

实用电子技术

电路分析

秦 斌 编



实用电子技术

电路分析

秦 斌 编

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是“实用电子技术”丛书之一,书中主要讲解电路方面的基本知识。在学习电路之前,为了使读者感性认识电,首先引领读者进入“电的世界”,讲述电的构成,电与自然现象、人体的关系,以及安全用电方面的最基本的内容等;然后依次介绍电路基本概念、直流电路、电容与电感、正弦交流电路、三相交流电路、非正弦波交流及电路网络等。本书为了便于读者理解,配有丰富的图片,结合相关计算举例进行阐述,这也正是本书的最大特点。

本书可作为工科院校电路相关专业师生的参考用书,也可作为电路从业人员的参考读物。

图书在版编目(CIP)数据

电路分析/秦斌编. —北京:科学出版社,2009
(实用电子技术)

ISBN 978-7-03-024523-6

I. 电… II. 秦… III. 电路分析 IV. TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 066649 号

责任编辑:孙力维 杨 凯 / 责任制作:董立颖 魏 谨

责任印制:赵德静 / 封面设计:李 力

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009年6月第一版 开本:B5(720×1000)

2009年6月第一次印刷 印张:13 1/4

印数:1—5 000 字数:252 000

定 价:24.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

很多人认为电“看不见、摸不着”，而且相关理论很抽象，较难理解。但是，随着社会的发展，电所发挥的作用越来越大，人类越来越离不开电。要想利用好电，就必须掌握好它的特性，否则会因某些误操作而带来灾害。

无论是强电还是弱电，我们在生活上、工作上都或多或少地与电打交道。对于工科院校的学生，以及刚踏入工作岗位的技术人员来说，掌握与电相关的技能是当务之急。但是，这些人却不知道从哪里开始学起，通过什么方式学习。在书店或图书大厦，也能看到不少与电相关的基础类书籍，但大部分都是按照教学大纲编写，不能无师自通，或者不能达到“事半功倍”或“立竿见影”的效果。

本书就是以上述读者为对象，以“事半功倍”和“立竿见影”为宗旨编写而成的。无论是学习电工学还是电子学，“电路”都是必须通过的第一道“槛”。

为了激发读者学习电路的兴趣，本书首先把读者带入“电的世界”，即介绍“电的本质是什么”、“电与自然现象”、“电与人体的关系”，以及“基本安全用电”等。然后依次介绍电路基本概念、直流电路、电容与电感、正弦交流电路、三相交流电路，以及非正弦波交流、网络等。在讲解过程中尽量把理论图解化，而且为了使读者尽快消化所学知识，随后安排了适量的例题并附有解答。

通过本书的学习，读者会明白“原来学习电路这么简单”，这也是编者所希望的。

最后，在本书出版之际，对在编写过程中给予帮助及关心的各位同仁表示衷心的感谢；也希望读者对书中不当的内容或错误之处批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 电的世界	1
1.1 电的本质	1
1.1.1 物质的构成	1
1.1.2 从周期表看电的性质	3
1.1.3 电子行为	4
1.2 电与自然现象	5
1.2.1 雷云的产生	5
1.2.2 雷 击	6
1.2.3 避 雷	7
1.3 电与人体	7
1.3.1 人体是电的导体	7
1.3.2 人体的肌肉也是一种发电机	10
1.4 安全用电	13
1.4.1 触 电	14
1.4.2 短 路	15
第 2 章 电路基本概念	17
2.1 电路的构成	17
2.1.1 电 路	17
2.1.2 电路图的表示方法	18
2.2 电路的主要物理量	20
2.2.1 电 流	20
2.2.2 电 压	21
2.2.3 电 阻	23
2.2.4 电动势	29



2.3 基本定律	32
2.3.1 欧姆定律	32
2.3.2 基尔霍夫定律	34
第 3 章 直流电路	43
3.1 电阻联结	43
3.1.1 串 联	43
3.1.2 并 联	46
3.1.3 串并联	50
3.2 电池联结	53
3.2.1 电池电压与内阻	53
3.2.2 电池的串并联	53
3.2.3 考虑内阻的电路	54
3.3 直流电路基本测量仪表	55
3.3.1 电流表	55
3.3.2 电压表	58
3.3.3 模拟万用表	60
3.4 叠加定理	67
3.4.1 叠加定理的举例说明	67
3.4.2 基于叠加原理的电路计算	68
3.5 戴维南定理	70
3.6 电桥电路	73
3.6.1 电桥平衡条件	73
3.6.2 惠斯通电桥	75
第 4 章 电容与电感	77
4.1 库仑定律	77
4.2 电容器结构	78
4.2.1 电容器的作用	78
4.2.2 电容器的构造	78
4.2.3 电容器的电容量	81
4.2.4 大量储存电荷的条件	83
4.3 电容器的串并联	84
4.3.1 串 联	84

4.3.2 并 联	86
4.3.3 串并联	86
4.4 电磁感应定律	88
4.4.1 电磁感应	88
4.4.2 电 感	89
4.5 电感器联结	91
第 5 章 正弦交流电路	95
5.1 直流电与交流电的比较	95
5.1.1 身边的直流电源与交流电源	95
5.1.2 直流与交流的性质	96
5.1.3 交流波形	97
5.1.4 直流与交流的电源符号	98
5.2 正弦交流电的产生	99
5.2.1 均匀磁场中线圈的移动	99
5.2.2 交流电的产生	99
5.2.3 正弦交流电的表示	101
5.2.4 其他波形	102
5.2.5 速度与角速度	102
5.3 正弦量的有效值与平均值	105
5.3.1 频率与周期	106
5.3.2 瞬时值与最大值	107
5.3.3 平均值表示	107
5.3.4 用有效值表示电压及电流	107
5.3.5 角频率与电角度	109
5.4 相 位	112
5.4.1 定 义	112
5.4.2 e 与 i 的相位差	113
5.4.3 相位超前与滞后	113
5.4.4 瞬时表达式与相位	114
5.5 正弦量的相量及复数表示	117
5.5.1 电流 i_1 与 i_2 的合成	117
5.5.2 利用瞬时表达式进行合成	118
5.5.3 利用波形进行合成	118
5.5.4 相量表示	119



5.5.5 复数表示	121
5.6 正弦交流中的电阻、电感及电容	126
5.6.1 电阻与阻抗	126
5.6.2 纯电阻电路	127
5.6.3 纯电感电路	128
5.6.4 纯电容电路	129
5.7 频率与电抗关系	133
5.7.1 感抗与频率	133
5.7.2 容抗与频率	133
5.7.3 电抗与相位	134
5.8 R, L, C 串联电路及串并联电路	135
5.8.1 RL 串联电路	135
5.8.2 RC 串联电路	137
5.8.3 RLC 串联电路	138
5.8.4 RLC 并联电路	140
5.9 交流功率与功率因素	144
5.9.1 单相交流功率	144
5.9.2 交流功率、功率因数和用电量的测量	146
5.9.3 功率因数改善	147
5.10 功率表及功率测量	150
5.10.1 功率表的使用方法	150
5.10.2 功率表的接法	151
5.10.3 功率表的读数与倍率	151
5.10.4 电流线圈及电压线圈的士端	152
第 6 章 三相交流电路	155
6.1 三相交流电的产生及表示	155
6.1.1 三相交流电的产生及性质	155
6.1.2 三相交流电的表示方法	156
6.1.3 三相交流电的相序	157
6.2 三相联结	158
6.2.1 星形联结	158
6.2.2 三角形联结	160
6.2.3 V 联结	161
6.2.4 三相联结的组合	162

6.3 三相交流电的计算	163
6.3.1 对称三相电路	163
6.3.2 Y - Y 电路	163
6.3.3 Δ - Δ 电路	164
6.3.4 Y - Δ 电路及 Δ - Y 电路	166
6.3.5 Y - Δ 的相互变换	167
6.4 对称三相功率及其测量	168
6.4.1 对称三相功率	168
6.4.2 三相功率的测量	170
6.5 负载阻抗的 Δ - Y 变换	172
6.6 不对称三相电路	175
6.6.1 定 义	175
6.6.2 不对称三相电路的求解方法	176
 第 7 章 非正弦波交流	 181
7.1 定 义	181
7.2 非正弦波交流的谐波分析	181
7.3 非正弦波交流的有效值	183
7.4 非正弦波交流电路的电流	184
7.5 基波与谐波	185
7.6 含 L, C 电路的暂态现象	185
7.6.1 RC 串联电路的暂态现象	185
7.6.2 微分电路和积分电路	187
 第 8 章 电路网络	 189
8.1 直流电路基尔霍夫定律的不同解法	189
8.2 交流电路的基尔霍夫定律	191
8.3 复杂电路中的叠加定理和戴维南定理	192
8.3.1 交流电路的叠加定理	192
8.3.2 交流电路的戴维南定理	194
8.4 输入输出电压和电流网络	196
8.4.1 二端口网络常数	196
8.4.2 镜像阻抗	197
8.4.3 H 参数	199

电的世界

第 1 章

“电”是摸不着、看不到的物质。那么，电是如何产生的呢？电与自然现象有没有关系，与我们的人体又有什么关系呢？我们的周围随处可见大小各异、种类不同的家用电器等，那么你会安全用电吗？

本章围绕着以上内容一一进行讲解。

1.1 电的本质

由于在我们身边到处都使用电，如图 1.1 所示，因此有时可能不知道电的宝贵之处。有一则报道也许让我们记忆犹新，那就是在纽约曾经发生过的停电事件，那时纽约市民在办公大厦或家中面对寒冷及黑暗表现出了极大的不安和烦恼。另外，人们有这样的担忧，现在会不会发生电影《火烧摩天楼》(The Towering Inferno)中所见到的停电灾难。所以说，电有时成为我们生活中的重要“食粮”，也有时会成为露出獠牙的“恶魔”。在本节首先阐述电的本质。

1.1.1 物质的构成

包括我们的身体在内，把一切物质若一直细分下去，最后剩下的是称为分子的粒子。分子是用肉眼看不到的，但它具有物质的性质。若再将分子细分下去，我们知道，它是由称为原子的粒子构成的。原子与分子不同，其本身不具有物质的性质。分子是由若干个原子复杂地结合起来构成的，如图 1.2 所示。

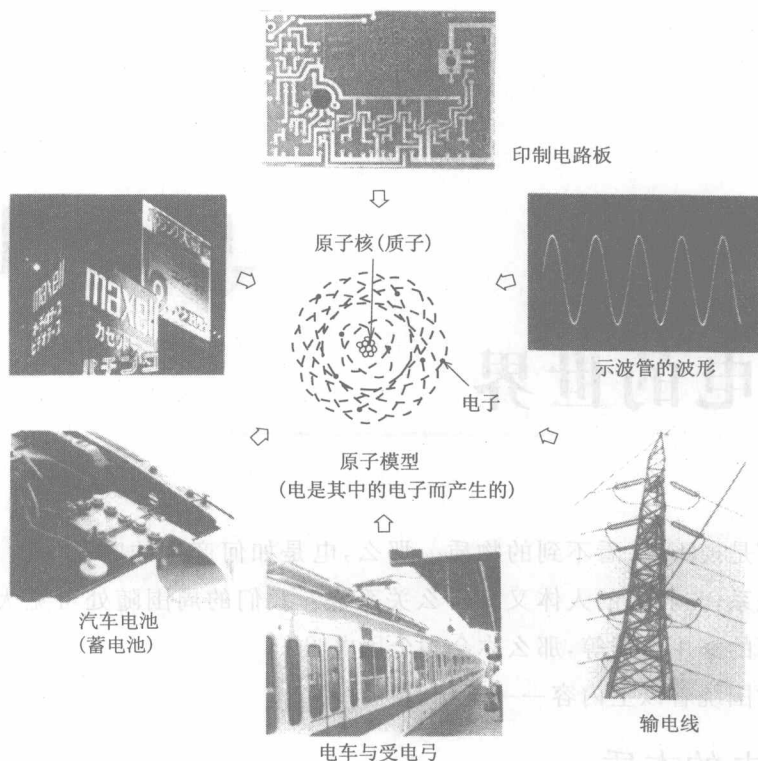


图 1.1 电的各种应用

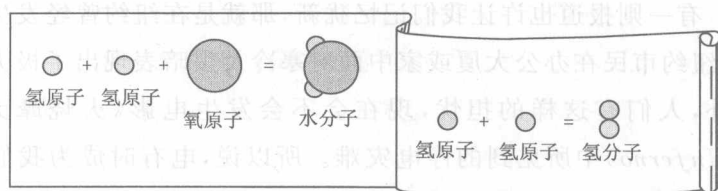


图 1.2 从原子到分子

直至 19 世纪,人们认为物质的构成单位是原子,但根据英国科学家汤姆森的实验可知,原子还可以释放出更小的超微粒子,该粒子命名为电子。尔后,根据各种研究结果表明,构成物质的原子是由原子核和以原子核为中心,沿一定轨道绕原子核旋转的电子构成的。再进一步研究可知,原子核是由带正电的质子及不带电的中子构成,而电子带负电。原子中原子核具有的质子(正电)数与电子(负电)数相等,相互吸引,因此原子呈中性,如图 1.3 所示。

如果比较原子与电子的大小,形象地如图 1.4 所示,就是原子与高尔夫球的比例和高尔夫球与地球的比例相当。原子核的大小约为原子直径的 $1/10\ 000$,原子核是质子与中子的紧密结合体。电子的质量为 $9 \times 10^{-31} \text{ kg}$ 左右,大小及重量几乎可以忽略,而其电量与质子所具有的电量相同。

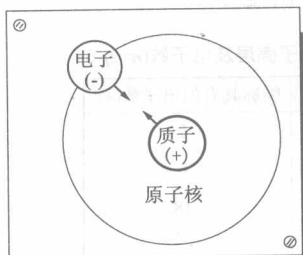


图 1.3 电子与质子的中和

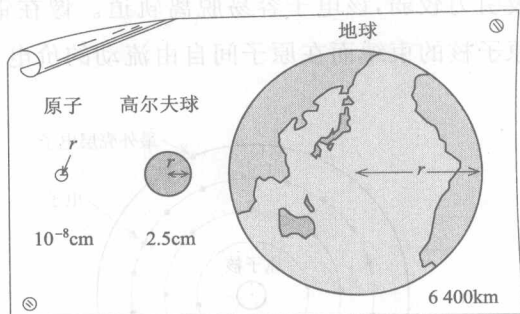


图 1.4 原子的大小

1.1.2 从周期表看电的性质

原子是物质的基本单位,由原子核与电子构成,根据其不同组合,形成各种物质。该物质称为元素,包括天然及人工的在内大约有 100 多种。对于性质类似的元素组,若观察其电子排列,发现有周期性规律。将其归纳形成周期表,图 1.5 所示为周期表的一部分,表中原子序数与电子数一致。

原子序数 → 13 符 号 → Al 元 素 名 → 铝 原 子 量 → 26.9815 电子排列 → 2, 8, 3			
28 Ni 镍 58.70 2, 8, 16, 2	29 Cu 铜 63.546 2, 8, 18, 1	30 Zn 锌 65.38 2, 8, 18, 2	31 Ga 镓 69.72 2, 8, 18, 3
	47 Ag 银 107.868 2, 8, 18, 18, 1	48 Cd 镉 112.41 2, 8, 18, 18, 2	

图 1.5 元素周期表的一部分



图 1.6 所示为铜(电子数 29, 电子排列 2、8、18、1)的原子模型。电子所绕的轨道从靠近原子核起向外依次命名为 K, L, M, N... 壳层, 能够具有的电子数如表 1.1 所示。沿着最外侧轨道旋转的电子称为最外壳层电子(也称为外壳层电子或价电子)。如铜那样, 有 1 个或者几个最外壳层电子的情况, 因原子核的吸引力较弱, 该电子容易脱离轨道。像在铜和银那样的金属中, 将离开特定的原子核的束缚而在原子间自由流动的价电子称为自由电子。

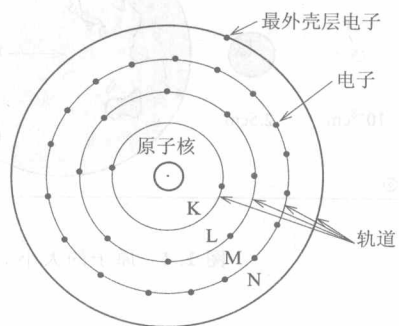


表 1.1 电子壳层及电子数($n=2p^2$)

壳层(编号)	能够具有的电子数(n)
K(1)	2
L(2)	8
M(3)	18
N(4)	32
O(5)	50

图 1.6 铜的原子模型

1.1.3 电子行为

若中性状态的原子失去电子, 则原子表现出正电(+)的性质; 反之, 若从外部有 1 个以上的电子进入中性状态的原子轨道, 因该原子的电子数多于质子数, 则原子表现出负电(-)的性质。从周期表来看, 金属的价电子容易脱离, 而非金属的价电子与原子核连接紧密, 没有自由移动的电子。

图 1.7 所示为电子与原子核的关系。

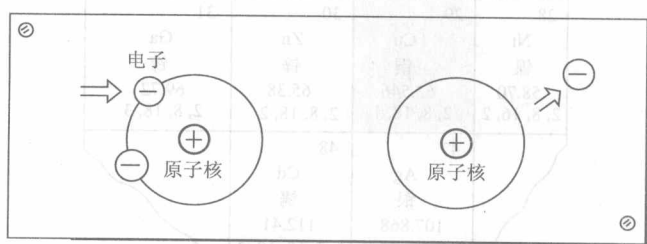


图 1.7 电子与原子核的关系

1.2 电与自然现象

在古代,水手们在黑暗的晚上常因看到桅杆上跳动的蓝白色火球而惊奇。当时他们把这种火球称之为“圣·爱尔摩之火”¹⁾。当然,这一现象现在也会发生,“圣·爱尔摩之火”其实并不是火,而是静电引起的自然现象。说起静电引起的自然现象,我们最熟悉的的就是打雷了。

1.2.1 雷云的产生

一般认为,在形成云而下雨时,云中有电产生,但仅仅那样还不会发生放电和雷击现象。由于空气本身对电来说是绝缘的,所以为了能发生放电或打雷(大地放电),必须积聚大量的电荷才行。

在列车的受电弓与接触线之间常常会冒出火花,这一现象叫做火花放电。破坏空气的绝缘性而产生火花放电,这只有在 1cm 左右的距离内加上数千伏以上的电压时才有可能。由此看来,只有在云中积聚着足以产生非常大电压的电荷时,才有可能形成雷云和引起打雷。那么,在云中最易积聚电荷的雷云,又是怎样积蓄电荷的呢?

被称之为雷云的云,其特征是云层的高度很高。图 1.8 表示了雷云形成的几个阶段。在其形成的初期,云的底部距地面约 1000~2000m,而顶部则可延续到 8000m 左右的高空。在地面被加热的空气由于处于不断上升的状态,所以这种云的结构是云垂直于地面的方向很长。这一现象显示了上升气流的激烈程度。而上升气流的活泼状态便是产生大量电荷的原因。其理由是,水滴因遇到激烈的上升气流,会相互黏在一起变成大水滴,随着继续向高空上升,它被冷却成冰粒。不久由于重量增加而上升气流又无力支持,便纷纷下落,形成小粒往上送,大粒向下落的局面。这些水滴和冰粒由于摩擦和碰撞等复杂的运动,便形成带正(+)电荷的部分和带负(-)电荷的部分。大的冰粒在下落时在途中融化,变成大雨落下。由于大的冰粒易带负电荷,所以云中的电荷分布是上部为正,底部为负,如图 1.9 所示。地表面的正电荷是由云层底部的负电荷感应产生的。这时由于形成了大量电荷,所以才会发生云层放电和打雷。

1) St. Elmo's fire,雷雨或暴风雨时,在船的桅杆等凸出物的尖端所看到的发光现象。——编者注

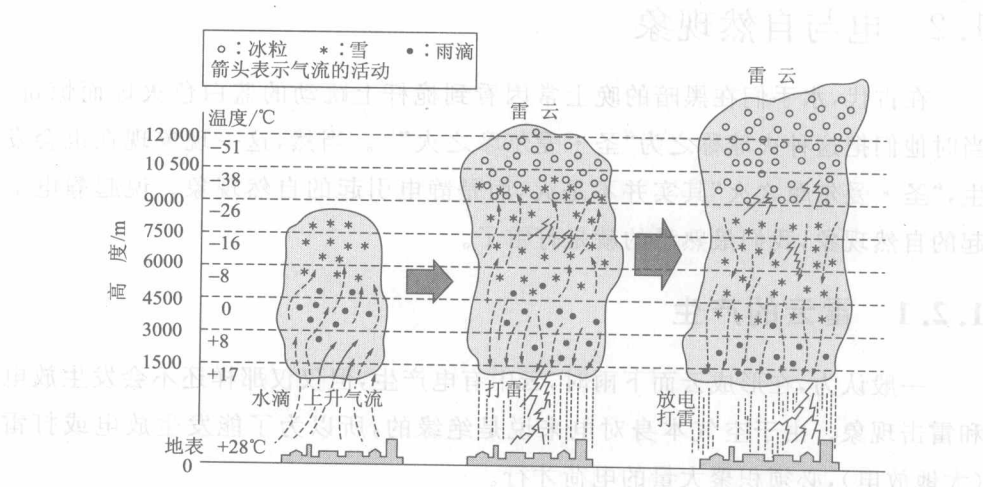


图 1.8 雷云的形成过程

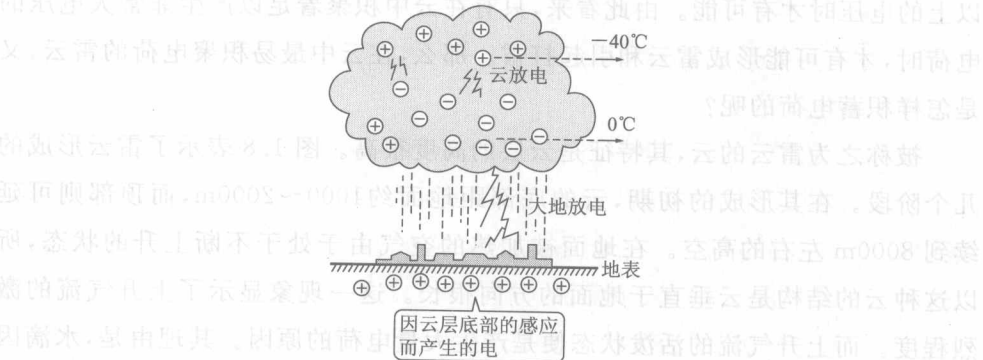


图 1.9 雷云中的电荷分布

1.2.2 雷 击

发生雷击时,云和地面之间的电压究竟有多大呢?

一般在夏季发生的雷云,其底部的高度为 $1000 \sim 5000\text{m}$,其放电电压为 1 亿伏[特]左右。因此,每 1m 的放电电压就是数万伏[特]。雷云所具有的电荷量为 $10 \sim 90\text{C}$ (库[仑])左右。



1.2.3 避 雷

雷云的活动方式、雷放电、雷击究竟具有什么样的性质呢？我们必须把这些问题搞清楚才能确立避雷的对策。

在铁塔、避雷针等高耸的物体上容易发生雷击事故。此外，雷放电的电流容易在物体的表面及金属物体上流动。

1967 年夏，日本松本深志高级中学（长野县）的学生在北阿尔卑斯山的西穗高登山途中遭到雷击，死伤者达数十人之多。雷击的地点全部是在岩石上。由于岩石的电阻大，放电电流就在岩石的表面穿过，于是，在岩石之间的学生和岩石附近的学生便成了牺牲者。

由于电流流过时产生高温，雷击处易发生金属被熔化、可燃物被点燃的现象。

避雷时，应认真考虑以下几点：

- ① 在平地等无处藏身的地方，应赶快伏下身来采取低姿势。
- ② 烟囱和树木等，以其高度为半径扫出的圆形面积可视为保护范围，姑且可算作安全区域，但过于靠近，雷击时就有触电或烧伤的危险。
- ③ 在雷云飘近时，应将阳伞、高尔夫球棒、钓鱼竿等较长的物品放低。

1.3 电与人体

1.3.1 人体是电的导体

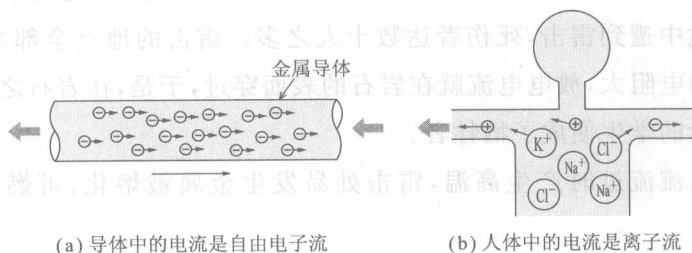
铜、金、银、铝等金属是人们熟知的传导电流的良导体。人体虽然也是传导电流的导体，如图 1.10 所示，但其电流的流动方式与一般的金属导体存在若干差异，如图 1.11 所示。

所谓电流，是指存在于导体内部的无数电荷的移动（流体）。实际电流的起源是带负电荷的电子，或是带正或负电荷的离子的移动。在导体内存在着无数能自由移动的电子（自由电子），导体内的电流也就是自由电子的流动。

电流产生的条件是存在构成电流来源的无数电荷，以及具有使电荷产生静电力所需的电位差（电压）。在所存在的无数自由电子上加上电场，静电力就会对电子产生作用而形成电子的流动（电流）。电场是因加上来自电源的电压而产生的。



图 1.10 触电现象是人体容易导电的证据



(a) 导体中的电流是自由电子流

(b) 人体中的电流是离子流

图 1.11 人体与导体中电流的差异

即使加上相同的电压,电流流过的难易度也随着是铜还是铁等材料的“种类”,粗细、长度等材料的“形状”,以及材料的“温度”而异。

例如,铜或银等材料因其自由电子的密度大而成为导体。此外,盐(NaCl , 氯化钠)等电解质的高浓度水溶液也是导体。溶于水中的电解质会分离成带正电荷的离子和带负电荷的离子(电离),这些离子便是电流的来源。因为地球(earth)上有大量的土壤和海水,而土壤和海水中含有溶有电解质的水,所以地球也是导体。

占人体的体重约 60% 的物质是水,人体内的水中溶有 Na^+ , K^+ , Cl^- 等离子(均带有电荷)。人体因其离子的浓度高,所以是电流易于通过的导体。

但是,人体虽然是导体,却与铜、银等金属导体不同,其构造与性质相当复杂。人体是由多达约 6×10^{13} 种细胞和由其集合而成的活体组织,以及具有各种功能与构造的器官、内脏构成的。细胞的细胞内液及细胞核被细胞膜(亦称为形质膜)包裹着。细胞的外侧是细胞外液及把各个细胞联结起来的组织。细胞内液、细胞外液均为溶有电解质的半流动性胶体状物质,这些也均是导体。细胞膜是厚度为 10nm ($1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$) 的极薄的一层薄膜,是高电阻率绝缘体。通常没有离子出入此薄膜,故无电流通过。此外,细胞因其组织或所属器官的