

高等学校教材

电路原理

胡 钊 主编

胡 钊 樊亚东 编著



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

200908290929
A/EID HEX: 15262652895602

高等学校教材

电路 原理

DIANLU YUANLI



高等教育出版社·北京

内容简介

本书是作者在长期从事电路理论双语和中文教学基础上，按照现代电气、电子以及自动化技术对于电路理论教学的要求精心写作而成，它大量吸收了现代电路理论的教学思想与研究成果，系统地介绍了现代电路理论的基本概念、基本原理和基本分析方法，其突出特色在于以实际培养和提高学生分析、解决电路问题的能力为目的，将电路理论课程中的基本内容与重点、难点和解题方法指导通过精心编排的各类典型例题有机地融为一体，从而是一本重点突出、条理清晰、论述细致、可读性好、便于自学的现代电路理论教材。

本书共分十七章：电路的基本概念、基本元件和基本定律，电路的等效分析方法，电路的一般分析方法即方程法，电路定理，线性时不变动态电路暂态过程的时域分析，线性时不变动态电路的正弦稳态分析，线性时不变正弦稳态交流电路的频率响应，含耦合电感的电路，三相电路，非正弦周期激励作用下线性时不变电路的稳态分析，线性时不变动态电路暂态过程的复频域分析，大规模电路的矩阵分析方法，双口网络，状态变量分析法，线性均匀传输线的正弦稳态分析，线性时不变无损耗均匀传输线的暂态分析，非线性电路。

本书重点突出、兼顾面广，概念准确清晰不仅可作为高等院校电气、电子以及自动化类专业电路理论课程的教科书或教学参考用书，也可供有关科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电路原理/胡钊主编；胡钊，樊亚东编著. —北京：高等教育出版社，2011.7
ISBN 978-7-04-031713-8
I. ①…电 II. ①胡…②樊… III. ①电路理论-高等学校-教材 IV. ①TM13
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 120588 号

策划编辑 杜 炜	责任编辑 袁 坤	封面设计 李卫青	版式设计 马敬茹
插图绘制 尹 莉	责任校对 金 辉	责任印制 刘思涵	

出版发行	高等教育出版社	咨询电话	400-810-0598
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	网 址	http://www.hep.edu.cn
邮政编码	100120		http://www.hep.com.cn
印 刷	北京外文印刷厂	网上订购	http://www.landaco.com
开 本	787mm×1 092mm 1/16		http://www.landaco.com.cn
印 张	44	版 次	2011 年 7 月第 1 版
字 数	1 080 千字	印 次	2011 年 7 月第 1 次印刷
购书热线	010-58581118	定 价	59.00 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 31713-00

前言

现代电气、电子和信息技术正以空前迅猛的速度日益突进，这对构成其重要基础的电路理论的教材体系和内容排布的更新与变革提出了新的更高的多元要求。

作者在近年来不断追踪研究国内外“电路”教材体系与内容变化的基础上，结合我们长期从事该课程中文与双语教学的实践体会，并针对我国教学体系与教学实践改革的现状与要求以及当代大学生学习的具体情况和特点，本着知识体系完备，例题典型丰富，强化基础，概念准确、重点突出、贴近实际，叙述简洁，循序渐进、深入浅出、讲解透彻，便于读者自学的撰写原则，精心编著了这本反映现代“电路”课程教学体系与内容的新教材。

本教材以线性电路最基本的三大内容：电阻电路分析、动态电路的正弦稳态分析和暂态分析为主体，系统地介绍了基本电路理论和电路的基本分析方法，有机并配比恰当地融汇了电路理论的基本内容、经典内容与现代内容和观点，力求使本教材能够成为充分体现基础性、时代性和科学性的现代电路理论教材。

本教材共十七章，在内容的选取上着意凸现了宽口径、厚基础、重视基本概念、基本内容、基本方法以及数学物理有机渗透的特色，又兼顾了强、弱电专业对电路理论知识的需求，也考虑到了各类高等学校对“电路”课程的教学要求，同时还保持了知识体系的完整性与系统性，因而利于现代电类各专业大学生构筑独立完备的电气电子基础知识体系，也非常有利于各专业授课教师根据课程安排的不同灵活地组织教学。

本教材精心编排了各类典型例题，帮助读者深入理解、牢固掌握并能灵活应用电路的基本理论和分析方法，通过十分有助于锻炼和提高学生自主学习能力、启发创造性思维能力的习题可以使他们更好地掌握基本教学内容，培养学生独立分析问题和解决问题的能力，在融会贯通、深刻理解所学内容的基础上进一步学好后续课程并能够将在电路课程中所获取的电路知识有机地应用于实际。

本书由胡钊教授和樊亚东副教授共同撰写，胡钊任主编并负责统稿和校定全书。本书第5章和第9章由樊亚东编著，其余各章均由胡钊编著。西安交通大学罗先觉教授审阅了全书并提出了许多宝贵的意见，作者谨对他表示诚挚的谢意。

在本书的编写过程中，参考了李裕能、夏长征教授主编的《电路》，武汉大学电气工程学院“电路”课程组的全体教师以及李裕能、夏长征、熊元新、孙元章、查晓明、刘涤尘、阮江军、刘开培、常湧等有关方面专家及学者提出了很多有益的建议，在此向他们一并表示衷心感谢。

限于作者的水平，书中恐有疏误之处，热切期待各位读者赐教指正，以便再版后能更好地臻于大家。作者联系方式：pku1126@126.com。

作者

于武汉珞珈山

2011年5月

目 录

第1章 电路的基本概念、基本元件和

基本定律 1

1.1 实际电路和电路模型 1

1.1.1 实际电路的构成与功能 1

1.1.2 电路元件模型和电路模型 2

1.2 电流、电压变量及其参考方向 4

1.2.1 电流变量及其参考方向 4

1.2.2 电压变量及其参考方向 6

1.2.3 电流与电压的关联参考方向 8

1.3 电功率与电能 9

1.4 电路元件的特性和分类 11

1.4.1 元件的特性 11

1.4.2 元件的分类 12

1.5 基本电路元件 13

1.5.1 电阻元件 13

1.5.2 电感元件 17

1.5.3 电容元件 22

1.5.4 独立电源 25

1.5.5 受控电源 29

1.6 基尔霍夫定律(KL) 32

1.6.1 电路分析中的两类约束 32

1.6.2 术语诠释 33

1.6.3 基尔霍夫电流定律(KCL) 34

1.6.4 基尔霍夫电压定律(KVL) 36

1.6.5 KCL方程、KVL方程和VCR

方程的独立性 38

1.7 运算放大器 40

1.7.1 运算放大器及其电路模型 40

1.7.2 含运算放大器电路的分析 44

习题 47

第2章 电路的等效分析方法 56

2.1 等效电路与等效变换的概念与

定义 56

2.2 无源单口电阻电路的等效变换 ... 58

2.2.1 串联电阻电路 58

2.2.2 并联电阻电路 60

2.2.3 混联电阻电路 62

2.3 无源三端电阻电路的等效变换 ... 64

2.3.1 电阻的Y形联结与 Δ 形联结之间 等效变换的一般式 64

2.3.2 等值电阻Y形联结与等值电阻 Δ 形 联结之间的等效变换 66

2.4 简单含源单口电路的等效变换 ... 67

2.4.1 独立电源的串联和并联 67

2.4.2 独立电源与任意单口电路或元件 的串联和并联 69

2.4.3 实际电源的两种电路模型及其 等效变换 71

2.4.4 无伴独立电源的等效转移 73

2.4.5 含受控源单口电路的等效变换 76

2.4.6 无源或有源单口电阻电路的输入 电阻 81

2.4.7 无源或有源单口电感、电容电路 的等效变换 83

2.4.8 由电感或电容元件组成的戴维宁 电路与诺顿电路之间的等效 变换 88

习题 91

第3章 电路的一般分析方法 96

3.1 电路的一般分析方法概述 96

3.2 支路变量法 96

3.2.1 2b法 96

3.2.2 b法 97

3.3 最少电路变量的选取 99

3.4 网孔分析法 100

3.4.1 网孔电流与网孔方程	100	4.4.4 戴维宁定理和诺顿定理的 应用举例	139
3.4.2 电源均为独立电压源时的网孔 分析法	102	4.4.5 单口电路内外存在受控源耦合 关系时戴维宁等效电路与诺顿 等效电路的多样性	143
3.4.3 独立电流源支路的处理方法	104	4.4.6 戴维宁定理与诺顿定理的基本 要点	146
3.4.4 受控源支路的处理方法	105	4.4.7 最大功率传输定理	147
3.5 回路分析法	108	4.5 集总参数电路的特勒根定理	149
3.5.1 回路电流与回路方程	108	4.5.1 特勒根定理的表述及其证明	149
3.5.2 电源均为独立电压源支路时的 回路分析法	109	4.5.2 特勒根定理的基本要点	152
3.5.3 独立电流源支路的处理方法	110	4.6 互易定理	152
3.5.4 受控源支路的处理方法	110	4.6.1 互易定理的表述及其证明	152
3.6 节点分析法	111	4.6.2 互易定理的基本要点	156
3.6.1 节点电压与节点方程	111	4.7 平面电路的对偶原理	157
3.6.2 电源均为独立电流源支路时的 节点分析法	112	习题	160
3.6.3 独立电压源支路的处理方法	113	第5章 线性时不变动态电路暂态 过程的时域分析	166
3.6.4 受控源支路的处理方法	118	5.1 动态电路的基本概念	166
3.6.5 含运算放大器电路的节点 分析法	119	5.1.1 动态电路及其方程	166
习题	120	5.1.2 换路定则	167
第4章 电路定理	125	5.1.3 初始条件的确定	168
4.1 电路定理概述	125	5.2 一阶电路的零输入响应	170
4.2 线性电路的叠加定理和 齐性定理	125	5.2.1 RC 电路的零输入响应	170
4.2.1 叠加定理说明示例	125	5.2.2 时间常数	171
4.2.2 叠加定理的表述与证明	127	5.2.3 RL 电路的零输入响应	174
4.2.3 叠加定理的基本要点	130	5.3 一阶电路的零状态响应	176
4.2.4 齐性定理	130	5.3.1 RC 电路的零状态响应	177
4.2.5 线性电路响应之间的线性关系	131	5.3.2 RL 电路的零状态响应	179
4.3 集总参数电路的替代定理	132	5.3.3 RC 电路在正弦激励下的零状态 响应	181
4.3.1 替代定理的表述及其证明	132	5.4 一阶电路的全响应	183
4.3.2 替代定理的基本要点	135	5.5 三要素法	187
4.4 线性电路的戴维宁定理与诺顿 定理	137	5.6 阶跃函数和一阶电路的阶跃 响应	190
4.4.1 戴维宁定理的表述及其证明	137	5.6.1 阶跃函数	190
4.4.2 诺顿定理的表述及其证明	138	5.6.2 一阶电路的阶跃响应	192
4.4.3 戴维宁电路模型与诺顿电路 模型间的等效关系	139	5.7 二阶电路的零输入响应	194

5.8 二阶电路的零状态响应	199	6.7 正弦稳态电路的功率	255
5.9 二阶电路的全响应	203	6.7.1 瞬时功率	255
5.10 冲激函数和电路的冲激响应 ...	204	6.7.2 平均功率和无功功率	257
5.10.1 冲激函数及其性质	204	6.7.3 视在功率	266
5.10.2 一阶电路的冲激响应	206	6.7.4 复功率	267
5.10.3 冲激响应与阶跃响应的关系	209	6.8 正弦稳态电路的最大功率传输	
5.10.4 二阶电路的冲激响应	210	定理	270
5.11 卷积积分	212	6.9 功率因数的提高	274
5.11.1 卷积积分的定义	212	习题	278
5.11.2 用卷积积分计算任意激励的		第7章 线性时不变正弦稳态交流电路	
零状态响应	212	的频率响应	285
习题	214	7.1 正弦稳态网络函数与频率	
第6章 线性时不变动态电路的正弦		特性	285
稳态分析	219	7.1.1 正弦稳态网络函数	285
6.1 线性时不变动态电路正弦稳态		7.1.2 频率特性	287
响应的基本概念	219	7.2 频率特性的类型	288
6.2 线性时不变动态电路正弦稳态		7.3 <i>RLC</i> 谐振电路	292
分析的意义	220	7.3.1 <i>RLC</i> 串联谐振电路	293
6.3 正弦量的时域分析	221	7.3.2 <i>RLC</i> 并联谐振电路	305
6.3.1 正弦量及其三要素	221	习题	310
6.3.2 同频率正弦量之间的相位差	223	第8章 含耦合电感的电路	315
6.3.3 正弦量的有效值和平均值	225	8.1 互感现象与互感元件	315
6.4 正弦量的相量表示	226	8.2 互感元件的伏安特性方程与	
6.4.1 复数及其运算	226	同名端	315
6.4.2 正弦量相量变换	227	8.3 耦合电感元件的去耦等效	
6.4.3 正弦量相量变换的基本性质	230	电路	321
6.5 电路基本元件的相量域模型和		8.3.1 不含受控源的去耦等效电路	321
基尔霍夫定律的相量形式	233	8.3.2 含受控源(CCVS)的去耦等效	
6.5.1 电路基本元件的相量域模型	233	电路	328
6.5.2 基尔霍夫定律的相量形式	237	8.4 含耦合电感的正弦稳态电路的	
6.6 正弦稳态电路的相量域模型		分析计算	329
分析方法	239	8.5 空心变压器	333
6.6.1 正弦稳态无源电路的等效变换 ...	240	8.5.1 初级等效电路	335
6.6.2 正弦稳态电路的一般分析方法		8.5.2 次级等效电路	336
(方程法)	249	8.6 理想变压器	338
6.6.3 应用电路基本定理分析正弦		8.7 全耦合变压器	348
稳态电路	251	8.8 实际铁心变压器模型	349
6.6.4 应用相量图分析正弦稳态电路 ...	253	8.8.1 无损、自感值有限的非全耦合	

变压器	349	有效值	381
8.8.2 实际铁芯变压器模型	350	10.5.2 非正弦周期电流和电压的 平均值	382
习题	351	10.5.3 非正弦周期电流电路的平均功率 (有功功率)	383
第9章 三相电路	356	10.6 非正弦周期激励作用下稳态 电路的分析计算	384
9.1 三相电路概述	356	10.7 L 、 C 元件构成的无源 滤波器	387
9.1.1 三相电源的产生	356	习题	390
9.1.2 三相电源的联结方式	357	第11章 线性时不变动态电路暂态 过程的复频域分析	394
9.1.3 三相电路的一般形式	359	11.1 拉普拉斯变换的定义	394
9.2 负载 Y 形联结对称三相电路的 分析	360	11.2 拉普拉斯变换的基本性质	396
9.2.1 Y - Y 联结的对称三相电路	360	11.3 用于拉氏反变换的部分分式展 开法	401
9.2.2 Δ - Y 联结的对称三相电路	362	11.4 电路基本元件的复频域模型与 基尔霍夫定律的复频域形式	405
9.3 负载 Δ 联结对称三相电路的 分析	362	11.4.1 电路基本元件的复频域模型	406
9.3.1 Y (或 Δ)- Δ 联结的对称三相 电路	362	11.4.2 基尔霍夫定律的复频域形式	410
9.3.2 负载 Δ 联结的对称三相电路线电 压(流)和相电压(流)的关系	363	11.5 线性时不变动态电路暂态过程 的复频域分析方法	410
9.4 不对称三相电路的分析	365	11.5.1 线性时不变动态电路复频域模型 的等效变换分析方法	411
9.5 三相功率及其测量	367	11.5.2 用复频域模型分析线性时不变动 态电路暂态过程的一般方法	412
9.5.1 三相电路的瞬时功率	367	11.5.3 应用复频域电路定理分析线性时 不变动态电路的暂态过程	417
9.5.2 三相电路的有功功率和无功 功率	367	11.6 网络函数	420
9.5.3 三相电路的视在功率和 复功率	368	11.6.1 网络函数的定义及其类型	420
9.5.4 三相电路功率的测量	369	11.6.2 网络函数与单位冲激响应的 关系	421
习题	370	11.6.3 利用网络函数计算线性时不变 电路的零状态响应	422
第10章 非正弦周期激励作用下线性 时不变电路的稳态分析	373	11.6.4 网络函数的极点和零点及其与 冲激响应的关系	423
10.1 非正弦周期量	373	11.7 由零、极点分布确定频率 响应	429
10.2 周期函数的傅里叶级数 展开	374	习题	430
10.3 周期函数的频谱	376		
10.4 对称波形周期函数的谐波 分析	378		
10.5 非正弦周期电流和电压的有效值、 平均值和平均功率	381		
10.5.1 非正弦周期电流和电压的			

第 12 章 大规模电路的矩阵分析**方法** 435

12.1 大规模线性电路矩阵分析方法

概述 435

12.2 电路的图的基本概念 435

12.3 有向图的四种矩阵描述及其对应的基尔霍夫定律矩阵形式 ... 440

12.4 矩阵 A 、 B_i 和 Q_i 之间的关系 447

12.5 标准支路特性方程的矩阵形式 448

12.5.1 电感之间无耦合且支路中含有受控源时的支路特性方程 449

12.5.2 电感之间存在耦合且支路中不含受控源时的支路特性方程 451

12.6 电路分析方程的矩阵形式 452

12.6.1 节点电压方程的矩阵形式 453

12.6.2 回路电流方程的矩阵形式 457

12.6.3 基本割集电压方程的矩阵形式 460

习题 462

第 13 章 双口网络 467

13.1 双口网络概述 467

13.2 双口网络的端口特性方程与参数 468

13.2.1 Z 参数方程与 Z 参数 46913.2.2 Y 参数方程与 Y 参数 47113.2.3 H 参数方程与 H 参数 47313.2.4 T 参数方程与 T 参数 476

13.3 同一双口网络各种参数间的换算关系 479

13.4 双口网络的等效网络 480

13.4.1 互易双口网络的等效网络 481

13.4.2 一般双口网络的等效网络 482

13.5 双口网络的互联及其有效性测试 484

13.5.1 级联(链联) 485

13.5.2 串联 486

13.5.3 并联 487

13.5.4 串并联与并串联 489

13.5.5 双口网络互联的有效性测试 490

13.6 双端接双口网络的网络函数 493

13.6.1 用 Z 参数表示的输入阻抗和输出阻抗 494

13.6.2 转移电压比和转移电流比 495

13.6.3 双端接对称双口网络的特性阻抗 497

13.7 回转器和负阻抗变换器 498

13.7.1 回转器 498

13.7.2 负阻抗变换器 500

习题 501

第 14 章 状态变量分析法 507

14.1 状态变量、状态方程和输出方程 507

14.2 电路状态方程的建立方法 510

14.2.1 线性时不变常态电路状态方程的列写 511

14.2.2 线性时不变非常态(病态)电路状态方程的列写 518

14.3 线性时不变电路状态方程的求解 523

14.4 线性时不变电路输出方程的列写 525

14.5 线性时不变电路输出方程的求解 527

习题 528

第 15 章 线性均匀传输线的正弦稳态分析 532

15.1 分布参数电路与均匀传输线的基本概念 532

15.2 均匀传输线的偏微分方程 534

15.3 正弦稳态下均匀传输线相量方程的通解 535

15.4 正弦稳态下均匀传输线相量方程的特解 537

15.5 正弦稳态下均匀传输线上的 行波	540	正向传播	593
15.5.1 均匀传输线上电压和电流的时域 表达式	540	16.3.1 阶跃直流电压源激励下波的 产生与正向传播	594
15.5.2 均匀传输线上的正向行波和 反向行波	541	16.3.2 任意函数形式阶跃理想电压源 激励下波的产生与正向传播	596
15.6 均匀传输线的传播常数与 特性阻抗	547	16.4 无损耗线边界上波的反射	598
15.6.1 传播常数	547	16.4.1 一般边界条件下无损耗线方程 的复频域解	598
15.6.2 特性阻抗	550	16.4.2 三种特殊边界条件下无损耗线 上波的反射	600
15.7 终端连接不同类型负载的均匀 传输线	552	16.4.3 无损线终端接有集中参数负载 时波的反射	611
15.7.1 终端接特性阻抗的传输线	552	16.5 求解无损线暂态过程中波的 反射和透射的柏德生法则	619
15.7.2 终端开路时的工作状态	556	习题	623
15.7.3 终端短路时的工作状态	558	第 17 章 非线性电路	625
15.7.4 终端接任意负载阻抗	560	17.1 非线性元件与非线性电路的 基本概念	625
15.8 无损耗均匀传输线	561	17.2 非线性电阻	626
15.8.1 无损耗线的传播常数和特性 阻抗	562	17.2.1 非线性电阻的分类	626
15.8.2 正弦稳态下无损线方程的 定解	562	17.2.2 静态电阻和动态电阻的概念	628
15.8.3 无损耗线终端接有不同类型 负载时的工作状态	563	17.3 非线性电感	629
15.9 均匀传输线的集中参数等效 电路	582	17.4 非线性电容	630
15.9.1 均匀传输线的单个双口等效 电路	582	17.5 非线性电阻电路方程的 建立	631
15.9.2 均匀传输线的链形双口等效 电路	584	17.5.1 节点法	631
习题	586	17.5.2 回路法	632
第 16 章 线性时不变无损耗均匀传输 线的暂态分析	589	17.6 非线性电阻电路的基本 分析法	633
16.1 均匀传输线暂态过程的基本 概念	589	17.6.1 图解法	633
16.2 无损耗线均匀传输线偏微分 方程的通解	589	17.6.2 分段线性化解析法	638
16.3 零状态无损耗线在理想阶跃 电压源激励下波的产生与		17.6.3 小信号分析法	640
		17.7 DP 图为分段线性的非线性 电阻电路的设计	643
		17.8 非线性动态电路的微分方程 与状态方程	647
		17.8.1 非线性动态电路微分方程的 建立	647

17.8.2 非线性动态电路状态方程与	习题	655
输出方程	习题参考答案	663
17.9 非线性自治电路的分段线性化	中英文名词对照表	686
方法	参考文献	691
648		
652		

第 1 章

电路的基本概念、基本元件和基本定律

内容提要

本章介绍电路的基本概念和基本定律，其中包括实际电路和电路模型、电流和电压及其参考方向的概念、电功率与电能、电路元件的特性和分类、电阻、电感、电容、独立电源和受控电源、基尔霍夫定律以及运算放大器。

1.1 实际电路和电路模型

1.1.1 实际电路的构成与功能

在现代科学研究、工程技术以及日常生活中，人们广泛地使用各种电气电子设备和仪器，如发电机、电动机、信号发生器、电视机、计算机等，它们合称为实际电路。一个较为简单的例子就是手电筒电路，它是用三根导线分别将一个干电池、一个灯泡和一个开关顺次连接起来组成的一个实际照明电路，如图 1-1(a) 所示。

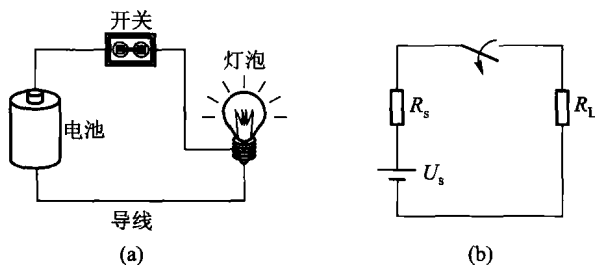


图 1-1 手电筒照明电路及其电路模型

(a) 实际电路 (b) 电路模型

实际电路是为了实现预期目的将一些实际电路元件，即构成电路的设备或器件按照特定的方式用导线连接起来所构成的一个整体，概括起来，大致可以分为电源或信号源、中间环节和负载三个部分。电源或信号源的作用是向负载提供电能或信息，例如发电机、信号发生器等；中间环节是用来将电源和负载连接起来完成特定任务的部件，例如变压器、放大器等；负载则是消耗电能或接收信息的部分，例如电动机等。

实际电路的形式各不相同，种类繁多，小的有集中数以万计的电路元件在几平方毫米内的集成电路，大的有现代通信网、数据信息网、计算机网乃至长达数百上千公里的电力输电线。

然而,它们所完成的功能却可以大致分为两类,一类是实现电能的产生、传输、分配和转换,这方面比较典型的例子就是电力系统。发电机组将热能、水能或原子能等其他形式的能量转换成电能,通过变压器、输电线这些中间环节传输给各类用电负载,再由这些负载将电能转换成机械能、热能或光能等;另一类则是在信息网络与控制系统中,完成各种电信号(例如语言信号、控制信号、图像信号等)的产生、传递、储存、变换、加工处理与控制,常见的例子有收音机、电视机电路等。

1.1.2 电路元件模型和电路模型

一个实际电路在工作时所发生的物理过程是十分复杂的,其中的每一个元件中一般都会同时出现几种电磁现象。例如,当通过电池的电流增大时,电池的端电压会降低,电池会发热;电阻器中的电流变化时,周围会伴随着电磁场的变化;电流通过电感器时会产生磁场,电感器也会发热,匝间还存在着电场;当电容器极板间的电压发生变化时,电容器中有变化的电场和变化的磁场,介质中还有热损耗,等等。上述这些现象同时发生在这些实际电路元件和导线之中,彼此交织在一起,连续分布在整個元件中,不能从空间上相互分开。

显然,直接对这种由具体电路元件组成的实际电路进行分析和研究是相当复杂和困难的,有时甚至是不可能的。事实上,在工程实际中也没有这样精确分析的必要。因此,可以像力学等其他成熟学科一样,采用科学的抽象分析方法,在一定条件下对实际电路元件进行抽象处理,即忽略它的次要特性,又能足够准确地反映其主要电磁性能的元件模型来表示,这种元件模型称为理想(化)电路元件。每一种理想电路元件只表示一种电磁现象,因而各具有某种确定的电磁性能。例如,电阻元件只消耗电能,电容元件只储存电场能量,电感元件只储存磁场能量。实际电路元件本身所固有的电磁性能可以用电路参数来表示,基本的电路参数有三个,即电阻、电容和电感,其中电阻是用来反映电路元件电能量损耗性质的;电容和电感则分别是用以反映电路元件形成电场并储存电场能和形成磁场并储存磁场能的电路参数。

引入了电路参数的概念以后,所谓电路元件的“理想化”就是假定同时发生在整个电路元件之中的电能消耗以及电能、磁能的储存现象可以分别加以研究,并且这些具有连续分布特性的电磁过程以及反映它们的三种电路参数可以分别集中起来构成集总(中)参数元件模型。这样,每一种集总参数元件就只反映一种电磁特性,即其内部只发生一种电磁过程。因此“理想化”又可称为“集总化”,相应地,理想电路元件亦称为集总参数元件(简称集总元件)。

理想电路元件的电磁特性可以用数学方法精确地加以定义,它们作为一种数学模型,在实际中并不存在,而是一种没有几何尺寸并视其参数集中于一点(无几何大小的点)的模型化元件,但这并不意味着它们是理论脱离实际的无用之物,相反,这种理想化的模型在电路理论分析中是一种必不可少的基本要素。实践证明,在一定条件下建立起来的集总参数元件模型符合实际情况,因而是可行的,正如力学中所建立的“质点”和“刚体”模型能够很好地描述实际物体机械运动的规律一样。

理想电路元件概括起来可以分为三类,其一是理想负载元件,主要有电阻元件、电容元件和电感元件,它们是基本的集总参数元件,分别用来模拟以消耗电能为主的电阻器、电炉等,以储存电场能为主的实际电容器等所反映的电场现象和以储存磁场能为主的实际电感器等所表

现的磁场现象；其二是理想电源元件，即理想电压源和理想电流源，用来反映实际电源等提供能量的情况；其三是理想耦合元件，有受控电源、耦合电感器、理想变压器和回转器等，它们的作用是描述实际电路元件之间在物理过程上的相互关联关系。有关这些元件的详细介绍将在后续章节里陆续给出。

对于图 1-1(a) 所示的实际电路，可以认为灯泡的电感极其微小，因而把它看成一个理想电阻元件；而一个新的电池，其内阻与灯泡电阻相比完全可以忽略不计，而把它看成是输出恒定电压的理想电压源；电路的连接导线在长度较短时，它的电阻也可完全忽略，而可看作理想导体。这时，我们用理想电阻元件构成了小灯泡的模型，用理想电压源构成了电池的模型，用理想导线构成连接导线的模型。这样，实际电路图 1-1(a) 即可转变为图 1-1(b) 所示的电路模型，即电路图。因此，今后对电路进行理论分析所采用的通常不是实际电路而是电路模型。

如何用理想电路元件去模拟实际电路元件，这主要依据实际电路元件的工作条件以及对模型精确度的不同要求，具有以下两个特点：①在一定的应用条件下，采用同一种理想电路元件模型可以表示一类具有相同的主要电磁性能的不同实际电路元件，例如电阻器、电炉和照明器件在低频情况下应用时，它们储存的电感、磁能与它们所消耗的电感相比很微小，可以忽略不计，因而都可以用电阻元件来表示；②同一个实际电路元件在不同的应用条件下，其模型的形式各不相同。这是由于实际电路元件中的电磁性能是多种多样的，在一种情况下应用时，其某种电磁性能占主导地位，在另一种情况下应用时，它们的另一些电磁性能又可能占主导地位。例如，一个实际电感线圈，它是在一个骨架上用良好的金属导线绕制而成的，如图 1-2(a) 所示。在恒定直流情况下，它所表现出的电磁性能主要是耗能，而所储存的电感、磁能与其消耗的电感相比都很小，可以忽略不计，这时它的模型可以用图 1-2(b) 所示的理想电阻元件来表示；如果应用在低频交流电路中，其突出的电磁性能是储存磁能，它所消耗的电感和储存的电感与前者相比达到仍可忽略的程度，在这种情况下，其模型可以用图 1-2(c) 所示的理想电感元件来表示；如果应用在高频交流电路中，就需要考虑到绕制该线圈的导线所消耗的电感，它所储存的电感仍然可以忽略不计。这样，该实际电感器就可以用反映电感消耗的理想电阻元件与体现磁能储存的理想电感元件的串联组合来模拟，如图 1-2(d) 所示。如果这个实际电感器用在更高频率的交流电路中，则它所储存电感的分布电容的影响也需要考虑，那么这种情况的实际电感器模型则可以用图 1-2(e) 所示的理想电阻元件与理想电感元件串联后再与理想电容

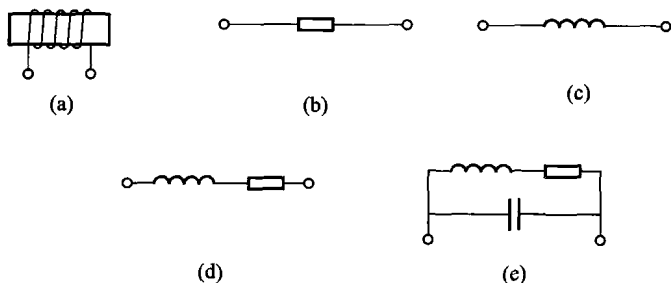


图 1-2 实际电感线圈的几种电路模型表示

- (a) 实际电感线圈 (b) 通过直流时的模型 (c) 通过低频交流时的模型
(d) 通过高频交流时的模型 (e) 通过更高频交流时的模型

元件并联来表示。

由理想的(集总参数的)电路元件组成的电路称为集总参数电路。一个实际电路要能用集总参数电路去模拟或者说采用集总化方法为实际电路元件建模需要满足下列条件(称为集总化电路条件或集总化假设):实际电路的最大几何尺寸 d 必须远远小于电路最高工作频率 f 所对应的波长 λ ,即有 $d \ll \lambda$, $\left(\lambda = \frac{c}{f}, \text{光速 } c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}\right)$,如果用光速 c 除以该不等式两边,则可得集总化电路条件的另一种表述形式: $\tau \ll T$,其中 τ 是电信号(电压或电流)从电路的一端到达另一端所需的时间, T 为信号的周期。显然,电路信号的频率越高,波长越短,若要求电路满足集总参数电路的条件,则需要其尺寸越小。例如,我国电力用电的频率为50 Hz,对应的波长为6 000 km,对于以此为工作频率的电子电路来说,其尺寸与这一波长相比可以忽略不计,因而完全可以作为集总参数电路来处理。但是对于远距离的通信线路和电力传输线来说,由于不满足上述条件,所以就必须要考虑到电场、磁场沿电路分布的现象,不能用集总参数而要用所谓的分布参数来表征。另外,一般的计算机电路,其工作频率可达500 MHz以上,若以500 MHz为例,假设电路尺寸只有0.5 m,则 $\lambda = 0.6 \text{ m}$,显然 d 与 λ 在同一数量级上,并且数值相差很小,因此,用集总参数电路来处理会产生较大的误差,严格地说是不能用的。

集总假设从本质上来说,就是将交织在一起的电场和磁场分割开来考虑,即认为这两种场之间不存在相互作用。但是,我们知道,电场与磁场间的相互作用产生电磁波及能量辐射,一部分能量将通过辐射损失掉。因此,只有在辐射能量可以忽略不计的情况下才能采用集总的概念,这就要求电路满足所谓集总(化)条件。由此可以得到集总参数电路的下列特征:①电流在集总参数电路中流动不需要时间,即可以忽略不计空间因素,所有电量仅是时间的函数;②没有任何电、磁能量辐射,即电磁能量的消耗与储存都集中在元件内部进行;③集总元件端钮上的电位和端钮间的电压在任一时刻都有完全确定的值;④在任何时刻,流入理想二端元件某一端的电流恒等于流出其另一端的电流。

1.2 电流、电压变量及其参考方向

在电路分析中,为了定量地描述电路的工作状态或元件特性,需要一组可以表示为时间函数的物理量。这组物理量可以分为基本变量和复合变量两类,基本变量共有四个:电流 $i(t)$ 、电压 $u(t)$ 、电荷 $q(t)$ 和磁链 $\Psi(t)$;复合变量只有二个:功率 $p(t)$ 和能量 $w(t)$ 。选定上述四个变量作为电路的基本变量,其原因在于采用它们完全可以描述电路中各种变化的电和磁现象。复合变量可以由基本变量表示,用以反映电路中功、能的传递情况。

在电路分析中较为常用的是可以实际测量的两个基本变量——电流和电压以及复合变量——功率。

1.2.1 电流变量及其参考方向

电路中电荷有规则的定向流动形成电流,其大小或强弱用电流强度(简称电流)来表示,其定义为:在时刻 t 穿过某横截面 S 的电流强度 $i(t)$ 等于从 t 到 $t + \Delta t$ 的时间内,从该面的一

边穿到另一边的电荷量的代数和 Δq 与此时间间隔 Δt 之比, 当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时的极限, 即

$$i(t) \stackrel{\text{def}}{=} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq(t)}{dt} \quad (1-1)$$

式(1-1)表明, 某一时刻 t 穿过 S 面的电流强度值就等于在该时刻单位时间内穿过 S 面的电荷量的代数和。运动的电荷可以是导体或半导体中的电子或空穴, 电解质中的正负离子以及真空中的电子或离子等。电流强度的定义可以用图 1-3 加以说明。

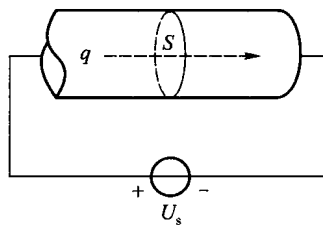


图 1-3 电流强度定义的说明

电流的国际单位制(SI)单位为安[培](A), $q(t)$ 的单位为库[仑](C)。若电荷以 1 C/s 的速率流动, 则电流的大小为 1 A。此外, 各种应用场合常用的电流单位还有兆安(MA)、千安(kA)、毫安(mA)、微安(μ A)和纳安(nA), 它们之间的换算关系为: 1 MA = 10^6 A, 1 kA = 10^3 A, 1 mA = 10^{-3} A, 1 μ A = 10^{-6} A, 1 nA = 10^{-9} A。

电流 $i(t)$ 即表示电荷流动这种物理现象, 又代表反映这种现象的物理量, 它不仅有大小, 而且有方向。历史上, 将正电荷运动的方向人为地规定为电流的实际方向, 沿用至今, 但是现代科学表明, 电流事实上是负电荷或电子的定向移动而形成的, 其实际方向与人们所规定的恰好相反。如果电流的大小和/或方向随时间变化, 则称其为时变电流, 用符号 $i(t)$ 或只用 i 表示。大小和方向作周期性变化且平均值为零的时变电流称为交流电流(alternating current), 常记为 ac 或 AC。如果电流的大小和方向均不随时间变化, 则称为恒定电流, 通常称为直流电流(direct current), 简称直流, 常记为 dc 或 DC, 一般用大写字母 I 表示, 由于直流是时变电流的特例, 所以直流电流也可以用小写字母 i 表示。

在对电路进行分析计算时, 需要知道电流的实际流向, 这对一些简单的直流电路还是容易做到的, 例如在图 1-1(b)中, 当开关闭合后, 电流的实际方向显然是从电源的正极流向负极。但是对于比较复杂的直流电路, 例如图 1-4 所示的直流电桥电路, 电阻 R_x 上电流的实际方向就不能一目了然了, 依据该图中电阻参数大小的不同情况会有三种可能性: ①从 a 流向 b; ②从 b 流向 a; ③无流向可言, 因为这时电桥平衡, R_x 上的电流为零。此外, 在交流电路中, 电流的实际方向分时间段交替改变, 因而就更不可能在这样的电路中用一个固定的方向标示出电流的实际方向。由于这两方面的原因, 对于复杂电路很难采用实际方向进行分析计算。

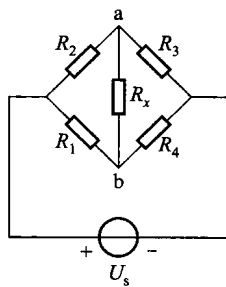


图 1-4 直流电桥电路

通过上面的分析可知, 电流作为一种物理现象具有代数量(标量)的特征: 大小和正负(方向), 因而是代数量。因此, 可以采用代数量问题的研究方法人为地选定电流的正方向, 即在分析电路之前对电路的任一导线或元件中电流的两个可能的流动方向任意指定一个作为电流流动的正方向, 称为参考正方向, 简称参考方向。例如, 对于图 1-5 中的同一段电路或元件, 既可以是由其一端 a 指向另一端 b 的方向(如图 1-5(a)所示), 亦可以是由 b 指向 a 的方向(如图 1-5(b)所示)。在电路理论中约定: 沿参考方向的正电荷运动所形成的电流为正值, 即 $i(t) > 0$, 逆参考方向的正电荷运动所形成的电流为负值。参考方向有两种表示方法: ①用一个带实线段的箭头表示; ②用双下标表示。例如, 图 1-5(a)、(b)中的电流参考方向除了

可以用带实线段的箭头表示外,也可以分别用 i_{ab} 和 i_{ba} 表示电流的参考方向是由 a 指向 b 和由 b 指向 a 的。由于电路中任一处的电流都有两种可能的参考方向,因此当对同一处的电流指定相反的参考方向时,对应的电流表达式应相差一个负号。例如,若图 1-5(a)和(b)中为同一段电路上的电流,则由于指定的参考方向相反,所以两者符号相反。对于这种情况,采用双下标写法则可以表示为

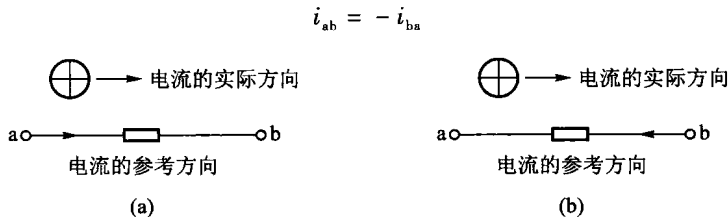


图 1-5 由事先假定的电流参考方向和计算所得电流的正、负共同确定电流的实际方向

(a) $i > 0$ (b) $i < 0$

这样,便可以以所设定的电流参考方向作为电路分析计算的依据列出电路方程,如果计算所得的电流值 $i(t) > 0$,表明该时刻电流的实际方向与参考方向相同;如果电流值 $i(t) < 0$,则表明该时刻电流的实际方向与参考方向相反。可见,电流的参考方向并不一定是电流的实际方向,但是一旦有了在选定参考方向下的电流的表示式,就能够确定每一时刻电流的实际方向。这种由电流每一时刻计算结果的正或负与其参考方向二者共同确定该时刻电流实际方向的原则示于图 1-5 中。

应该强调指出,电流值的正与负只有在设定其参考方向的前提下才有明确的物理意义,否则无此依据地讨论电流的正与负是毫无意义的。电流的参考方向可以任意选定,但一经确定,在电路计算过程中不要再随意更改,以免造成混乱,而且这种任意选择性不会影响到计算结果,因为参考方向相反时,计算出的电流值仅相差一负号,最后得到的实际结果仍然相同。

1.2.2 电压变量及其参考方向

从物理学中已经知道,电荷在电场中会受到电场力的作用,若将无穷远处选作参考点,将单位正电荷从电场中某一点沿任意路径移动至参考点,电场力所做功的大小称为该点的电位,电场中任意两点 a、b 之间的电位差便是这两点间的电压(降),它是描述电场力对电荷做功大小的物理量,定义为将单位正电荷自场中 a 点移至 b 点电场力做功的大小。这虽是从电场的概念出发所得出的电位与电压的概念,但由于在电路中,同样也存在着电荷受电场力作用而移动的现象,亦即也有电场力做功电场能量增加或减少的问题,所以电场中的电位、电压及其相互关系的概念同样适用于电路,只不过电路中的参考点是选择在其中的某一点而并非无穷远点。因此,如果设一定量的正电荷 $dq(t)$ 从电路中的 a 点移动到 b 点时电场力所做的功为 $dw(t)$,则电路中 a、b 两点间的电压定义为

$$u(t) = \frac{dw(t)}{dq(t)} \quad (1-2)$$

式中, $dw(t)$ 即为正电荷量 $dq(t)$ 在移动过程中所失去或获得的电能,在国际单位制(SI)中, $dw(t)$ 的单位为焦[尔](J),电压 $u(t)$ 的单位为伏[特](V)。若将 1 C 的电荷从电场中的 a 点