

TURING

图灵电子与电气工程丛书



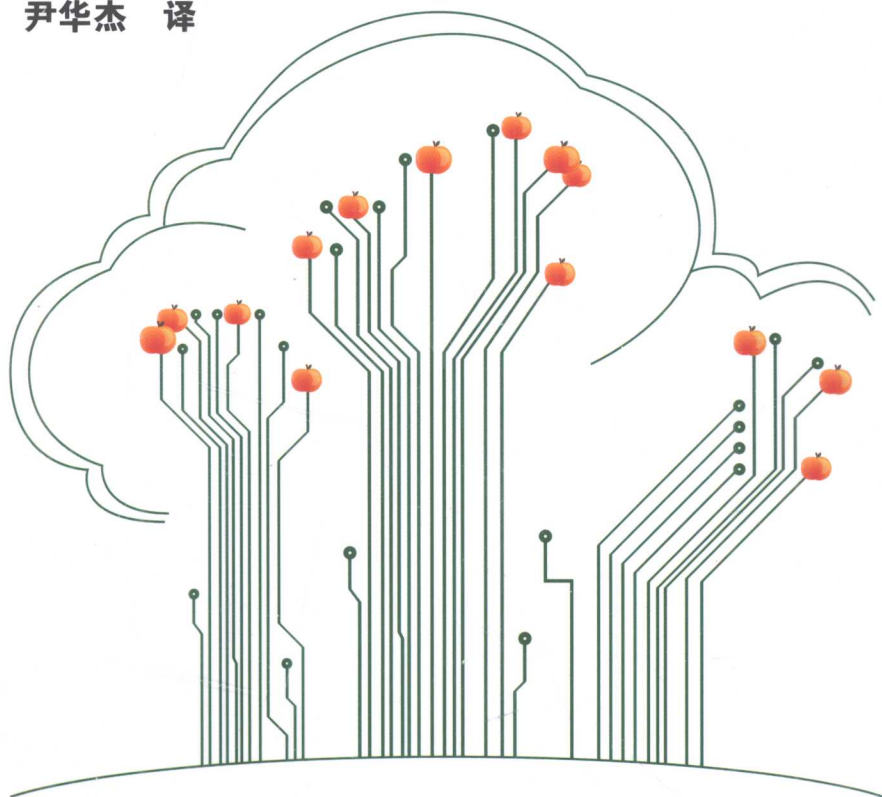
ELSEVIER
爱思唯尔



教会你大学里没学到而工作中至关重要的知识和技能

电子电气工程师 必知必会（第2版）

[美] Darren Ashby 著
尹华杰 译



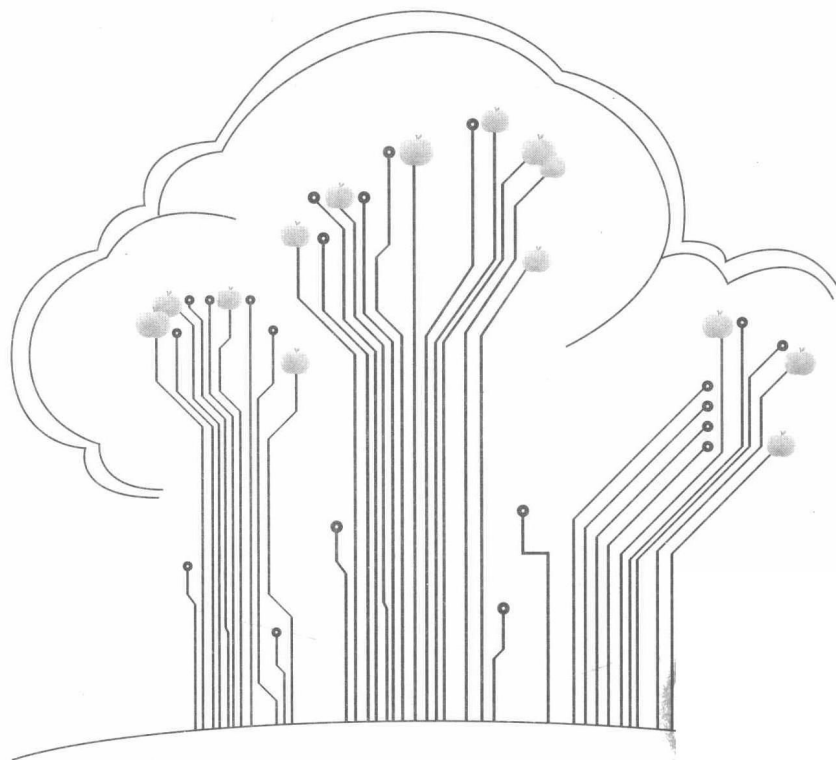
 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

TURING

图灵电子与电气工程丛书

电子电气工程师 必知必会（第2版）

[美] Darren Ashby 著
尹华杰 译



人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (CIP) 数据

电子电气工程师必知必会: 第2版/ (美) 阿什比
(Ashby, D.) 著; 尹华杰译. —北京: 人民邮电出版社,
2010.2

(图灵电子与电气工程丛书)

书名原文: Electrical Engineering 101:
Everything You Should Have Learned in School, But
Probably Didn't, 2E

ISBN 978-7-115-21866-7

I. ①电… II. ①阿… ②尹… III. ①电子技术—高
等学校—教材②电气工程—高等学校—教材 IV. ①TN
②TM

中国版本图书馆CIP数据核字 (2009) 第227503号

内 容 提 要

本书从实际工作需要出发, 总结了一名现代电子电气工程师在日常工作中最为关键的知识
点, 从简单的R、L、C元件, 到复杂的运放、微处理器/微控制器、数模/模数转换器、电
机、电源, 再到元件的非理想性、电路的可靠性设计、仿真、焊接, 以及电路和软件的故障
处理等, 文字生动幽默。此外, 本书还以较大的篇幅介绍了作者作为研发部门的管理者, 在
人际沟通、管理等方面的心得体会。

本书既可供电气信息类专业的高校师生参考, 也适合电气工程师阅读。

图灵电子与电气工程丛书

电子电气工程师必知必会 (第2版)

-
- ◆ 著 [美] Darren Ashby
译 尹华杰
责任编辑 朱 巍
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京铭成印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 700×1000 1/16
印张: 15.5
字数: 273千字 2010年2月第2版
印数: 5 001-9 000册 2010年2月北京第1次印刷
著作权合同登记号 图字: 01-2009-6908号
ISBN 978-7-115-21866-7
-

定价: 45.00元

读者服务热线: (010) 51095186 印装质量热线: (010) 67129223

反盗版热线: (010) 67171154

版权声明

Electrical Engineering 101: Everything You Should Have Learned in School but Probably Didn't, 2e by Darren Ashby, ISBN: 978-1-85617-506-7.

Copyright © 2009 by Elsevier. All rights reserved.

Authorized Simplified Chinese translation edition published by the Proprietor.

ISBN: 978-981-272-327-7.

Copyright © 2010 by Elsevier (Singapore) Pte Ltd. All rights reserved.

Elsevier (Singapore) Pte Ltd.

3 Killiney Road

#08-01 Winsland House I

Singapore 239519

Tel: (65)6349-0200

Fax: (65)6733-1817

First Published 2010

2010年初版

Printed in China by POSTS & TELECOM PRESS under special arrangement with Elsevier (Singapore) Pte Ltd. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书简体中文版由人民邮电出版社与Elsevier (Singapore) Pte Ltd.合作出版。本版仅限在中华人民共和国（不包括香港特别行政区和台湾地区）出版及标价销售。未经许可之出口，视为违反著作权法，将受法律之制裁。

译者序

本书不是严格意义上的专业书，而是一位资深电子电气工程师及技术开发部门的管理者，总结个人经验后写出的心得体会，它能够帮助读者强化电子电气工程的专业基础知识，指导读者进行科研开发、项目管理、人际沟通。

本书作者在科研和管理工作以及人员招聘的过程中，看到有太多的电子电气工程专业的学生及工程师，由于没有打牢基础知识而常常碰壁，所以萌生了写作为本书的念头。如果去问问那些已经毕业很多年的工程师们，我猜想，记不准并联电阻的求法、记不准滑动摩擦的定义者，恐怕大有人在。因此，为电子电气工程专业的学生、工程师乃至老板们提供一本可以巩固本学科基础知识的读本，是十分必要的。

电子电气工程中的概念看不到、摸不着，其中的公式、原理比较抽象难懂。我在读中学的时候，曾经有这么一个想法：“如果有这样的作家，能够把我们学生要学的公式和原理，写成学生们爱读、读起来轻松愉快的类似小说的读本，或者干脆就把这些知识巧妙、有机地融合在一本小说里，让我们在读小说、看故事的时候，顺便就把这些难懂、难记、难学的知识学会了，那该有多好。”我不敢说Darren Ashby先生的这本书完成了我的这个梦想，但我认为它确实是朝我梦想的方向迈进了一步，理由如下。

其一，作者自称“语文不太好”，所以在阐述电子电气工程的基础知识时，采用了很多通俗、形象化的比喻，而没有像许多大牌学者写书那样，以为读者什么都懂而采用大量晦涩难懂的专业术语。这使得本书成了一本简单易读的好书。在阐述电子电气工程的基础知识时，他还穿插了一些自己的亲身经历、故事及日常生活中一些人人都感兴趣的话题，譬如《星球大战》、《星际旅行》、《呆伯特》等电影或卡通片中的人物、故事等，这就像老师给我们上了一堂生动的课一样，不仅有知识，还有笑话。

其二，本书介绍的电子电气工程知识没有局限在某一门课程，而是覆盖了电子电气工程的大量基础和专业课程，包括电路原理、模拟电路、数字电路、电机、电力电子、开关电源、自动控制、电磁兼容等，其内容从简单的R、L、C元件，到复杂的运放、微处理器/微控制器、数模/模数转换器、电机、电源，再到元件的

非理想性、电路的可靠性设计、仿真、焊接，以及电路和软件的故障处理等，这些都是现代电子电气工程师需要经常用到的知识。对于这些内容，作者不是像教材一样一一介绍，而是从自身的实践，用尽可能浅显的语言，写出了自己对这些内容的心得体会。

其三，本书不仅具有上述丰富内容，还为读者提供了一些新颖的思维方法，例如书中介绍的单位代数、元件可视化、直觉分析法、积木工程法等，都是令读者豁然开朗，开扩视野，避免死记硬背的巧记、巧学、巧算、巧用的好方法。

其四，本书还介绍了作者作为技术开发部门的管理者，在项目管理、人员管理、人员招聘与解聘等方面的经验，对于指导人们如何进行科研开发、如何做好一名电子电气工程师及科研管理者、如何与同事及上下级协调相处等，提供了宝贵的建议。

最后，作者还将全书所述的内容，归纳成了简单易记的“经验法则”。

阅读本书，Darren先生近20年在电子电气工程领域中积累起来的丰富知识和经验会使读者受益匪浅，这不能不说是Darren先生送给大家的一份厚礼。

本书的翻译工作得到了许多同事和研究生的帮助，在此不一一具名。对于他们的协助，译者表示衷心感谢。

由于译者才疏学浅，译词失当、疏漏之处在所难免，敬请读者不吝指正。

前 言

写在前面的话

哇，《电子电气工程师必知必会》的成功实在令人惊奇！现在我的粉丝已经遍布世界各地，他们当中有些人对该书进行了评价，有些人则给我讲述了该书对他们的帮助。这么大的反响正是我一直期待的，因为这使得我有机会吸收大家的意见，对它进行增补、修订。

当然，今天你拿到手的绝不只是第2版，它还是一个更好的版本。主题更多、见解更透彻，其中也包含更多几乎只有我们这些电子电气工程师才能领会的“俚语”^①。

如果你想了解本书的内容，请看看本书初版的前言。

写作本书的意图在于，我想把一些我认为在学校教育中容易被遗漏或者随着时间的流逝容易淡忘的基础知识收集在一起。我热切地希望，当一位新手向你请教的时候，本书能够出现在你推荐给他的翻破了的书中。有些基础内容是电气工程行业的每一位学生、每一位工程师、每一位管理者以及每一位老师都应该掌握的！

我的口头禅是：“并没有那么难！”很多年以前，我大学里的一位辅导老师很自豪地告诉我，他们刷掉了一半以上刚开始修读电气工程专业课程的学生。我当时并没有说什么。不过我总在想，如果你让许多学生过不了关，那对于要教好这门课程的老师来讲，不也是一种失败吗？我之所以总说“并没有那么难”，是想强调这样一个事实：即便像我这样一个语文不好的人，也能够理解电气工程的世界。这就意味着你也一样能行！我所持的立场不同于我的那位老师，我坚信每个想搞懂这个专业的人必定能够搞懂它。我相信大多数读过本书的人都将有所收获。也许将来的某个时候应该出一个统计结果，给那位老师看看。她曾建议我放弃

^① 指一些暗示用语。大多数“俚语”在脚注中给出。

这个专业，但我挺过来了。也祝大家好运，请继续读下去以证明我的正确预见“并没有那么难！”

好啦，这就是本书的内容。如果你决定购买本书，我要对你说一声谢谢，并祝愿它会给你的事业带来成功！

给读者们的话

致工程师们

毫无疑问，我们周围有许多好老师，同时我相信你也打好了基础，但是你工作繁忙，时间紧迫，还经常要准备大量的业务汇报，根本没有时间去巩固你的各种基础知识，久而久之，知识之光渐渐褪色。如果你也像我一样，那你一定会去找一些真正的好书，在需要的时候经常翻阅。这些书往往行文流畅，将你要用到的一些知识解释得清晰易懂。我希望本书就是这样一本书。

你也有可能像离开水的鱼，本来是一名机械工程师，但却进入了电气工程的世界里，需要对电气工程获得一个基本的了解，以便同周围的电气工程师们一起工作。如果你透彻理解了本书中介绍的原理，那我可以保证你将至少能使部分的“点子王”（sparky，我喜欢这样称呼电气工程师们）对你处理问题的直觉感到惊讶不已。

致学生们

我并不想要抨击学院式的教学方法，但我觉得，似乎有太多的学生是以填鸭式的方式在学校里学完各门课程的。你当然知道我指的是什么！我所指的就是这样一种学习模式：听课，记住教师要你知道的所有东西，参加考试，在正确的地方填上正确的内容，最后完成了整个课程却没有带走半点实用的东西。我认为许多学生是由于老师们没有花时间好好备课，而被迫进入这种模式的。学生们压力很大，他们不能不及格。实际上，如果在课程结束的时候，你能够对一门课程建立起基本的、直觉的理解，那么你应用这些基本知识所能取得的成功，要比应用课程大纲提到的任何东西所能取得的成功都要大得多。

致经理们

工程经理们要做的事儿本来就应该比呆伯特^①卡通片中头发直竖的老板所描述

^① 呆伯特（Dilbert）是作者史考特·亚当斯根据自身经历以及读者来信为蓝本所做的一部讽刺职场现实的卡通作品。——编者注

的多得多。许多经理们并不了解工程师，其实工程师们是欢迎上司对他们所做的任何工作进行真正有见地的干预的。请注意我说的是“真正有见地的”，你不能把你刚刚在饭桌上听说来的一些新概念传递给工程师们，并要求他们予以注意。然而，如果你理解了本书中的这些基础内容，那么我相信你总有机会正确地对工程师们进行指点。并且，你也会很欣慰地看到项目进展得更加顺利，工程师们也会对你这个顶头上司尊敬有加，他们甚至会把那些摆在桌上、用来发泄怨气的头发直竖的呆伯特卡通玩偶扫地出门！

致老师们

请不要误解我，我并没有说所有的老师都不好。事实上，除了一两个之外，我所遇到的老师都是很好的灵魂工程师。然而，有时我认为是这个教育体系存在着缺陷。例如教务长要求X、Y和Z等内容都要讲，但由于课时不够，有时老师可能会牺牲更为基础的X和Y，而直接讲授Z。

我曾有机会在自己的母校教了一个学期的课，所讲授课程的有些章节就被直接跳了过去。我希望给老师们多一些权利，由他们来决定学生是否及格。

致所有的人

在本书每章的结尾，我都归纳了一些要点，称之为“经验法则”。顾名思义，这些“经验法则”表述的概念对于那些真正优秀的工程师来讲都应该是熟知的。正是这些概念在一直引领着他们获取正确的结论和解答。如果你觉得某个小节很枯燥而不想去读，无论如何也应该保证看看相应的经验法则。这些是经过提炼的核心概念，是你绝对应该掌握的。

目

录

第0章 电到底是什么	1	2.2.2 恒定电压源与恒定电流源	42
0.1 鸡与蛋	1	2.2.3 直流	43
0.2 电到底为何物	1	2.2.4 交流	43
0.3 原子	2	2.2.5 回到电容和电感	45
0.4 还有啥呢	4	2.2.6 低通滤波器	46
0.5 节目预告	9	2.2.7 高通滤波器	48
0.6 它仅仅是看似神奇而已	9	2.2.8 有源滤波器	49
第1章 必知必会的知识点	11	2.3 磁场与电场	51
1.1 单位的重要性	11	2.3.1 磁场	52
1.1.1 单位代数	11	2.3.2 电场	54
1.1.2 有时“几乎”就是“足够好”	12	2.4 保持在控制之中	56
1.2 使电气元件可视化	14	2.4.1 系统的概念	56
1.2.1 电气元件的机械等效	14	2.4.2 阶跃输入	58
1.2.2 电阻等效于阻尼	15	2.4.3 反馈	59
1.2.3 电感等效于质量	16	2.4.4 正反馈	59
1.2.4 电容等效于弹簧	16	2.4.5 负反馈	60
1.2.5 储能电路	17	2.4.6 开环增益和闭环增益	60
1.2.6 较复杂的电路	17	第3章 电气器件	62
1.3 直觉的方法——直觉信号分析	18	3.1 部分导电	62
1.4 “积木”工程——构件	21	3.1.1 半导体	62
第2章 基本理论	24	3.1.2 二极管	62
2.1 基本原理	24	3.1.3 晶体管	64
2.1.1 欧姆定律	24	3.1.4 FET	67
2.1.2 分压原理	28	3.1.5 一些不常见的半导体器件	68
2.1.3 电容阻碍电压的变化	29	3.2 功率和发热管理	69
2.1.4 电感阻碍电流的变化	32	3.2.1 结温	69
2.1.5 元件的串联和并联	34	3.2.2 外壳温度	69
2.1.6 戴维南定理	37	3.2.3 散热器	69
2.2 这些与频率有关	41	3.2.4 辐射	70
2.2.1 AC/DC与一个小秘密	41	3.2.5 对流	70
		3.2.6 传导	71

3.2.7 利用PCB散热	72	4.3 ADC离不开DAC	117
3.2.8 热扩散	72	4.4 让物体动起来——机电的世 界	121
3.3 神奇的运放	73	4.5 速度维持	127
3.3.1 正确使用运放	73	4.5.1 转矩控制	129
3.3.2 运放的原理	73	4.5.2 制动	129
3.4 负反馈	76	4.5.3 简单的秘密	130
3.5 正反馈	80	4.5.4 一个小细节	131
3.6 这就是逻辑	84	4.5.5 再生制动并不是太难	131
3.6.1 二进制数	84	4.5.6 改变转向	132
3.6.2 逻辑	86	4.5.7 结论	132
3.7 微处理器/微控制器基础	94	4.6 其他DC电机	132
3.7.1 微控制器原理	94	4.6.1 无刷DC电机	133
3.7.2 结构	96	4.6.2 步进电机	134
3.7.3 算法程序	98	4.6.3 交流及通用电机	135
3.7.4 乘法	100	4.6.4 螺线管	136
3.7.5 除法	101	4.6.5 继电器	136
3.7.6 关于I/O (输入或输出) 的注意 事项	102	4.6.6 “捕蝇器”	137
3.7.7 以简单模块为起点	103	4.7 供电	138
3.8 输入和输出	104	4.7.1 电压的需求	138
3.8.1 输入	104	4.7.2 线性电源	139
3.8.2 模拟传感器	107	4.7.3 开关电源	141
3.8.3 接地	107	4.7.4 几点最后的考虑	143
3.8.4 传感器阻抗	107	4.8 当元件不理想时	144
3.8.5 输入阻抗	107	4.8.1 无处不在的R、L、C	144
3.8.6 输出	108	4.8.2 误差源: 理想与实际	146
3.8.7 复用技术	111	4.8.3 电阻	147
3.8.8 白炽灯	112	4.8.4 电容	147
3.8.9 晶体管	112	4.8.5 电感	148
3.8.10 线圈	112	4.8.6 半导体	148
4.8.7 电压源	148	4.8.7 电压源	148
4.8.8 总结	149	4.8.8 总结	149
第4章 真实世界	113	4.9 可靠性设计	149
4.1 相互转换	113	4.9.1 外部世界与内部世界	150
4.1.1 模拟与数字	113	4.9.2 学会适应	152
4.1.2 先有模拟量	115	4.9.3 模块化设计	153
4.1.3 然后有数字量	115	4.9.4 预见变化	154
4.1.4 综合两个世界的优点	115	4.9.5 过犹不及	154
4.2 A到D的转换及反向过程	115	4.10 我所偏爱的一些电路	155
4.2.1 A表示模拟量	116	4.10.1 组合达林顿对管	155
4.2.2 D代表数字量	116		

4.10.2 DC电平移位器	156	6.1.9 根源	185
4.10.3 虚拟地	156	6.1.10 问题分类	185
4.10.4 电压跟随器	156	6.1.11 消除故障	186
4.10.5 AC放大器	157	6.2 机器中的幽灵——EMI	187
4.10.6 反相振荡器	157	6.2.1 EMI的本质	187
4.10.7 恒流源	158	6.2.2 魔鬼的招数	187
4.11 积累你自己的电路集	158	6.2.3 传导的EMI	187
第5章 工具	163	6.2.4 辐射的EMI	188
5.1 让不可见的可见	163	6.2.5 处理EMI	189
5.1.1 万用表	163	6.2.6 用破坏来证明你能够修复	189
5.1.2 示波器	165	6.3 时机就是一切	189
5.1.3 逻辑分析仪	167	6.4 压力之下	190
5.2 仿真器	169	6.5 要为意外做好心理准备	190
5.2.1 理论与实际	169	6.5.1 不是每个元器件都产自同一 个模子	190
5.2.2 功能强大的工具	170	6.5.2 控制环境	191
5.2.3 培养直觉	170	6.5.3 穷人的EMI试验	192
5.3 电烙铁	171	6.5.4 记录解决方案, 积累经验	193
5.3.1 4个基本条件	171	6.5.5 空中的EMI	193
5.3.2 焊丝	172	6.5.6 导线中的EMI	193
5.3.3 SMT	173	6.5.7 小电流信号更易受干扰	194
5.3.4 拆焊	174	6.5.8 找出天线并予以破坏	194
5.4 “人际”工具	175	6.5.9 结论	195
5.4.1 生产厂家	176	6.6 消除漏洞的对策	196
5.4.2 销售代表	176	6.6.1 无漏洞的软件也许不存在	196
5.4.3 分销商	177	6.6.2 大量而全面的测试	197
5.4.4 现场应用工程师	177	6.6.3 重现问题	197
5.4.5 设计采用	178	6.6.4 设置追踪器	198
5.4.6 直购	178	6.6.5 再次破坏	198
5.4.7 总结	179	6.6.6 捉虫	199
第6章 故障排除	180	第7章 人际沟通	200
6.1 排查故障前的准备	180	7.1 人际关系技巧	200
6.1.1 科学鸟枪方法	180	7.1.1 上级	200
6.1.2 排除故障不难学习	181	7.1.2 同级	203
6.1.3 始于易	182	7.1.3 下级	204
6.1.4 跳出专业看问题	182	7.1.4 行政助理	206
6.1.5 注意细节	183	7.2 做一个外向的内向者	206
6.1.6 对比排查	183	7.2.1 一切都取决于你的观点	206
6.1.7 再谈估算	184	7.2.2 想象	208
6.1.8 故障重现	184		

7.2.3 自我暗示	209
7.2.4 打破自己的“壳”	210
7.2.5 反复练习	211
7.3 交流技巧	211
7.3.1 口语	212
7.3.2 写作	213
7.3.3 切中要害	214
7.4 给经理的寄语	215
7.4.1 做服务者	216
7.4.2 做缓冲者	216
7.4.3 做激励者	216
7.4.4 要理解工程师们	216

7.4.5 最好的经理在多数时候 都是对的	217
7.4.6 在平凡之辈中找出“射击” 能手	218
7.5 给雇员的寄语	221
7.5.1 如何得到一份工作	221
7.5.2 最后一点考虑	223
7.5.3 如何保有一份工作	223
7.5.4 最后一点慎重考虑	224
7.6 如何制造一个伟大的产品	225
词汇表	229

第0章

电到底是什么

0.1 鸡与蛋

到底是先有鸡还是先有蛋？当我静下心来写作本书第一版的时候，就遇到了类似的困惑。我发现人们为了更深入地理解主题，往往先获得一些相关的基本观点和概念，而这些基本的观点和概念又是建立在拥有一定知识的假定之上的。另一方面我又意识到，如果人们先了解了这些基本概念，那么所需的知识将更易于理解——这就是我所遇到的鸡和蛋的困惑局面。

可以说，第一版解释了“鸡”（这里的“鸡”就是跟电的利用有关的一切），它实质上假定读者已经知道了“蛋”是什么（“蛋”就是要了解电是什么）。说实话，这有点自欺欺人^①。此外我也从未指望第一版会取得巨大的成功。实际情况是，有很多人想更多地了解我们周围这个日益繁荣的电子世界。因此，对于这个新的改进版本，我将先离题一下，尽我所能来解释到底什么是“蛋”。如果你对这方面的内容^②已有所了解，那么可以跳过这一部分，不过你也可以选择在这里逗留一会儿，看看我对电为何物的解释到底有没有高明之处。

0.2 电到底为何物

电子是什么呢？尽管从来没有人见过电子，但人们发明了很多方法来检测成群的电子。各种电表、示波器以及探测器都可以告诉我们电子是如何移动的、它们在干什么。人们也发明了很多方法依靠电子来使电机运转、使灯泡发光，为移动电话和计算机及其他成千上万的酷极了的东西供电。

那么电到底为何物呢？这个问题问得很好。如果你对这个问题探究得足够深，就会发现世界各地有许多RSP^③在讨论这个话题。我没有欲望加入他们的讨论行列

① 在难以赶上截止日期时我们都会做出妥协吗？难以赶上截止期限的原因仅仅是因为我们自己的拖延吗？这两个问题责任重大，跟先有鸡还是先有蛋的辩论同等重要。

② 也就是整个第0章的内容。你可以辩论到底该从0开始还是该从1开始计算章数，但你都得从这两章中选出你想开始的一章，并用心消化它。

③ RSP=真正机灵的人 (Really Smart Person)。你很快就会知道，我实在是太想在所有工程师们的日常俚语中添加一两个自己的缩略语了。顺便说一句，我相信许多工程师都是RSP，对于工程师这个职业来讲，这似乎是一个共同特征。

(也许是因为还没有达到RSP的层次吧)。所以，下面我将把自己对电的理解、思考并在脑海中形成的一个合乎情理的关于电的概念告诉给大家。如果我的解释能够使你对电这个东西的理解变得容易一点，我就心满意足了。

0.3 原子

我们必须先了解称作原子 (atom) 的极小粒子。图0-1是原子的简单示意图。

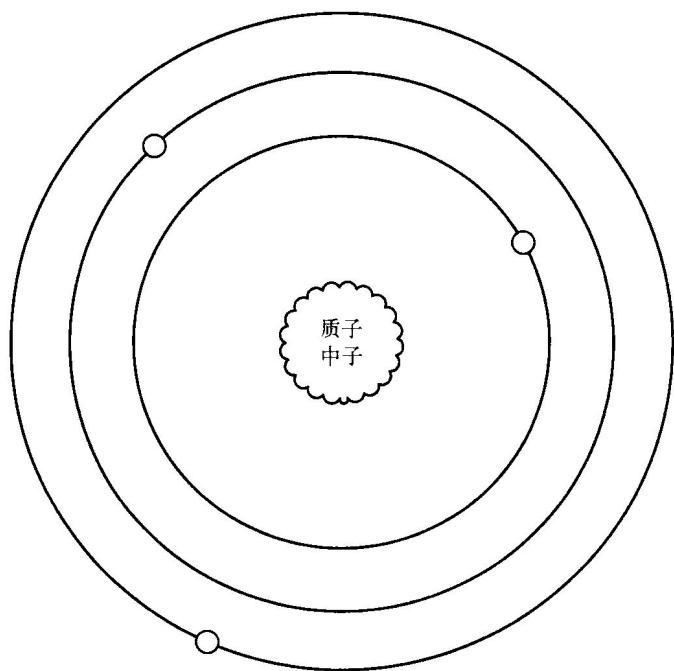


图0-1 原子结构示意图

原子^①由三种粒子构成：质子、中子和电子。其中只有两种粒子带有我们所称的电荷 (charge) 特性。质子带正电荷 (positive charge)，电子带负电荷 (negative charge)，中子则不带任何电荷。质子和中子的质量要比微小的电子大得多。尽管大小不同，但质子和电子带有等量的异种电荷。

好啦，千万不要因为看了这个简图，就认为电子运动的轨迹是简单的圆圈。它们实际上在一个充满能量的3D区域中运动，物理学家称这个区域为壳层 (shell)。壳层有很多种类型和形状，但本书不打算对其做深入的介绍。不过有一点你必须

^① 原子真是太小太小了。如今通过利用一些特别酷的仪器，我们几乎可以“看”到一个原子，但这种方式有点类似盲人通过感觉“看”到布莱叶盲文一样。

了解，那就是当你往原子中加入足够强的能量时，就可以迫使一个电子从原子中弹出来，变成自由运动的状态。当出现这种情况时，原子的剩余部分就会具有正净电荷^①，弹出来的电子则具有负净电荷^②。实际上，当它们作为原子的一部分时，就是拥有这些电荷的，只是因为放在一起而互相抵消了，所以当我们把原子作为一个整体来看时，其净电荷为零。

好啦，因为原子不喜欢自己的壳层失去电子，所以一旦有别的电子靠近它，这个电子就会滑落到这个原子壳层的空轨中。为了弹出这些电子而需要的能量或功的大小取决于原子的类型。当原子为很好的绝缘体时，例如为橡皮（中的原子）时，这些电子是紧紧地“粘”在原子的壳层中的，无法自由运动，如图0-2所示。

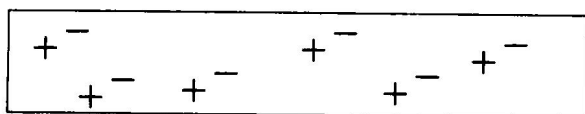


图0-2 电子被“粘”在一个绝缘体的原子壳层中，它们无法离开，也不能自由运动

在绝缘体中，这些电子是“粘”在其位置上的，绕着原子的原子核做轨道运动，就像水冻结在管子中一样^③。请注意，在这种情况下，正电荷的数目跟负电荷的数目是完全一样的。

在铜这样的良导体中，原子外层的电子只需轻轻地一碰就会弹出。在金属元素中，这些电子能够很容易地在原子之间弹来弹去，我们称之为电子海（electron sea），也有人称之为自由电子（free electron），这个名称你也许听说过。图0-3是这种情况的一个图示。

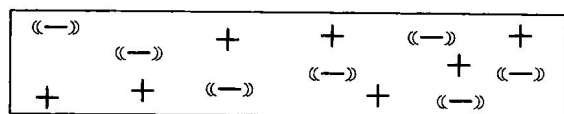


图0-3 电子海

要注意，在这种情况下，正电荷的数目跟负电荷的数目也是相同的。其实差

① 带有净电荷的原子也称作离子（ion）。

② 常被称作自由电子（free electron）。

③ 我喜欢冻结水的比方。但这个比方不要用过了头，不要以为你必须熔化它们才能使它们移动。

别不在于电荷的数目，而在于它们是否可以轻松移动。现在电子就像是管子中的水，它们不是冻结的而是液体，或者说，就像一个已经充满了水的管子。要使电子移动只需轻轻一压，它们就会跑起来^①。这些松散电子表现出的一个效应就是金属所具有的亮闪闪的外表。因此我们也就能明白为什么我们称作银的元素是一种最好的导体了。

再补充一点：电荷的一个最基本的性质是同种电荷相斥，异种电荷相吸^②。你若将一个自由电子放到另一个自由电子的旁边，它会将另一个电子推离。要想使一个带有正电荷的原子移动则困难得多，在几乎所有的固体材料中，原子都是“粘”在它的位置上的，但正电荷也会因同性相斥而移动^③。

经验法则

- ⊕ 电在本质上就是电荷，有正电荷与负电荷两种。
- ⊕ 能量就是功。
- ⊕ 无论是在导体中还是在绝缘体中，正电荷的数目与负电荷的数目都相等。
- ⊕ 在良导体中，电子容易移动，就像水一样。
- ⊕ 在好的绝缘体中，电子是“粘”在它的位置上的，就像冻结的水一样。（但有一点不同：它们不会“融化”。）
- ⊕ 同种电荷相斥，异种电荷相吸。

0.4 还有啥呢

好啦，现在我们已经对绝缘体和导体有了一点认识，并知道了它们跟电子和原子的关系。那这些信息有什么用呢？我们为什么要关心这个呢？让我们把注意力集中在这些电荷上，让电荷移动移动，看看会发生什么吧。

首先，我们让电荷移动到一个地方，并呆在那里不动。为此，我们需要用到前面已经介绍过的、电荷之间的一个很酷的效应。请记住：异种电荷相吸，同种

① 打比方是理解一些东西的好方法，但你必须小心不要用过之而不及。在这个例子中，你不可能简单地将导线的一侧提起而看到电子掉出来，所以电子并不是精确地像水管中的水。

② 使我深受打击的是，在某种程度上，这是人际关系中的基本原则。“好”女孩常被“坏”男孩吸引，还有许多其他可类比的东西在我的脑海里闪现。

③ 毫无疑问也存在移动正电荷的情况（事实上，触电的时候就会发生这种情况）。只是我们在电子学中处理的大多数材料、电路等牵涉到的是移动这个特别特别小、超级小、通常容易移动的电子。至于其余的很酷的材料，我建议你去找一本好一点的电磁学的书来看看。