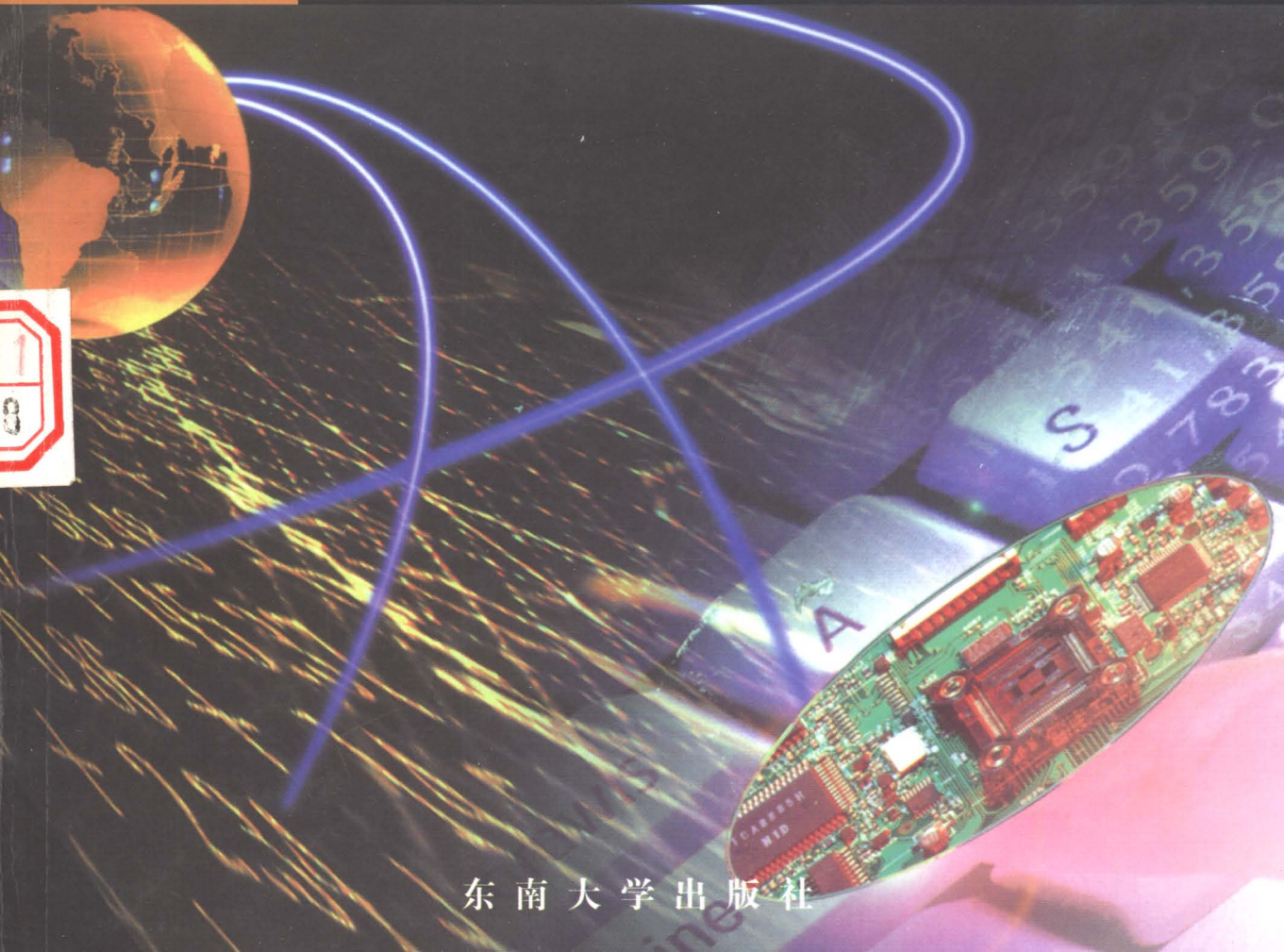


工程电路 分析

燕思远



东南大学出版社

高等学校教材

工程电路分析

燕思远 编著



东南大学出版社

内 容 简 介

本书是根据教育部颁发的《电路分析基础教学基本要求》，并结合编者长期教学经验编写而成的。内容包括：导论、电路的基础知识、网络图论、线性电阻电路分析、电路定理、简单的非线性电阻电路、正弦稳态分析、网络的基本特性、动态电路的时域分析和电路与系统的 S 域分析。

本书的特点是：充分注意了基础性、应用性、先进性和启发性。从建立电路理论“概念体系”的论述方式入手，强调理论与工程应用相结合。概念清晰，叙述简明，图文并茂，适于教学。

本书可作为电子信息、通信、电气、应用电子和自动化等电类专业本科生的“电路”课程教材，也可供高职、高专师生和广大科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电路分析基础/燕思远编著. —南京:东南大学出版社,2000.12
ISBN 7-81050-686-2

I. 电… II. 燕… III. 电路分析 IV. TN702

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 55563 号

东南大学出版社出版发行
(南京四牌楼 2 号 邮编 210096)

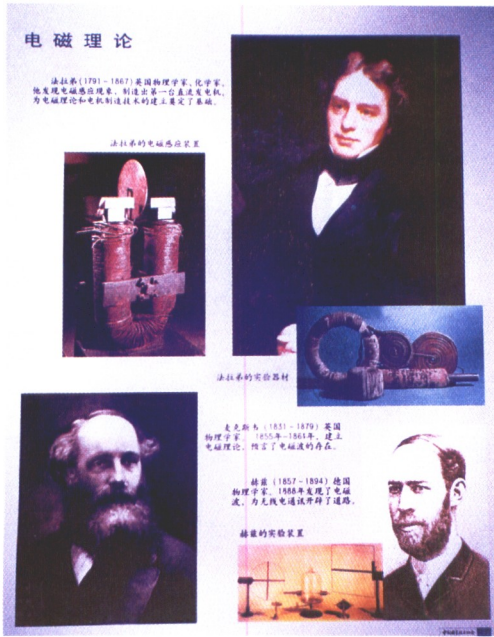
出版人:宋增民

江苏省新华书店经销 江苏省地质测绘院印刷厂印刷
开本:787mm×1029mm 1/16 印张:18.25 加 4 页彩插 字数:459 千字

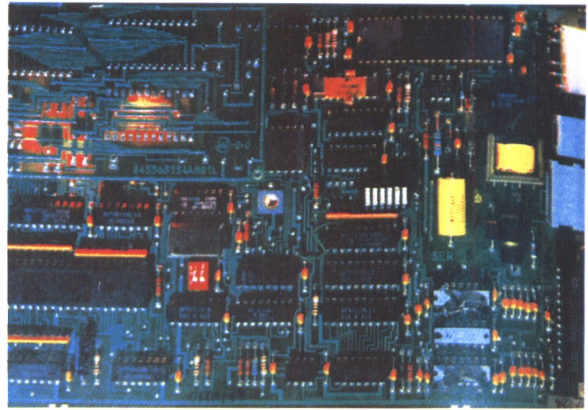
2001 年 2 月第 1 版 2001 年 2 月第 1 次印刷

印数:1-2700 册 定价:28.00 元

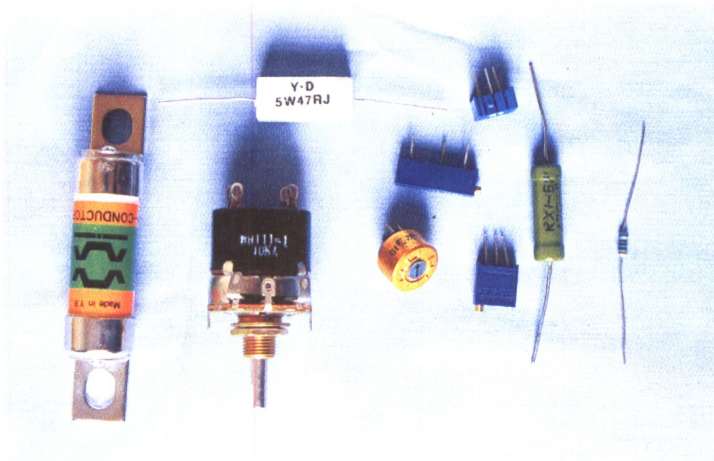
(凡因印装质量问题,可直接向发行科调换。电话:025-3792327)



◀图 1-3 早期研究电磁理论的法拉第、麦克斯韦和赫兹

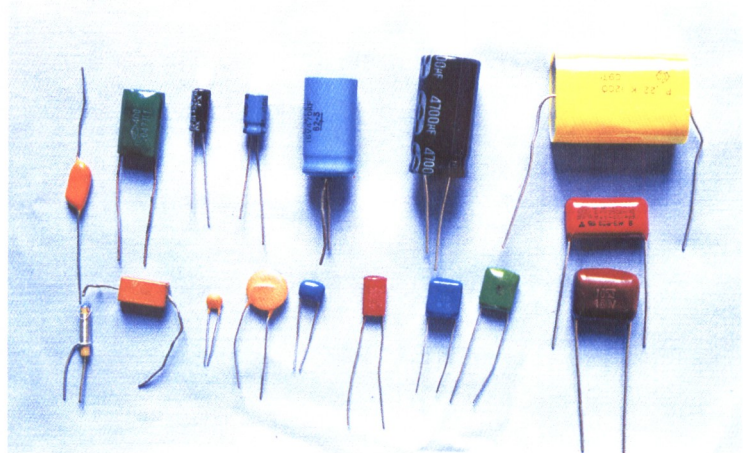


▲图 1-14 实际的电路板



▲图 2-8 几种类型的电阻器

▼图 2-19 几种电容器样品



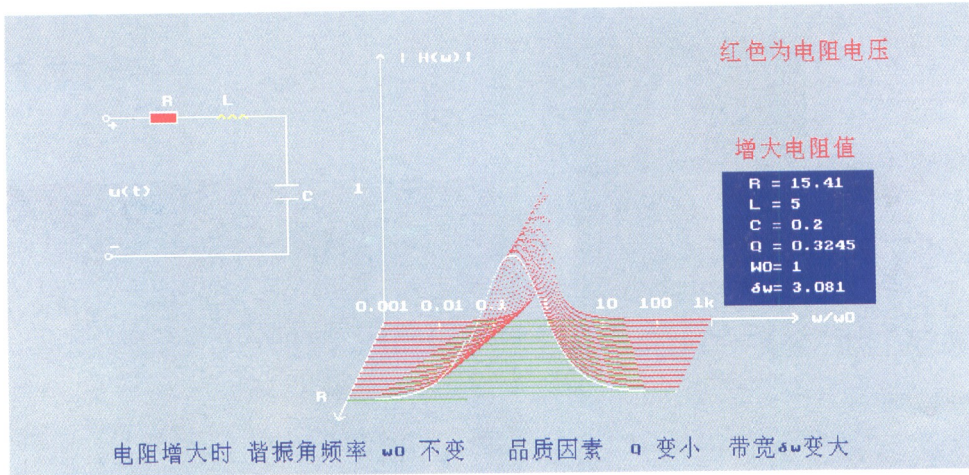


图 7-50 串联谐振电路通频带随电阻值变化情形

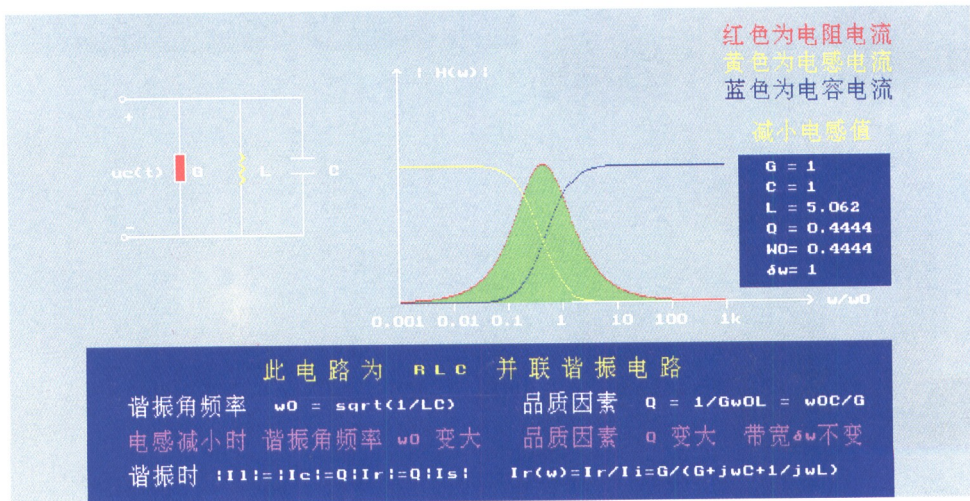


图 7-52 并联谐振电路各电流随频率变化情形

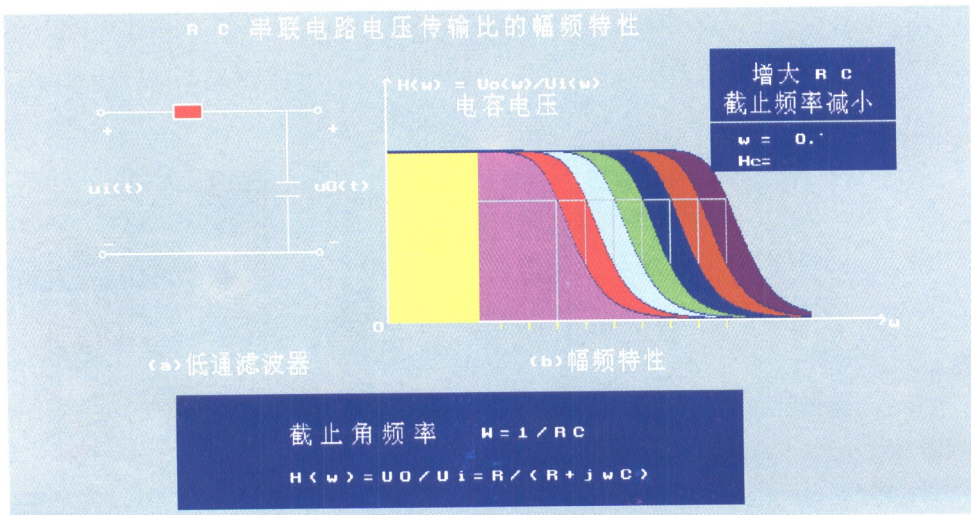


图 8-3 低通特性的变化规律

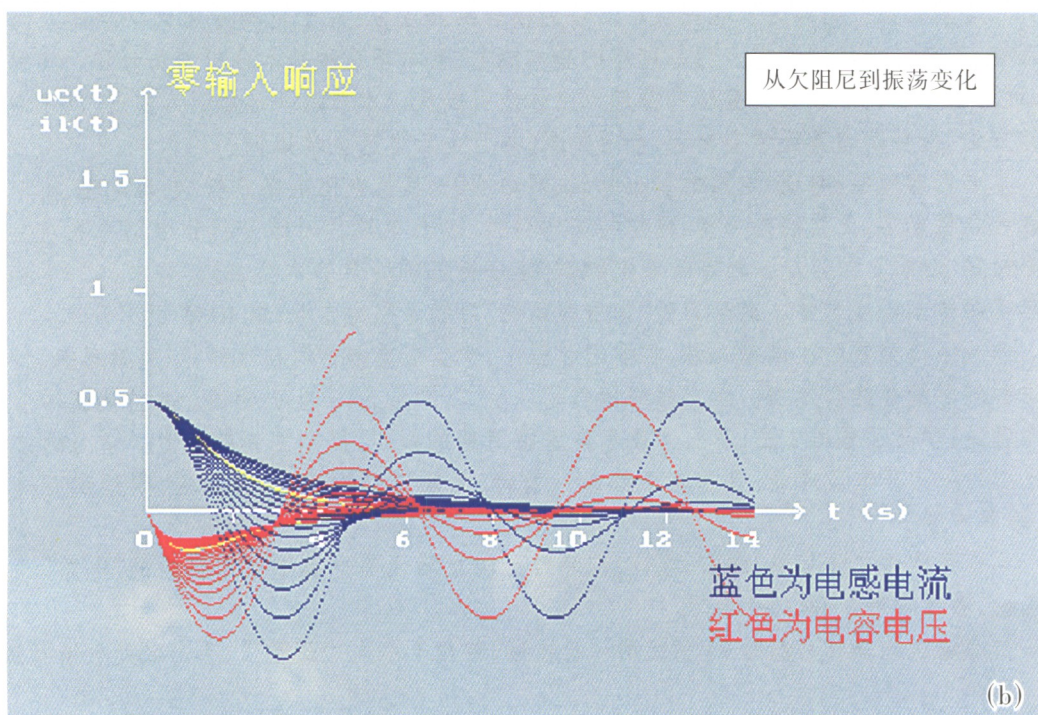
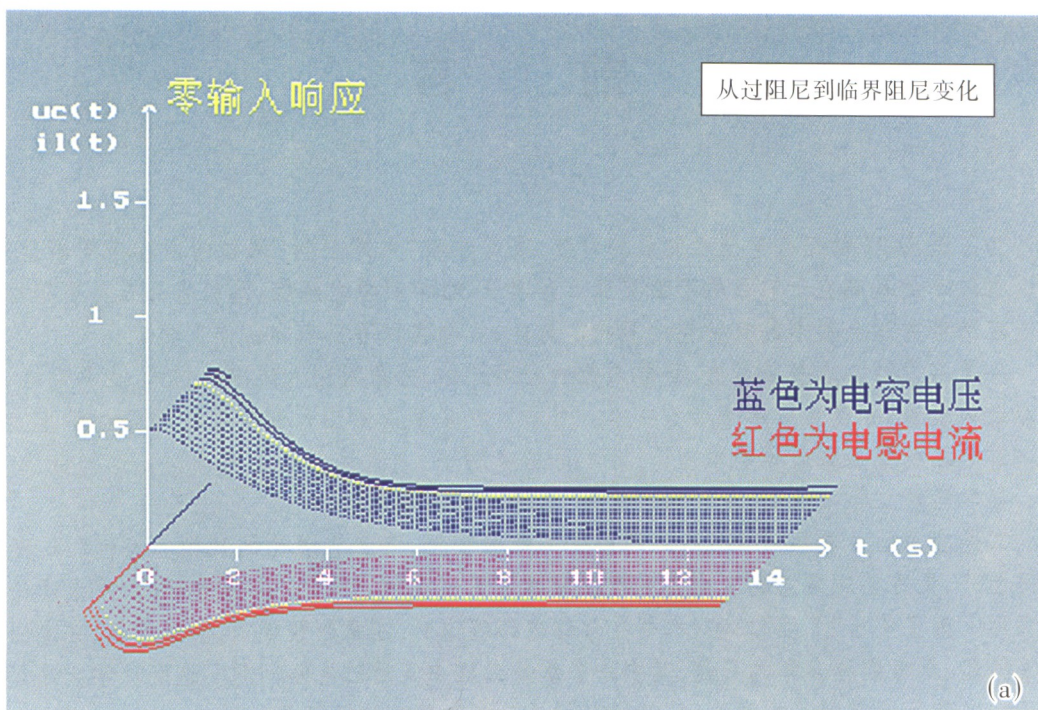


图 9-24 二阶电路中典型的电压变化曲线

前 言

为了适应 21 世纪科学技术发展的需要,高等学校“电路分析”课程的内容应不断改革。而课程改革的基礎在于教材的不断更新。作者积 30 年教学之经验,深深感到有必要编写一本适应形势并适合教学的有特色的教材。为此,作者在以下三个方面作了尝试:

一是启发性。本书从历史、科学人物的介绍开始,力求用深入浅出的方式,由易到难,循序渐近地展开,并设法引起读者的兴趣。书中以许多形象的和丰富的例题让学生直观地理解电路的重要概念和基本理论,而不是居高临下,刻意讲述抽象的理论。这样做,有利于引导学生树立学习信心,建立科学信念,启迪科学创造意识。

二是应用性。电路分析理论之所以受到普遍重视,除了它理论的日渐完美性和广泛的适用性外,更重要的是它的工程应用性。本书从工程实际出发,以应用为目的,注重理论联系实际。为了突出“工程”二字,本书在介绍电路理论时,注意删繁就简,去陈立新,并潜心选择了例题、思考题和各章的习题,其中许多都是工程中实用的电路问题。这既让学生通过研究工程电路问题掌握基本理论,又能提高学生分析和解决实际问题的能力。

三是基础性。电路分析理论虽已发展到相当的高度,但对于电类专业大学生的入门课程而言,作者认为讲述的重点仍以电路的基本概念、基本理论和基本分析方法为宜。实践证明,过分追求理论体系的完整性和高起点往往适得其反。本书以基础知识为重点,以通俗简明为方法,指导读者真正学会知识,会用知识,并且今后自己会学知识。

本书内容包括:导论、电路的基础知识、网络图论、线性电阻电路分析、电路定理、简单的非线性电阻电路、正弦稳态分析、网络的基本特性、动态电路的时域分析和电路与系统的 S 域分析等 10 章。内容符合教育部颁发的《电路分析基础教学基本要求》。书中打“*”号的内容可视专业情况选学。对于开设“信号与系统”后续课程的专业,第 10 章可以不讲。

作为一门重要的技术基础课,在学习过程中,学生应当把学习科学知识、科学思想、科学方法和科学精神结合起来。世上的事物总是一生二,二生三,三生万物的。当你真正懂得了基本理论,学会了思维方法,那么你就容易掌握更新的知识,提高创新的能力。学习的方法是什么?一句格言说得好:要想真正读懂一首诗,必须做到为学者,善其端,积跬步而持之以恒,悟意方停。

本书可作为电子信息、通信、电气、应用电子和自动化等电类专业本科生的“电路”课程的教材,参考学时为 80~90 学时。

作者谨以此书作为献给 21 世纪的一份礼物,但由于本人才疏学浅,不当之处敬请指正。

燕思远

2000 年 3 月

目 录

| | |
|----------------------------|----|
| 第 1 章 导论 | 1 |
| 1-1 历史的回顾 | 1 |
| 一、奠基时期 | 1 |
| 二、重要发明及其应用 | 3 |
| 1-2 电路与系统 | 8 |
| 一、电路 | 8 |
| 二、系统 | 9 |
| 第 2 章 电路的基础知识 | 12 |
| 2-1 电路及其基本变量 | 12 |
| 一、电路模型 | 12 |
| 二、基本变量 | 13 |
| 2-2 电源和电阻元件 | 16 |
| 一、电压源与电流源 | 16 |
| 二、电阻元件 | 17 |
| 2-3 基尔霍夫定律 | 20 |
| 一、KCL | 20 |
| 二、KVL | 21 |
| 三、KCL 和 KVL 的应用 | 22 |
| 2-4 储能元件 | 27 |
| 一、电容元件 | 27 |
| 二、电感元件 | 30 |
| 三、耦合电感 | 34 |
| 2-5 等效电路 | 37 |
| 一、等效的概念 | 37 |
| 二、 Δ -Y 等效 | 40 |
| 三、电源的等效变换 | 43 |
| 2-6 受控源与运算放大器 | 47 |
| 一、受控源 | 47 |
| 二、运算放大器 | 49 |
| 习题 | 52 |
| 第 3 章 网络图论 | 58 |
| 3-1 图的基本概念 | 58 |
| 一、从七桥趣题说起 | 58 |
| 二、关于图的基本知识 | 59 |

| | |
|-----------------------------|------------|
| 3-2 网络矩阵 | 63 |
| 一、基本关联矩阵 | 63 |
| 二、基本割集矩阵 | 65 |
| 三、基本回路矩阵 | 67 |
| 四、网孔矩阵 | 68 |
| 3-3 特勒根定理 | 70 |
| 习题 | 74 |
| 第4章 线性电阻电路分析 | 76 |
| 4-1 网孔分析法 | 76 |
| 4-2 节点分析法 | 81 |
| * 4-3 矩阵分析法 | 84 |
| 习题 | 87 |
| 第5章 电路定理 | 90 |
| 5-1 叠加定理 | 90 |
| 5-2 替代定理 | 93 |
| 5-3 等效电源定理 | 95 |
| 一、戴维宁定理 | 95 |
| 二、诺顿定理 | 98 |
| 5-4 最大功率传输定理 | 100 |
| 习题 | 102 |
| 第6章 简单的非线性电阻电路 | 106 |
| 6-1 非线性电阻元件 | 106 |
| 一、非线性电阻特性 | 106 |
| 二、非线性电阻串联 | 108 |
| 三、非线性电阻并联 | 109 |
| 6-2 直流分析 | 110 |
| 一、直流工作点 | 110 |
| 二、应用举例 | 112 |
| 习题 | 116 |
| 第7章 正弦稳态分析 | 118 |
| 7-1 正弦信号与相量 | 118 |
| 一、正弦信号 | 118 |
| 二、相量 | 121 |
| 7-2 电路的相量模型 | 123 |
| 一、KCL和KVL的相量形式 | 123 |
| 二、基本元件VCR的相量形式 | 124 |
| 7-3 阻抗与导纳 | 130 |
| 一、阻抗与导纳 | 130 |
| 二、阻抗的串联与并联 | 131 |
| 7-4 正弦稳态电路分析 | 137 |

| | |
|------------------------------|------------|
| 一、网孔分析法 | 137 |
| 二、节点分析法 | 138 |
| 三、戴维宁等效法 | 140 |
| 7-5 正弦稳态电路的功率 | 142 |
| 一、平均功率 | 142 |
| 二、复功率 | 145 |
| 三、共轭匹配 | 148 |
| 7-6 变压器电路 | 150 |
| 一、空芯变压器 | 150 |
| 二、全耦合变压器 | 154 |
| 三、理想变压器 | 155 |
| 7-7 谐振电路 | 158 |
| 一、串联谐振 | 158 |
| 二、并联谐振 | 164 |
| 7-8 三相电路 | 169 |
| 一、三相电源 | 169 |
| 二、三相电路的联接与计算 | 170 |
| 习题 | 173 |
| 第 8 章 网络的基本特性 | 179 |
| 8-1 网络函数 | 179 |
| 一、网络函数与频率特性 | 179 |
| 二、滤波器的概念 | 184 |
| 8-2 二阶网络的频率特性 | 185 |
| 8-3 双口网络的参数方程 | 191 |
| 一、 Y 参数方程 | 192 |
| 二、 Z 参数方程 | 193 |
| 三、 H 参数方程 | 195 |
| 四、 A 参数方程 | 196 |
| 8-4 双口网络等效与分析 | 200 |
| 一、 Z 参数等效 | 200 |
| 二、 Y 参数等效 | 201 |
| 三、 H 参数等效 | 201 |
| 8-5 双口网络的联接 | 206 |
| 一、并联 | 206 |
| 二、级联 | 207 |
| 三、匹配联接 | 209 |
| 习题 | 213 |
| 第 9 章 动态电路的时域分析 | 216 |
| 9-1 一阶电路: 受激响应 | 216 |
| 一、一阶电路及其响应 | 216 |
| 二、阶跃信号与阶跃响应 | 220 |

| | |
|-------------------------------|-----|
| 9-2 一阶电路:储能响应 | 222 |
| 一、换路定律与起始值 | 222 |
| 二、储能响应与时间常数 | 223 |
| 9-3 一阶电路:三要素法 | 227 |
| 9-4 二阶电路分析 | 235 |
| 一、储能响应 | 235 |
| 二、阶跃响应 | 238 |
| * 9-5 冲激函数与冲激响应 | 241 |
| 一、单位冲激函数 | 241 |
| 二、冲激响应 | 244 |
| 习题 | 245 |
| * 第 10 章 电路与系统的 S 域分析 | 250 |
| 10-1 拉普拉斯变换 | 250 |
| 一、常用信号的拉普拉斯变换 | 250 |
| 二、拉普拉斯变换的主要性质 | 252 |
| 10-2 拉普拉斯反变换 | 258 |
| 10-3 S 域分析 | 263 |
| 一、 S 域电路方程 | 263 |
| 二、电路的 S 域模型 | 264 |
| 10-4 系统函数 | 268 |
| 一、系统函数 $H(s)$ | 268 |
| 二、 $H(s)$ 的零、极点 | 270 |
| 习题 | 273 |
| 附录 | 276 |
| 附录一 部分国际单位制(SI)单位 | 276 |
| 附录二 部分国际单位制(SI)词头 | 276 |
| 附录三 电工测量仪表分类 | 276 |
| 附录四 部分电容器的有关数据 | 277 |
| 部分习题参考答案 | 278 |
| 参考文献 | 283 |

第 1 章

导 论

1-1 历史的回顾

电子科学技术的快速发展,把人类带进了一个奇妙的电的世界。就像离不开水和空气一样,人们在生活和工作中已经离不开电。在整个电气和电子工程中,如电力、通信、控制、测量、计算机、自动化等领域,都已达到了令人鼓舞的先进水平。当我们领略着今天电的奇迹的时候,简要回首它的某些往事也许是很有意义的。

一、奠基时期

电与磁总是相伴而生。关于磁生电、电生磁的现象,是人们经过 2 000 多年不断观察才认识的。我国古代早就发现了电与磁的现象。公元前 2637 年我国人祖黄帝利用磁制成了罗盘针。据司马迁记载,公元前 9 世纪,航海家已使用指南针导航了,如图 1-1 所示。1600 年,英国物理学家吉伯特(W. Gilbert, 1540 ~ 1603)在他的书中第一次讨论了电与磁,他被世人称为电学之父。



图 1-1 我国四大发明之一——指南针的应用

1660年,德国科学家库里克(O. V. Guericke)制成了第一台产生静电的装置。1785年,法国人库伦(C. A. Coulomb)定量地研究了两个带电体间的相互作用,得出了历史上最早的电学定律——库伦定律。这是人类在电磁现象认识上的一次飞跃。美国科学家富兰克林(B. Franklin, 1706~1790)在电的研究方面作了大量实验,并于1749年提出了正电和负电的概念。

1800年,意大利物理学教授伏特(A. Volta, 1745~1827)发明了第一种化学电源——铜锌电池,它能够把化学能不断地转变为电能,维持单一方向的电流持续流动。这一发明具有划时代的意义,引起了电磁学中一场革命。它为人们深入研究电化学、电磁学以及它们的应用打下了物质基础。以后很快发现了电流的化学效应、热效应以及利用电来照明等。

1820年,丹麦物理学家奥斯特(H. C. Oersted, 1777~1851)通过实验发现了电流的磁效应,在电与磁之间架起了一座桥梁,打开了近代电磁学的突破口。

1825年,法国科学家安培(A. M. Ampere, 1775~1836)提出了著名的安培定律。他从1820年开始在测量电流的磁效应中,发现两个载流导线既可以互相吸引,又可以互相排斥。这一发现成为研究电学的基本定律,为电动机的发明作了理论上的准备。

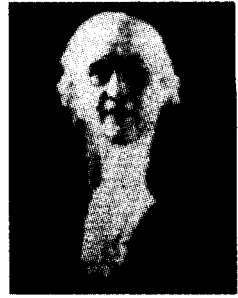
1827年,当时德国的一位教师欧姆(G. S. Ohm, 1787~1854)通过多年的实验,发现了电阻上电压与电流的定量关系,从而提出了今天普遍应用的欧姆定律。

1831年,英国物理学家法拉第(M. Faraday, 1791~1867)发现了电磁感应现象。当他继续奥斯特的实验时,他坚信既然电能产生磁,那么磁也能够产生电。他终于发现在线圈内运动的磁体可以在导线中产生电流。这一发现成为发电机和变压器的基本原理,从而使机械能转变为电能成为可能,推动了电在工业上的广泛应用,使人类迈向了电气时代。

1847年,德国科学家基尔霍夫(G. R. Kirchhoff, 1824~1887)在他还是一个23岁大学生的时候提出了著名的电流定律和电压定律,这成为电路分析最基本的依据。

1864年,苏格兰科学家麦克斯韦(J. C. Maxwell, 1831~1879)提出一组关于电和磁共同遵守的数学方程,即麦克斯韦方程,他预言空间一定存在电磁波。

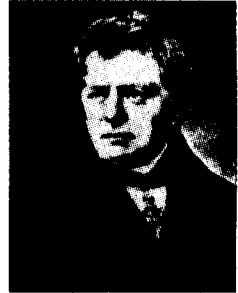
1889年,德国物理科学家赫兹(H. R. Hertz, 1857~1894)经过艰苦的反复实验,证明麦克斯韦所预言的电磁波确实存在。图1-3为早期研究电磁理论的三位科学家法拉第、麦克斯韦和赫兹。



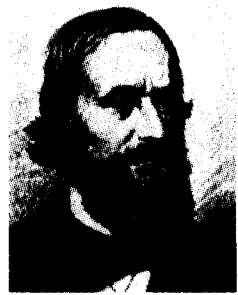
伏特



安培



欧姆



基尔霍夫

图1-2 四位科学家

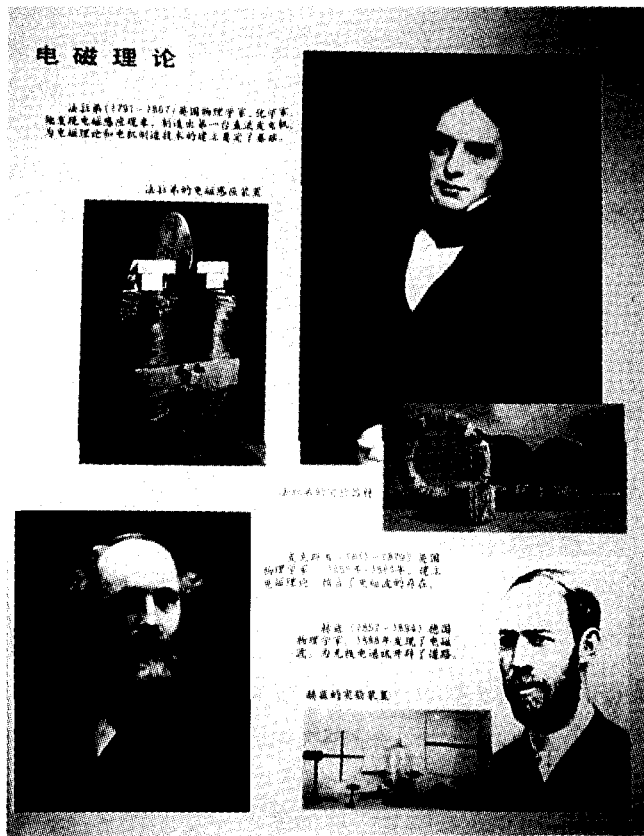


图 1-3 早期研究电磁理论的法拉第、麦克斯韦和赫兹(见彩图)

二、重要发明及其应用

随着人们对电的认识不断深化,各种有用的发明不断涌现。1837年,画家出身的美国人莫尔斯(S.F.B.Morse,1791~1872)发明了电报。1843年,他用电报机可从华盛顿向40英里外的巴尔提摩发出电文。在他研究之初,为了说服别人为他投资,他得到的回答常常是:“先生,用导线传递消息,你为啥不发明一个能飞向月球的火箭呢?”但莫尔斯的创造欲望经过十多年的奋斗终于实现了。图1-4是莫尔斯和他早期的电报机。



图 1-4 莫尔斯和他早期的电报机

1875年,另一项伟大发明在波士顿诞生了,这就是美国科学家贝尔(A. G. Bell, 1847 ~ 1922)设计的电话。贝尔当时仅是一名聋哑人学校的教师,但凭借对电流作用敏感的认识和不懈的努力,达到了通过导线互相通话的目的。经过不断改进,到1878年,他实现了从波士顿到纽约之间200英里的首次长途通话。贝尔曾经把电话的话音比喻为歌声,他说:“这歌声是永不停止的,因为这是对生活故事的歌颂,而生活是永不停止的。那高悬的电话线正在把生与死、成功与失败的消息传遍全球。”图1-5是贝尔和他早期的电话机。

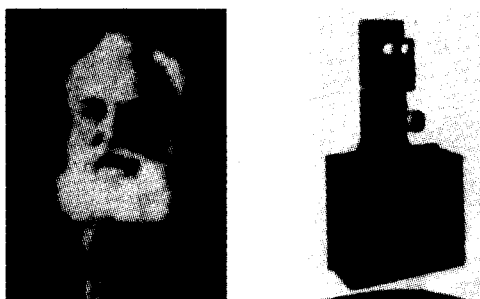


图 1-5 贝尔和他早期的电话机

1866年,德国工程师西门子(K. W. Siemens, 1823 ~ 1883)发现了电动原理并用在了发电机的改进上。由于电在各方面的应用日益广泛,如照明、电解、电镀、电力拖动等,迫切需要更方便地获取电能,以提高效率,降低成本。1882年,直流高压输电试验成功。但由于直流高压不便于用户直接使用,同年在发明变压器的基础上又实现了远距离交流高压输电。从此,电气化时代开始了。

1879年,美国的爱迪生(T. A. Edison, 1847 ~ 1931)发明了钨丝电灯。这位在一生中获得一千多项发明专利的发明家用电照亮了千家万户。他曾说过:“我的人生哲学是工作。我愿揭示自然界的秘密并用以造福于人类。我认为,我们在人世间短暂的一生中,最好的贡献莫过于此。”图1-6为爱迪生及他发明的电灯。



图 1-6 爱迪生及他发明的电灯

1894年,意大利的马可尼(G. Marconi, 1874 ~ 1937)发明了无线电。没有受过正规大学教育的20岁的马可尼利用赫兹的火花振荡器作为发射器,通过电键的开、闭产生断续的电磁波信号。1895年他发射的信号传送距离可达1 km以上,1897年发射的信号可在20 km之外接收

到,从此开始了无线电通信的时代。图 1-7 是马可尼和他的无线电收发报机的原理图。

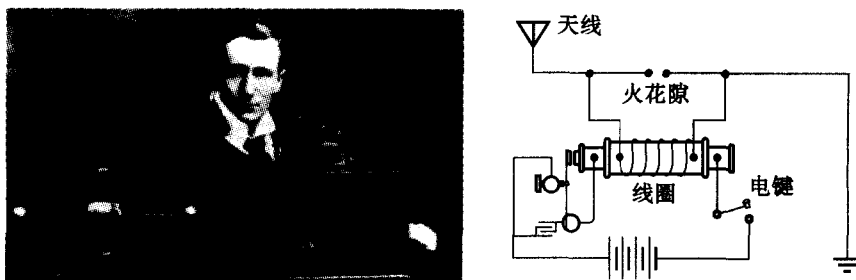


图 1-7 马可尼和他的无线电收发报机原理图

电真空器件的发明使电子工程的发展推进了一大步。英国科学家汤姆逊(J. Thomson, 1856~1940)在 1895~1897 年间反复测试,证明了电子确实存在。随后,英国科学家弗莱明(J. A. Fleming)在爱迪生发明的热二极管的基础上发明了实用的真空二极管。它具有单向导电特性,能用来整流或检波。1907 年,美国人福斯特(L. D. Forest)发明了真空三极管,它对微弱电信号有放大作用。1914 年,福斯特用真空三极管又构成了振荡电路,使无线电通信系统更加先进。图 1-8 是福斯特正工作于无线电发射机旁。



图 1-8 福斯特正工作于无线电发射机旁

1925 年,英国的贝尔德(J. L. Baird)首先发明电视。几乎在同时,美国无线电公司(R. C. A)的工程师诺基(V. K. Zworykin)发明了电视显像管。1933 年,他利用真空二极管、真空三极管和显像管等,最早发明了电视机。1936 年,黑白电视机就正式问世了。

1946 年,世界又一个奇迹出现了。第一台电子计算机在美国宾夕法尼亚大学莫尔电子工程学院研制成功。这台叫做 ENIAC(Electronic Numerical Integrator And Calculator)的计算机是以美国数学家纽曼(J. V. Neumann)为主设计的。这台计算机占地约 165 m²,使用了 18 000 只真空电子管,重 30 t,每秒钟可运算 5 000 次,这在当时是史无前例的。今天的计算机已发展到第五代,速度已接近每秒 5 万亿次。然而第一台计算机仍是划时代的。没有当初,何有今天! 图 1-9 是 ENIAC 的实景。

人类的生产实践和科学实验是不断发展的,永远不会停止在一个水平上。从 1948 年起,固态电子学的时代向我们走来。1947 年 12 月 24 日,贝尔实验室的布拉丁(Walter Brat-