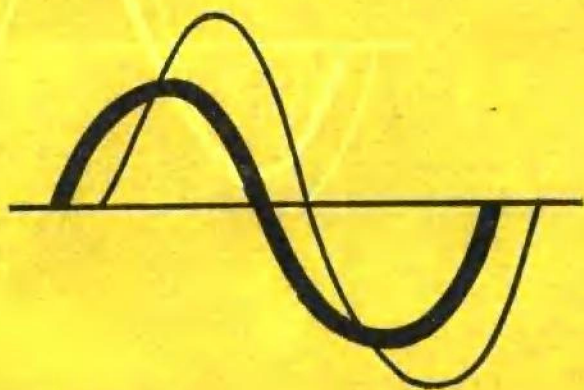




# 电工学初步

刘家屿 马春森 编  
中国建筑工业出版社

本书讲述电工技术的重要概念和原理,说明其间的相互关系及实际应用。主要包括:电的基本概念,电路规律,功和功率,电压发生器,电场和电容器,磁和电磁,交流电,矢量和矢量图,正弦交流电路的分析,三相交流电路,变压器,异步电动机,同步电机,直流电机,触电事故的发生及其防止等。

讲述内容附有图示和实验方法,并备有适当的例题和习题,以辅助学习。

本书可作为电气工人、知识青年的自修读物,技工学校电工课程的参考教材,中学教师和各有关行业技术人员知识性读物。

### 电 工 学 初 步

刘家屿 马春森 编

\*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

\*

开本: 787×1092毫米 1/32 印张:  $11\frac{13}{16}$  字数: 265 千字

1983年4月第一版 1983年4月第一次印刷

印数: 1—44,100册 定价: 0.95元

统一书号: 15040·4468

## 前 言

无论是谁，只要他从事技术工作，必然或多或少地要接触到电工技术。例如，一台电气设备或一部机器的电气部分的选购和使用，从阅读说明书、了解技术性能起，到实际操作使用，以至日常维护和排除可能出现的一般故障，无一不需具备必要的电工基本知识。对于从事电工技术的专业人员来说，电工的理论知识更是非有不可的了。

本书专门向读者介绍电学基本知识和初级的电工技术常识。期望读者通过本书的学习掌握好电工原理，在电工技术领域中提高工作能力。

本书的编排由浅入深，注意理论联系实际，讲述电工技术中应知的重要概念和原理，说明其间的相互关系及实际应用。由于一切电的现象和过程都离不开电子的运动，本书特别注意从电子理论来解释电工学中的问题，企使读者比较容易地掌握电工技术的重要原理，为进一步深入学习打好基础。

书中对许多基本概念的讨论，均附有图例，讲述实验方法，说明实验结论。同时举出实例，进一步说明道理。书中附有复习题和练习题，以帮助读者巩固每一章所学的知识。书末给出了全部练习题的题解，读者可以对照检查自己理解的程度。

本书以西德福格尔出版社出版的《电工技术基础》（即电子学第一分册，海恩兹·迈斯特著，第四版，1979年）和

克利特出版社的《电机及安全保护措施》（亚尔诺得·施梯尔著，第5版，1978年）两书为参考，结合国内情况和有关资料编写而成。

愿《电工学初步》能帮助读者提高电工基础知识水平，以期对技术进步作些贡献。书中的缺点和错误请读者批评指正。

编 者  
1982.8

# 目 录

|                                                                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 第一章 电的基本概念 .....                                                                                                                                       | 1  |
| 1-1 原子和电子 .....                                                                                                                                        | 1  |
| 1-2 电荷 .....                                                                                                                                           | 2  |
| 1. 中性原子(3) 2. 离子(4)                                                                                                                                    |    |
| 1-3 电量 .....                                                                                                                                           | 4  |
| 1-4 电流 .....                                                                                                                                           | 5  |
| 1. 电的导体、非导体和半导体( 5 ) 2. 电流回路( 8 ) 3. 电流的方向<br>( 10 ) 4. 电流强度( 11 ) 5. 电流强度 $I$ 与电量 $Q$ 的关系( 13 ) 6. 导体<br>中的电流密度( 13 ) 7. 电流的类型( 15 ) 8. 电流的各种效应( 16 ) |    |
| 1-5 电压 .....                                                                                                                                           | 18 |
| 1. 电位(20) 2. 电压方向(21)                                                                                                                                  |    |
| 1-6 电阻 .....                                                                                                                                           | 22 |
| 1. 比电阻(电阻率)( 23 ) 2. 导线的电阻( 25 ) 3. 电导和电 导率( 27 )<br>4. 电阻与温度的关系(29)                                                                                   |    |
| 第二章 电路规律 .....                                                                                                                                         | 32 |
| 2-1 欧姆定律 .....                                                                                                                                         | 32 |
| 1. 电流-电压特性曲线(电阻特性曲线)( 33 ) 2. 线性电阻和非线性电<br>阻( 35 )                                                                                                     |    |
| 2-2 电阻的串联 .....                                                                                                                                        | 36 |
| 1. 无负载的分压器(39) 2. 降压电阻(41) 3. 导线的电压降(41)                                                                                                               |    |
| 2-3 电阻的并联 .....                                                                                                                                        | 44 |
| 1. 分流电阻( 49 )                                                                                                                                          |    |
| 2-4 克希荷夫定律 .....                                                                                                                                       | 51 |
| 1. 克希荷夫第一定律(节点电流定律)( 51 ) 2. 克希荷夫第二定律(回<br>路电压定律)( 52 )                                                                                                |    |

|     |                                                                                           |     |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2-5 | 混联电路 .....                                                                                | 54  |
|     | 1.扩展的串联电路(54) 2.扩展的并联电路(56) 3.有负载的分压器(57) 4.电阻电桥(58)                                      |     |
| 第三章 | 功和功率 .....                                                                                | 62  |
| 3-1 | 电功 .....                                                                                  | 62  |
| 3-2 | 电功率 .....                                                                                 | 64  |
| 3-3 | 能量的转换 .....                                                                               | 66  |
|     | 1.功和能的单位(67) 2.电能转变为热能(67)                                                                |     |
| 3-4 | 效率 .....                                                                                  | 68  |
| 第四章 | 电压发生器 .....                                                                               | 72  |
| 4-1 | 电压的产生原理和方式 .....                                                                          | 73  |
|     | 1.由化学反应产生电压(73) 2.由热产生电压(77) 3.由光产生电压(79) 4.由晶体变形产生电压(79) 5.由电磁感应产生电压(80) 6.生物电(80)       |     |
| 4-2 | 电压发生器的特性 .....                                                                            | 81  |
|     | 1.源电压和端电压(81) 2.功率匹配(84)                                                                  |     |
| 4-3 | 电压发生器的联接 .....                                                                            | 85  |
|     | 1.串联(85) 2.并联(86)                                                                         |     |
| 第五章 | 电场和电容器 .....                                                                              | 90  |
| 5-1 | 电场 .....                                                                                  | 90  |
|     | 1.非导体中的电场(90) 2.电场强度(91) 3.电场感应(93) 4.电场的屏蔽(94) 5.电场感应产生电流(95) 6.在绝缘体中的电场感应(96) 7.驻极体(98) |     |
| 5-2 | 电容器 .....                                                                                 | 99  |
|     | 1.电容器的充电和放电(100) 2.电容量和电量(101) 3.电容器的类型(104) 4.电容器的联接(109)                                |     |
| 第六章 | 磁和电磁 .....                                                                                | 115 |
| 6-1 | 磁的现象 .....                                                                                | 115 |
|     | 1.磁体(115) 2.磁极之间的力效应(116) 3.分子磁性(116) 4.磁场(117)                                           |     |
| 6-2 | 磁量和磁量单位 .....                                                                             | 120 |

|     |                                                                                   |     |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------|-----|
|     | 1.磁势(原磁压)(120)2.磁场强度(121)3.磁通(122)4.磁通密度(磁感应、磁感应强度)(122)                          |     |
| 6-3 | 材料的磁特性.....                                                                       | 125 |
|     | 1.磁阻和磁路的欧姆定律(125)2.导磁系数(磁导率)(126)3.磁通密度与磁场强度的关系(128)                              |     |
| 6-4 | 磁场的力效应.....                                                                       | 135 |
|     | 1.两个磁铁之间的力效应(135) 2.载流导体在磁场中受力的作用(136)3.载流导线之间的力效应(139)                           |     |
| 6-5 | 电磁感应.....                                                                         | 141 |
|     | 1.运动感应(发电机原理)(141)2.静止感应(变压器原理)(144)3.涡流(148)4.自感(150)5.电感(153)                   |     |
| 第七章 | 交流电的基本概念 .....                                                                    | 156 |
| 7-1 | 交流电的类型.....                                                                       | 156 |
|     | 1.纯交流电(157)2.复合电(157)3.正弦形交流电(157)                                                |     |
| 7-2 | 正弦交流电在电工技术中的重要意义.....                                                             | 159 |
| 7-3 | 正弦交流电压的产生.....                                                                    | 161 |
| 7-4 | 正弦交流电的参数.....                                                                     | 163 |
|     | 1.幅值、瞬时值(163)2.周、频率、相角(相位)(163)3.相位差(166)4.角速度(角频率) $\omega$ (166)5.正弦电流的有效值(167) |     |
| 第八章 | 矢量和矢量图 .....                                                                      | 171 |
| 8-1 | 用旋转矢量表示正弦量.....                                                                   | 171 |
| 8-2 | 用矢量图表示两正弦量相位差的方法.....                                                             | 174 |
| 8-3 | 矢量的加、减法.....                                                                      | 175 |
|     | 1.两个矢量相加(175)2.两个矢量相减(176)                                                        |     |
| 第九章 | 正弦交流电路 .....                                                                      | 178 |
| 9-1 | 交流阻抗.....                                                                         | 178 |
|     | 1.电阻负载的电路(178)2.线圈(感抗和有功电阻)负载的电路(179)3.视在阻抗(183)4.电容负载的电路(183)5.阻抗和频率的关系(187)     |     |
| 9-2 | 交流阻抗的联接.....                                                                      | 188 |
|     | 1.电阻和感抗的串联(线圈)电路(188)2.电阻和容抗的串联电路                                                 |     |

|       |                                                                                                                       |     |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
|       | (193)3.电阻、感抗和容抗的串联电路(195)4.电阻和感抗的并联电路(198)5.电阻、感抗和容抗的并联电路(200)                                                        |     |
| 9-3   | 交流电路的谐振.....                                                                                                          | 203 |
|       | 1.电压谐振(串联谐振)(203) 2.谐振频率(汤姆逊振荡公式)(207)                                                                                |     |
|       | 3.电流谐振(并联谐振)(208)                                                                                                     |     |
| 9-4   | 交流电的电功和电功率.....                                                                                                       | 211 |
|       | 1.电阻负载的功率(212)2.电感负载的功率(213)3.电容负载的功率(213)4.电阻和电感负载的功率(214) 5.功率三角形、功率方程式(215)6.功率因数(216)7.功率因数的提高(217) 8.交流电的电功(218) |     |
| 第十章   | 三相交流电 .....                                                                                                           | 220 |
| 10-1  | 三相交流电的产生 .....                                                                                                        | 220 |
| 10-2  | 三相电路的联接 .....                                                                                                         | 222 |
|       | 1.星形联接(223)2.三角形联接(226)                                                                                               |     |
| 10-3  | 三相交流电的功率 .....                                                                                                        | 227 |
| 10-4  | 三相交流电的优点 .....                                                                                                        | 230 |
| 第十一章  | 变压器 .....                                                                                                             | 232 |
| 11-1  | 变压器的用途 .....                                                                                                          | 232 |
|       | 1.不同场合使用不同的电压(232)2.变压器的功用(233)                                                                                       |     |
| 11-2  | 变压器的结构和工作原理 .....                                                                                                     | 234 |
| 11-3  | 变压器的空载情况和负载情况 .....                                                                                                   | 235 |
|       | 1.空载情况(235)2.带负载情况(239)                                                                                               |     |
| 11-4  | 变压器的变压比 .....                                                                                                         | 240 |
| 11-5  | 变压器的变流比 .....                                                                                                         | 242 |
| 11-6  | 变换比 .....                                                                                                             | 242 |
| 11-7  | 变压器变换阻抗的作用 .....                                                                                                      | 243 |
| 11-8  | 变压器的功率、损失和效率 .....                                                                                                    | 245 |
| 11-9  | 自耦变压器 .....                                                                                                           | 246 |
| 11-10 | 互感器 .....                                                                                                             | 247 |
|       | 1.电压互感器(248)2.电流互感器(248)                                                                                              |     |
| 11-11 | 三相变压器 .....                                                                                                           | 252 |

|       |                                                                                                                |     |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 第十二章  | 异步电动机(感应电动机)                                                                                                   | 255 |
| 12-1  | 异步电动机的构造                                                                                                       | 255 |
| 12-2  | 旋转磁场                                                                                                           | 256 |
|       | 1.单相交流电产生的磁场(256)2.旋转磁场的产生(257)3.旋转磁场的转速与电动机的极数和电源频率的关系(260)                                                   |     |
| 12-3  | 异步电动机的工作原理                                                                                                     | 263 |
|       | 1.异步电动机的转子绕组感生电压(263)2.转子的旋转方向(264)3.转子旋转的速度(265)4.转差率(265)                                                    |     |
| 12-4  | 鼠笼式异步电动机                                                                                                       | 267 |
|       | 1.异步电动机的鼠笼转子(267)2.转子的转速(转数)升高时,转子电流和电压的频率降低(268)3.鼠笼转子电动机的起动电流和起动转矩(268)                                      |     |
| 12-5  | 鼠笼转子三相异步电动机的起动方法                                                                                               | 270 |
|       | 1.直接起动(270)2.星形—三角形的起动( $Y-\Delta$ )(271)3.用自耦变压器起动(273)4.用串联电阻起动(273)                                         |     |
| 12-6  | 绕线式三相异步电动机                                                                                                     | 274 |
|       | 1.绕线式异步电动机的工作原理(274)2.绕线式异步电动机的起动(275)                                                                         |     |
| 12-7  | 电动机的额定转矩                                                                                                       | 275 |
| 12-8  | 三相异步电动机的调速                                                                                                     | 280 |
|       | 1.鼠笼式电动机的调速(改变极对数 $P$ )(280)2.绕线式电动机的调速(改变转差率 $s$ )(280)                                                       |     |
| 12-9  | 小型三相电动机使用单相电源                                                                                                  | 281 |
|       | 1.利用电容器分相使三相电动机工作于单相电源(281)2.分相电容器的电容量(282)                                                                    |     |
| 12-10 | 单相异步电动机                                                                                                        | 283 |
|       | 1.简单的单相异步电动机不能自行起动(284)2.单相电动机的自起动方法(285)3.改变工作绕组电流与辅助绕组电流之间相位差的方法(285)4.单相电容分相电动机所需的电容量(287)5.罩极式单相异步电动机(288) |     |
| 12-11 | 单相交流感应式电度表                                                                                                     | 290 |
| 第十三章  | 同步电机                                                                                                           | 294 |

|                        |                                                                                                               |     |
|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 13-1                   | 同步电机的基本构造 .....                                                                                               | 294 |
| 13-2                   | 同步发电机工作原理和特性 .....                                                                                            | 295 |
|                        | 1. 电压的频率由转速和极数确定(296) 2. 同步发电机的空载特性(296) 3. 同步发电机的负载特性(297)                                                   |     |
| 13-3                   | 同步电动机 .....                                                                                                   | 299 |
|                        | 1. 工作原理和起动方法(299) 2. 励磁电流对同步电动机运行情况的影响(301)                                                                   |     |
| 第十四章 直流电机 .....        |                                                                                                               | 304 |
| 14-1                   | 直流电机的工作原理 .....                                                                                               | 304 |
|                        | 1. 直流发电机的工作原理(304) 2. 直流电动机的工作原理(308)                                                                         |     |
| 14-2                   | 直流电机的构造 .....                                                                                                 | 310 |
|                        | 1. 定子(310) 2. 转子(311)                                                                                         |     |
| 14-3                   | 直流电机中的电势和电磁转矩 .....                                                                                           | 312 |
|                        | 1. 电势的计算公式(312) 2. 直流电机的电磁转矩(315) 3. 电磁转矩与电磁功率的关系(316)                                                        |     |
| 14-4                   | 直流发电机的工作特性 .....                                                                                              | 318 |
|                        | 1. 直流发电机的分类(318) 2. 直流发电机的电枢反应(319) 3. 并励发电机的自励条件(320) 4. 并励发电机的空载特性(321) 5. 并励发电机的外特性(322) 6. 复励发电机的外特性(323) |     |
| 14-5                   | 直流电动机的运行 .....                                                                                                | 323 |
|                        | 1. 并励直流电动机的机械特性(324) 2. 并励电动机的调速(325) 3. 并励电动机的起动(327) 4. 如何改变并励电动机的转向(327) 5. 串励直流电动机(328)                   |     |
| 第十五章 触电事故的发生及其防止 ..... |                                                                                                               | 334 |
| 15-1                   | 触电事故发生的原因 .....                                                                                               | 334 |
| 15-2                   | 触电的危险性 .....                                                                                                  | 336 |
| 15-3                   | 发生触电事故时应采取的紧急措施 .....                                                                                         | 339 |
| 15-4                   | 防止触电事故应采取的保护措施 .....                                                                                          | 339 |
|                        | 1. 保护低电压(341) 2. 保护绝缘(341) 3. 保护隔离(341) 4. 保护接地(342) 5. 接零(343) 6. 漏电保护线路(344)                                |     |
| 习题解答 .....             |                                                                                                               | 346 |

# 第一章 电 的 基 本 概 念

## 1-1 原 子 和 电 子

如果把物质（例如碳、铜）粉碎成最小的微粒，最后便得到原子。“原子”一词来自希腊文，意思是“不可再分”。但是近代物理学家研究证明，原子也是一个复合体，它由其他物质组成。

原子的结构很象我们的太阳系。在太阳系中，行星在自己的轨道上围绕太阳运行。原子则由原子核和环绕核按圆形或椭圆形轨道运动的电子组成，电子环绕原子核的运动轨道是一种壳层的形式，形成所谓电子层，图 1-1 表示一个碳原子的结构模型。

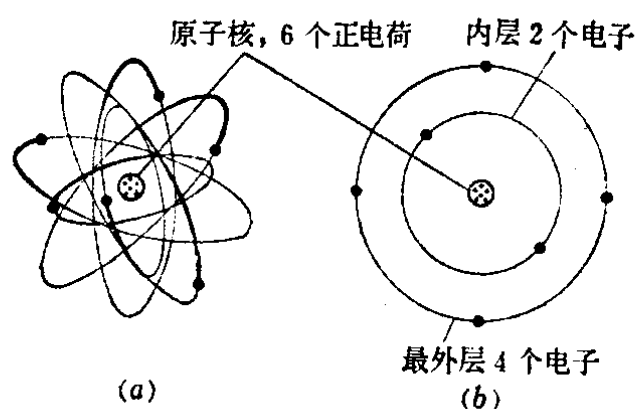


图 1-1 碳原子的结构模型

6 个电子围绕原子核，内层为 2 个，外层为 4 个  
(a) 立体图；(b) 平面图

最外层的电子称为价电子，它离原子核最远，最容易受外界的影响，它决定了原子的化学性质和电的性质。

## 1-2 电 荷

电子以高速环绕原子核运动（约为 2200 公里/秒），电子的重量虽然很小，但在高速圆周（或椭圆）运动中产生相当大的离心力，离心力的作用方向朝外，力图使电子离开运转轨道而远去。那么，是什么力量能够保持电子稳定在核周围各自运转的轨道上呢？

地球环绕太阳运行，是质量引力把地球保持在自己的运行轨道上，但是电子与原子核之间的质量引力，经计算证明，远不足以使电子保持在自己的轨道上，所以必定还有其他的力，即电的作用力。

在原子核与电子之间存在着电的作用力。这种电的作用力很容易得到证明，我们用毛皮去摩擦琥珀或塑料，这些材料对纸屑就有了吸引力，这个力明显的比质量引力大得多。

产生电作用力的本源称为电荷。

电子对原子核有电作用力的性能，所以电子带有电荷，我们称电子为载荷子（又因为电荷运动构成电流，以后我们又把电子称为载流子）。

原子核也同样有电作用力的性能，所以原子核也带有电荷。

实验证明，电子与电子之间没有引力，而有排斥力；原子核与原子核之间也是同样的情况（图1-2）。

由于电子互相排斥，而原子核与电子互相吸引，所以，原子核和电子必定带着不同性质的电荷。原子核的电荷称为

正电荷，电子的电荷称为负电荷。

由此可知，同性电荷相互排斥，异性电荷相互吸引（图 1-3）。

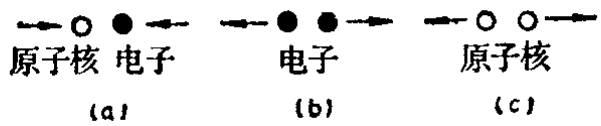


图 1-2 电子、原子核间的力效应

(a) 原子核与电子之间的力效应；(b) 电子与电子之间的力效应；  
(c) 原子核与原子核之间的力效应

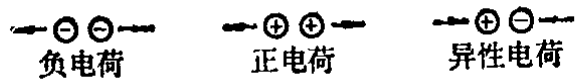


图 1-3 电荷之间的力效应

1. 中性原子

氢原子的结构最简单，它由一个电子和一个作为原子核的质子构成。

电子带有最小单位的电荷，即所谓基本电荷（单元电荷）。

电子带负的基本电荷，质子带正的基本电荷。

电子的负的基本电荷数量恰好等于质子的正的基本电荷的数量。所以，原子的正、负电荷效应恰好抵销，原子对外不呈带电的性质，而呈中性。

呈中性的原子所带的正、负电荷恰好相等。例如，铜原子有29个电子，所以也有29个质子。在原子核中除质子之外还有电中性粒子，即所谓中子（图中未绘）。在至今所认识的103种原子中，它们的结构都是相似的，电子按一定的规律分布在轨道上，其电子数目总是等于质子数，图 1-4 是氢原子和铜原子的结构示意图。

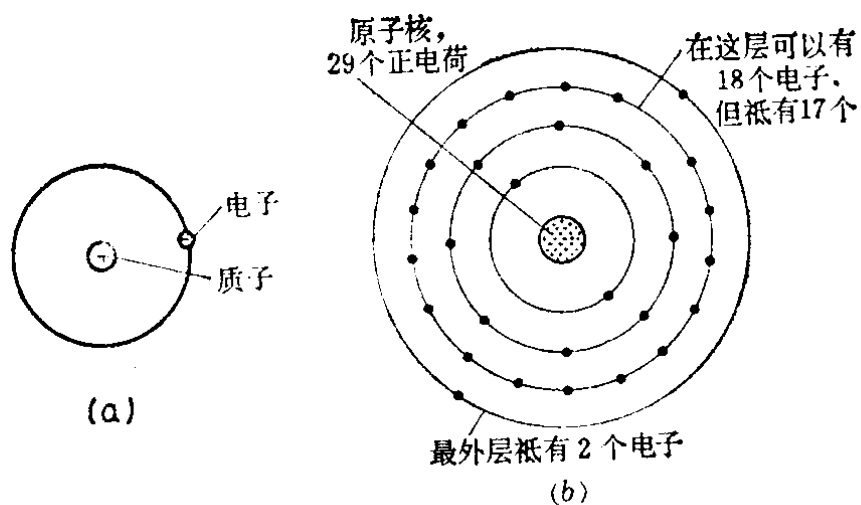


图 1-4 原子结构的示意图  
(a)氢原子; (b)铜原子

## 2. 离子

如果原子失去电子，那么，原子中的正电荷就多于负电荷，结果该原子就带正电荷，对外就有电的效应，它吸引负电荷。

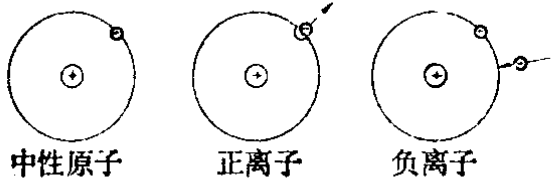


图 1-5 离子的形成示意图

如果原子得到额外的电子，那么，这个原子就带负电荷，对外也有电的效应，它吸引正电荷。

当然，这些带电荷的原子也被其他异性电荷所吸引。带电荷的原子叫做离子；带正电荷的原子叫做正离子，带负电荷的原子叫做负离子（图1-5）。

概括来说就是：有多余电子的原子为负电荷，缺少电子的原子为正电荷。

## 1-3 电 量

一定的电量是若干基本电荷的总和（在电作用的过程中

常常有亿万个电子或基本电荷参与)。电量以符号  $Q$  表示。电量的单位为库仑(简称库),以  $C$  表示。

1 库仑的电量约等于  $6.24 \times 10^{18}$  个电子所带的电量 ( $10^{18}$  代表 1 的后面共有 18 个 0,  $6.24 \times 10^{18}$  就是 624 亿亿), 即

$$1 \text{ 库}(C) = 6.24 \times 10^{18} \text{ 个电子的电量}$$

电子是带电的基本粒子, 每个电子可表示最小单位的电量。但是我们不以电子数目计算电量, 而以库仑为单位进行计算。正如计算液体一样, 20000 滴的酒精相当于 1 升, 但是我们宁愿用“升”而不用“滴”来计量液体。不以电子数目而用库仑为电量的计量单位的理由是很明显的, 如果人工点算电子数目, 以每秒钟数出 10 个的速度进行, 则需要点算 2000 亿年才能点算完相当 1 库仑的电子数。

一个电子的电荷可以用库仑表示:

$$e = \frac{1}{6.24 \times 10^{18}} \text{ 库}(C) = 0.16 \times 10^{-18} \text{ 库}(C)$$

## 1-4 电 流

电荷作有规则的定向运动就成为电流。

电子和离子都是载流子, 都可构成电流。

只有在内部存在足够数量的载流子并且它们能够自由运动的材料中才可能有电流。

### 1. 电的导体、非导体和半导体

#### (1) 导体

内有大量的且可自由运动的载流子的物质, 称为导体。

导体分为两种: 电子型导体和离子型导体。

#### 1) 电子型导体

铜、铝、银、金、铁等金属，还有碳都属于电子型导体。

每一个金属原子都可给出它的价电子(最外层的电子)，并由此而变成正的原子离子。电子在原子离子间可自由运动，它们称为自由电子。实际上，正原子离子为负电子所共有。

1 厘米<sup>3</sup>的铜内含有约 $10^{23}$  ( 1 的后面有23个 0 ) 个自由电子。

在导体的一定方向上加上电的压力(在电学上称电压)，

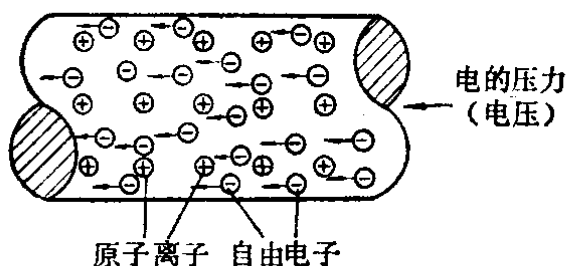


图 1-6 金属中的导电机构

自由电子便被推着通过导体 (图1-6)，导体中的自由电子带着自己的负电荷在这个方向上传输，这就是电子电流。

因此，可以认为：金属导体中的电流 (电子电流) 就是导体材料中沿着一定方向作有规则运动的自由电子所形成。这种电荷运动不会引起材料的迁移。

在一般负载情况下，金属导体中电子运动的速度大约只有3毫米/秒，但是电子碰撞的传播速度 (即电流的速度) 接近光速 (光速 $c=300000$ 公里/秒)。这里我们要注意碰撞传播速度与电子运动速度的区别。

例：

( 1 ) 电子的平均速度  $v=3$  毫米/秒，问通过长度为1200米的导线需要多少时间？

( 2 ) 在距离相同的情况下，电子碰撞传播需要多少时间？

解：

$$( 1 ) v(\text{速度}) = \frac{s(\text{距离})}{t(\text{时间})}, \quad t(\text{时间}) = \frac{s(\text{距离})}{v(\text{速度})}$$

$$\begin{aligned}
 t(\text{时间}) &= \frac{1200 \text{米}}{0.003 \text{米/秒}} = 400000 \text{秒} \\
 &= \frac{400000}{3600} \text{小时} = 111 \text{小时}
 \end{aligned}$$

$$(2) \ t(\text{时间}) = \frac{1200 \text{米}}{3000000000 \text{米/秒}} = 0.000004 \text{秒}$$

### 2 ) 离子型导体

电解液（导电液体）、熔融金属（例如熔融铝）和游离气体都属于离子型导体，其中的载流子（携带电荷的粒子）就是正离子和负离子。这种电流称离子电流。离子导电发生材料的迁移。

例如：在水中溶解少量的酸、碱或盐，溶液中就有了离子，溶液即能导电。如图1-7所示，在玻璃水缸中悬挂两个碳棒，加入少量硫酸铜( $\text{CuSO}_4$ )，硫酸铜在溶解过程中形成正的铜离子( $\text{Cu}^{++}$ )和负的硫酸根( $\text{SO}_4^{--}$ )离子，此时，若在两个碳棒上加电压，正的铜离子便跑向一个碳棒，并附在其上（即镀铜）；负的 $\text{SO}_4$ 离子跑向另一碳棒，与水中的氢(H)结合成为硫酸( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )，水( $\text{H}_2\text{O}$ )的其余部分——氧原子(O)，成为气泡释放出来。

上述过程逐渐消耗铜，如果不给溶液补充铜，溶液中的铜全部消耗掉时，过程即结束。在这个过程中碳棒中有电流流过，溶液成为离子型导体，并且发生材料迁移的现象。

### ( 2 ) 非导体（绝缘体）

只含有很少载流子而且载流子都被束缚于分子上的那些

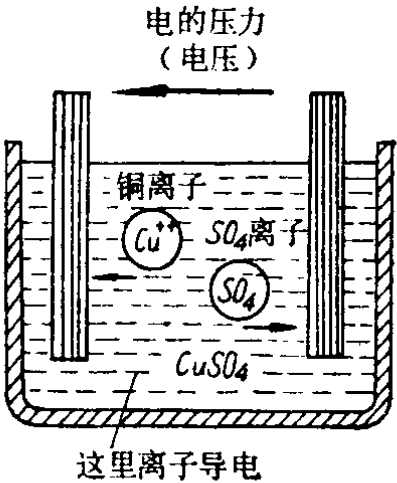


图 1-7 电解液中的离子导电