

普通高等教育电子信息类“十三五”规划教材

电路分析基础

◆ 主编 王 源
参编 赵梦晗
电路课程慕课及混合式教学团队

- 有利自主学习
- 注重工程应用
- 结合仿真实例
- 重视实践练习



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

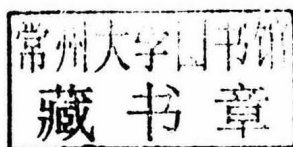
普通高等教育电子信息类“十三五”规划教材
北京联合大学“十二五”立项规划教材

电路分析基础

主 编 王 源

参 编 赵梦晗

电路课程慕课及混合式教学团队



西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书共十一章，分为四个部分。第一部分为直流电路分析，包括：第一章 电路与电路定律，第二章 电阻电路的等效变换，第三章 电阻电路的一般分析，第四章 电路定理。第二部分为动态电路分析，包括：第五章 一阶电路。第三部分为交流电路分析，包括：第六章 正弦稳态电路的分析，第七章 含有互感电路的分析，第八章 三相电路，第九章 非正弦周期电流电路。第四部分为运算电路分析，包括：第十章 拉普拉斯变换与二端口网络。本书第十一章含有理想运算放大器电路的分析，作为综合分析，是全书的归纳总结，涵盖了直流电路分析、动态电路分析、交流电路分析和运算电路分析四个部分。书中的重点章节，均列举了详尽的工程案例与电路仿真实例，部分章节还结合电路仿真软件 PSPICE 进行讲解。此外，本书还编写了各个章节的实验及其仪器仪表的使用，旨在提高学生的实践动手能力，这对于工程专业学生的学习是至关重要的，同时方便教师的教学。

本书可作为普通本科、城市型本科、应用型本科以及高等职业教育等电类各专业学生学习电路分析课程的教材，也可作为工程技术人员和电子电路爱好者学习电路分析知识的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电路分析基础/王源主编. —西安:西安电子科技大学出版社, 2019.6
ISBN 978-7-5606-5057-9

I. ①电… II. ①王… III. ①电路分析 IV. ①TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 294451 号

策 划 刘玉芳

责任编辑 刘玉芳 毛红兵

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 咸阳华盛印务有限责任公司

版 次 2019年6月第1版 2019年6月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印 张 27.5

字 数 657千字

印 数 1~3000册

定 价 64.00元

ISBN 978-7-5606-5057-9/TM

XDUP 5359001-1

* * * 如有印装问题可调换 * * *

前 言

笔者在编写《实用电路基础》(机械工业出版社, 2004年)一书时, 就引用了叶圣陶大师所述“教师当然须教, 但尤宜致力于‘导’。导者, 多方设法, 使学生逐渐自求得之, 卒底于不待教师教授之谓也。”来表达编者的理念。编写本书时, 更加强调了对学生自主学习能力的培养, 特别注意讲解内容由浅入深, 易于理解; 详简结合, 易于教学。即要尽量适合学生自主学习, 力争使理解力比较薄弱、基础比较差的学生在学习本书时也能做到基本无障碍学习, 无师自通。建议使用本书的教师要注重引导学生自主学习部分内容, 不局限于教师的课堂教学, 使学生建立创新意识。特别是有些院校学生基础较弱, 大部分学生的自主学习意识过低, 仍旧处于应试教育下的思维模式, 即从主观上完全依赖于教师的课堂教学和对教师指定教材的模仿式学习, 不敢开展独立的、个性化的、具有创新意识的学习, 这样长此以往是不利于人才质量提升的。同时, 由于学生自主学习的能力较差, 也影响了教师更深层次的教学改革。例如, 发现性学习、研究性学习、工程应用或实际应用性学习等, 不容易展开, 一些教学方法改革的初衷良好, 却不幸演变成了放羊式教学, 不得不放弃又回到了原点。解决这类问题迫切需要从教材的编写上就注重引导学生建立起较强烈的自主学习的意识, 课堂上教师有意识地指导、组织学生对教材的自主学习, 使学生独立获取更多的知识。最终通过主动自觉的自主学习, 学生可以获得绝大部分知识, 学习水平大幅度提升。

当前 MOOC 慕课(大规模开放在线课程)及 SPOC(小规模不开放在线课程)方兴未艾, 学生可以在课外在线学习相关课程, 课上在老师的指导下进行各种形式的讨论和深入学习, 这种将在线学习和课上研讨相结合的混合式教学为学生的自主学习提供了有效手段。本书编者结合本书制作了 MOOC 慕课, 未来线上慕课、线下教材、课上研讨及深入讲解相互配合, 为以学生为中心的自主学习提供有效的平台。

由于一些传统的大学电路课程通用的经典教材, 讲解比较抽象、难度比较大, 与普通本科院校的教学目标以及学生的认知能力不太相符, 不利于这类学生自主学习, 也给教师的教学带来一定的困难。本书根据这些实际情况在编写时进行了彻底的改进, 既继承了这些经典教材传统的、好的地方, 同时针对理解力和学习基础比较薄弱的学生的特点, 在基本和中等内容上进行了充分的补充讲解, 更利于学生理解, 是本书独具的特点。例如, 率先加入了实际应用或工程应用的实例、仿真应用的实例, 把理论知识与实验融合在一起等。本书编写时本着易于理解、易于教学的原则, 对于绝大部分传统的重要内容给予了详尽、细致的讲解。有些也很重要或者可选内容, 鉴于学时有限, 教师在课堂上可能没有时间详细讲解, 唯有鼓励学生自主学习。还有些内容, 现在可能已不是很重要了, 只要了解即可, 对于这些内容, 将其整合在例题及相关知识中, 使学生了解其基本内容, 使自主学习能够逐步深入下去, 例如将回路法糅合在具体例题中, 将二端口网络整合在拉普拉斯变换的网络函数中, 将图论基础知识提前至电路的一般方法中, 等等。

本书的编写充分参考了 2011 年高教社出版的教育部高等学校电子电气基础课程教学

指导分委员会编写的《电子电气基础课程教学基本要求》。“教学基本要求”中电路类课程分为“电路理论基础”课程教学基本要求和“电路分析基础”课程教学基本要求，前者针对电子电气信息类专业，后者针对电子信息工程和通信工程类专业。“电路理论基础”课程教学基本要求比“电路分析基础”课程教学基本要求的内容略多，个别内容要求较高，但大部分内容和要求一致。本书编写时对两个版本的交叉内容进行了细致入微的详细讲解，个别要求不一致的内容以要求高的为准。考虑到大部分院校目前电路课程学时较少，对少数非基础内容基本上无暇顾及，因此本书中对于“电路理论基础”课程教学基本要求中属于近代电路的“矩阵方程的列写”和“分布参数电路”这两部分内容，前者简化处理，后者没有收录。这两部分内容属于电子电气信息类专业，在“电路分析基础”课程教学基本要求中没有要求。但对矩阵理论中的基础内容，如图论的基础知识予以保留，这部分内容也是“电路分析基础”课程教学基本要求中的可选内容。本书还把运算放大器部分归纳为专门的一章放到最后，作为全书的总结，涵盖直流电路、交流电路、动态电路和运算电路的分析。二端口和图论的基本概念提前至直流电路部分讲解，以利于教学。本书还特别注重电路分析与后续课程模拟电路的衔接，对于模拟电路后续课程用到的电路分析课程中的知识，本书或者予以说明和专门讲解，或者把模拟电路与电路分析相关的知识点整合在一起讲解，以利于对电路分析知识的理解，及其在模拟电路中的应用。

本书获得北京联合大学校级十二五规划教材立项，对此编者对学校教务处和智慧城市学院给予本书出版的重视表示衷心感谢。同时特别感谢西安电子科技大学出版社的编辑们，对本书的出版给予的信任和大力支持。

本书各章节由城市智慧学院电子科学系王源副教授编写，实验部分和附录 A 由工科综合实验教学示范中心赵梦晗实验员编写，附录 C 由机器人学院自动化系王珏副教授和工科中心赵梦晗实验员共同编写。工科中心吉素霞老师、刘建国工程师和谢忠屏工程师参与了书中全部实验的试做和仪器仪表的调试。电子科学系刘佳、吕彩霞等教师使用了本书的试用稿，并提出了宝贵的意见。电子科学系江余祥、吕彩霞、刘佳、章学静、吴晶晶，以及通信系陈婷婷、陈晓丹等主讲电路分析基础课程的教师参与了部分例题和习题的编写与试做工作，在此一并表示感谢。

本书各章配有 PPT 及全部仿真实例，如有需求可到西安电子科技大学出版社网站下载。本书慕课“电路分析基础与应用实例”在中国大学 MOOC 平台上线，欢迎广大读者在线学习。编者希望教师们使用本书时结合翻转课堂开展混合式教学，培养学生的自主学习能力，实现以学生为中心，教师为指导的先进的教学模式。

对于本书不妥之处希望大家谅解和批评指正，相关建议和要求可发送至电子邮箱：xxtwangyuan@bnu.edu.cn，以便于今后的修订。

王 源
2018 年 12 月

目 录

绪论	1	第三节 电阻 Y- Δ 连接的等效变换	40
第一章 电路与电路定律	10	一、Y 连接	40
第一节 实际电路与电路模型	10	二、 Δ 连接	40
一、实际电路	10	三、Y- Δ 连接之间的等效变换	40
二、理想电路元件与电路模型	11	第四节 电压源、电流源的串联和并联	43
三、电路 CAD	12	一、电压源的串联	43
第二节 电流和电压的参考方向	12	二、电流源的并联	44
一、电流的参考方向	12	三、电压源与支路并联	44
二、电压的参考方向	13	四、电流源与支路串联	44
三、电压与电流的关联参考方向和 非关联参考方向	14	第五节 电源等效变换法	45
四、国际单位制(SI)中各变量的单位	15	第六节 输入电阻	48
第三节 功率和电能	15	第七节 实际应用举例	54
一、电能	15	一、把小量程电流表表头改装成 大量程电流表	54
二、功率	16	二、把小量程电流表表头改装成 大量程电压表	55
第四节 电阻元件	17	第八节 PSPICE 7.1 原理图编辑器 Schematics 的使用	56
一、电阻	17	一、进入 PSPICE 7.1 原理图 编辑器界面	56
二、电导	18	二、调出一个电路元器件图符	58
三、电阻元件的开路和短路性质	18	三、绘制电路原理图	61
四、电阻元件的功率与电能	19	四、设置电路分析	61
第五节 电压源和电流源	19	五、运行分析及观察输出结果	62
一、电压源	19	习题二	62
二、电流源	20	实验二 元件伏安特性的测定	66
第六节 受控源	21		
第七节 基尔霍夫定律	23		
一、基尔霍夫电流定律(KCL)	23		
二、基尔霍夫电压定律(KVL)	24		
第八节 电路模拟软件 PSPICE 7.1 简介	27		
习题一	28		
实验一 仪器和仪表的使用	31		
第二章 电阻电路的等效变换	35	第三章 电阻电路的一般分析	71
第一节 电路的等效变换	35	第一节 电路的图	71
第二节 电阻的串联和并联	36	第二节 KCL 和 KVL 方程的独立性	72
一、电阻的串联	36	一、KCL 的独立方程与独立节点	72
二、电阻的并联	36	二、独立回路与 KVL 的独立方程	72
三、电阻的混联	38	第三节 网孔电流法	74
		一、2b 法与支路电流法	74
		二、网孔电流法	74
		第四节 节点电压法	80

第五节 用 PSPICE 7.1 分析		第四节 一阶电路的零状态响应	140
直流电路(一)	88	一、RC 电路的零状态响应	140
一、绘制电路原理图	88	二、RL 电路的零状态响应	144
二、设置分析类型	88	三、小结	145
三、运行分析	89	第五节 一阶电路的全响应	147
四、查看分析结果	89	第六节 一阶电路的阶跃响应	152
五、改变扫描参数的数据	90	一、单位阶跃函数与单位阶跃响应	152
六、查看输出文件	90	二、延迟的单位阶跃函数及其响应	154
习题三	93	三、单位阶跃函数的起始作用	154
		四、阶跃函数及阶跃响应	155
第四章 电路定理	97	第七节 实际应用举例	156
第一节 叠加定理	97	一、微分电路	156
第二节 替代定理	102	二、积分电路	157
第三节 戴维南定理和诺顿定理	103	三、继电器应急控制电路	158
一、戴维南定理	103	第八节 用 PSPICE 7.1 分析动态电路	159
二、诺顿定理	104	一、RC 充放电电路的分析	159
三、最大功率传递定理	108	二、RLC 串联二阶动态电路的分析	165
第四节 对偶原理	109	三、正弦激励下 RC 一阶动态	
一、电路的对偶性	109	电路的分析	172
二、对偶电路	110	四、相关知识点学习	174
第五节 实际应用举例	111	习题五	176
第六节 用 PSPICE 7.1 分析		实验五 一阶电路的响应和时间	
直流电路(二)	112	常数的测定	184
一、绘制电路原理图	112	实验六 微分电路和积分电路	189
二、设置分析类型	113	实验七 二阶电路的零输入响应及	
三、运行分析	113	零状态响应	191
四、观察输出结果	113		
习题四	115	第六章 正弦稳态电路的分析	194
实验三 基尔霍夫定律和叠加定理	119	第一节 正弦量	194
实验四 戴维南定理及最大功率		一、正弦量的三要素	194
传输定理	121	二、正弦量的相位差	195
		三、正弦量的有效值	197
第五章 一阶电路	125	第二节 正弦量的相量表示法	197
第一节 电容元件与电感元件	125	第三节 正弦量运算的相量形式	198
一、电容元件	125	一、同频率正弦量的代数和	199
二、电感元件	128	二、正弦量的微分	199
第二节 过渡过程、换路定律及		三、正弦量的积分	199
初始值的计算	130	第四节 电路定律的相量形式	200
一、过渡过程	130	一、基尔霍夫定律的相量形式	200
二、换路定律及初始值的计算	131	二、R、L、C 元件 VCR 的相量形式	200
第三节 一阶电路的零输入响应	133	第五节 阻抗和导纳	204
一、RC 电路的零输入响应	133	一、阻抗	204
二、RL 电路的零输入响应	137	二、导纳	205

三、阻抗和导纳的等效互换	206	二、耦合电感并联电路的计算	279
第六节 阻抗与导纳的串联和并联	207	三、耦合电感电路变换为去耦	
第七节 电路的相量图法	209	等效电路的计算	280
第八节 正弦稳态电路分析的相量法	211	第三 空芯变压器	281
第九节 正弦稳态电路的功率	213	一、空芯变压器的引入阻抗	282
一、瞬时功率	213	二、变压器的计算	283
二、平均功率、无功功率及视在功率	214	第四节 理想变压器	285
三、功率因数的提高	217	一、理想变压器的基本概念	285
第十节 复功率	220	二、理想变压器的应用	286
一、复功率的概念	220	三、理想变压器的性质	288
二、电压和电流的有功分量和		习题七	289
无功分量	221	第八章 三相电路	293
第十一节 最大功率传输定理	224	第一节 三相电路的基本概念	293
第十二节 串联电路的谐振	225	一、三相交流电的产生	293
一、谐振的现象	225	二、三相电的供电方式	294
二、对串联谐振电路的理论分析	227	三、对称三相负载的连接	295
三、串联谐振的特征	227	第二节 对称三相电路的电压、电流	296
四、电路的选择性	229	一、对称三相电路的电压	296
第十三节 并联电路的谐振	231	二、对称三相电路的电流	297
一、RLC 并联电路	231	第三节 对称三相电路的计算	298
二、工程中的并联谐振电路	233	第四节 对称三相电路的功率	300
第十四节 正弦稳态电路的频域分析	234	一、有功功率	300
第十五节 实际应用举例	238	二、无功功率	300
第十六节 用 PSPICE 7.1 分析		三、视在功率	300
交流电路	242	四、三相平均功率的测量	301
一、绘制电路图	242	第五节 不对称三相电路的概念	302
二、设置分析类型	243	第六节 实际应用举例	304
三、运行分析	244	习题八	305
四、查看输出结果	244	实验十二 三相星形连接电路	307
习题六	246	第九章 非正弦周期电流电路	311
实验八 正弦交流电路中 RLC 元件的		第一节 非正弦周期信号	311
性能	259	第二节 非正弦周期函数的	
实验九 RC 电路的频率特性测试	262	傅立叶级数	312
实验十 RLC 串联谐振电路	264	一、非正弦周期函数分解为	
实验十一 日光灯实验	267	傅立叶级数	312
第七章 含有互感电路的分析	271	二、非正弦周期函数的频谱	312
第一节 互感	271	第三节 周期函数的有效值、平均值和	
一、自感与互感	271	平均功率	312
二、同名端	274	一、有效值	312
三、耦合系数	277	二、平均值	313
第二节 含有耦合电感电路的计算	278	三、平均功率	313
一、耦合电感串联电路的计算	278		

第四节 非正弦周期电流电路的 谐波分析法	313	习题十	353
习题九	316	实验十三 二端口网络的参数	357
第十章 拉普拉斯变换与 二端口网络	319	第十一章 含有理想运算放大器 电路的分析	361
第一节 拉普拉斯变换	319	第一节 运算放大器及其理想化模型	361
一、拉普拉斯变换的定义及意义	319	第二节 含有理想运算放大器 电路的分析	363
二、拉普拉斯变换的基本性质	320	第三节 实际应用举例	371
三、拉普拉斯反变换的部分分式法	324	习题十一	373
第二节 运算电路	329	实验十四 理想电路运放的分析	376
第三节 用运算法分析动态电路的 过渡过程	334	附录 A 电阻的识别和标识方法	380
第四节 网络函数与二端口网络	338	附录 B 复数及其运算	383
一、网络函数	338	附录 C 电路实验仪器仪表的使用	386
二、二端口网络的概念	339	部分习题参考答案	423
三、二端口的参数方程与参数	339	参考文献	432
四、双口网络中各种参数之间的关系	344		
五、具有端接的二端口网络的分析	346		
六、二端口的连接	351		

绪 论

一、电路课程的性质

电路课程的先修课程主要有大学物理电学部分、微积分、线性代数等。通过学习电路课程,学生能够掌握电路中的相关定律、定理以及电路的基本分析方法,为后续电子与电气信息类专业课程储备必要的分析和求解电路的知识。电路课程是高等学校电子与电气信息类专业重要的技术基础课,是所有电类强、弱电专业的必修课。电路课程作为必修技术基础课程的专业包括:电气工程及其自动化、自动化、计算机科学与技术、通信工程、电子信息工程、生物医学工程、电气工程与自动化、信息工程、网络空间安全等。

在科学技术发展过程中,电路理论与众多学科相互影响,相互促进。在工程技术和生活实际中,电路理论更是应用广泛。从简单的照明电路到复杂的电力系统;从单个的手提电话到卫星通信网络和互联网,无不与电路理论相关联。可以说,只要是涉及电能的产生、传输和分配的地方,就有电路理论的应用,而在信息生产、传递和处理的绝大多数场合,都有电路理论的应用。电路理论,已经和人们的生活不可分割。

电路理论是电气工程和电子科学技术的主要理论基础,是一门研究电路分析和网络综合与设计基本规律的基础工程学科。所谓电路分析,是在给定电路和已知参数的条件下,通过求解电路中的电压和电流而了解电网络的特性;而网络综合是在给定电路技术指标的情况下,设计出电路并确定元件参数,使电路的性能符合设计要求。因此,电路分析是电路理论中最基本的部分,电路分析课程是学习电路理论的入门课程,被列为电类各专业的技术基础课,特别是和后续的同为技术基础课的模拟电子技术、数字电子技术、信号与系统和自动控制原理这几门课程关系最为密切,是这些课程的理论基础。

二、电学发展史

电路理论伴随着电学的发展,历经 200 多年,各个时代的伟人层出不穷,大事连连。了解波澜壮阔的电学发展史,有利于激发学生的学习兴趣、学习动力和创新思维。

公元前 600 年前后,希腊人发现通过摩擦琥珀可吸引羽毛,用磁铁矿石可吸引铁片。希腊七贤之一,哲学家泰勒斯看到这一现象,并进行了一番思考,认为万物皆有灵,磁铁矿石能吸铁,磁铁矿石有灵。希腊商人从波罗的海沿岸进口琥珀,用来制作手镯和首饰,他们也知道摩擦琥珀能够吸引羽毛,但是他们认为那是神灵或者魔力的作用。公元前的中国人认为空中的打雷和闪电都是神的行为。打雷就是雷公在天上敲大鼓,闪电就是电母用两面镜子把光射向下界。这些解释都是不科学的,但是开创了人类发现磁与静电的先河。

早在公元前 2500 年左右,中国人就已经知道了天然磁石,并在战国时期(公元前 475 年—公元前 221 年),将磁石做成勺子形状,放在铜盘里用于指示方向,那时指南针叫

作司南。13世纪初,人们把磁铁矿石加工成针形,放到秸秆里,使之能漂浮在水面上,这就是最早的航海罗盘。到了14世纪初,人们又制成了用绳子把磁针吊起来的航海罗盘。1492年,哥伦布使用这种航海罗盘,发现了美洲新大陆。1519年,麦哲伦也是用这种航海罗盘,发现了环绕地球一周的航线。从人们在公元前认识到摩擦琥珀起电能够吸引羽毛这一现象起,在很长时间内对电磁知识的了解都没有什么进展。直到15世纪英国伊丽莎白女王的御医吉尔伯特,对磁进行了研究,并在1600年写了一本《论磁学》的书。书中指出,地球本身就是一块大磁石,并且论述了罗盘的磁倾角问题。同时,他也对摩擦琥珀吸引羽毛的现象进行了研究。他发现这种现象不仅存在于琥珀上,还存在于硫磺、树脂、玻璃、水晶、钻石等物质上。到了现在,人们已经知道了,毛皮、绒布、陶瓷、火漆、玻璃、纸、丝绸、琥珀、金属、橡胶、硫磺、赛璐珞等都是摩擦起电物质系列。为了做静电实验,吉尔伯特还设计了一种叫作贝鲁索留姆旋转器的老式验电器。他主张研究方法应该以实验作为基础,而不仅仅只靠思考。他说到做到,在这一点上,吉尔伯特可以说是近代科学研究方法的开创者。

相比之下,人们对雷电的认识更早一些。在亚里士多德时代,人们对雷电的认识就比较科学了,认为雷的发生是由于大地上的水蒸气上升形成雷雨云,雷雨云遇到冷空气凝缩而变成雷雨,同时伴随强光出现。直到亚里士多德之后很久的1708年,英国人沃尔揭示了雷是由静电产生的。后来人们也认识到,闪电是电荷的轨迹。1748年,富兰克林基于同样的认识,设计了避雷针。他还于1747年提出,摩擦起电有正电和负电两种,正是他给出了静电中的正电和负电这两个名字。1746年,莱顿大学教授纽森布鲁克发明了一种存储静电的瓶子,这就是后来很有名的“莱顿瓶”。纽森布鲁克原本想像把水装入瓶子里那样把电装进瓶子里,他首先往瓶子里装上水,然后将一根金属丝的一头安装在玻璃棒上,另一头通到瓶子的水里。就在他的手接触到瓶子和玻璃棒的一瞬间,被重重地“电击”了一下。据说,他曾说过,即便国王命令他再做这个可怕的实验,他也不做了。1752年6月,富兰克林效仿在莱顿瓶里蓄电,做了一个用风筝把导线放到雷雨云里去的实验,试图验证雷雨云中的静电,结果发现雷雨云有时带正电,有时带负电的现象。这个有名的风筝实验,后来还被很多科学家效仿。1753年7月,俄罗斯科学家利赫曼在做风筝实验时,不幸遭电击身亡。1700年以后,电击疗法一度很流行,被用来治疗疾病。意大利博洛尼亚大学教授伽伐尼,在解剖青蛙时发现,手术刀一碰到青蛙腿上的肌肉,肌肉就痉挛。当时正是电击疗法盛行的时代,于是他认为青蛙肌肉痉挛的原因是电,他把它叫作“动物电”,并于1791年发表了论文《动物电》。意大利帕维亚大学教授伏打,在重做伽伐尼青蛙实验的过程中,对“动物电”产生了疑问。经过进一步研究,于1800年发表了论文《论不同异电物质接触起电问题》,阐明了两种不同金属接触带电的现象。通过用各种金属进行实验,他认为锌、铅、锡、铁、铜、银、金、石墨是一个金属系列。当这个金属系列中的两种金属相互接触时,系列中排在前面的金属带正电,排在后面的金属带负电。他把铜和锌作为两个电极,置于稀硫酸中,从而制成了伏打电池,电压的单位“伏(特)”就是用他的名字命名的。1820年,丹麦哥本哈根大学教授奥斯特,在一篇论文中公布了他的一个发现:把伏打电池连接在导线两端,在导线边上放上一个磁针,结果磁针马上发生了偏转,至此,人们发现了电能生磁。同年,法国的安培发现了关于电流周围产生磁场的方向问题的安培定律,电流的单位“安(培)”就是以他的名字命名的。随后的1831年,法拉第发现了具有划时代意义的电磁感应现象,电磁

学得到了飞速发展。另一方面,关于电路的研究也在进行。先是1820年,欧姆发现了导线两端的电压与其中的电流成正比的欧姆定律;然后1849年基尔霍夫又发现了关于电路网络的基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律,从而确定了电工学,并为后来的电气工程打下了基础。至此,人们已经发现了磁、静电、电磁感应等现象,发明了电池,随后电学的发展更加迅猛。

古代人们发现,当琥珀等与金属摩擦后,金属并不会带电。金属与金属接触或其他带电体与金属接触,甚至还没有触碰到,金属就能带电,但一旦分离开,金属便立即不再带电。金属这种与众不同的行为,说明金属是一种特殊性质的材料,用现在的科学知识解释,当然很简单:金属内部有大量可以移动的电子,即自由电子,一旦与其他物质摩擦,局部丢失或增添的电子会很快得到及时补偿或吸收,从而达到新的平衡,故摩擦后金属不会呈现带电状态。但是金属与其他带电体触碰,哪怕还没有接触到,金属内部自由电子受到其他带电体的吸引或排斥作用,致使局部不是电子聚集就是消散,呈现感应带电状态。但是一旦把其他带电体移开,自由电子马上恢复均匀分配状态,整个金属不再带电。由于当时人们不了解金属的构造,更不知道电子的存在,他们认为任何物质均是由正电流体和负电流体组成的,两种电流体数量相等,在系统中守恒,故整个物体呈电中性。玻璃和毛皮等内部的正、负电流体不能自由运动,要经过摩擦才能分开,从而带电,而金属内部的电流体可以自由运动,或被吸引或被排斥,从而使金属呈感应带电状态。1729年,格雷把电流体不能自由运动的材料称为绝缘体,把电流体可以自由运动的材料称为导体。随着科学的进步,人们认识到导体中真正存在的是电荷而不是所谓的电流体,但是格雷对材料的分类是正确的,即当时人们已经认识到了导体的存在,金属就是一种导体。后来人们又发现大地、水和人体都是导体,只是导电的程度不同而已。发现导体的意义重大,没有导体就没有后来的电气工程,更谈不上电子学。前面说过,奥斯特做过的接上伏打电池的导线其边上的磁针发生偏转的实验,引起了很多科学家的兴趣。法国物理学家安培做了进一步的实验,他把导线绕成很多圈,形成一个螺线管,并用它代替奥斯特实验中的环形导线重做奥斯特实验。结果发现,通有电流的螺线管的作用几乎同磁棒一模一样,若把钢针放到该螺线管内,钢针就会变成磁针。1820年,安培提出了一个大胆的设计:“电流有磁效应,即便是磁铁,产生磁效应的真正原因也是电流,只不过这些电流是在磁棒材料内部而已。”现在这个观点已被证实。至此,人们已经认识到电荷的运动产生电流,电流伴随磁效应,磁与电流是统一的,磁可以由电流产生。奥斯特和安培实验说明,两个通有电流的电线圈之间有相互作用力,利用这种作用力,可以设计电动机。1820年,第一台直流电动机诞生。电动机的诞生,开创了电气工业新时代。1831年,俄罗斯的西林格根据奥斯特的实验,把线圈和磁针组合起来,发明了电报机,这就是电报的开始。既然电能生磁,那么磁能不能生电呢?科学家们都在思考这个问题。1831年,英国化学家和物理学家法拉第做了一个著名的实验——电磁感应实验,这个实验证明了磁也能生电。

法拉第的电磁感应实验分两个步骤,首先他用串入一个检流计的导线把一个螺线管短路,然后将一个磁棒插入螺线管,检流计检测出短路线里有电流,当磁棒停止不动时,短路线里的电流也消失了。这说明磁场变化时,在螺线管里感应出电流,但是螺线管两端是短路的,短路线两端没有电位差,那么感应电流又是怎么被驱动的呢?法拉第认为,磁场变化感应出的是电位差而不是电流。为了证明这个设想,法拉第又做了另一个实验。他把

短路线断开，这时是不会有电流的，然后将磁棒插入和拔出螺线管，结果发现螺线管两端有电位差。如果把短路线接通，短路线里出现电流。这说明磁场变化感应出的是电位差，而不是电流，是感应电位差产生的感应电流，人们把感应电位差称作感应电动势。由此，法拉第证明了磁也能生电。法拉第电磁感应定律可以归纳如下：“只要线圈中的磁场变化就能在线圈两端感应出电动势。导体切割磁力线或者磁力线切割导体，都会在导体两端产生感应电动势。”发电机的工作原理就是法拉第电磁感应定律。

1840年前后，惠斯通已开始考虑海底电缆的问题。1845年，英吉利海峡海底电报公司成立，开始了从英国到加拿大，跨过多佛尔海峡到达法国的海底电缆敷设工程。1851年，最早的加来多佛尔海底电缆敷设完毕，并成功地实现了通信。现在世界的大海里仍遍布着用于通信的电缆。

我们现在可以从电视上看到世界各个地区发生的各种事情，这都归功于人类发现了电磁波。1888年，德国的赫兹做了最早的电磁波实验，弄清了电磁波和光一样具有直线传播、反射和折射现象，频率的单位赫(兹)就是以他的名字命名的。意大利的马可尼读了赫兹的电磁波实验文章后，于1895年研制出了最早的电磁波无线装置，并在大约3公里的距离内进行了莫尔斯信号通信的实验，实验成功后，他创办了无线电报和信号公司。1899年，跨越多佛尔海峡的无线通信成功。1901年，又成功地在距离英国2700公里的纽芬兰收到了莫尔斯信号。要实现无线通信，首先要产生稳定的高频电磁波。达德尔采用线圈和电容器构成的电路产生了高频信号，但频率不高，只有不到50 Hz，电流也较小，只有2~3 A。1903年，荷兰的包鲁森利用酒精蒸汽电弧放电，产生了1 MHz的高频波。彼得森又对其进行了改进，制成了输出功率达到1 kW的装置，其后德国制造出了机械式高频发生器，美国的特斯拉和费森登、德国的戈尔德施米特等人开发出了用高频交流机产生高频波的方法等。1906年，美国通用电气(GE)公司的亚历山德森制成了80 kHz的高频信号发生装置，首次成功地进行了无线电话实验。用无线电话传送语音，并且要收听它，这就需要有用发送高频信号的发生装置和用于接收的检波器。费森登在1913年设计了一种外插式接收装置，并试验成功。达德尔设计出了以包鲁森电弧发送器为发送装置、以电解检波器为接收装置的受话器，但是由于当时都是采用火花振荡器，噪声很大，所以虽然实验阶段很成功，但离实用化还很远。要想使产生的电波稳定，接收到的噪声小，那还要等到电子管的出现。

电子管的发明是按照二极管—三极管—四极管—五极管的顺序开发出来的。1883年，爱迪生发现从电灯泡的热灯丝上飞溅出来的电子把灯泡的一部分都熏黑了，这种现象被称为爱迪生效应。1904年，英国人佛来明受到“爱迪生效应”的启发，发明了二极管并用它来进行检波。1907年，美国的D·弗雷斯特在二极管的阳极和阴极之间加了一个叫栅极的电极，构成了三极管。这种三极管既可用于放大信号电压，也可配以适当的反馈电路产生稳定的高频信号，可以说是一个划时代的电路元件。三极管经过进一步的改进，能够产生短波、超短波等高频信号。此外，三极管的控制栅极具有控制阴极电子流的功能，随后的阴极射线管和示波器与此有密切的关系。由于当时的真空技术尚不成熟，所以三极管的制造水平也不高，但是在反复的改进过程中，人们知道了三极管具有放大作用，终于拉开了电子学的序幕，振荡器也从马可尼火花装置发展到三极管振荡器。1915年，英国的郎德在三极管的控制栅极与阳极之间又加了一个电极，称为帘栅级，其作用是解决三极管中流向阳

极的电子流中有一部分会流到控制栅极去的问题。1927年,约布斯特在阳极与帘栅极之间又加了一个电极,称作抑制栅,发明了五极管。这个新加的电极的作用,是为了抑制四极管中电子流撞到阳极上时阳极产生二次电子发射。1934年,美国的汤姆森通过对电子管进行小型化改进,发明了适用于超短波的橡实管。1937年,发明了不用玻璃而采用金属的ST管。1939年,发明了经过小型化后的MT管。

第二次世界大战后,由于半导体技术的进步,电子学得到令人瞩目的发展。1948年,美国贝尔实验室的肖克莱、巴丁、布莱特发明了用半导体材料制作的晶体管。这种晶体管使用了两根金属丝与低掺杂锗半导体表面接触,称为点接触型晶体管。这种半导体器件使得人们能够对固体单晶内部的两种载流子进行控制,从而实现电流和电压的放大功能,三位科学家因此获得了1956年的诺贝尔物理学奖。1949年,开发出了结型晶体管,在实用性方面前进了一大步。1956年,开发出了制造P型和N型半导体的扩散法,它是在高温下,将杂质原子渗透到半导体表层的一种方法。1960年,开发出了外延生长法,并制成了外延平面型晶体管。外延生长法是把硅晶体放在氢气和卤化物气体中来制造半导体的一种方法。半导体技术的这些发展,推动了集成电路的诞生。

大约在1956年,英国的达马就从晶体管原理预想到了集成电路的出现。1958—1959年,美国德克萨斯仪器公司的科尔比和仙童半导体公司的诺依斯共同发明了集成电路。他们把许多器件、电路元件和连接线做在同一片小硅片上,大幅度缩小了电子系统的体积,降低了功耗,提高了可靠性,减少了成本,科尔比因此获得了2000年诺贝尔物理学奖。1961年,德克萨斯仪器公司开始批量生产集成电路。集成电路把具有某种功能的,包含元器件和连接导线在内的整个电路制作在半导体晶体里,电路和器件的合一意味着人们有能力将整个电子系统全部集成到一片小硅片上。1971年,Intel公司制成了微处理器芯片,并广泛应用于包括计算机在内的各种电子系统中,从而引发了信息工业的深刻革命。集成电路发展到现在已经达到了器件、电路和系统的合一,进入了系统芯片(SoC)时代。到了2007年,Intel公司采用45纳米工艺制成了4核微处理芯片Xeon,其上集成了超过8亿个晶体管,主时钟工作频率超过3GHz。利用这种芯片可以制作专业水平的电影,可以通过Internet传送电视等视频信号,也可进行实时的视频和通话,因此,这种芯片是典型的SoC。

1799年,伏打在铜片与锌片之间夹入一层浸透盐水或碱水的厚纸,再把它们一层一层相间叠放在一起,制成了“伏打电堆”。“电堆”的意思是,把许多单个电池单元高高地相间堆在一起。从铜片和锌片上分别引出导线,发现两条导线一条带正电,另一条带负电,彼此间有电位差。伏打把这两条导线短路,放电过程会持续进行。短接的导线会发热,如果导线较细还会熔化。对于短路放电过程中损失的电荷,电池会源源不断地补充新电荷,使短路后的正、负电极保持一定的电位差。伏打电池和短路线所构成的回路,是人类历史上第一个电路。

一次放电完成后,不能再用的电池称为一次电池。伏打对伏打电堆做了改进,制成了伏打电池。1836年,英国的丹尼尔在陶瓷桶里放入阳极和氧化物,制成了与伏打电池相比能够长时间提供电流的丹尼尔电池。1868年,法国的勒克朗谢公布了勒克朗谢电池。1885年(明治18年),日本的尾井先藏发明了尾井干电池,它是一种把电解液吸附在海绵里的特殊电池,具有运输方便的特点。1917年,法国的费里发明了空气电池。1940年,美国的鲁宾发明了水银电池。

放完电，还能够充电再用的电池称为二次电池。1859年，普朗泰发明了能够反复充电使用的铅蓄电池，其结构是在稀硫酸中装有铅电极，这是最早的二次电池，现在汽车里使用的就是这种类型的电池。1897年(明治30年)，日本的岛津源藏开发出了具有 $10\text{ A}\cdot\text{h}$ 容量的铅蓄电池，并用他名字的字头GS作为商品名称投放市场。1899年，瑞典的容纳制成了容纳电池。1905年，爱迪生制成了爱迪生电池。这些电池的电解液，都用的是氢氧化钾，后来就被称为碱性电池。1948年，美国的纽曼发明了镍镉电池，这是一种能充电的干电池，是具有划时代意义的电池。1939年，英国人格罗夫发现氧和氢的反应中有电能产生，并由实验证明了燃料电池的可能性，从外部给阳极一侧送入氧，给阴极一侧送入氢，就能够产生电和水。1958年，英国剑桥大学制成了 5 kW 的燃料电池。1965年，美国GE公司成功地开发出了燃料电池，这个电池就安装在1965年的载人宇宙飞船双子星5号上，用于供给宇航员饮水和飞船电能。1969年，登上月球的阿波罗11号飞船上，也使用了燃料电池作为飞船的内电源。1873年，德国人西门子用硒和铂丝制成了光电池，照相机曝光计中所用的就是这种硒光电源。

太阳能电池又称为“太阳能芯片”或“光电池”，是一种利用太阳光直接发电的光电半导体薄片。它只要满足一定照度的光照条件，瞬间就可输出电压及在有回路的情况下产生电流，在物理学上称为太阳能光伏(Photovoltaic, PV)，简称光伏。太阳能电池是通过光电效应或者光化学效应直接把光能转化成电能的装置，以光电效应工作的晶硅太阳能电池为主流，而以光化学效应工作的薄膜电池湿式太阳能电池则还处于萌芽阶段。早在1839年，法国科学家贝克雷尔(Becquerel)就发现，光照能使半导体材料的不同部位之间产生电位差，这种现象后来被称为“光生伏特效应”，简称“光伏效应”。1954年，美国科学家恰宾和皮尔松在美国贝尔实验室首次制成了实用的单晶硅太阳能电池，诞生了将太阳光能转换为电能的实用光伏发电技术。这种元件当太阳光或灯光照到它的PN结上时，就能产生电能，被广泛用于人造卫星、太阳能汽车、钟表、台式计算器等。提高这种元件转换效率的研究与开发工作，一直都在进行之中。现在光伏发电已被世界各国广泛应用，中国光伏发电的装机容量规划为2020年达到20GW。

截至2015年底，中国光伏发电累计装机容量达到约4300万千瓦，超过德国成为全球第一，中国已经成为世界上最大的利用光伏发电的国家。农村很多地区的家庭利用太阳能发电，除了供自己家庭使用外，多余的电能还能存储起来并入公共电网，用于其他地区的供电。

英国化学家戴维把2000个伏打电池连在一起，进行了电弧放电实验。戴维的实验是在正负电极上安装上木炭，通过调整电极间距离使之产生放电而发出强光，这就是电用于照明的开始。1860年，英国人思旺把棉线碳化后做成灯丝装入玻璃泡里，发明了炭丝灯泡。由于当时的真空技术不高，点灯时间一长，灯丝就会在灯泡里氧化烧掉。1865年，施普伦格尔为研究真空现象而发明了水银真空泵。思旺得知后，利用这一技术于1878年把玻壳内的真空度提高，同时又对灯丝进行了改进。他把棉线用硫酸处理，然后再碳化，最后公布了思旺灯泡，思旺的白炽灯曾在巴黎万博会上展出。1879年，美国的爱迪生把白炽灯的寿命成功地延长到了40个小时以上。1880年，爱迪生发现竹子能做灯丝，若干年后，他用日本八幡的优质竹子制造出了灯丝。1882年，他在伦敦和纽约成立了爱迪生电灯公司，制造这种竹灯丝灯泡。1886年(明治19年)，日本东京电灯公司成立，一般的家庭开始用上了白炽灯泡。1910年，美国的库利奇发明了钨丝灯泡。1913年，美国的兰米尔发明了充气钨

丝灯泡。1925年,日本的不破橘三发明了内壁磨砂灯泡。1931年,日本的三浦顺一发明了双螺旋钨丝灯泡。正是由于这种不断的探索,今天的人们才能享受到白炽灯照明的日常生活。1902年,美国的休伊特在玻壳内装入水银蒸汽,发明了弧光放电汞灯。由于这种灯可以发出紫外线,所以常作为杀菌灯使用。现在广泛使用于广场照明和道路照明的高压汞灯发出的光是一种混合灯光,包括水银电弧放电的光和紫外线照在涂敷于玻壳内壁的荧光材料上所发出的光。1932年,荷兰飞利浦公司开发出了波长为 590 nm 单色光的钠灯,这种灯广泛用于道路、隧道照明。1938年,美国的纽曼发明了现在广泛使用的荧光灯,这种灯通过用水银电弧放电发出的紫外线,照射涂敷在灯管内壁的不同荧光粉而发出不同颜色的光,通常白色荧光灯用的最多。最早应用半导体 PN 结发光原理制成的 LED 光源,问世于 20 世纪 60 年代初,当时所用的材料是 GaAsP,发红光。1969 年开发出第一盏 LED 灯(红色),1976 年开发出绿色 LED 灯,1993 年开发出蓝色 LED 灯,1999 年开发出白色 LED 灯。2000 年 LED 应用于室内照明,LED 的开发是继白炽灯照明发展历史一百多年以来的第二次革命,是继爱迪生发明电灯泡以来,重新开始的巨大光革命。LED 照明灯,主要是以大功率白光 LED 单灯为主。LED 太阳能路灯、LED 投光灯、LED 吊顶灯、LED 日光灯都已经可以批量生产,越来越多 LED 节能灯已经进入平常百姓家。

电动机的起源是 1820 年奥斯特所发现的电能生磁的电磁作用。1831 年法拉第发现的磁能生电的电磁感应,则是发电机和变压器的起源。1832 年,法国人毕克西发明了手摇式直流发电机,其原理是通过转动永磁体使磁通发生变化,从而在线圈中产生感应电动势,并把这种电动势以直流电压形式输出。1866 年,德国的西门子发明了自励式直流发电机。1869 年,比利时的格拉姆制成了环形电枢,发明了环形电枢发电机。这种发电机是用水力来转动发电机转子的,在经过反复改进后,这种发电机于 1874 年得到了 3.2 kW 的输出功率。1882 年,美国的戈登制造出了输出功率达 447 kW、高 3 米、重 22 吨的两相式巨型发电机。由于爱迪生坚持只做直流方式的发电机,所以美国的特斯拉在爱迪生公司时,就把两相交流发电机的专利权卖给了西屋公司。1896 年,特斯拉的两相式发电机在尼亚加拉发电厂开始运行,3750 kW、5000 V 的交流电一直送到 40 km 外的布法罗市。1889 年,西屋公司在俄勒冈州建设了发电厂,1892 年成功地将 15 000 V 电压送到了皮茨菲尔德。1834 年,俄罗斯的亚科比试制出了由电磁铁构成的直流电动机,1838 年这种电动机曾开动了一艘船,电动机电源用了 320 个电池。此外,1836 年美国的达文波特和英国的戴比德逊也造出了直流电动机。由于这些电动机都以电池作为电源,所以都未能广泛普及。1887 年特斯拉两相电动机,作为实用化感应电动机的发展计划开始启动。1897 年西屋公司制成了感应电动机,设立了专业公司致力于电动机的普及。两相交流电是用四根电线输电的技术。德国的多勃罗沃尔斯基在绕组上找到了窍门,即从绕组上每隔 120° 的三个地方引出抽头,得到了三相交流电。1889 年,他利用这种三相交流电的旋转磁场,制成了功率为 100 W 的三相交流电动机。同年,多勃罗沃尔斯基又开发出了三相四线制交流接线方式,并在 1891 年的法兰克福输电实验(1500 VA 三相变压器)中获得了圆满成功。

发电端在往外输送交流电时,先要把交流电压升高,到了用电端再把送来的交流电压降低,因此变压器是必不可少的。1882 年,英国的吉布斯获得了“照明与动力用配电方式”专利,其内容就是将变压器用于配电,当时所用的变压器是磁路开放式变压器。西屋公司引进了吉布斯的变压器,经过研究于 1885 年开发出了实用的变压器。在此前一年的 1884

年,英国的霍普金森制成了闭合回路变压器。

随着电学的发展,电路理论也在不断地发展。1853年,汤姆逊(即开尔文勋爵)采用电阻、电容和电感的电路模型分析了莱顿瓶的放电过程,得出电振荡频率。同年,亥姆霍兹提出电路中的等效发电机定理。1850—1855年,欧洲建成了英国、法国、意大利、土耳其之间的海底电报电缆。电信号经过远距离的电缆传送,产生了信号的衰减、延迟、失真等现象。1854年汤姆逊发表了电缆传输理论,并分析了这些现象。1857年,基尔霍夫考虑到架空传输线与电缆不同,得出了包括自感系数在内的完整的传输线及电流方程式,称为电报员方程或基尔霍夫方程。至此,包括传输线在内的电路理论基本建立起来了。1880年,英国人J·霍普金森提出了形式上与欧姆定律相似的计算磁路的定律。19世纪末,交流电技术的迅速发展促进了交流电理论的建立。1893年,C·P·施泰因梅茨提出分析交流电路的复数符号法(相量法),采用复数表征正弦方式的交流电,简化了交流电的计算。瑞士数学家J·R·阿尔甘提出的矢量图,也成为分析交流电路的有力工具。这些理论和方法,都为此后电路理论的发展奠定了基础。

法拉第认为电磁间的相互作用是一种“临近效应”,并以有限的速度向外延拓,直至充满整个空间,故这种作用是通过某种媒质传递的,法拉第称这种媒质为“场”。英国数学家和物理学家开尔文,进一步发展了法拉第的思想,他认为电磁现象与弹性现象类似,在空间甚至真空中,处处充满着一种连续的、没有质量但有弹性的媒质,称为“以太”。可见,开尔文的“以太”就是法拉第的“场”,相互作用是在“场”中传播的,即在“以太”中传播的。人们发现在电力和电信系统中,长线电路的许多现象用电路观点是无法解释的,线上的电流和电压似乎是以波的形式传播的。基尔霍夫研究了电扰动在长线上的传播,发现其传播速度等于光速。苏格兰物理学家麦克斯韦深受法拉第、开尔文和基尔霍夫的影响,总结了当时所发现的种种电磁现象的规律,将它描述成为麦克斯韦方程组。麦克斯韦认为,电磁现象在“场”中的传播,酷似电压和电流在长线中的传播,但缺少一个和法拉第电磁感应定律相对应的方程。既然磁场变化能感应出电场,同样也应有电场变化感应出磁场,于是大胆地提出位移电流的假设。补充了这个方程后,可以导出电磁现象不仅是距离的函数还是时间的函数,它们之间的作用以波的形式传播,其速度等于光速。麦克斯韦预见了电磁波的存在,为电路理论奠定了坚实的基础。德国物理学家赫兹为了证明麦克斯韦预言的电磁波的存在,做了一个有趣的实验。他发现在感应线圈进行火花放电时,放在附近的线圈也发生放电,他认为这是共振效应。接着,赫兹又在距离感应线圈足够远的地方放置了一个共振偶极子,结果当感应线圈放电时,那个偶极子也放电,由于距离足够远,因此只可能是电磁波起了作用。1888—1889年,赫兹公布了他的实验,证明了电磁波的存在和麦克斯韦方程的正确性。进入20世纪,英国工程师O·亥维赛提出阻抗的概念,还提出了求解电路瞬态过程的运算方法。1918年,福台克提出了对称分量法,这一方法简化了不对称三相电路的分析,至今仍为分析三相交流电机和电力系统不对称运行的常用方法。1920年,G·A·坎贝尔和K·瓦格纳研究了梯形结构的滤波电路。1924年,R·M·福斯特提出电感电容二端网络的电抗定理,此后便建立了由给定频率特性设计电路的网络综合理论。1925年,英国人贝尔德首先发明电视,几乎同时,美国无线电公司的工程师滋沃雷金发明了电视显像管。1933年,他利用真空二极管、三极管和显像管发明了最早的电视机,1936年,黑白电视机问世。电子管的发明推动了电子电路技术的迅速发展。1932年,瑞典人H·奈奎斯特提出了由反馈电路的开环传递函数的频率特性,作为判断系统稳定性的依据。1945年,美国人H