



经典译丛



实用电子与电气基础

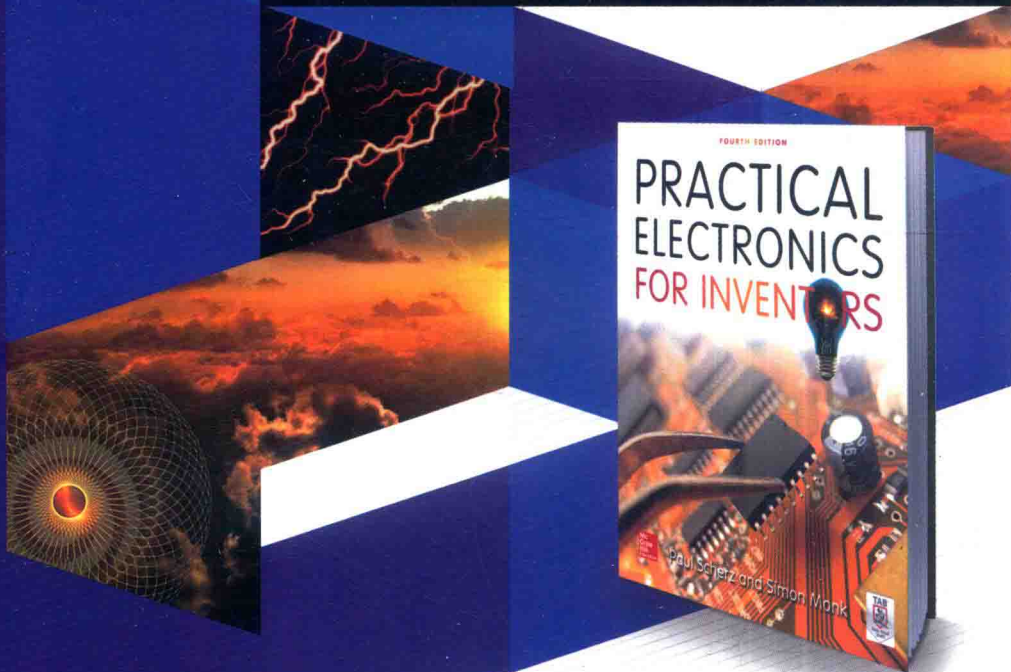
Practical Electronics for Inventors, Fourth Edition

实用电子元器件 与电路基础 (第4版)

Practical Electronics for Inventors
Fourth Edition

【美】 Paul Scherz 著
Simon Monk

夏建生 王仲奕 刘晓晖 郭福田 等译



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

经典译丛·实用电子与电气基础

实用电子元器件与电路基础 (第4版)

Practical Electronics for Inventors

Fourth Edition

[美] Paul Scherz 著
Simon Monk

夏建生 王仲奕 刘晓晖 郭福田 等译

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是一本实用性非常强的电子元器件和实用电子电路的参考工具书。它在第3版的基础上根据电子技术的快速发展,对原书内容又做了增订修改,并删减了一些相对过时的内容。使得本书的内容紧密跟随电子技术知识的不断更新与发展,也更切合和贴近原书的实用特性。

本书从电路基本原理的介绍开始,对各种类型的电子元器件进行了详细具体的分类介绍。介绍了各种实用电路的设计;在数字电路中,介绍了寄存器、计数器等各种中规模集成数字器件,以及存储器、现场可编程门阵列 FPGA 等大规模集成电路和相应的开发设计软件 HDL,介绍了微控制器及模块化电子设备,并给出了实际应用程序实例;介绍了各种电机及控制电路;同时,还结合图解的方法,介绍了制作实用电子电路的过程、方法、调试步骤、安全组装和注意事项等。

本书可作为电子工程技术人员、电子爱好者的电子元器件和实用电子电路的参考工具书,也可以作为大专院校的教学参考书。

Paul Scherz, Simon Monk

Practical Electronics for Inventors, Fourth Edition

ISBN 978-1-25-958754-2

Copyright © 2016 by McGraw-Hill Education.

All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including without limitation photocopying, recording, taping, or any database, information or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

This authorized Chinese translation edition is jointly published by McGraw-Hill Education and Publishing House of Electronics Industry. This edition is authorized for sale in China Mainland.

Copyright © 2017 by McGraw-Hill Education and Publishing House of Electronics Industry.

版权所有。未经出版人事先书面许可,对本出版物的任何部分不得以任何方式或途径复制或传播,包括但不限于复印、录制、录音,或通过任何数据库、信息或可检索的系统。

本授权中文简体字翻译版由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司和电子工业出版社合作出版。此版本经授权仅限在中国大陆销售。

版权 © 2017 由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司与电子工业出版社所有。

本书封面贴有 McGraw-Hill Education 公司防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字:01-2016-7928

图书在版编目(CIP)数据

实用电子元器件与电路基础:第4版/(美)保罗·施瓦茨(Paul Scherz),(美)西蒙·莫克(Simon Monk)著;夏建生等译. —北京:电子工业出版社,2017.12

书名原文:Practical Electronics for Inventors, Fourth Edition

ISBN 978-7-121-32922-7

I. ①实… II. ①保… ②西… ③夏… III. ①电子元件 ②电子电路 IV. ①TN6 ②TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 258243 号

策划编辑:谭海平

责任编辑:李秦华

印 刷:三河市鑫金马印装有限公司

装 订:三河市鑫金马印装有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:47.75 字数:1680.8 千字

版 次:2017 年 12 月第 1 版(原著第 4 版)

印 次:2017 年 12 月第 1 次印刷

定 价:128.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888,88258888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式:(010)88254552, tan02@phei.com.cn。

译者序

本书的第一版和第二版作者 Paul Scherz 是一位物理学家和系统运行管理者,也是一位发明家和业余电子爱好者,这种兴趣是他在大学的核工程与工程物理系和等离子物理系的工作经历中培养起来的。由于这是一本实用性非常强的电子元器件和实用电子电路的参考工具书,所以本书一出版便成为流行世界各地的畅销书。2013 年原书作者 Paul Scherz 与具有控制论和计算机科学学士学位及软件工程哲学博士学位的 Simon Monk 合作出版了本书的第 3 版,它在第 2 版的基础上做了较大的增订,增加了第 6 章传感器、第 13 章微控制器和第 16 章模块化电子设备。

这是本书的第 4 版,仍是 Paul Scherz 与 Simon Monk 博士合作的修改版本,它在第 3 版的基础上根据电子技术(特别是数字电子技术)的快速发展,对原书内容又做了很多增订删改,增加了第 14 章可编程逻辑,并删减了一些相对过时的内容。本书虽然是一本实用性很强的电子工具书,但它对各种元器件的分析和对各种电路的原理分析介绍,其深度和广度使得它完全可以作为一本教学参考书使用。

本书从电路基本原理的介绍开始,对各种类型的电子元器件进行了详细具体的分类介绍。首先重点介绍了包括电阻、电感、电容、变压器等在内的基本电子元器件;然后分别介绍了各种半导体器件、光电器件、各种传感器、运算放大器、直流稳压和调压器件、电声器件等专用元器件;介绍了各种滤波电路的设计及实用电路,各种振荡电路及 555 时基电路;在数字电路中,从各种门电路、触发器开始,详细介绍了各种中规模集成数字器件,如寄存器、计数器、编码器、译码器、数据选择器、数据分配器、数字显示器,以及大规模集成电路的存储器、可编程逻辑器件、微处理器和模块化电子设备等;在电机及控制电路中,介绍了直流电动机、伺服电动机和步进电动机等。详细提供了各种元器件的型号、参数、接线引脚、外形、实物图片等,并给出了典型的实用电路图,清晰的手绘电路图多达 750 余幅;特别需要指出的是,本书结合图解方法,详细地介绍了制作实用电子电路的过程、方法、步骤和注意事项,以及常用仪器仪表的操作使用,元器件的选择,安全操作等,细节几乎面面俱到,这也是本书的一大特点。

本书内容丰富,资料翔实新颖,涉及领域范围极广,叙述清晰细致,语言生动风趣,图文并茂,给出了大量的元器件参数图表和特性曲线以及各种实用电路的组成和工作过程的详尽分析,并给出了很多计算和分析例题来帮助读者理解内容;本书提供了篇幅很大的附录,对电力系统及家用供电系统做了简明但全面的介绍,收录了误差分析、常用公式等内容。因此,本书是一本非常有实用价值的参考书。可作为电子工程技术人员、电子爱好者的电子元器件和实用电子电路的工具参考书,也可以作为大专院校的教学参考书。

本书的第 2 章由王仲奕翻译;第 3 章的 3.3 节、3.4 节、3.5 节这三节及第 4 章由刘晓晖翻译;第 5 章、第 6 章、第 7 章、第 8 章、第 9 章、第 10 章、第 11 章、第 15 章、第 16 章及第 3 章的 3.1 节、3.2 节、3.7 节这三节由郭福田翻译;序言、第 1 章、第 12 章、第 13 章、第 14 章、第 17 章及第 3 章的 3.6 节、3.8 节、3.9 节这三节、附录及索引等其他内容由夏建生翻译。

由于译者水平有限,错误和疏漏在所难免,恳请读者批评指正。

序 言

电子领域的设计家们不仅要拥有理论知识、洞察力和创造力,还要具备专业技术,能将自己的想法变成实际生活中的应用电子产品。本书旨在从理论和实际两个方面,帮助读者直观地理解电子学,激发读者的创造力。

本书以指导读者进行发明设计为目的,适合于电子学基础知识薄弱、甚至包括根本没有相关知识的初学者。因此,它既是一本适合教师、学生和电子设计初级爱好者使用的入门教材,也是一本可供专业技术人员 and 更高级别爱好者使用的、有价值的参考书。

关于第4版

第4版主要增加了一章新内容,即可编程逻辑,这一章着重介绍了FPGA(field-programmable gate arrays,现场可编程门阵列)的使用,介绍了如何使用原理图编辑器和Verilog硬件描述语言(Verilog HDL)来对FPGA开发板进行编程。

这本书(第4版)经历了多次的内容更新,对一些不再符合现代电子的和过时的内容进行了删减,并且纠正了在第3版中发现的错误。

关于作者

Paul Scherz是一位系统运行管理者。他在美国威斯康星大学获得物理学的理学士学位。Paul也是一名发明家和业余电子爱好者,这是缘于他在大学的核工程与工程物理系和等离子物理系的工作经历中所培养起来的兴趣。

Simon Monk博士具有控制论和计算机科学的学士学位及软件工程的哲学博士学位。在当了几年大学教师后进入工业界,参与创办了移动软件公司——Momot有限公司。他从青少年时期开始,就是一个活跃的电子爱好者,现在也是一名在电子技术和开源工具集方面的全职作家。Monk博士已经出版了很多电子技术方面的书籍,包括Arduino和Raspberry Pi计算机编程书籍,以及黑客电子方面的论著。

关于技术编审

Michael Margolis在开发和提供硬件和软件解决方案方面有着超过40年的经验;他曾在索尼、朗讯/贝尔实验室以及一些初创公司工作过。Michael也是两本书的作者,即*Arduino Cookbook*(Arduino大全)和*Make an Arduino-Controlled Robot: Autonomous and Remote-Controlled Bots on Wheels*(制作一个Arduino控制的机器人:自动驾驶和遥控机器人)。

Chris Fitzer是一个解决方案的架构师和技术经理,他于2003年在曼彻斯特大学科学与技术研究所(UMIST)获得电气与电子工程博士学位,此前在1999年获得了一级荣誉学位(学士)。他目前领导着一个全球团队,开发和部署世界各地的智能电网技术。从他的前期工作,已经看到Cris推动了欧洲对ZigBee智能能源(ZSE)的兴趣,并率先发布了世界首例认证的智能能源内部显示(IPD)和原型智能电表,他还撰写和合著了许多智能电网技术领域的期刊论文。

致谢

衷心感谢在编写这本书时给予我们很多帮助各位朋友,特别要感谢对本书进行技术评审的 Michael Margolis, Chris Fitzer 和 David Buckley。

这本书(第4版)的内容准确性方面能够在第3版的基础上得到较大的提高和改进,首先要感谢的是巴克内尔大学的 Martin Ligare, 他对该书进行了详尽和非常有帮助的内容勘误;此外,对该书的校验和勘误做出贡献的还有: Steve Baker(海军研究生学院), George Caplan(韦尔斯利学院), Robert Drehmel, Earl Morris 和 Robert Strzelczyk(摩托罗拉公司), Lloyd Lowe(博伊西州立大学), John Kelty(内布拉斯加州大学), Perry Spring(卡斯卡迪亚社区学院), Michael B Allen, Jeffrey Audia, Ken Ballinger(EIT), Clement Jacob, Jamie Masters 和 Marco Ariano 等,感谢他们为该书的出版花费了很多时间和精力。

同时要感谢 Michael McCabe 和 Apoorva Goel, 以及 McGraw-Hill 教育出版公司的每一位朋友, 是他们的支持和娴熟的业务能力才使得该书由书稿变成一本有价值的工具书。

Paul Scherz 和 Simon Monk

目 录

第1章 电子学简介	1	2.33 二端口网络与滤波器	155
第2章 基本理论	3	2.34 瞬态电路	168
2.1 电子学概论	3	2.35 周期非正弦电源电路	178
2.2 电流	3	2.36 非周期电源	183
2.3 电压	6	2.37 SPICE	185
2.4 导体的微观结构	12	第3章 基本电子电路元件	190
2.5 电阻、电阻率和电导率	15	3.1 导线、电缆和连接器	190
2.6 绝缘体、导体和半导体	19	3.2 电池组	205
2.7 热和功	21	3.3 开关	216
2.8 热传导和热阻	23	3.4 继电器	219
2.9 导线规格	26	3.5 电阻器	223
2.10 接地	27	3.6 电容器	240
2.11 电路	33	3.7 电感	265
2.12 欧姆定律和电阻器	34	3.8 变压器	279
2.13 电压源和电流源	45	3.9 熔断器和断路器	295
2.14 电压, 电流和电阻的测量	47	第4章 半导体	298
2.15 电池的串并联	48	4.1 半导体技术	298
2.16 开路和短路	49	4.2 二极管	302
2.17 基尔霍夫定律	50	4.3 晶体管	322
2.18 叠加原理	54	4.4 半导体晶闸管	362
2.19 戴维南定理和诺顿定理	55	4.5 瞬态干扰抑制	369
2.20 交流电路	59	4.6 集成电路	376
2.21 交流及电阻, 电压和电流的 有效值	64	第5章 光电子技术	378
2.22 电力网	67	5.1 光子简介	378
2.23 电容器	69	5.2 灯	379
2.24 电感	84	5.3 发光二极管	381
2.25 复杂电路模型	114	5.4 光敏电阻	390
2.26 复数	116	5.5 光电二极管	392
2.27 正弦电路	120	5.6 太阳能电池	393
2.28 交流电路的功率(视在功率, 有功功率 和无功功率)	129	5.7 光电晶体管	395
2.29 交流电路的戴维南定理	137	5.8 光电晶闸管	397
2.30 谐振电路	139	5.9 光电耦合器	398
2.31 分贝	151	5.10 光纤	400
2.32 输入和输出阻抗	154	第6章 传感器	401
		6.1 一般原则	403

6.2	温度传感器	404	10.2	555 定时器	524
6.3	接近和触摸传感器	408	10.3	压控振荡器	530
6.4	运动、力及压力检测装置	411	10.4	文氏电桥和双 T 形振荡器	530
6.5	化学物质传感器	416	10.5	LC 振荡器(正弦波振荡器)	531
6.6	光、辐射、磁性和声音传感器	417	10.6	晶体振荡器	533
6.7	GPS	418	10.7	微控制器振荡器	535
第 7 章	实用电子技术	419	第 11 章	稳压器和电源	536
7.1	安全性	419	11.1	稳压集成电路	537
7.2	设计电路	421	11.2	稳压器的应用	539
7.3	万用表	432	11.3	变压器	539
7.4	示波器	435	11.4	整流器的封装	539
7.5	电子技术实验室	450	11.5	几种简单的电源	540
第 8 章	运算放大器	479	11.6	关于波纹抑制的技术要点	542
8.1	运算放大器的水模拟系统	480	11.7	相关问题	544
8.2	运算放大器的工作原理	480	11.8	开关稳压器电源	544
8.3	运算放大器的相关理论	481	11.9	开关电源	547
8.4	负反馈	482	11.10	各种商品电源	548
8.5	正反馈	486	11.11	电源的制作	549
8.6	运算放大器的实际类型	487	第 12 章	数字电路	550
8.7	运算放大器的特性	488	12.1	数字电路基础	550
8.8	功率运算放大器	489	12.2	逻辑门	556
8.9	实践中的注意事项	490	12.3	组合器件	567
8.10	电压和电流的偏移补偿	491	12.4	逻辑器件系列	577
8.11	频率补偿	491	12.5	电源与测试逻辑 IC	579
8.12	比较器	492	12.6	时序逻辑电路	580
8.13	带迟滞的比较器	493	12.7	计数器 IC	598
8.14	单电源比较器	495	12.8	移位寄存器	604
8.15	窗口比较器	496	12.9	模拟/数字接口	611
8.16	电平指示器	496	12.10	显示器件	621
8.17	测量放大器	496	12.11	存储器件	633
8.18	应用	497	第 13 章	微控制器	643
第 9 章	滤波器	501	13.1	微控制器的基本结构	643
9.1	滤波器设计须知	502	13.2	微控制器举例	644
9.2	基本滤波器	502	13.3	评测板/开发板	658
9.3	无源低通滤波器的设计	503	13.4	Arduino	658
9.4	滤波器的比较	507	13.5	微控制器的接口	666
9.5	无源高通滤波器的设计	507	第 14 章	可编程逻辑	684
9.6	无源带通滤波器的设计	509	14.1	可编程逻辑	684
9.7	无源带阻滤波器的设计	511	14.2	现场可编程门阵列(FPGA)	685
9.8	有源滤波器的设计	513	14.3	ISE 和 Elbert V2	686
9.9	集成滤波器电路	519	14.4	Elbert 2 开发板	687
第 10 章	振荡器和定时器	521	14.5	下载	688
10.1	RC 间歇振荡器	521	14.6	制定 FPGA 逻辑设计	688

14.7	Verilog	697	16.4	音频放大器	724
14.8	在 Verilog 中描述 FPGA 设计	698	16.5	前置放大器	727
14.9	模块化设计	701	16.6	混频电路	727
14.10	模拟仿真	708	16.7	阻抗匹配	728
14.11	VHDL	710	16.8	扬声器	728
第 15 章	电动机	711	16.9	分频网络	729
15.1	直流电动机	711	16.10	驱动扬声器的简单集成电路	730
15.2	直流电动机的速度控制	711	16.11	声响设备	731
15.3	直流电动机的方向控制	712	16.12	其他音频电路	732
15.4	遥控伺服系统	714	第 17 章	模块化电子设备	734
15.5	步进电动机	715	17.1	集成电路产品	734
15.6	步进电动机的类型	715	17.2	接口板和模块化产品	735
15.7	步进电动机的驱动	717	17.3	即插即用模块	737
15.8	带译码器的控制驱动器	718	17.4	开源硬件	739
15.9	步进电动机的识别	720	附录 A	配电与家用配线	740
第 16 章	音频电子技术	722	附录 B	误差分析	745
16.1	声音概述	722	附录 C	常用资料和公式	748
16.2	话筒	723			
16.3	话筒的特性指标	724			

第1章 电子学简介

学习电子学时，初学者往往不能明确哪些内容是必须掌握的。那么究竟该了解哪些知识，并且应该按何种先后顺序去学习这些知识呢？图 1.1 可以作为学习电子学的一个不错的起步点，该流程图展示了电子学的所有重点内容，以及这些内容的常规学习顺序。图中扼要地介绍了进行实用电子装置设计的基本要素，这些要素也正是本书所要阐述的内容，下面将对这些要素进行详细介绍。

首先是理论知识，包括电压、电流、电阻、电容和电感的知识，以及各种用来确定电路中电压、电流的大小和方向的定律和定理。掌握了这些基础理论后，将开始学习无源元件，如电阻器、电容器、电感器和变压器等。

接下来是分立无源电路，包括限流网络、分压器、滤波电路、衰减器，等等。这些简单的电路本身并没有什么价值，但在较复杂的电路中，它们却是至关重要的组成部分。

学习了无源元件和无源电路后，将开始学习由半导体材料制成的分立有源装置。这些装置主要由二极管(单向导通门)，晶体管(电气控制开关/放大器)和晶闸管整流器(仅用做电气控制开关)组成。

在阐述了分立有源装置之后，将介绍分立有源/无源电路。在这些电路中，有一部分带有整流器(交-直流转换器)、放大器、振荡器、调制器、混合器和稳压器。从这里开始，学习的内容不再枯燥无味，开始变得有趣了。

在电子学的整个学习过程中，会接触到多种输入/输出(I/O)装置(转换器)。输入装置包括麦克风、光电晶体管、开关、键盘、电热调节器、应变仪、发电机和天线。它们将物理信号，如声音、光照和压力，转换成电路可使用的电信号。输出设备是将电信号转换为物理信号。输出装置包括灯、LED 和 LCD 显示器、扬声器、蜂鸣器、电动机(直流、伺服、步进)、螺线管和天线。正是这些 I/O 装置使人与人之间、电路之间可以相互通信。

为了简化电路，设计者和生产商已经制造出集成电路(IC)，就是在一小片半导体硅片上集成了前面提到的若干分立电路，硅片由塑料外壳封装，延伸出来的细小引线可以连接到芯片外部的金属引脚。放大器、稳压器之类的集成电路属于模拟装置，它们可以对连续变化的任意大小的电压信号做出反应，并且可以产生任意大小的电压信号(不同于数字电路，数字电路只有两种工作电平)。实用电路设计者必须熟悉集成电路的内容。

然后进入数字电子技术的学习。数字电路只工作在高(如 5 V)、低(如 0 V)两种电压状态下。仅采用两种电压状态是为了方便数据(数字、符号、控制信息)的处理和存储，将各种信息编码成为数字电路可以使用的信号，在这个过程中，需要将二进制的位与表示对立意义的“词语”对应起来(如 1 和 0，分别表示高、低电平)。对于某个具体的电路，由设计者指定它们表示的实际意义。与模拟电路不同，数字电路使用的是一套全新的集成元件。

数字电路中使用了大量的专用集成电路，其中，一部分用于信息输入时的逻辑操作；另一部分用做计数；还有一部分用来暂存需要恢复的数据。数字集成电路包括逻辑门、触发器、移位寄存器、计数器、存储器、处理器，等等，数字电路使电子装置具有了“头脑”。为了使数字电路能与模拟电路相互作用，需要使用专门的模数转换电路，把模拟信号转换成一串由 0 和 1 组成的特殊字符串；同样，也需要数模转换电路将 0 和 1 组成的字符串转换成模拟信号。

随着对这本书后面数字电子技术知识的掌握和了解，就可以深入到微控制器的知识领域，这是一类可编程的数字电子器件，只需对一个微控制器编写少量的程序，便可通过微控制器的输入输出端口自动读取外部传感器的信息数值并用来控制输出装置。

最后是搭建/测试阶段。包括阅读原理图，使用实验板搭建电路原型，测试电路原型(使用万用表、示波器和逻辑探头)，校正电路(非必需)，使用各种工具和专用电路板搭建最终电路。

下一章将对作为基础的电子学理论做一个介绍。

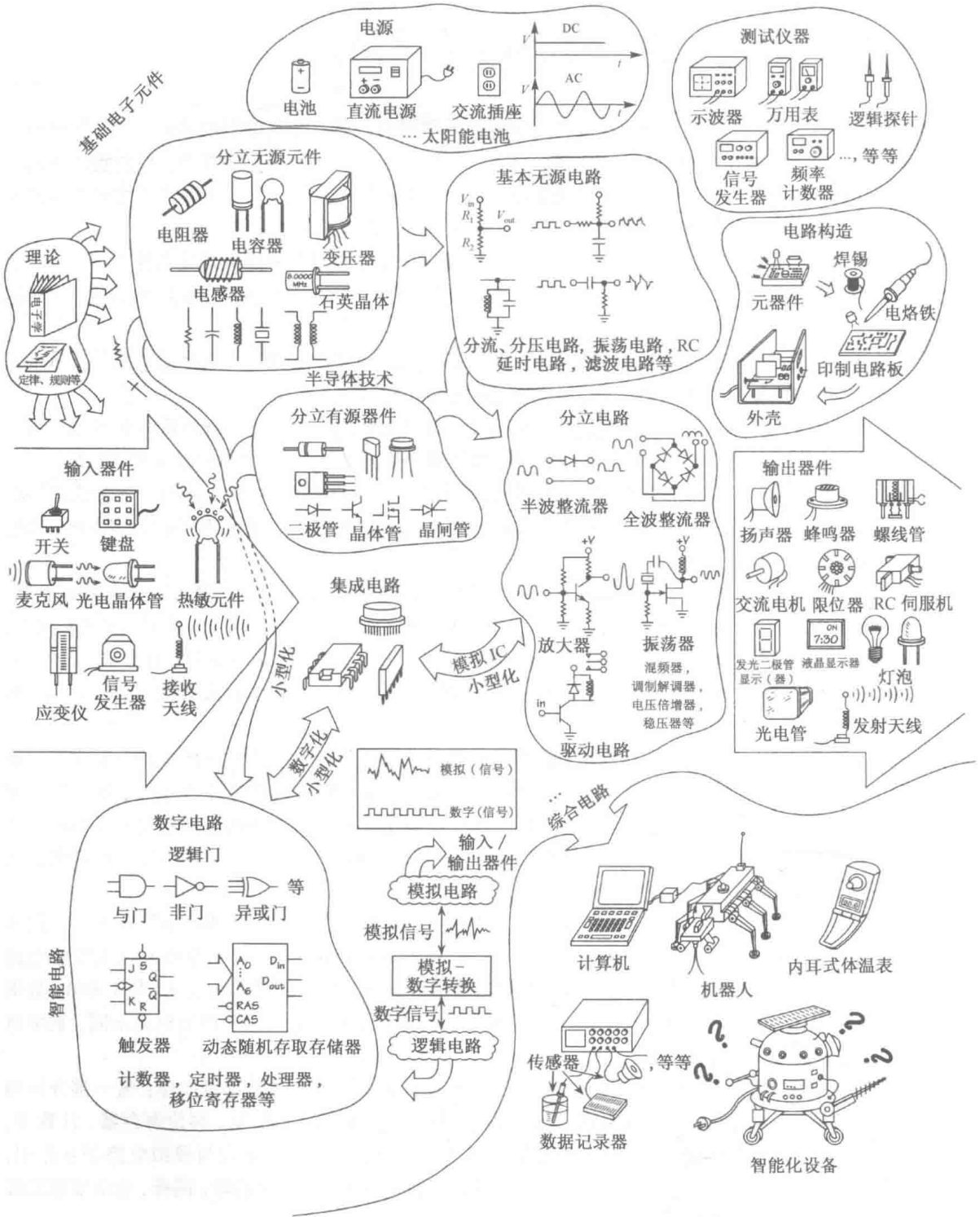


图 1.1 基本电子元器件

第2章 基本理论

2.1 电子学概论

本章首先介绍电子学中的一些基本概念,如电流、电压、电阻、电源、电容和电感。在这些基本概念的基础上,说明描绘电阻、电容、电感这些基本元件上的电流和电压特性的数学模型。并通过基本定理和定律的应用,如欧姆定律、基尔霍夫定律、戴维南定理,给出包含电阻、电容、电感和一种激励源的复杂电路网络的分析方法,同时介绍用于电网络中的各种激励源,如直流电源(DC)、交流电源(AC)(包括正弦周期信号或非正弦周期信号),以及非正弦非周期信号源。然后将讨论瞬态电路,在这种电路中,状态会发生突变(如电路中开关的跳闸),最后对含有非线性元件(二极管,晶体管,积分电路等)的电路进行分析和讨论。

对开始学习电子学的读者,本书建议你使用电路仿真模拟器,在电路实验仿真网站(www.circuitlab.com)中为使用者提供了很好的交互式界面,可以很方便使用。另外,还提供了一些在线应用的计算程序能够帮助读者计算本章的许多例子。在学习某一章的内容时,应用电路仿真模拟器有助于理解这一章的知识,并对电路性质有一个直观的认识。但是,要注意的是当没有完全理解模拟仿真器模拟一个实际电路所需要的参数时,模拟仿真器会给出错误的结果。更重要的是能亲自动手做出面包板,用导线、电阻、电源等电路元件构成电路,这将会得到大量的实际知识,对于一个开发者是非常必要的。

需要明确的是,本章只是从理论上解释了所有涉及的电路元件。例如,拿电容来说,我们将了解电容的工作原理和在某一特定条件下描述一个电容器的特征方程式,以及预测一些基本现象的各种相关技巧。但是,更为重要的应该是得到电容器的实际知识,如电容器的实际应用(滤波器、缓冲器、振荡器的设计等),现有的实际电容器的类型,实际电容器有哪些不同的非理想特性,在一些特殊的应用场合哪种电容器最佳,以及如何识别电容器上的标签,在本书3.6节中可以找到这方面的相关知识。以上讲的问题也适用于本书理论部分所涉及的其他电路元件。

关于变压器和非线性电路元件,如二极管、晶体管、模拟和数字集成电路(IC),其理论和实际的问题没有在本章讨论。变压器部分将在本书3.8节中讨论,其他非线性电路元件将在本书的其他章节中分别讨论。

在这里提醒读者:如果在本章的某一节中出现看起来复杂的数学表达式,不要担心,先跳过它,因为本章大部分复杂的数学表达式是用来证明一些电路理论和定理的,或是为了说明如何把复杂事物理想化以避免用数学方法处理的。在大部分电路设计中实际用到的数学知识是非常少的。事实上,只需要知道基本的代数知识就足够了。因此,在本章某些特别部分中出现感觉难以理解的数学公式时,抛开这部分内容,不必过于在意其中的这些数学表达式,抓住有用的,不难理解的公式、定理等。不使用这些数学表达式也能够设计出相当好的电路。

2.2 电流

电流是单位时间内通过某一横截面 A 的总电荷。这个横截面可以是空气、等离子体或是液体中的任意一截面。但在电子学中,这个横截面大多数情况下是固体中的一个薄片,比如说导体(如图2.1所示)。

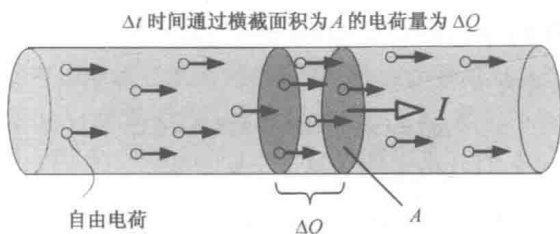


图 2.1 电流定义模型

如果在 Δt 时间内, 通过某一截面的电荷量为 ΔQ , 则定义平均电流 I_{ave} 为

$$I_{\text{ave}} = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

如果电流随时间变化, 定义 $\Delta t \rightarrow 0$ 时的电流值为瞬时电流, 即瞬时电流是电荷通过某一截面时的变化率

$$I = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{dQ}{dt} \quad (2.1)$$

电流的单位是库仑每秒, 也称为安培(A)

$$1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$$

因为安培是一个比较大的单位, 因此, 电流也常用毫安($1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ A}$)、微安($1 \mu\text{A} = 10^{-6} \text{ A}$)和纳安($1 \text{ nA} = 10^{-9} \text{ A}$)来表示。

在导体内, 比如铜, 电流是导体内自由电子定向移动而形成的。每个铜原子有一个自由电子, 单个自由电子的电荷量为

$$Q_{\text{electron}} = (-e) = -1.602 \times 10^{-19} \text{ C} \quad (2.2. a)$$

这个电荷量与单个铜离子的电荷量相等, 但是符号相反(原子失去一个电子形成正电荷, 这些电子在导体内自由移动而形成自由电子群。失去电子的原子其质子数多于电子数)。一个质子的电荷量为

$$Q_{\text{proton}} = (+e) = +1.602 \times 10^{-19} \text{ C} \quad (2.2. b)$$

由于导体内的质子和电子的数量相等, 因此整个导体是中性的。从式 2.2 可以看出, 如果流过铜导线的电流为 1 A, 则在 1 s 内穿过导线横截面的电子数量为

$$1 \text{ A} = \left(\frac{1 \text{ C}}{1 \text{ s}} \right) \left(\frac{\text{电子}}{-1.602 \times 10^{-19} \text{ C}} \right) = -6.24 \times 10^{18} \text{ 电子/s}$$

上式结果提出一个问题, 即为什么每秒流过的电子量是负数? 对这个问题只有两种可能的解释, 要么把电子流动的反方向定义为电流, 要么让正电荷取代电子在导线中运动, 以上都可以解决符号问题。但后一种解释是不正确的, 实验证明, 电子是自由运动的, 而正电荷不能自由移动, 它们被固定在导体的晶格中(但要注意的是, 有些介质中的正电荷可能会运动, 如液体、气体和等离子体中的正电荷是运动的), 因此前一种说法, 即把电子流动的反方向规定为电流的方向是正确的。

很早以前, 当本杰明·富兰克林(通常被称为电子学之父)开始早期的电子学研究时, 规定了正电荷的符号, 在那个时期, 电荷的运动和做功还是一件神秘的事情, 后来, 名叫约瑟夫·汤姆逊的物理学家在实验中获得运动的电荷, 为了测量和记录实验数据以及做一些计算, 汤姆逊必须遵守唯一的定律——富兰克林的正电流定律。但是, 汤姆逊发现运动电荷(被他称为电子)的运动方向与公式中约定的电流 I 的方向相反, 或者说电子逆着约定的方向运动, 参见图 2.2。

上述问题对于那些对物理细节不感兴趣的人来说没有什么关系, 可以假设在导线中或电子设备中自由运动的是正电荷, 把负电荷的运动方向等效为正电荷沿着相反方向的运动对所有的研究工作没有影响。事实上, 在电子学中用的所有公式都是基于这种假设的, 例如欧姆定律($V = IR$)中的电流 I 被认为是由正电荷形成的, 以后将一直遵循这个概念, 简单地说, 就是想象正电荷在运动。当说电子流动时, 要意识到定义的电流正沿与其运动方向相反的方向流动。通过显微镜观察导体的内部, 可以非常清楚地看到这一事实。

例 1: 导体电流为 2 A, 问 3 s 内通过给定点的电子数量是多少?

解: 3 s 内通过给定点的电荷为

$$\Delta Q = I \times \Delta t = (2 \text{ A}) \times (3 \text{ s}) = 6 \text{ C}$$

一个电子的带电量为 $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$, 所以 6 C 电荷的电子数量是

$$\text{电子数量} = 6 \text{ C} / 1.602 \times 10^{-19} \text{ C} = 3.74 \times 10^{19}$$

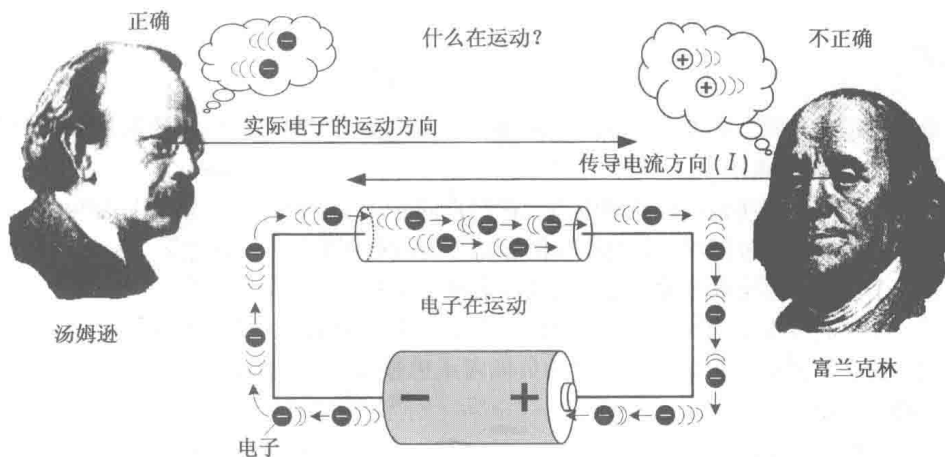


图 2.2 汤姆逊改变了正电荷在导体中自由运动的说法,与富兰克林的观念相反,但由于负电子的运动方向可以等效为正电荷沿着相反方向的运动,因此原有的公式仍然适用,在应用这些公式时,仍然采用富兰克林的电流理论,尽管已经意识到在导体内运动的实际是自由电子

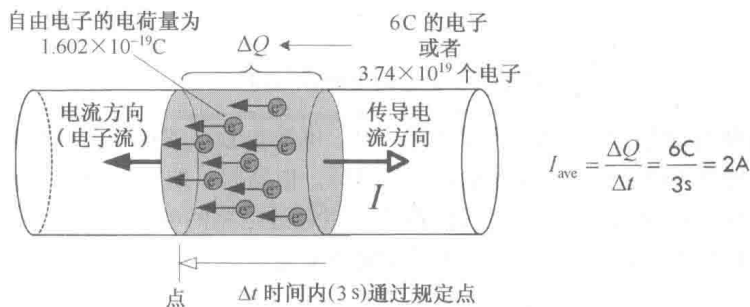


图 2.3 例 1 所示电路

例 2: 电路中电荷随时间变化的函数关系式为: $Q(t) = (0.001 \text{ C}) \sin[(1000/\text{s})t]$ 。求瞬时电流。

$$I = \frac{dQ}{dt} = \frac{d}{dt} [(0.001 \text{ C}) \sin(1000/\text{s} \cdot t)] = (0.001 \text{ C})(1000/\text{s}) \cos(1000/\text{s} \cdot t) \\ = (1 \text{ A}) \cos(1000/\text{s} \cdot t)$$

解: 如果在上式中给定具体时间, 就可以算出那一时刻的电流值。例如, 设 $t = 1 \text{ s}$ 时, 电流值为 0.174 A , $t = 3 \text{ s}$ 时, 电流值为 -0.5 A 。负号表示电流沿相反方向流动, 这符合正弦函数的特性。

注意: 例 2 中利用了微积分的知识, 如果不熟悉微积分, 可以在附录 C 中先看一些关于微积分的基础知识。幸运的是在学习电子学的过程中, 几乎不涉及电荷量, 通常只考虑电流, 而电流可以用电流表直接测量得到, 或者通过不需要微积分的公式进行计算得到。

2.2.1 对电流的看法

当使用电子仪器时, 需要考虑电流强度的大小, 最好的方法是给出一个额定值。例如: 一个 100 W 的白炽灯泡的工作电流大约是 1 A ; 微波炉的工作电流是 $8 \sim 13 \text{ A}$; 笔记本电脑是 $2 \sim 3 \text{ A}$; 电扇是 1 A ; 电视机是 $1 \sim 3 \text{ A}$; 烤面包炉是 $7 \sim 10 \text{ A}$; 荧光灯是 $1 \sim 2 \text{ A}$; 收音机是 $1 \sim 4 \text{ A}$; 发光二极管是 20 mA ; 连接互联网的智能手机大约是 200 mA , 一个低功率集成芯片的电流小于 $1 \mu\text{A}$, 甚至只有几皮安(pA); 汽车的启动电动机大约有 200 A ; 避雷器大约是 1000 A ; 心脏起搏器或呼吸机的有效电流为 $100 \text{ mA} \sim 1 \text{ A}$ 。

2.3 电压

要在两点之间形成电流,必须在这两点之间加上一个电压,导体两端的电压提供一个推动导体中所有自由电子运动的电动势(EMF)。

需要指出的是,电压也叫做电势差或电位,它们指同一个量。但是,应该尽量避免使用电势差和电位这两个词,因为很容易和位能混淆,电压和位能是不同的物理量。

图2.4是一个简单的手电筒电路,是用两段导线和一个开关把一个电池和一个灯泡连接起来构成的。当开关断开时,没有电流流通,而当开关闭合的瞬间,开关之间的电阻几乎降为零,电路中将有电流流过。电压驱动电路中所有的自由电子由电源的负极向正极移动,如前所述,这时电路中产生一个与自由电子运动方向相反的电流。

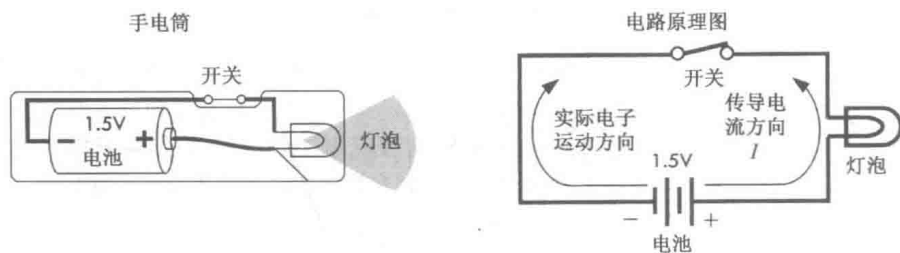


图 2.4 手电筒电路及原理图

在这里特别需要注意的是,像电路中需要电池一样,电池也必须连接到电路中其内部才能发生化学反应,这个化学反应使自由电子移动,实现电源设计目标。电路起了把电池的两个端子连成回路的作用。图2.5显示了一个碱性干电池的工作原理,可以看到虽然通过电路的电流的性质不同,如在电池的一些面上是离子流,另一些面上是电子流,但流过电路中的电流是恒定的。

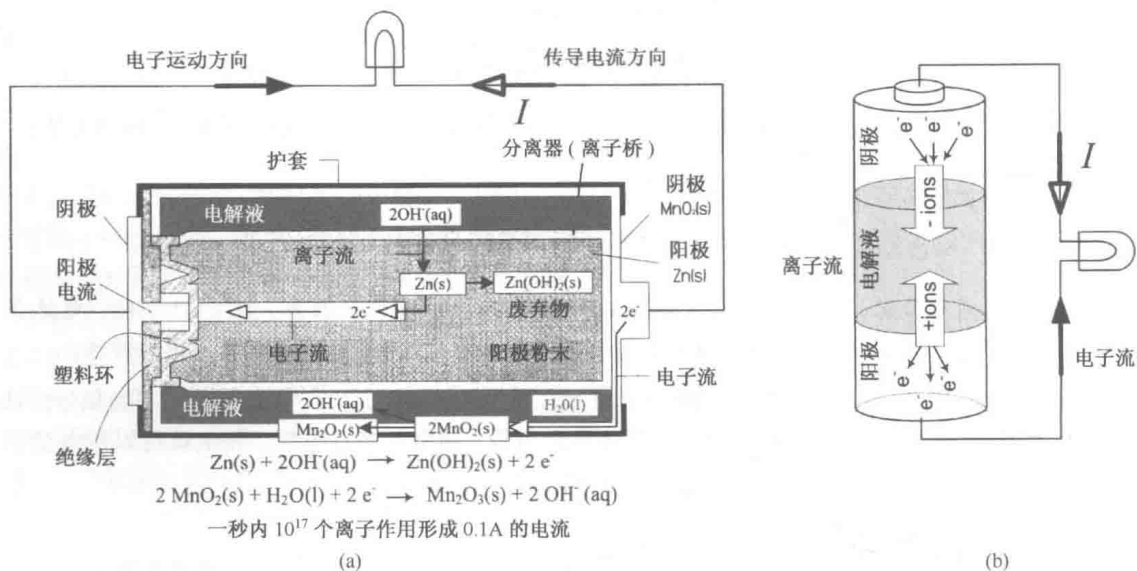


图 2.5 碱性干电池的工作原理

灯丝中的自由电子受到外加电压的电动势而得到能量,它们把得到的能量转移给灯丝中的原子,原子在其晶格内振动而产生热和发出光(当晶格中原子的价电子受到其他自由电子的激发回到较低的能量状态时就会释放光子)。

如果一个设备在其两端保持一个恒定的电压值,就称其为直流电压源(或DC)。电池是直流电压源的实例,其电路符号为

2.3.1 电压的产生过程

为了了解电池是怎样产生一个遍布整个电路的电动力的,可以设想电池内发生的化学反应产生了自由电子,这些自由电子迅速在电池的负极端(阳极材料)累积形成了一个电子集中区,在这个区域中存在电子之间的相互排斥力,这个力被称为“电压”。当电池两端接上负载(即手电筒的灯泡,导体,开关),电子从电池的负极端扩散进入电路中,使连接在电池负极端的导体端部的电子量增多,从而使导体内部电压增大。在一个区域中,自由电子量只要有一点差异,就会在自由电子间产生一个很大的斥力,靠近那些注入电子的自由电子受到排斥力迅速向相反方向移动,挤压相邻的电子,如此下去产生连锁反应,或称为瞬态脉冲,它以接近光的速度在电路中传播。这个过程如图 2.6 所示。

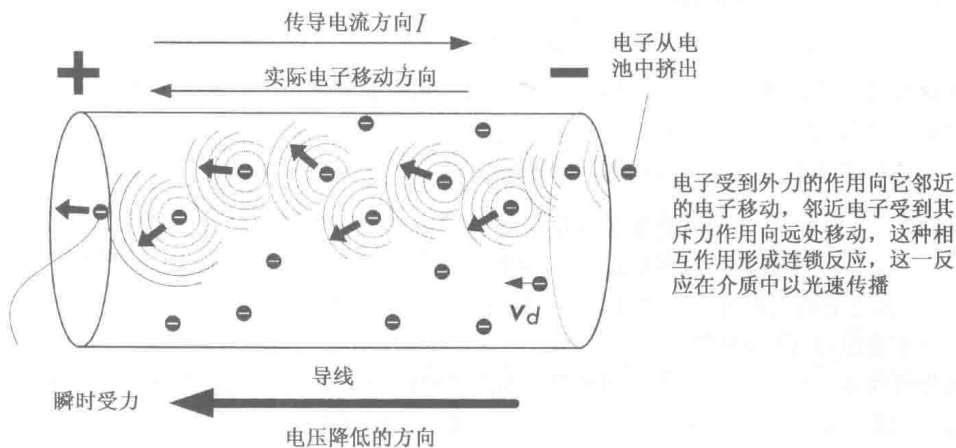


图 2.6 电压的产生过程

事实上,电子实际物理运动的平均速度是非常慢的,电子的漂移速度(一群电子向正极移动的平均速度)通常每秒不到一毫米,如在 12 号导线中通 0.1 A 的电流,其漂移速度为 0.002 mm/s。把电子的漂移与电流的流动联系起来,或者更确切地说,电流 I 沿着电子运动的反方向运动(如前所述,实际电子的运动非常复杂,而且还涉及热效应——我们将在下面部分讨论)。

进入电路中的电子受到的斥力是不相等的,这是因为物质可以以某种方式吸收一些来自负极端的斥力能流(通过电子之间的碰撞及自由电子间的结合等来吸收能量)。正如人们所知道的,电路中包含大量的部件,其中一些部件处于网络路径的末端。可以想象斥力能流经过这些网络路径后变得微弱了,把弱斥力区和低电压联系起来,即在这些区域,电子的位能很低,几乎不做功。

由于新的自由电子注入系统而产生电压,电压就是指在电压力区里,单位电荷在两点之间的位能之差(参见图 2.7)。电压和位能差的关系如下式所示:

$$V_{AB} = \frac{U_{AB}}{q} \text{ 或 } V_B - V_A = \frac{U_B - U_A}{q} \text{ 或 } \Delta V = \frac{\Delta U}{q}$$

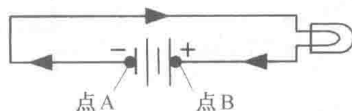


图 2.7 电压的定义

电压的定义表明电压是两点之间(如点 A 和点 B 之间)的测量值,这就是 V_{AB} 下标 AB 的含义,也可以用 ΔV 表示。为了测量和给出每一点的确定电压值,需要有一个参考值。在电子学中,通常取电压最低的点作为参考点,并定义参考点上的电位为零。在直流电路中,人们选择电池的负极端为电位的参考点,并通过在电路中插入接地符号 \perp 标明参考点的位置。

实际上很少用 V_{AB} 和 ΔV 表示电压,而是简写成 V 或 V_R 。 V 表示任意两点之间的电压, V_R 表示电阻 R 两端的电压。这样,电压和位能的关系可以更清晰地表示为

$$V = \frac{U}{q}$$

要明确电压和位能这两个变量代表两点之间的差值,今后将会发现所有重要的电学定律一般都采用这种清晰的表达形式。

在手电筒例子中,可以算出把一个电子从1.5 V电池的负极端转移到正极端的位能差为

$$\Delta U = \Delta Vq = (1.5 \text{ V}) \times (1.602 \times 10^{-19} \text{ C}) = 2.4 \times 10^{-19} \text{ J}$$

注意,上式结果给出的是两个电子之间的位能差,不是从电池负极(电压为 U_1)发射的电子的实际位能,也不是进入电源正极(电压为 U_0)的电子的实际位能。但是,如果假定进入电源正极端的电子的位能为零,可以认为来自负极端电子的相对位能为

$$U_1 = \Delta U + U_0 = \Delta U + 0 = 2.4 \times 10^{-19} \text{ J}$$

注意:位能增加意味着同性电荷之间的距离变小,位能减小意味着同性电荷之间的距离变大。我们避免使用负电荷,因为电压是根据正实验电荷来定义的。长期以来,采用富兰克林正电荷的观点来处理由于注入电子的集中产生的电位,问题就得到了解决。

在实际电路中,从电池负极发出的电子数量很多,达到 10^{13} 数量级。电子的数量与电子流动时受到的阻力有关,即前面的计算结果应该乘以电子的总数量。例如,若手电筒的电流为0.1 A,则每秒将有 6.24×10^{17} 个电子从电池的负极流出,计算得所有电子的位能大约为0.15 J/s。

电路中各处的自由电子的位能是多少呢?如灯丝中的自由电子,导线正极端和负极端的自由电子,等等。可以认为灯丝中电子的位能是进入导线负极端电子的位能的一半,能量的减少是由于电子受到沿线其他自由电子的机械碰撞而失去能量,造成电斥力逐渐减弱的缘故,事实上,在手电筒电路中,电压的减小应归因于自由电子通过灯丝时把能量转化成了热和光。

导体内自由电子的位能来自于电池。假设在同一导体中,所有的自由电子具有相同的位能,也就是假设在同一导体上任意两点之间都没有电位差,例如,把一个电压表接在一个导体的两点间,测得的电压为0 V(参见图2.8),这是事实,然而,实际并非如此,在导体上有一个很小的电压降,如果用一个精度较高的电压表可以测得这个电压降大约为0.00001 V或更小,其值的大小取决于导体的长度,电流以及导体材料的类型,这是因为导体本身有内阻。

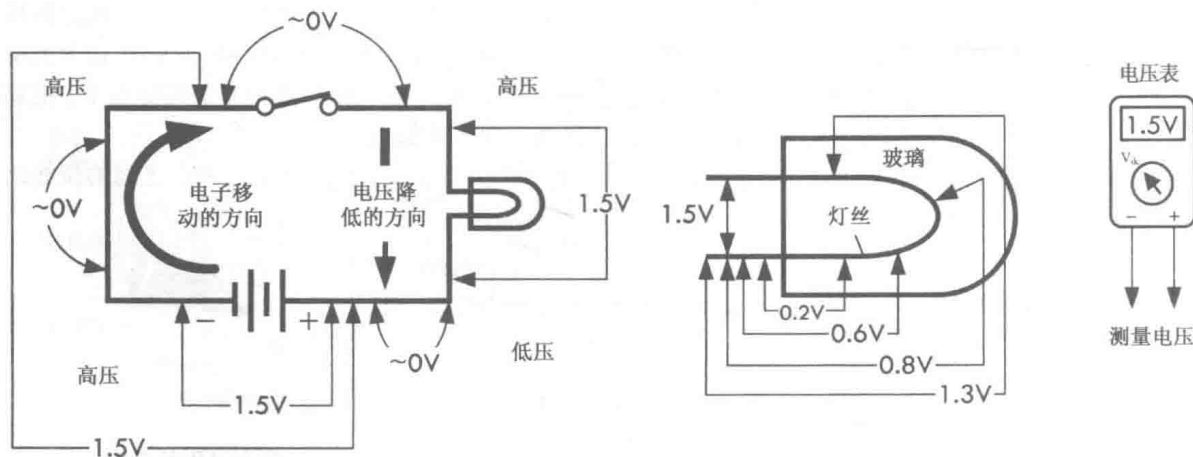


图 2.8 实际电路及测量

2.3.2 伏特和功率的定义

现在利用电压和势能差的关系 $V = U/q$ 来定义伏特——电压的单位。定义1伏特为

$$1 \text{ 伏特} = \frac{1 \text{ 焦耳}}{1 \text{ 库仑}}, 1 \text{ V} = \frac{1 \text{ J}}{1 \text{ C}} = \text{J/C (能差)}$$