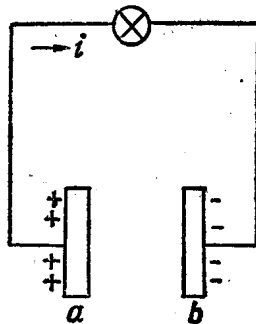


图 1—3

$$U_{ab} = \frac{A}{q}$$

(1-2)

式中  $U_{ab}$ ——电路中a b两点之间的电压；

$A$ ——电场将正电荷 $q$ 由a点移到b点时所做的功；

$q$ ——被移动的正电荷的电量。

在国际单位制中，电荷的单位为库仑，功的单位为焦耳，而电压的单位为“伏特”，简称“伏”，记作V。有时还用到千伏(kV)、毫伏(mV)和微伏( $\mu$ V)等单位。

$$1 \text{ 千伏} = 1000 \text{ 伏} = 10^3 \text{ 伏}$$

$$1 \text{ 毫伏} = 0.001 \text{ 伏} = 10^{-3} \text{ 伏}$$

$$1 \text{ 微伏} = 0.000001 \text{ 伏} = 10^{-6} \text{ 伏}$$

### 三、电流、电压的参考方向

前已述及，电流的实际方向规定为正电荷移动的方向，而同时电压也具有一定的极性(或方向)，我们规定电压的极性(或方向)与电场的方向相同，即从高电位指向低电位。在分析和计算电路时，电流、电压的实际方向有时难以事先确定，因此，为了计算和分析上的方便，有必要假设一个电流和电压的参考方向。实际方向可能与参考方向相同，也可能相反，当电流、电压的实际方向与参考方向一致时，它们的数值定为正值，反之，若电流、电压的实际方向与参考方向相反，则定为负值。这样，电流、电压可能为正也可能为负，所以它们都是代数量。应该注意，在未规定参考方向的情况下，电流、电压的正负是没有意义的。参考方向又称为正值的方向，简称正方向。

在电路中，电流、电压的参考方向可以用实线箭头( $\longrightarrow$ )表示，箭头的方向对于电流表示它的流向，对于电压则表示从高电位指向低电位。参考方向还可以用双下标法表示，例如 $U_{ab}$ 和 $I_{ab}$ 分别指电压和电流的参考方向由a到b。为了不使实际方向与参考方向相混淆，实际方向在电路图中不必标出，如果需要，可以用虚线箭头( $\cdots \rightarrow$ )表示。

### 四、电位

由于电压是对于电路中某两点来说的，因此，在比较复杂的电路中，要一一说明电路中每两点间的电压是很繁琐的。我们可以在电路中任意选取某一点作为参考点，把其他点到此参考点的电压称为各点的电位。用符号 $\phi$ 表示。例如图1-4中，我们任意选择d点为参考点，则a、b、c、e四点的电位应是

$$\phi_a = U_{ad}$$

$$\phi_b = U_{bd}$$

$$\phi_c = U_{cd}$$

$$\phi_e = U_{ed}$$

根据电位的定义，电位参考点d的电位应为0，即 $\phi_d = 0$ 。在电路图中，电位参考点用接地符号来表示，如图1-4所示。

电位参考点的选择是任意的，选取不同的点作为参考点，电路中各点的电位也就不同了。

电路中任意两点之间的电压，可以用它们之间的电位之差来表示，例如

$$U_{ab} = \phi_a - \phi_b$$

$$U_{bc} = \phi_b - \phi_c$$

$$U_{ce} = \phi_c - \phi_e$$

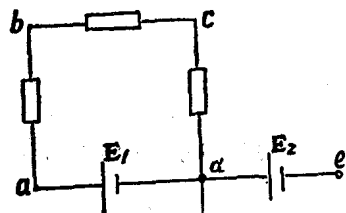


图 1-4

因此,电压有时也称为电位差。电位参考点不同,电路中各点电位亦随之不同,但任意两点间的电位差却不会改变。

## 五、电动势

从以上讨论我们知道,在电场力作用下,正电荷总是从高电位移向低电位,即从正极移向负极。在图1-3中,随着电荷的移动,正极a和负极b上的电荷都将逐渐减少,它们所产生的电场也逐渐减弱,直至为零,从而使流过灯泡的电流也逐渐减小,最后等于零。

为了维持电流持续流动,必须有一种外力把正电荷源源不断地从负极b送回到正极a,即从低电位移到高电位。电源就是具有这种外力的设备。借助于这种外力,正电荷在电源内部从负极被推向正极。用以描述电源这一特征的物理量称作电动势。它在数值上等于电源内部的外力把单位正电荷从负极移到正极时所作的功。电动势的方向是由负极指向正极,即由电源的低电位指向高电位。电动势的单位在国际单位制中也是“伏”。有时还用千伏(kV)、毫伏(mV)、微伏( $\mu V$ )等单位。

大小和方向不随时间变化的电动势称为直流电动势,用大写字母E表示。在电路图中常

用如图1-5(a)所示的电池符号来表示电动势,同时还采用如图1-5(b)所示符号表示。圆圈内的箭头表示电动势的方向,即由低电位指向高电位。

当电源端电压U的参考方向与电动势E的方向相反时,如图1-5(a)、(b)所示,它们之间有 $U=E$ 的关系;若U的参考方向与E的方向相同,如图1-5(c)所示,则 $U=-E$ 。

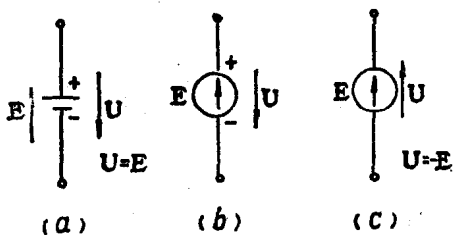


图 1-5

**例题 1-1** 在图1-4电路中,设 $U_{ab}=3$ 伏,  $U_{bc}=5$ 伏,  $U_{cd}=2$ 伏,  $E_1=10$ 伏,  $E_2=4$ 伏。如果分别取d点和e点作为电位参考点,求各点的电位。

**解** (1) 取d点为电位参考点,即 $\phi_d=0$ ,则

$$U_{ad}=E_1=10V$$

由于

$$U_{ad}=\phi_a-\phi_d$$

所以

$$\phi_a=U_{ad}+\phi_d=10+0=10V$$

又

$$U_{ab}=\phi_a-\phi_b$$

所以

$$\phi_b=\phi_a-U_{ab}=10-3=7V$$

又

$$U_{cd}=\phi_c-\phi_d$$

所以

$$\phi_c=U_{cd}+\phi_d=2+0=2V$$

而

$$U_{ed}=-E_2$$

所以

$$U_{ed}=\phi_e-\phi_d$$

$$\phi_e=U_{ed}+\phi_d=-E_2+\phi_d=-4+0=-4V$$

(2) 以e点为电位参考点,

则

$$\phi_e=0$$

由

$$U_{ed}=-E_1$$

得

$$U_{ed}=\phi_e-\phi_d$$

$$\phi_d=\phi_e-U_{ed}=\phi_e+E_2=0+4=4V$$

根据前面的计算式可得

$$\phi_a=U_{ad}+\phi_d=10+4=14V$$

$$\phi_b = \phi_a - U_{ab} = 14 - 3 = 11V$$

$$\phi_c = U_{cd} + \phi_d = 2 + 4 = 6V$$

计算结果表明，当参考点由d点变为e点时，各点的电位也随之改变，它们都升高了4伏。由于电压等于各点电位之差，所以任意两点的电压是不会随参考点的变更而变化的。

## § 1—3 电路的基本定律

本节介绍电路的三个基本定律，即欧姆定律、克希荷夫定律和焦耳定律。这三个定律充分揭示了直流电路中各物理量之间的关系。在本章的网络分析中，所采用的各种分析方法以及简化复杂网络的一些重要原理和定理，都是以这些基本定律为依据的。这些定律除适用于直流电路的分析外，原则上也适用于其它电路。因此，我们掌握电路的基本定律及其应用是十分重要的。

### 一、欧姆定律

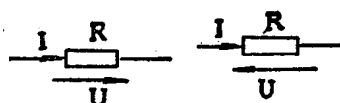
欧姆定律的内容是：流过电阻R的电流与电阻两端的电压U成正比。在电压与电流的参考方向选得一致时，欧姆定律的数学表示式为

$$I = \frac{U}{R} \quad \text{或} \quad U = RI \quad (1-3)$$

如果电流和电压的参考方向相反，则欧姆定律表示式应为

$$U = -RI$$

如图1—6 (a) 和 (b) 所示。



(a)  $U=IR$  (b)  $U=-IR$

图 1—6

电阻的单位是“欧姆”，简称欧，记作 $\Omega$ 。有时还用到千欧( $k\Omega$ )和兆欧( $M\Omega$ )等单位。

$$1 \text{ 千欧} = 1000 \text{ 欧} = 10^3 \text{ 欧}$$

$$1 \text{ 兆欧} = 1000000 \text{ 欧} = 10^6 \text{ 欧}$$

电阻的倒数称为电导，即

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-4)$$

电导的单位为“西门子”，记作S。

同一个电阻元件，既可以用电阻R表示，也可以用电导G表示。引用电导后，欧姆定律可以表达为

$$I = GU \quad (1-5)$$

电工理论中，根据电阻的特性把电阻分为两类。一类是电阻值与通过它的电流和所施加的电压无关，即  $R = \frac{U}{I}$  是一个常量，这类电阻称为线性电阻。另一类是电阻值与通过它的电流和所施加的电压大小有关，即  $R = \frac{U}{I}$  不是常量，称为非线性电阻。实际的电阻元件都是非线性的，但是某些电阻元件在一定范围内，它们的电阻值随通过的电流变化很小，可以近似地看作是线性电阻。

电路元件的特性常用该元件上的电压U和电流I之间函数关系来说明，这种函数关系称

为元件的伏安特性。如果在直角坐标系中，画出电压和电流的关系曲线，这种曲线称为元件的伏安特性曲线。线性电阻的两端电压与电流成正比关系，所以它的伏安特性曲线是一条通过坐标原点的直线，如图 1—7 所示。非线性电阻上的电压与电流不成正比，所以它的伏安特性是一条曲线，图 1—8 画出了某二极管的伏安特性曲线。可以看出，在曲线不同点 A、B 上，电压与电流的比值是不同的，即电阻的大小随电压或电流而改变。

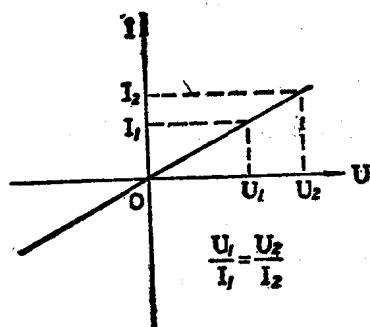


图 1—7

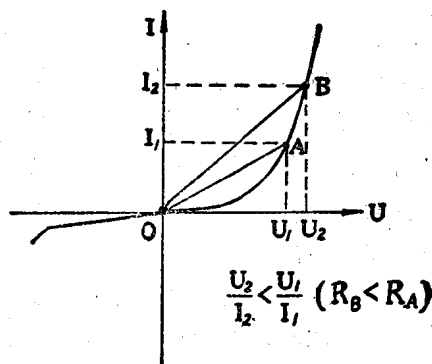


图 1—8

## 二、克希荷夫定律①

克希荷夫定律包括第一和第二两个定律，下面先介绍几个名词。

**支路** 电路中每个分支叫作支路，如图 1—9 所示电路中 abc、ac、adc 都是支路。该电路有三条支路。

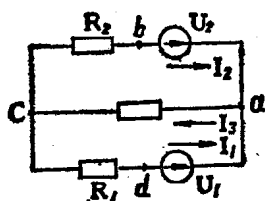


图 1—9

**节点** 三个或三个以上支路的连接点叫作节点，图 1—9 中的 a、b 和 c 都是节点。支路就是连接两个节点之间的一段电路。

**回路** 电路中任一闭合路径称为回路。图 1—9 中 abca、acda、abcda 都是回路，该电路有三个回路。

### 1. 克希荷夫电流定律 (KCL)

克希荷夫电流定律又称为第一定律，即：在任一时刻，流入任一节点的电流总和等于流出该节点的电流总和。对于图 1—9 中的 a 节点我们可写出

$$I_1 + I_2 = I_3 \quad (1-6)$$

上式可写成

$$-I_1 - I_2 + I_3 = 0 \quad (1-7)$$

由式 (1—7) 可见，克希荷夫电流定律也可表述为：在任一时刻，对于任一节点，它的电流的代数和恒等于零。用数学式表示为

$$\sum I = 0 \quad (1-8)$$

这里若将流出节点的电流规定为正，那么流入节点的电流则为负。电流定律体现了在节点上电荷既不能产生也不能消灭的原理，即任一时刻，流入节点的电荷之和必然等于流出节点的电荷之和，从而表现出电流的连续性。

电流定律原是运用于节点的，我们也可以把它推广到电路中的任一假设的封闭面。例如在图 1—10 所示封闭面所包围的电路中，有三条支路与电路的其余部分（未画出）相连接，

① Kirchhoff's Law 有的书中译为基尔霍夫定律。

由于电流的连续性, 该封闭面的电流代数和也应为零。即

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

在运用克希荷夫电流定律时, 必须标出所有电流的参考方向, 对于未知电流, 参考方向是任意假设的。在写节点电流方程时, 是以电流参考方向为准的。

克希荷夫电流定律与各支路中所接的元件性质无关, 同时, 它对于线性电路或非线性电路都是适用的。

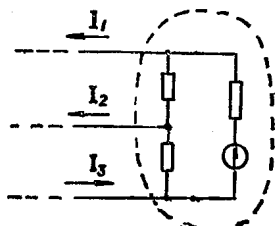


图 1-10

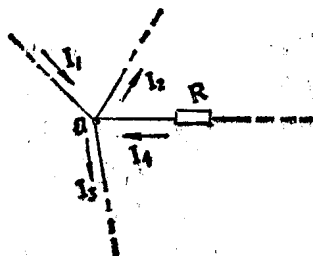


图 1-11

例题 1-2 图 1-11 表示一个复杂电路中的一个节点 a, 电流的参考方向如图中所设, 已知  $I_1 = 5$  安,  $I_2 = 2$  安,  $I_3 = -3$  安, 试求电流  $I_4$ 。

解 根据克希荷夫电流定律可得

$$-I_1 + I_2 + I_3 - I_4 = 0$$

即

$$-5 + 2 + (-3) - I_4 = 0$$

解之得

$$I_4 = -6 \text{ A}$$

$I_4$  得到负值, 说明  $I_4$  的实际方向与参考方向相反。

通过上述例题可以看到, 在运用电流定律时, 会遇到两种正负符号, 其一是电流方程中各项前的正负符号, 它取决于电流的参考方向与节点的相对关系, 若将流出电流取为正, 则流入就为负。另一是电流数值本身正负号, 它取决于电流的实际方向与参考方向间的关系, 相同者为正, 相反者为负。两种符号不要混淆。

## 2. 克希荷夫电压定律 (KVL)

克希荷夫电压定律又称为第二定律。即: 在任一时刻, 电路中任一回路各段电压的代数和等于零, 即

$$\sum U = 0 \quad (1-9)$$

在运用克希荷夫定律列写回路电压方程时, 需要规定一个循行回路的方向, 凡电压的参考方向与循行方向一致者, 该项电压前面取正号, 电压参考方向与循行方向相反者, 前面取负号。例如图 1-12 中各段电压参考方向已在图中标出, 电压定律可写为

$$U_1 - U_x - U_{II} + U_V - U_V = 0 \quad (1-10)$$

克希荷夫电压定律也可以用来列写电路中任意两点间的电压。例如在图 1-12 中, 我们沿右边路径计算 ad 间的电压为

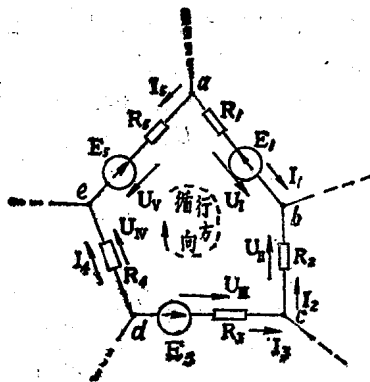


图 1-12