

教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会推荐教材

Fundamental Electric and Electronic Circuits  
Part I : Electric Circuits

# 电路与电子线路基础

## 电 路 部 分

■ 王志功 沈永朝 编

 高等教育出版社  
HIGHER EDUCATION PRESS

教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会推荐教材

# 电路与电子线路基础

DIANLU YU DIANZI XIANLU JICHU

## 电路部分

■ 王志功 沈永朝 编



Fundamental Electric and Electronic Circuits  
Part I: Electric Circuits

## 内容提要

《电路与电子线路基础 电路部分》在讲述电路与电子学的发展历史和电路工程的基本任务与方法之后,按照:(1)从电源、电阻、电容、电感、互感、变压器到互连及传输线;(2)从集总参数到分布参数;(3)从单端口、二端口到多端口网络;(4)从直流静态、交流稳态到瞬态;(5)从线性到简单的非线性;(6)从理论分析到初步设计的顺序相互穿插,讲述由基本元器件,特别是无源线性器件构成的基本电路的规律、模型与分析方法。

本书适合于高等学校电子电气信息类专业本科生电路课程的教学,并强烈建议与《电路与电子线路基础 电子线路部分》联合使用。

## 图书在版编目(CIP)数据

电路与电子线路基础. 电路部分 / 王志功, 沈永朝编. —北京: 高等教育出版社, 2012. 1

ISBN 978 - 7 - 04 - 032503 - 4

I. ①电… II. ①王… ②沈… III. ①电路理论-高等学校-教材②电子线路-高等学校-教材 IV. ①TM13②TN7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 228951 号

策划编辑 吴陈滨  
插图绘制 尹 莉

责任编辑 曲文利  
责任校对 杨凤玲

封面设计 赵 阳  
责任印制 田 甜

版式设计 马敬茹

出版发行 高等教育出版社  
社 址 北京市西城区德外大街 4 号  
邮政编码 100120  
印 刷 北京铭传印刷有限公司  
开 本 787mm × 960mm 1/16  
印 张 28  
字 数 520 千字  
购书热线 010 - 58581118

咨询电话 400 - 810 - 0598  
网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>  
网上订购 <http://www.landaco.com>  
<http://www.landaco.com.cn>  
版 次 2012 年 1 月第 1 版  
印 次 2012 年 1 月第 1 次印刷  
定 价 40.50 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换  
版权所有 侵权必究  
物 料 号 32503 - 00

## 序

自1999年以来,我国高等教育的规模发生了历史性变化,开始进入大众化的发展阶段。高等院校从生源基础知识水平、课程设置、教学目的到培养目标都趋于多元化,原有教材类型较少的现状已经难以满足不同类型高等院校培养不同类型人才的需求。而在本科教育中,基础课程建设是保证和提高教学质量的关键。为此,教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会与高等教育出版社合作,以教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会最新制定的《电子电气基础课程教学基本要求》、电子信息科学类与电气信息类各教学指导分委员会最新制定的专业规范以及《全国工程教育专业认证标准(试行)》为依据,共同组织制订了“电子信息科学类与电气信息类专业平台课程教材规划”。

这套规划教材的制订和编写遵循了以下几点原则:

1. 尊重历史,将高等教育出版社经过半个多世纪的积淀所形成的名家名作、精品教材纳入规划。这些教材经过数十年的教学实践检验,具有很好的教学适用性。此次规划将依据新的《电子电气基础课程教学基本要求》以及电气信息学科领域的最新发展,对教材内容进行修订。

2. 突出分类指导,突出不同类型院校工程教育的特点。大众化教育阶段,不同类型院校的人才培养目标定位不同,应当根据不同类型院校学生的特点组织编写与之相适应的教材。鼓励有编写基础的一般院校和应用型本科院校经过2~3年的探索实践,形成适用于本层次教学的教材。

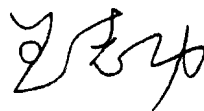
3. 理论知识与实际应用相结合。提倡在教材编写中把理论知识与在实际生产和生活中的应用紧密结合,着重培养学生的工程实践能力和创新能力,以适应社会对工程教育人才的要求。

4. 数字化的多媒体资源与纸质教材内容相结合。在教育部“加快教育信息化进程”的倡导下,提倡利用多样化、立体化的信息技术手段(如动画、视频等),将课程教学内容展现给学习者,以加深他们对知识的理解,达到更好的教学效果。

教材建设是一项长期、艰巨的工程。我们将本着成熟一批出版一批的指导思想,把这项工作扎实持续地推进下去,为电子信息科学类与电气信息类专业基

础课程建设一批基础扎实、教学适用性强、体现时代气息的规划教材,为提高高等教育教学质量,深化高等教育教学改革做出应有的贡献。

教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会主任委员



2010年12月

# 前 言

2007 年秋,东南大学实施了一项教育创新计划,每学年选拔 15 名左右优秀高中毕业生组建“高等理工实验班”,尝试以全新模式培养创新性人才。此举对学制、课程设置和教材等诸多教学环节都提出了非常高的要求。

虽然称为“高等理工实验班”,但由于东南大学的理工教育以电子信息学科最具优势,故对这批学生在电子信息基础课程方面的特色教学成为亟待解决的问题。这时,主管教学的副校长郑家茂教授、吴键雄学院院长李久贤教授等邀请我承担“高等理工实验班”电子信息基础课程的改革工作,并担任“电路”与“电子线路”两门课程的主讲,借此实现两门课程的贯通。由此,我被推上了新课程建设的前台。

在我大学毕业后的 30 多年的教学科研生涯中,早期曾担任过数年本科生“电子线路”的教学工作,后赴德国深造并从事高速集成电路的科学研究,回国后的前 10 年中,则主要承担集成电路设计方面的教学和科研任务。如何使传统课程的教学适应当代电子工业的实际需要,实现“电路”与“电子线路”的贯通教学,成为我长时间反复思考的问题。下列 6 个方面为我开展新课程的建设提供了前提和基础:

(1) 我的硕士导师沈永朝教授在 20 世纪 90 年代初期进行过“电路”与“电子线路”贯通教学的大胆尝试,曾编写过一套共 6 章的讲义。我在这套讲义基础上开始工作,使导师的事业得到传承,导师的思想得以发展。

(2) 自 2003 年始,我作为教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会主任委员,组织了电子电气基础课程 5 个方向 12 门课程“教学基本要求”的制订工作。其间,同国内数十名“电路”与“电子线路”教学名师在一起,向他们学习了许多宝贵的知识和经验。两门课程的“教学基本要求”成为我组织新课程和编写新讲义的指南。

(3) 从 2004 年开始,我参加了一年一度的“国家精品课程”的评选工作。在此过程中,我从参评“国家精品课程”的相关材料中也学到不少知识。数门“电路”与“电子线路”方面的“国家精品课程”为准备这套《电路与电子线路基础》提供了很好的借鉴。

(4) 回国后,我在 10 年当中,主编了 6 本、参编了 2 本、翻译了 5 本集成电路设计方面的教科书,积累了不少资料 and 知识。我们知道,集成电路技术涵盖半导体理论、材料和工艺、电路特别是电子线路理论和技术。相关的知识为这套

《电路与电子线路基础》的编写奠定了基础。

(5) Internet 上不少的文献、资料和图片可供参考和选用。

本书的编写应该说是众多传统知识与新技术的一种再结晶的过程,希望这种结晶能够像硅半导体那样,最终产生出千变万化、集成的“电子线路”。

本书本着基础理论与工程技术相结合、电路与电子线路贯通、循序渐进和删繁就简的原则来组织教学内容。

《电路与电子线路基础 电路部分》总的编写思路按照下列 6 条线索相互穿插:

- (1) 从电源、电阻、电容、电感、互感、变压器到互连及传输线;
- (2) 从集总参数到分布参数;
- (3) 从单端口、二端口到多端口网络;
- (4) 从直流静态、交流稳态到瞬态;
- (5) 从线性到简单的非线性;
- (6) 从理论分析到初步设计。

此外,为实现汉英双语专业词汇对照教学,提高读者英文专业书籍和期刊的阅读和写作能力,基本中文专业术语在本教材第一次出现时都给出了对应的英文术语,且在书后按汉语拼音顺序给出了汇总,以便学生日后查阅。部分习题也直接用英文给出,作为对专业知识和语言能力的双重练习。

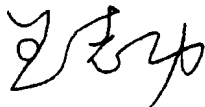
通过本课程两个学期约 128 学时的学习,希望学生能够掌握目前开设的“电路”和“电子线路”(模拟部分和数字的基本门级电路部分)的基本知识,为学习诸如数字逻辑电路与系统、通信电路与系统、控制系统等奠定基础。

赵鑫泰博士对文稿进行了仔细校对和格式整理,并编写了习题,在此表示感谢。

天津大学电气与自动化工程学院孙雨耕教授在百忙之中仔细审阅了本书全部手稿,提出了一系列指导性的修改建议,在此表示衷心感谢。高等教育出版社为本书的出版做了大量工作,特此表示感谢。

虽然本书的形成自 2008 年起经历了 3 轮教学实践,对内容和文字做过多次修改,但由于这是电路和电子线路贯通教学的第一版教材,无论是课程设计、教材内容还是文字修辞都有待进一步完善。希望读者多提宝贵意见。

意见和建议请发至作者邮箱:zgwang@seu.edu.cn。



2011 年 7 月于南京

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	( 1 )
1.1 电路的故事 .....	( 1 )
1.1.1 电是神秘的 .....	( 1 )
1.1.2 金属是特殊的 .....	( 2 )
1.1.3 伽尔伐尼的意外发现 .....	( 3 )
1.1.4 伏打电池建立了第一个电路,将静电学推进到了动电学 .....	( 4 )
1.1.5 磁——又一个神秘的世界 .....	( 5 )
1.1.6 奥斯特实验 .....	( 6 )
1.1.7 法拉第电磁感应定律 .....	( 7 )
1.1.8 欧姆定律的出现是历史的必然 .....	( 8 )
1.1.9 用电流或电压表达信号——电报的兴起 .....	( 9 )
1.1.10 电话问世与连续信号响应 .....	( 11 )
1.1.11 电灯是电气工程应用中的一个重要里程碑 .....	( 12 )
1.1.12 场的概念与麦克斯韦方程 .....	( 14 )
1.1.13 赫兹实验与无线电的发明 .....	( 15 )
1.1.14 调谐电路与矿石检波器 .....	( 16 )
1.2 电子学的故事 .....	( 17 )
1.2.1 布劳恩开辟了一个新领域,电子器件登场 .....	( 17 )
1.2.2 电子管开创了电子学时代 .....	( 17 )
1.2.3 半导体器件登场迅速成为电子学的主角 .....	( 20 )
1.2.4 器件电路合一引起的革命 .....	( 21 )
1.3 电路学面临的问题和任务 .....	( 23 )
1.4 电路与电子线路的关系 .....	( 24 )
1.5 本教材的特点与结构 .....	( 25 )
<b>第 2 章 电路工程的基本任务与方法</b> .....	( 27 )
2.1 电路的描述和表达 .....	( 27 )
2.1.1 电路示意图 .....	( 27 )
2.1.2 电路元件与电路符号 .....	( 28 )
2.1.3 电原理图 .....	( 29 )
2.1.4 电路拓扑图 .....	( 29 )



---

2.1.5	电流与电压的参考方向	( 32 )
2.1.6	电路三视图	( 33 )
2.2	电路模型	( 36 )
2.2.1	元件、器件与电路	( 36 )
2.2.2	器件的物理模型	( 36 )
2.2.3	电路的抽象	( 40 )
2.2.4	抽象的其他作用	( 41 )
2.3	电路的语句描述	( 42 )
2.3.1	电路的 SPICE 语句描述	( 43 )
2.3.2	电路的硬件语言描述	( 45 )
<b>第 3 章</b>	<b>电源与电信号源</b>	( 47 )
3.1	直流电源	( 47 )
3.1.1	电池——化学直流电源	( 47 )
3.1.2	太阳能电池	( 63 )
3.1.3	电池的伏安特性与电路模型	( 63 )
3.2	正弦波交流电源	( 67 )
3.2.1	电力电源——重要的正弦波交流电源	( 67 )
3.2.2	正弦波交流电源与电路工程	( 68 )
3.2.3	正弦波形的模型与表达	( 68 )
3.2.4	正弦波形的重要性质	( 71 )
3.3	三相交流电源与三相电路	( 73 )
3.3.1	三相交流电的产生	( 74 )
3.3.2	三相电源的接法	( 76 )
3.3.3	三相负载的接法	( 77 )
3.3.4	三相电路连接	( 77 )
3.3.5	三相电路的功率	( 78 )
3.4	信号源	( 80 )
3.4.1	能量、信息与信号	( 80 )
3.4.2	有用信号与干扰信号	( 80 )
3.4.3	产生语音信息的信号源——话筒	( 81 )
3.4.4	监测温度变化的信号源——热电偶	( 81 )
3.4.5	探测磁场变化的信号源——磁头	( 82 )
3.5	理想电源	( 82 )
3.5.1	理想电压源	( 82 )
3.5.2	理想电流源	( 85 )

---

3.5.3	理想电源的连接	( 88 )
3.6	独立电源的 SPICE 语句描述	( 96 )
3.6.1	PULSE(脉冲)	( 96 )
3.6.2	SIN(正弦波)	( 97 )
3.6.3	EXP(指数波)	( 98 )
3.6.4	PWL(分段线性)	( 98 )
3.6.5	SFFM(单频调频波)	( 99 )
3.7	突变与奇异函数	( 99 )
3.7.1	单位阶跃函数	( 99 )
3.7.2	单位冲激函数	( 100 )
3.7.3	奇异函数的 SPICE 描述	( 102 )
<b>第 4 章</b>	<b>电阻与电阻电路分析</b>	<b>( 104 )</b>
4.1	电阻元件	( 104 )
4.1.1	电阻的物理特性	( 104 )
4.1.2	通用电阻元件	( 106 )
4.1.3	电阻的规范	( 109 )
4.1.4	电阻和 SPICE 描述语句	( 113 )
4.1.5	电阻的高频模型	( 114 )
4.2	电阻在电路中的表现	( 114 )
4.3	电阻电路分析	( 120 )
4.3.1	电阻电路的等效变换	( 120 )
4.3.2	电阻的串联	( 121 )
4.3.3	电阻的并联	( 122 )
4.3.4	电阻的 Y 形联结和 $\Delta$ 形联结的等效变换	( 123 )
4.3.5	实际电压源和实际电流源的等效变换	( 125 )
4.3.6	单端口电阻电路的输入电阻	( 126 )
<b>第 5 章</b>	<b>电路方程与电路定理</b>	<b>( 130 )</b>
5.1	电路方程	( 130 )
5.1.1	KCL 和 KVL 独立方程数	( 130 )
5.1.2	回路电流方程	( 132 )
5.1.3	结点电压方程	( 133 )
5.2	叠加定理	( 135 )
5.3	替代定理	( 136 )
5.4	戴维宁定理和诺顿定理	( 137 )
5.4.1	戴维宁定理	( 137 )

5.4.2	戴维宁定理的应用	(138)
5.4.3	诺顿定理	(139)
5.5	最大功率传输定理	(140)
5.6	特勒根定理	(141)
<b>第6章</b>	<b>电容与电容模型</b>	<b>(147)</b>
6.1	电容原理	(147)
6.1.1	静电现象与电容	(147)
6.1.2	理想电容器的基本行为	(152)
6.2	商用电容元件	(155)
6.2.1	商用电容元件的功用和分类	(155)
6.2.2	商用电容元件的特性、规范	(155)
6.2.3	高频低介质损耗电容	(160)
6.2.4	电源滤波用大容量电容	(160)
6.2.5	贴片电容	(161)
6.2.6	商用电容器特征汇总	(162)
6.3	集成电路电容	(162)
6.4	电容的 SPICE 语句描述	(164)
<b>第7章</b>	<b>电阻电容电路</b>	<b>(166)</b>
7.1	电源向电容充电	(166)
7.1.1	理想电压源向电容充电	(166)
7.1.2	理想电流源向电容充电	(167)
7.1.3	正弦波电压对电容充放电	(168)
7.2	电阻电容电路的基本形式与电路瞬态响应	(171)
7.2.1	一阶线性微分方程式求解	(172)
7.2.2	电阻电容电路瞬态响应	(175)
7.3	电阻电容电路对正弦波的响应	(180)
7.4	复数及其运算	(181)
7.4.1	复数的引入	(181)
7.4.2	复数的运算	(183)
7.4.3	复数在电路特性计算中的应用	(183)
7.4.4	相量法求解电阻电容电路	(186)
7.5	简单电阻电容电路	(188)
7.5.1	电阻电容分压器	(188)
7.5.2	电阻电容分流器	(192)
7.5.3	微分电路	(196)

---

7.5.4	积分电路	(199)
<b>第8章</b>	<b>电感</b>	<b>(205)</b>
8.1	电感的物理概念	(205)
8.1.1	载流直导线	(207)
8.1.2	无限长螺线管	(207)
8.1.3	环形线圈	(208)
8.2	理想电感元件的基本特性	(212)
8.2.1	理想电感元件的安韦特性和“伏安”特性	(212)
8.2.2	理想电感元件的功率	(214)
8.2.3	理想电感元件的串联与并联	(214)
8.2.4	电感与电容的对偶关系	(215)
8.3	磁性材料	(215)
8.4	磁路与磁路定律	(221)
8.5	实际电感元件	(222)
8.5.1	电感元件的分类	(222)
8.5.2	电感元件	(223)
8.5.3	贴片电感	(223)
8.5.4	集成电感	(225)
8.5.5	分布参数电感	(225)
8.6	电感计算	(226)
8.6.1	环形线圈的电感量	(226)
8.6.2	电感量的一般计算方法	(227)
8.6.3	电感量的工程计算方法	(228)
8.7	电感元件的模型和参数	(232)
8.7.1	电感元件的零级模型	(232)
8.7.2	电感元件的 SPICE 语句格式	(232)
8.7.3	电感元件的一级模型	(232)
8.7.4	低频扼流圈的模型	(233)
8.7.5	高频线圈的模型	(234)
<b>第9章</b>	<b>电阻电感电路</b>	<b>(238)</b>
9.1	电感的电源驱动	(238)
9.1.1	理想电压源驱动电感	(238)
9.1.2	实际电源驱动电感	(239)
9.1.3	交流电源驱动电感	(240)
9.1.4	利用复数计算电感的阻抗	(242)

---

9.2	电阻电感电路 .....	(244)
9.2.1	电阻电感电路的两种基本形式 .....	(244)
9.2.2	电阻电感电路的串并联变换 .....	(247)
<b>第 10 章</b>	<b>电阻电感电容电路 .....</b>	<b>(253)</b>
10.1	电阻电感电容电路的基本形式 .....	(253)
10.2	电阻电感电容电路的零输入响应 .....	(254)
10.3	电阻电感电容电路的零状态响应 .....	(262)
10.3.1	电阻电感电容电路的阶跃响应 .....	(264)
10.3.2	电阻电感电容电路的冲激响应 .....	(267)
10.3.3	无损耗电感电容电路对正弦信号的响应 .....	(270)
10.3.4	电阻电感电容电路对正弦信号的响应 .....	(274)
10.3.5	电容、电感器件的自谐振频率 .....	(279)
<b>第 11 章</b>	<b>互感与变压器 .....</b>	<b>(290)</b>
11.1	互感现象 .....	(290)
11.2	互感的动态行为和模型 .....	(295)
11.3	互感的 SPICE 语句描述 .....	(300)
11.4	有互感的电感元件的串联与并联 .....	(301)
11.5	变压器 .....	(305)
11.5.1	变压器原理 .....	(305)
11.5.2	变压器模型 .....	(308)
11.5.3	含漏感的变压器模型 .....	(309)
<b>第 12 章</b>	<b>互连线与传输线 .....</b>	<b>(316)</b>
12.1	互连线 .....	(316)
12.1.1	互连线的意义 .....	(316)
12.1.2	互连线模型 .....	(319)
12.2	分布元件与传输线 .....	(321)
12.3	均匀传输线及其方程 .....	(324)
12.4	均匀传输线方程的正弦稳态解 .....	(326)
12.5	均匀传输线的原参数和副参数 .....	(329)
12.5.1	传播常数 .....	(329)
12.5.2	特性阻抗 .....	(331)
12.6	无损耗传输线 .....	(332)
12.6.1	正弦稳态分析 .....	(332)
12.6.2	瞬态分析 .....	(336)

---

12.7	无损耗线的波过程	(338)
12.8	实际传输线	(343)
12.8.1	立体传输线	(343)
12.8.2	微带线	(343)
12.8.3	共面波导	(345)
<b>第 13 章</b>	<b>二端口与多端口网络</b>	<b>(349)</b>
13.1	二端口网络	(349)
13.2	二端口网络的方程和参数	(350)
13.2.1	二端口网络的 $Z$ 参数	(351)
13.2.2	二端口网络的 $Y$ 参数	(352)
13.2.3	二端口网络的 $T$ 参数	(355)
13.2.4	二端口网络的 $H$ 参数	(357)
13.2.5	二端口网络的不同参数之间的相互转换	(357)
13.3	射频二端口网络的 $S$ 参数	(358)
13.3.1	$S$ 参数的起源	(358)
13.3.2	$S$ 参数的定义	(359)
13.3.3	$S$ 参数与 $Z$ 参数和 $Y$ 参数的转换	(361)
13.4	二端口网络的等效电路	(362)
13.5	二端口网络的转移函数、傅里叶变换和拉普拉斯变换	(363)
* 13.6	二端口网络的互易定理	(368)
13.7	二端口网络的连接	(370)
13.8	回转器和负阻抗变换器	(372)
13.8.1	回转器	(372)
13.8.2	负阻抗变换器	(374)
13.9	多端口网络的 $Y$ 、 $Z$ 和 $S$ 参数	(375)
<b>第 14 章</b>	<b>电路功能的实现与滤波器设计</b>	<b>(379)</b>
14.1	电路的分析与设计	(379)
14.2	电路设计方法学	(380)
14.3	电路的单元化	(384)
14.3.1	电路单元化的必要性	(384)
14.3.2	对单元电路的基本要求	(385)
14.4	单元电路的连接	(386)
14.4.1	分压器的对接	(386)
14.4.2	分压器的串接	(391)
14.4.3	T 形与 $\Pi$ 形网络的连接	(393)

---

14.5	简单滤波器设计 .....	(401)
14.5.1	一阶电阻电容滤波器 .....	(401)
14.5.2	二阶电感电容滤波器 .....	(402)
14.5.3	三阶电感电容滤波器 .....	(404)
14.6	高阶滤波器设计 .....	(405)
14.6.1	高阶滤波器设计基本思想 .....	(405)
14.6.2	巴特沃思滤波器 .....	(407)
14.6.3	切比雪夫滤波器 .....	(409)
14.6.4	贝塞尔滤波器 .....	(410)
14.6.5	椭圆函数滤波器 .....	(410)
14.6.6	滤波器举例 .....	(412)
附录一	二阶线性微分方程式之解 .....	(416)
附录二	专业术语中英文对照 .....	(423)
参考文献	.....	(433)

# 第1章 绪 论

## Chapter 1 Introduction

电路与电子线路的发展是人类文明史上一条波澜壮阔的长河,与之相关的伟人辈出,大事连连。了解这一历史,对于培养学习兴趣、掌握相关知识和开拓创新思维,都具有重大意义。因此,我们首先从人类对电的认识开始,介绍电路和电子线路产生和发展的历史。

### 1.1 电路的故事

#### 1.1.1 电是神秘的

长期以来,人们对雷电(thunderbolt)抱有神秘感。闪电、雷声和狂风暴雨结合在一起使人恐惧,人们认为那是神灵的咒语,是对罪恶的惩罚。

很多科学家对雷电现象进行了研究,认为这是含有微粒的空气在上升、下降过程中相互摩擦而产生的自然现象。摩擦生电(friction-generated electricity)现象在中世纪就已经被发现,穿、脱衣时噼啪有声并伴随火花(spark),这些现象都是有记载的。然而,要积累数量如此巨大的电荷(charge)形成雷电,却始终令人难以置信。为研究雷电的本质,富兰克林(B. Franklin, 1706—1790, 图 1.1(a))做了著名的风筝实验,他利用天空中的风筝和引线,在云层和大地之间形成放电通道,并观察到放电现象,实现了人工雷电。图 1.1(b)是富兰克林进行风筝实验的油画。

从此,人们知道,雷电是一种可以用科学进行解释的自然现象,并不神秘。当云层中的电荷积累到一定程度,云层间或云层与地面间的电场强度(electrical field intensity)会超过大气的抗电强度,于是发生击穿(breakthrough),大量的电荷沿着特定的路径(path)流动,形成巨大的电流(current),激发出强烈的光,这就是我们观察到的闪电(lightning)。肉眼能清楚地看到放电路径,电荷是沿着



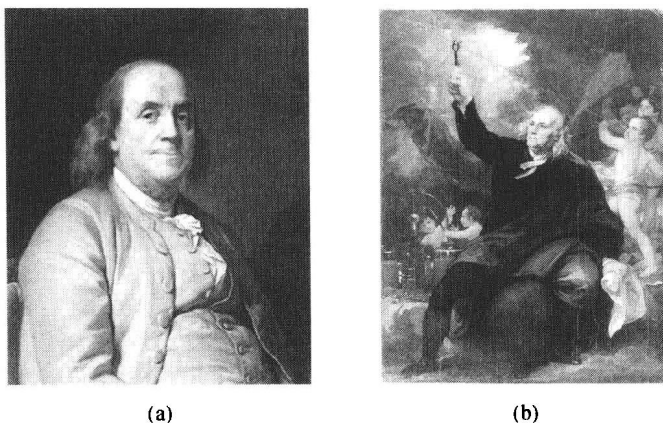


图 1.1 富兰克林画像 <http://en.wikipedia.org/wiki/File:BenFranklinDuplessis.jpg>

(a)和富兰克林风筝实验 [http://en.wikipedia.org/wiki/File:](http://en.wikipedia.org/wiki/File:West_-_Benjamin_Franklin_Drawing_Electricity_from_the_Sky_(ca_1816).jpg)

[West\\_-\\_Benjamin\\_Franklin\\_Drawing\\_Electricity\\_from\\_the\\_Sky\\_\(ca\\_1816\).jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:West_-_Benjamin_Franklin_Drawing_Electricity_from_the_Sky_(ca_1816).jpg) (b)

这些路径流动的,那是一条导电气体构成的电路,一条电荷(moving charge)运动的轨迹,是一条真正的电路。在这条电路中有电荷的转移,有能量(energy)的输送,显然也蕴含着雷电的信息(information)。只是这样的电路没有固定的形体而已。

### 1.1.2 金属是特殊的

中世纪,人们在摩擦生电实验中发现,金属(metal)与胶皮(rubber)、玻璃(glass)、琥珀(amber)、毛皮(pelt)和丝绸(silk)等材料完全不同,金属与其他任何材料摩擦,均不能带电。但金属同任何带电体(charged body)接触,都会带电;甚至只要靠近带电体,无需接触,金属就会带电。不过,在靠近但不接触的情况下,一旦将带电体移走,金属就不再带电。这种与众不同的行为说明,金属的性质是特殊的。以上现象用今天的科学知识来解释是非常容易的,因为金属中含有大量可以自由移动的电子,即自由电子(free electron),所以,局部摩擦丢失或增添的电子均会获得及时的补偿或吸收,从而达到新的平衡,不会呈现带电状态。另一方面,在其他带电体的作用下,金属内部的自由电子或被吸引或被排斥,使整个金属呈感应带电(inductive electrification)状态。一旦取走带电体,导体中的自由电子立即恢复均匀分布的状态,整个导体不再带电。但是,当时的人们不了解金属的结构,更没有电子的概念。他们认为,任何物质均由正电流体(electrical carrier)和负电流体组成,两种电流体数量相等,在系统中守恒(conservation),故整个物体呈电中性(electrical neutral)。一些物体(例如玻璃、