

21

高等学校电子信息类“十二五”规划教材

电路分析基础

(第四版)

张永瑞 编著

DIANLU FENXI JICHU



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

高等学校电子信息类“十二五”规划教材

电路分析基础

(第四版)

张永瑞 编著

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

《电路分析基础(第四版)》是作者结合 40 余年的教学经验,并参考国内外同类优秀教材好的编写理念,精心修编的一本适应当代电子科技发展需要的著作。该书内容符合教育部修订颁布的《高等工业学校电路分析基础课程教学基本要求》。

本书共 7 章,主要内容包括电路的基本概念、电阻电路分析、动态电路时域分析、正弦稳态电路分析、互感与理想变压器、电路频率响应和二端口网络。

本书基本概念讲述清晰,基本分析方法讲解透彻,步骤明确,举例联系实际,经典内容取舍合理,新器件、新方法介绍适度;每节后的思考题能启发读者深思联想,帮助读者深刻理解概念;每章后的习题难易度适中,方便读者习作;各章小结归纳提纲挈领,主次点鲜明,易于读者掌握。

本书可作为通信工程、电子信息工程、电子科学与技术、自动化、测控技术与仪器、计算机科学与技术等专业的各类本科生教材,也可供电子类专业的工程技术人员参考。

为便于教师施教和读者学习,与本书配套的教学指导书——《〈电路分析基础(第四版)〉实验与学习指导》也由西安电子科技大学出版社出版。

★ 本书配有电子教案,需要者可登录出版社网站,免费下载。

图书在版编目(CIP)数据

电路分析基础/张永瑞编著. —4 版. —西安:西安电子科技大学出版社,2013.4
高等学校电子信息类“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5606-2869-1

I. ① 电… II. ① 张… III. ① 电路分析—高等学校—教材 IV. ① TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 160403 号

责任编辑 王 瑛 云立实

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 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2013 年 4 月第 4 版 2013 年 4 月第 41 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 22.5

字 数 529 千字

印 数 313 001~321 000 册

定 价 39.00 元

ISBN 978-7-5606-2869-1/TM·0097

XDUP 3161004-41

* * * 如有印装问题可调换 * * *

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

前 言

在当今信息化社会，无论是家庭生活中使用的大、小家用电器，还是工农业生产中使用的各种自动控制生产线，或是科学研究中使用的各种精密实验仪器、测量系统、计算机网络等，无处不用电路。具体说，人们听收音机、看电视、打电话要用电路，工厂自动生产线的控制要用电路，航天器（比如我国的嫦娥三号、神七、神八）飞天的控制、水下核潜艇的潜与浮的控制、汶川地震及玉树泥石流大灾后生命探测与搜救等都广泛使用着电路。对于当代大学生，特别是通信工程、电子信息工程、电子科学与技术、自动化等专业的大学

生，学习好电路具有十分重要的意义。

电路的发展源远流长，我们在学习电路的首节课时，就应当缅怀对电路的发展做出杰出贡献的科学家。简明回顾他们的学术成就，学习他们重实验观察现象，学习他们归纳总结、理论升华的严谨的科学研究态度。

法国科学家库仑，1785年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——库仑定律，这是人类在电磁现象认识上的一次飞跃。意大利科学家伏特，1800年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，这一发明具有划时代的意义，引起了电磁学的一场革命。法国物理学家安培，1825年提出了著名的安培定律，他从1820年开始测量电流的磁效应，从中发现两个载流导线可以相互吸引又可以相互排斥，这一发现成为研究电学的基本定律，为电动机的发明做了理论上的准备。德国物理学家、数学家欧姆，1826年发表了《电路的数学研究》，文中第一次出现欧姆定律公式，时至今日，中外电路教科书中无一例外地都保留、讲授这一精辟的电学定律。英国物理学家法拉第，1831年发现了电磁感应现象，他坚信既然电能产生磁，那么磁也能产生电，最终他发现在线圈内运动的磁体可以在导线中产生电流，这一发现成为发明、制造发电机和变压器的理论根据，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。1840年，英国物理学家焦耳把环形线圈放入装水的试管内，测量不同电流强度和电阻时的水温，通过这一实验，他发现：导体在一定时间内放出的热量与导体的电阻及电流强度的平方之积成正比。四年之后，俄国物理学家楞次公布了他的大量实验结果，从而进一步验证了焦耳关于电流热效应之结论的正确性。因此，该定律称为焦耳—楞次定律。德国物理学家基尔霍夫，以他对光谱分析、光学和电学的研究著名。基尔霍夫给欧姆定律下了严格的数学定义，在23岁他还是大学生的时候就提出了著名的电流定律和电压定律，这成为集总参数电路分析最根本的理论依据。德国物理学家赫兹1886年10月，用放电线圈做火花放电实验，偶然发现近旁未闭合的绝缘线圈中有电火花跳过，便敏锐地想到这可能是电磁共振，从而证实了电磁波的存在。赫兹在1887年发表的题为《论在绝缘体中电过程引起的感应现象》的论文中，全面验证了麦克斯韦的电磁理论的

正确性。法国电报工程师戴维宁 1883 年发表在法国科学院刊物上仅一页半的论文，成就了一个重要的电路定理，即戴维宁定理。该定理的对偶形式 50 年后由美国贝尔电话实验室工程师 E. L. Norton 提出，即诺顿定理。

进入 21 世纪以来，随着新理论、新材料、新工艺、新技术的涌现，计算机科学与技术得到了飞速的发展，特别是网络技术、多媒体技术、嵌入式系统、人机交互、软件安全等新技术的出现、融合与应用，使得现代的信息化社会更加灿烂辉煌，使得“千里眼、顺风耳”、“九天揽月、五洋捉鳖”、“一个跟斗十万八千里”这些神化幻想小说中描述的梦想在当今都成为了现实。电子科技在飞速发展，作为工科高等院校培养的学生应能尽快适应形势需求。作为专业基础课，经典内容如何取舍，新理论、新技术、新的分析方法又如何增加在新版教材中？加进多少？讲授的深浅度？这些的确是很难把握的事情。不过，这一工作必须进行探索。我们在国家电工电子基地建设，对电路分析基础课程进行了多种形式的改革试点，也取得了许多有益的经验及一些值得吸取的教训。

鉴于上述的背景与理由，作者形成以下修编思路：

(1) 精选课程经典内容。对于一些经几十年甚至上百年实践检验和几代人共识的经典理论，作为后人的我们应充分“享受”先人给我们留下的这些成果，而不必什么都刨根问底、追溯源头，才肯认定结论正确。比如说，对于欧姆定律、基尔霍夫定律，不必要再去做实验验证，没必要再去从自由电子运动碰撞原子、离子受阻碍来解释欧姆定律，也没必要再从电荷守恒、能量守恒来解释基尔霍夫电流定律、电压定律，而只要明确先人给我们的结论是什么，如何用，应用中需注意些什么。新版教材中应该强调的是这些方面。

(2) 加强思考引申的问题，删去第三版书中类型与习题有重复的练习题。正文的讲解不可能面面俱到，但对一个问题的深入理解，可以多角度观察，可以逆向思维，可以联想，也可以“突发奇想”，提出这样、那样的问题，供读者思考。在新版教材中，我们在这方面做了更多的努力。

(3) 遵循“先易后难、循序渐进、突出重点、削枝强干”的原则；强调基本概念、基本分析方法、基本技能的训练，不追求太多的技巧性；对核心知识点讲深讲透，注重物理概念的定性解释，对必要的数学定量推导，交待清楚思路，推导过程简明扼要，结论醒目，便于读者掌握及使用。

(4) 基本概念讲述清晰，文字表述通俗易懂，基本分析方法讲解透彻，步骤明确，举例联系实际，便于读者仿效演练；对重要的定理阐述简练，应用范围、条件明确，使用中应注意的问题，结合编者几十年的教学体会归纳详尽；对经典内容取舍合理，新器件、新方法介绍适度。

(5) 新版教材增加了二端口网络一章。这主要考虑到集成电路发展迅速，许多实用的电路都是被集成在一小块芯片上加以封装而成的，其内部对使用者来说就是一个黑盒子，人们更关注的是端口上的电压、电流关系及其所表现出来的外部性能。这一章主要讲授二端口电路的常用参数、方程、连接、等效、特性阻抗及其匹配等一些重要的概念。

为配合读者掌握本书内容，作者提供了 MATLAB 软件简介及利用该软件分析电路的一些实例，有兴趣的读者可登录出版社网站免费下载。

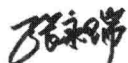
本书带 * 号的章节, 视各院校各专业教学计划的学时数等要求, 施教教师可作取舍。实施完全书内容大约需 65 学时。

为了便于教师施教和读者学习, 与此书配套的《〈电路分析基础(第四版)〉实验与学习指导》一书也将出版, 欢迎广大读者选读。

本书承蒙全国高等学校电路和系统教学与教材研究会副主任、国家级精品课程“电路”负责人、西安交通大学博士生导师罗先觉教授审阅, 罗教授仔细审阅并提出了许多宝贵的意见, 谨致以衷心的感谢! 本书在编辑中得到了云立实副编审及责任编辑王瑛的热情帮助, 在此表示诚挚的谢意。还要感谢多年来使用《电路分析基础(第三版)》, 并对本书的编写提出许多建设性意见的诸位老师, 以及本书所列参考文献的诸位作者, 是他们的好教材为我提供了丰富的资料, 是他们好的编写理念使我在写这本拙作中受益匪浅。

由于编著者水平有限, 加之编写时间紧迫, 所以书中难免存在不足或错误之处, 恳请广大读者批评指正。

编著者



2012 年 3 月于西安电子科技大学

常用符号表

符 号	中文表义	符 号	中文表义
q	电荷	G, g	电导
ϕ 或 Φ	磁通	L	电感
φ	相位差	C	电容
ψ 或 Ψ	磁链	M	互感
ψ	初相位	Z	阻抗
$i(t)$ 或 i	电流瞬时值	Z_{f1}	次级回路向初级回路的反映阻抗
I	直流电流；交流电流的有效值	Z_{f2}	初级回路向次级回路的反映阻抗
\dot{I}	正弦交流电流的有效值形式相量	Z_{in}	输入阻抗
I_m	正弦交流电流的振幅值	Z_{out}	输出阻抗
\dot{I}_m	正弦交流电流的振幅值形式相量	Z_L	负载阻抗
$u(t)$ 或 u	电压瞬时值	\mathbf{Z}	二端口网络 z 参数常数矩阵
U	直流电压；交流电压的有效值	Z_c	二端口电路的特性阻抗
\dot{U}	正弦交流电压的有效值形式相量	Z_{c1}	二端口电路输入端口的特性阻抗
U_m	正弦交流电压的振幅值	Z_{c2}	二端口电路输出端口的特性阻抗
\dot{U}_m	正弦交流电压的振幅值形式相量	Z_T	二端口网络的传输阻抗；转移阻抗
$p(t)$ 或 p	功率瞬时值	X	电抗
P	直流功率；交流功率的平均功率或有功功率	X_L	感抗
Q	无功功率；品质因数	X_C	容抗
\tilde{S}	复功率	X_{f1}	次级回路向初级回路的反映电抗
S	视在功率	X_{f2}	初级回路向次级回路的反映电抗
λ	功率因数	Y	导纳
$w(t)$ 或 w	瞬时能量	\mathbf{Y}	二端口网络 y 参数常数矩阵
W	直流能量	Y_T	二端口网络的传输导纳；转移导纳
W_{Lav}	电感 L 的平均储能	Y_{in}	输入导纳
W_{Cav}	电容 C 的平均储能	Y_{out}	输出导纳
R, r	电阻	f	频率
R_s	电源内阻	f_c	截止频率
R_L	负载电阻	f_{c1}	下截止频率
R_{in}	输入电阻	f_{c2}	上截止频率
R_o	输出电阻	f_0	谐振频率
R_0	戴维宁等效电源内阻	ω	角频率
		ω_c	截止角频率

符 号 中文表义

ω_{c1}	下截止角频率
ω_{c2}	上截止角频率
BW	通频带宽度
ω_0	谐振角频率
ρ	特性阻抗
A	放大倍数
\mathbf{A}	二端口网络 a 参数常数矩阵
K_u	二端口网络电压传输比; 电压转移比
K_i	二端口网络电流传输比; 电流转移比
τ	时间常数
$y(t)$	电路响应; 电路输出
$y_h(t)$	自由响应; 固有响应
$y_p(t)$	强迫响应
$y_r(t)$	暂态响应
$y_s(t)$	稳态响应

符 号 中文表义

$y_x(t)$	零输入响应
$y_f(t)$	零状态响应
$y(0_+)$	响应在换路后瞬间的数值, 即一阶电路的初始值
$y(\infty)$	响应在换路后 $t=\infty$ 时的数值, 即直流激励一阶电路的稳态值
$\epsilon(t)$	单位阶跃函数
$g(t)$	单位阶跃响应
$H(j\omega)$	网络函数
\mathbf{H}	二端口网络 h 参数常数矩阵
OL	欧姆定律
KCL	基尔霍夫电流定律
KVL	基尔霍夫电压定律
KL	基尔霍夫定律
VAR	伏安关系
VCR	电压电流关系

目 录

第 1 章 电路的基本概念	1	1.9 受控源与含受控源电路的分析	44
1.1 电路模型	1	1.9.1 受控源定义及其模型	44
1.1.1 实际电路的组成与功能	1	1.9.2 含受控源电路的分析	46
1.1.2 电路模型	2	思考题	48
思考题	4	1.10 小结	48
1.2 电路变量	4	习题 1	52
1.2.1 电流	4	第 2 章 电阻电路分析	57
1.2.2 电压	5	2.1 支路电流法	57
1.2.3 电功率	8	2.1.1 支路电流法	58
思考题	10	2.1.2 独立方程的列写	59
1.3 欧姆定律	11	思考题	63
1.3.1 欧姆定律	11	2.2 网孔分析法	63
1.3.2 电阻元件上消耗的功率与能量	12	2.2.1 网孔电流	63
思考题	13	2.2.2 网孔电流法	64
1.4 理想电源	14	思考题	69
1.4.1 理想电压源	14	2.3 节点电位法	69
1.4.2 理想电流源	16	2.3.1 节点电位	70
思考题	18	2.3.2 节点电位法	70
1.5 基尔霍夫定律	18	思考题	76
1.5.1 基尔霍夫电流定律(KCL)	19	2.4 叠加定理、齐次定理和替代定理	77
1.5.2 基尔霍夫电压定律(KVL)	21	2.4.1 叠加定理	77
思考题	25	2.4.2 齐次定理	80
1.6 电路等效	26	2.4.3 替代定理	81
1.6.1 电路等效的一般概念	26	思考题	83
1.6.2 电阻的串联与并联等效	27	2.5 等效电源定理	84
1.6.3 理想电源的串联与并联等效	33	2.5.1 戴维宁定理	84
思考题	36	2.5.2 诺顿定理	86
1.7 实际电源的模型及其互换等效	36	思考题	92
1.7.1 实际电源的模型	36	2.6 最大功率传输定理	93
1.7.2 实际电压源、电流源模型互换		2.6.1 最大功率传输问题	93
等效	37	2.6.2 最大功率传输定理	93
思考题	39	思考题	97
* 1.8 电阻 Π 、T 电路互换等效	40	2.7 小结	97
1.8.1 Π 形电路等效变换为 T 形电路	40	习题 2	100
1.8.2 T 形电路等效变换为 Π 形电路	42		
思考题	44		

第 3 章 动态电路时域分析	104	4.2 正弦交流电的相量表示法	157
3.1 电感元件和电容元件	104	4.2.1 复数的两种表示形式及四则运算 复习	157
3.1.1 电感元件	104	4.2.2 相量代表正弦交流电	158
3.1.2 电容元件	107	思考题	162
3.1.3 电感元件和电容元件的串并联 等效	110	4.3 基本元件 VCR 的相量形式和 KCL、KVL 的相量形式	163
思考题	112	4.3.1 R 、 L 、 C 的电压、电流关系的 相量形式	163
3.2 动态电路方程及其解	113	4.3.2 KCL、KVL 的相量形式	167
3.2.1 动态电路方程	113	思考题	169
3.2.2 动态电路方程解	114	4.4 阻抗与导纳	169
思考题	122	4.4.1 阻抗与导纳的概念	169
3.3 一阶动态电路的零输入响应、零状态 响应和全响应	122	4.4.2 阻抗和导纳的串联与并联等效	171
3.3.1 一阶电路的零输入响应	122	4.4.3 阻抗串联模型和并联模型的等效 互换	173
3.3.2 一阶电路的零状态响应	124	思考题	179
3.3.3 一阶电路的全响应	126	4.5 正弦稳态电路相量法分析	179
思考题	130	4.5.1 串、并、混联电路的分析	179
3.4 阶跃函数与阶跃响应	130	4.5.2 网孔、节点分析法用于正弦稳态 电路的分析	182
3.4.1 阶跃函数	130	4.5.3 等效电源定理用于正弦稳态 电路的分析	183
3.4.2 阶跃响应	132	思考题	186
思考题	134	4.6 正弦稳态电路的功率	186
* 3.5 二阶电路的零输入响应	134	4.6.1 基本元件的功率和能量	186
3.5.1 $\alpha > \omega_0$ ($R^2 > 4L/C$), 过阻尼 情况	136	4.6.2 一端口网络的功率	191
3.5.2 $\alpha = \omega_0$ ($R^2 = 4L/C$), 临界阻尼 情况	137	4.6.3 功率因数的提高	196
3.5.3 $\alpha < \omega_0$ ($R^2 < 4L/C$), 欠阻尼 情况	138	思考题	199
思考题	139	4.7 正弦稳态电路中的功率传输	199
3.6 正弦激励下一阶电路的响应	139	4.7.1 减小损耗和高效传输问题	200
3.6.1 正弦激励下一阶 RC 电路的全 响应	139	4.7.2 最大功率传输问题	200
3.6.2 一个重要结论	141	思考题	204
思考题	142	* 4.8 三相交流电路概述	204
3.7 小结	142	4.8.1 三相电源	204
习题 3	145	4.8.2 对称三相电路的计算	207
		4.8.3 不对称三相电路的计算	211
第 4 章 正弦稳态电路分析	151	思考题	213
4.1 正弦交流电的基本概念	151	4.9 小结	213
4.1.1 正弦交流电的三要素	151	习题 4	216
4.1.2 相位差	154		
4.1.3 有效值	155	第 5 章 互感与理想变压器	221
思考题	157	5.1 耦合电感元件	221

5.1.1 耦合电感的基本概念	221	6.4.2 频率特性	283
5.1.2 耦合电感线圈上的电压、电流 关系	223	6.4.3 通频带	285
思考题	228	思考题	289
5.2 耦合电感的去耦等效	228	6.5 小结	289
5.2.1 耦合电感的串联等效	228	习题 6	290
5.2.2 耦合电感的 T 形等效	229	第 7 章 二端口网络	295
思考题	232	7.1 互易定理	295
5.3 含互感电路的相量法分析	233	7.1.1 互易性	295
5.3.1 含互感电路的方程法分析	233	7.1.2 互易定理	296
5.3.2 含互感电路的等效法分析	234	思考题	301
思考题	239	7.2 n 端网络与 n 口网络	301
5.4 理想变压器	240	思考题	302
5.4.1 理想变压器的三个理想条件	240	7.3 二端口网络的方程与参数	302
5.4.2 理想变压器的主要性能	241	7.3.1 Z 方程与 z 参数	302
思考题	246	7.3.2 Y 方程与 y 参数	305
5.5 实际变压器模型	247	7.3.3 A 方程与 a 参数	306
5.5.1 空芯变压器	247	7.3.4 H 方程与 h 参数	307
5.5.2 铁芯变压器	250	思考题	311
思考题	253	7.4 二端口网络的连接	311
5.6 小结	253	7.4.1 串联	311
习题 5	254	7.4.2 并联	312
第 6 章 电路频率响应	259	7.4.3 级联	313
6.1 网络函数与频率响应	259	7.4.4 二端口网络连接有效性检验	314
6.1.1 网络函数	259	思考题	316
6.1.2 网络频率特性	260	7.5 二端口网络的等效	317
思考题	261	7.5.1 二端口网络的 z 参数等效电路	317
6.2 常用 RC 一阶电路的频率特性	262	7.5.2 二端口网络的 y 参数等效电路	319
6.2.1 RC 一阶低通电路的频率特性	262	思考题	320
6.2.2 RC 一阶高通电路的频率特性	266	7.6 二端口网络函数与特性阻抗	320
思考题	268	7.6.1 策动函数	321
6.3 常用 rLC 串联谐振电路的频率 特性	268	7.6.2 转移函数	324
6.3.1 串联谐振	269	7.6.3 特性阻抗	327
6.3.2 频率特性	274	思考题	329
6.3.3 通频带	277	7.7 小结	330
思考题	279	习题 7	331
6.4 实用 rLC 并联谐振电路的频率 特性	280	部分习题参考答案	335
6.4.1 并联谐振	280	索引	341
		参考文献	348

第 1 章 电路的基本概念

学习“电路分析基础”课程，首先要掌握电路的基本概念。本章从建立电路模型、认识电路变量等最基本的问题出发，重点讨论理想电源、欧姆定律、基尔霍夫定律、电路等效等重要概念。本章末介绍了受控源。

1.1 电路模型

“模型”是现代各个自然学科、社会学科分析研究中普遍使用的重要概念。如，没有宽窄厚薄的“直线”是数学学科研究中的一种模型；不占空间尺寸却有一定质量的“质点”是物理学科研究中的一种模型。人们在分析研究某一实际装置时，也常采用模型化的方法，即先建立能反映该装置基本特性的模型，使问题得到合理简化，然后对该模型进行定量分析，以求得该装置的某些分析研究结果。研究电路问题也是如此，我们首先要建立电路模型，然后进行定量分析。

1.1.1 实际电路的组成与功能

在现代工农业生产、国防建设、科学研究以及日常生活中，使用着各种各样的电器设备，如电动机、雷达导航设备、计算机、电视机、手机等，广义上说，这些电器设备都是实际中的电路。

图 1.1-1 是一种简单的实际照明电路。它由 3 部分组成：①是提供电能的能源，简称电源，它的作用是将其他形式的能量转换为电能（图中干电池电源是将化学能转换为电能）；②是用电装置，统称其为负载，它将电源供给的电能转换为其他形式的能量（图中灯泡将电能转换为光能和热能）；③是连接电源与负载传输电能的金属导线，简称导线。图中 S 是为了节约电能所加的控制开关。需要照明时将开关 S 闭合，不需要照明时将 S 打开。电源、负载与连接导线是任何实际电路都不可缺少的 3 个组成部分。

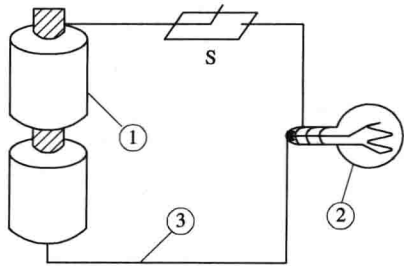


图 1.1-1 手电筒电路

实际电路种类繁多，但就其功能来说可概括为两个方面。其一，进行能量的传输、分配与转换。典型的例子是电力系统中的输电电路。发电厂的发电机组将其他形式的能量

(或热能、或水的势能、或原子能等)转换成电能,通过变压器、输电线等输送给各用户负载,在那里又把电能转换成机械能(如负载是电动机)、光能(如负载是灯泡)、热能(如负载是电炉)等,为人们生产、生活所利用。其二,实现信息的传递与处理。这方面典型的例子有电话、收音机、电视机、手机等中的电路。接收天线把载有语言、音乐、图像信息的电磁波接收后,通过电路把输入信号(又称激励)变换或处理为人们所需要的输出信号(又称响应),送到扬声器或显像管,再还原为语言、音乐或图像。

实际电路多种多样,具体的功能也各不相同,但它们有其共性,正是在这种共性的基础上,形成了电路理论这一学科。

1.1.2 电路模型

在实际电路中使用着各种电气元器件(又统称为电路部件),如电阻器、电容器、电感器、灯泡、电池、晶体管、变压器等。实际的电路部件虽然种类繁多,但在电磁现象方面却有许多共同的地方。譬如,电阻器、灯泡、电炉等,它们主要是消耗电能的,这样我们可用一个具有两个端钮的理想电阻来反映消耗电能的特征,当电流通过它时,在它内部进行着把电能转换为其他形式能量的过程。理想电阻的模型符号如图 1.1-2(a)所示。类似地,各种实际电容器主要是储存电能的,用一个理想的二端电容来反映储存电能的特征。理想电容的模型符号如图 1.1-2(b)所示。用一个理想的二端电感来反映储存磁能的特征。理想电感的模型符号如图 1.1-2(c)所示。

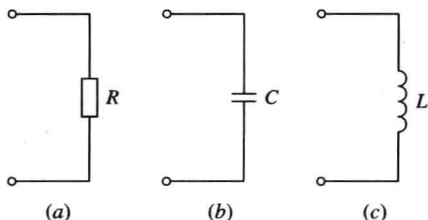


图 1.1-2 理想电阻、电容、电感元件模型

有了上述定义的理想电阻、理想电容、理想电感元件模型,对于任何一个实际的电阻器、电容器、电感器部件,都能用足以反映其电磁性能的一些理想元件模型或其组合来表示,构成实际部件的电路模型。譬如,灯泡、电炉、电阻器,都消耗电能,这些实际部件的电路模型都可用图 1.1-2(a)中的理想电阻 R 来表示。这样,就抽掉了这些实际部件的外形、尺寸等的差异性,而抓住了它们所表现出来的共性的东西,即消耗电能。再如一个实际的电感器,它是在一个骨架上用良金属导线绕制而成的,如图 1.1-3(a)所示。如果应用在低频电路里,主要是储藏磁能,它所消耗的电能与储藏的电能都很小,与储藏的磁能相比可以忽略,在这种应用条件下的实际电感器,它的模型可视做图 1.1-3(b)所示的理想电感 L 。如果应用在较高频率的电路中,绕制该线圈的导线所消耗的电能需要考虑,它储藏的电能仍可忽略,那么,这种情况的实际电感器的模型就可用体现电能消耗的电阻 R 与体现磁能储藏的电感 L 相串联表示,如图 1.1-3(c)所示。如果这个实际电感器应用在更高频率的电路中,它储藏的电能也需要考虑,那么这种情况下的实际电感器的电路模型可用图 1.1-3(d)来表示。

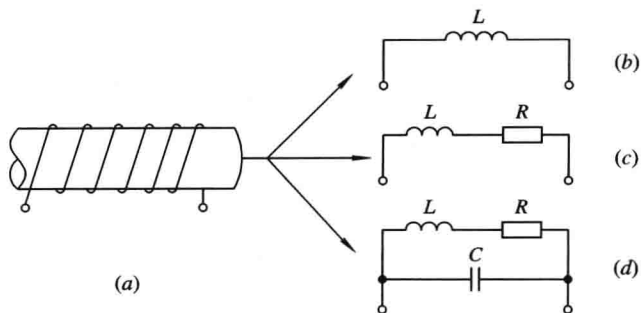


图 1.1-3 实际电感元件在不同应用条件下之模型

其他的实际电路部件都可类似地将其表示为应用条件下的模型，这里不一一列举。关于电路部件的模型概念还需强调说明 3 点：

(1) 理想电路元件是具有某种确定的电磁性能的理想元件；理想电阻元件只消耗电能（既不储藏电能，也不储藏磁能）；理想电容元件只储藏电能（既不消耗电能，也不储藏磁能）；理想电感元件只储藏磁能（即不消耗电能，也不储藏电能）。理想电路元件是一种理想的模型并具有精确的数学定义，实际中并不存在。但是不能说所定义的理想电路元件模型理论脱离实际，是无用的。这犹如实际中并不存在“质点”，但“质点”这种理想模型在物理学运动学原理分析与研究中举足轻重一样，人们所定义的理想电路元件模型在电路理论问题分析与研究中担任着重要角色。

(2) 不同的实际电路部件，只要具有相同的主要电磁性能，在一定条件下可用同一个模型表示，如上述的灯泡、电炉、电阻器这些不同的实际电路部件在低频电路里都可用电阻 R 表示。

(3) 同一个实际电路部件在不同的应用条件下，它的模型也可以有不同的形式，如图 1.1-3 所示实际电感元件在不同应用条件下之模型。

将实际电路中各个部件用其模型符号表示，这样画出的图称做实际电路的电路模型图，亦称做电原理图。如图 1.1-4 就是图 1.1-1 实际电路的电路模型。

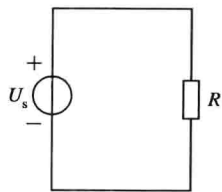


图 1.1-4 电路模型图

还应指出，实际电路部件的运用一般都和电能的消耗现象及电、磁能的储存现象有关，它们交织在一起并发生在整个部件中。这里所谓的“理想化”指的是：假定这些现象可以分别研究，并且这些电磁过程都分别集中在各元件内部进行；这样的元件（电阻、电容、电感）称为集总参数元件，简称集总元件。由集总元件构成的电路称为集总参数电路。集总参数电路中的电流在一根导线上流动不需要时间，即刻到达；或者说在同一根导线上的电流处处相等。这是集总参数电路的一个标志性特点。

用集总参数电路模型来近似地描述实际电路是有条件的，它要求实际电路的尺寸 l （长度）要远小于电路工作时电磁波的波长 λ ，即

$$l \ll \lambda \quad (1.1-1)$$

如果不满足这个条件，实际电路便不能按集总参数电路模型来处理。本书只讨论集总参数电路。

思考题

1.1-1 什么是集总元件？什么是集总参数电路？

1.1-2 我国电力网的频率是 50 Hz，50 km 长的电力供电线路算不算集总参数电路？3000 km 长的供电线路呢？

1.1-3 室内墙壁上公用天线插孔和电视机上天线插孔之间有一根 3 m 长的电缆线，设电视某频道频率为 500 MHz，这 3 m 长的电缆线算集总参数电路吗？为什么？

1.2 电路变量

在电路问题分析中，人们所关心的物理量是电流、电压和功率。在具体展开分析、讨论电路问题之前，首先建立并深刻理解与这些物理量有关的基本概念是很重要的。

1.2.1 电流

电荷有规则的定向运动，形成传导电流。我们知道，一段金属导体内含有大量的带负电荷的自由电子，通常情况下，这些自由电子在其内部作无规则的热运动，如图 1.2-1(a) 所示。在这种情况下，金属导体内虽有电荷运动，但由于电荷运动是杂乱无规则的，因而不能形成传导电流。如果在 AB 段金属导体的两端连接上电源，那么带负电荷的自由电子就要逆电场方向运动，这样，AB 段金属导体内就有电荷作规则的定向运动，于是就形成传导电流，如图 1.2-1(b) 所示，图中 E 为电场强度（表示电荷受到的力与其携带的电荷量的比值）。在其他场合，如电解溶液中的带电离子作规则定向运动也会形成传导电流。

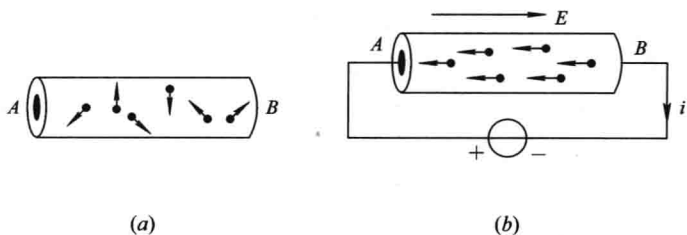


图 1.2-1 电流形成示意图

通过电流的磁效应、热效应来感知它的客观存在，这是人们所熟悉的常识。所以，毫无疑问，电流是客观存在的物理现象。为了从量的方面度量电流的大小，引入电流强度的概念。单位时间内通过导体横截面的电荷量定义为电流强度，如图 1.2-2 所示。电流强度

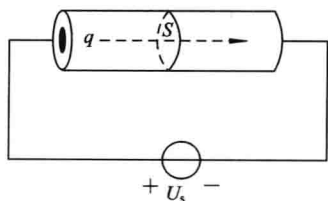


图 1.2-2 电流强度定义说明图

用 $i(t)$ 表示, 即

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} \quad (1.2-1)$$

式中 $q(t)$ 为通过导体横截面的电荷量。若 $dq(t)/dt$ 为常数, 即是直流电流, 常用大写字母 I 表示。电流强度的单位是安培(A), 简称“安”。电力系统中嫌安培单位小, 有时取千安(kA)为电流强度的单位。而无线电系统中(如晶体管电路中)又嫌安培这个单位太大, 常用毫安(mA)、微安(μ A)作电流强度单位。它们之间的换算关系是

$$\begin{aligned} 1 \text{ kA} &= 10^3 \text{ A} \\ 1 \text{ mA} &= 10^{-3} \text{ A} \\ 1 \mu\text{A} &= 10^{-6} \text{ A} \end{aligned}$$

在电路问题分析中, 电流强度是经常使用的物理量, 为了简便, 简称为电流。所以“电流”一词不仅表示一种物理现象, 而且也代表一个物理量。

电流不但有大小, 而且有方向。规定正电荷运动的方向为电流的实际方向。在一些很简单的电路中, 如图 1.1-4 所示, 电流的实际方向是显而易见的, 它是从电源正极流出, 流向电源负极的。但在一些稍复杂的电路里, 如图 1.2-3 所示的桥形电路中, R_5 上的电流实际方向并不是一看便知的。不过, R_5 上电流的实际方向只有 3 种可能: ① 从 a 流向 b ; ② 从 b 流向 a ; ③ 既不从 a 流向 b , 又不从 b 流向 a (R_5 上的电流为零)。所以说, 对电流这个物理现象可以用代数数量来描述它。简言之, 电流是代数量, 当然可以像研究其他代数量问题一样选择正方向, 即参考方向。假定正电荷运动的方向为电流的参考方向, 用箭头标在电路图上。今后若无特殊说明, 就认为电路图上所标箭头是电流的参考方向。对电路中电流设参考方向还有另一方面的原因, 那就是在交流电路中电流的实际方向在不断地改变, 因此很难在这样的电路中标明电流的实际方向, 而引入电流的参考方向也就解决了这一难题。在对电路中电流设出参考方向以后, 若经计算得出电流为正值, 说明所设参考方向与实际方向一致; 若经计算得出电流为负值, 说明所设参考方向与实际方向相反。电流值的正与负在设定参考方向的前提下才有意义。

在直流电路中, 测量电流时要根据电流的实际方向将电流表串联接入待测支路里, 即如图 1.2-4 所示那样接入电路。 \textcircled{A}_1 、 \textcircled{A}_2 两旁所标“+”、“-”号是直流电流表的正、负极。

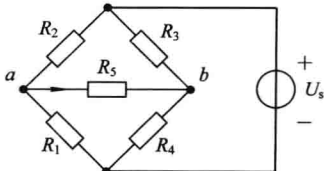


图 1.2-3 桥形电路

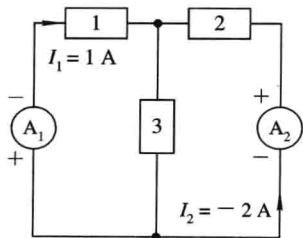


图 1.2-4 直流电流测试电路

1.2.2 电压

物理学中我们已经知道, 将单位正电荷自某一点 a 移动到参考点(物理学中习惯选无

穷远处作参考点)时电场力做功的大小称为 a 点的电位。在电路中,电位的物理意义同物理静电场中所讲电位是一样的,只不过电路中某点之电位,是将单位正电荷沿电路所约束的路径移至参考点(习惯选电路中某点而不选无穷远)时电场力所做功的大小。

两点之间的电位之差即是两点间的电压。从电场力做功概念定义,电压就是将单位正电荷从电路中一点移至电路中另一点时电场力所做功的大小,如图 1.2-5 所示。用数学式表示,即为

$$u(t) = \frac{dw(t)}{dq(t)} \quad (1.2-2)$$

式中 $dq(t)$ ^① 为由 a 点移至 b 点的电荷量,单位为库仑(C); $dw(t)$ 是为移动电荷 $dq(t)$ 电场力所做的功,单位为焦耳(J)。电位、电压的单位都是伏特(V),1 V 电压相当于移动 1 C 正电荷电场力所做的功为 1 J。电力系统中嫌伏特单位小,有时用千伏(kV)。而无线电系统中又嫌伏特单位太大,常用毫伏(mV)、微伏(μ V)作电压单位。

从电位、电压定义可知它们都是代数量,因而也有参考方向问题。电路中,规定电位真正降低的方向为电压的实际方向。但在复杂的电路里,如图 1.2-3 中 R_5 两端电压的实际方向是不易判别的,或在交流电路里,两点间电压的实际方向是经常改变的,这给实际电路问题的分析计算带来困难,所以也常常对电路中两点间电压设出参考方向。所谓电压参考方向,就是所假设的电位降低之方向,在电路图中用“+”、“-”号标出,或用带下脚标的字母表示。如电压 u_{ab} ,脚标中第一个字母 a 表示假设电压参考方向的正极性端,第二个字母 b 表示假设电压参考方向的负极性端。以后如无特殊说明,电路图中“+”、“-”标号就认为是电压的参考方向。在设定电路中电压参考方向以后,若经计算得电压 u_{ab} 为正值,则说明 a 点电位实际比 b 点电位高;若 u_{ab} 为负值,则说明 a 点电位实际比 b 点电位低。同电流一样,两点间电压数值的正与负,在设定参考方向的条件才是有意义的。

电压大小、方向均恒定不变时为直流电压,常用大写字母 U 表示。对直流电压的测量,是根据电压的实际方向,将直流电压表并联接入被测电路,使直流电压表的正极接所测电压的实际高电位端,负极接所测电压的实际低电位端。譬如,理论计算得 $U_{ab} = 5 \text{ V}$, $U_{bc} = -3 \text{ V}$,要测量这两个电压,电压表应如图 1.2-6 所示那样接入电路。图中 V_1 、 V_2 为电压表,两旁的“+”、“-”标号分别为直流电压表的正、负极性端。

例 1.2-1 如图 1.2-7(a)所示电路,若已知 2 s 内有 4 C 正电荷均匀地由 a 点经 b 点移动至 c 点,且知由 a 点移动至 b 点时电场力做功 8 J,由 b 点移动至 c 点时电场力做功 12 J。

(1) 标出电路中电流参考方向并求出其值,若以 b 点作参考点(又称接地点),求电位 V_a 、 V_b 、 V_c ,电压 U_{ab} 、 U_{bc} ;

(2) 标电流参考方向与(1)时相反并求出其值,若以 c 点作参考点,再求电位 V_a 、 V_b 、 V_c ,电压 U_{ab} 、 U_{bc} 。

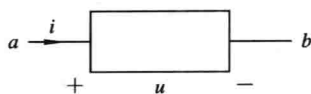


图 1.2-5 定义电压示意图

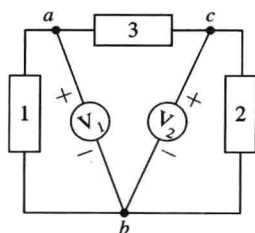


图 1.2-6 直流电压测量电路

① 为简化起见, $dq(t)$ 常写为 dq , 后面讨论中, 凡与时间有关的变量, 也作如上简化。