

高等学校教材

电路理论

——基础篇

颜秋容

高等教育出版社

高等学校教材

电路理论

——基础篇

颜秋容

高等教育出版社·北京

内容简介

本套教材分为《电路理论——基础篇》和《电路理论——高级篇》。

《电路理论——基础篇》共 13 章,包含电路模型与基本定律,电阻电路等效变换,电路分析方程,电路定理,含运算放大器的电路,非线性电阻电路,电容、电感及动态电路,一阶电路的暂态分析,二阶电路的暂态分析,正弦稳态分析,正弦稳态电路的功率,三相正弦稳态电路,含磁耦合的电路。

《电路理论——高级篇》共 8 章,包含正弦稳态电路的频率响应、周期性非正弦稳态电路、二端口网络、暂态过程的复频域分析法、暂态过程的状态变量分析法、电路的计算机辅助分析基础、均匀传输线的正弦稳态分析、均匀传输线的暂态分析。

本书主要面向电气、电子、信息、自动化等工程专业教学,将基础理论、思维方法与工程应用三者结合。适合于讨论式、翻转课堂和传统课堂教学模式。全书有 270 道例题,285 道紧随例题的目标检测题,588 道按节内容综合运用的习题,116 道按章内容综合运用的检测题,48 个拓展与应用问题。采用提出问题、展开分析、归纳总结、例题应用、目标检测、综合检测、工程应用的教学思路,对知识合理分层,既不失去其逻辑性与完整性,又便于根据不同层次的对象选取教学内容。

本书特别适合作为大专院校电路理论课程教材,也非常适合自学,对于高校教师、相关工程技术人员都是非常适合的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电路理论. 基础篇/颜秋容编著. --北京: 高等教育出版社, 2017.10

ISBN 978-7-04-048447-2

I. ①电… II. ①颜… 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(2017)第 210088 号

策划编辑 王勇莉	责任编辑 孙琳	封面设计 李卫青	版式设计 马敬茹
插图绘制 杜晓丹	责任校对 李大鹏	责任印制 赵义民	

出版发行 高等教育出版社	网 址 http://www.hep.edu.cn
社 址 北京市西城区德外大街 4 号	http://www.hep.com.cn
邮政编码 100120	网上订购 http://www.hepmall.com.cn
印 刷 北京铭传印刷有限公司	http://www.hepmall.com
开 本 787mm×1092mm 1/16	http://www.hepmall.cn
印 张 36	
字 数 880 千字	版 次 2017 年 10 月第 1 版
购书热线 010-58581118	印 次 2017 年 10 月第 1 次印刷
咨询电话 400-810-0598	定 价 70.00 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 48447-00

前言

电路理论是电气、电子、信息、自动化类工程专业重要的基础理论。工程技术人才的专业素养主要体现于学习能力、思维能力、解决工程问题的能力。本套教材主要面向电气、电子、信息、自动化等工程专业教学,将基础理论、思维方法、工程应用三者结合。便于开展讨论式教学、翻转课堂教学,有利于建构系统的理论体系、形成科学的思维方法、培养解决复杂工程问题的能力。

1. 特色

- 先有全局,再看细节。每章的第1节为概述,承上启下,提出新问题,分析问题的背景,明确学习目标,指出学习难点。
- 内容论述兼顾思维方法和知识掌握效率。对知识合理分层,既不失逻辑性与完整性,又便于根据不同层次的对象选取内容。采用双色印刷,用恰当的逻辑主线,章内按三级标题分层次展开。
 - 用色彩、边框突出重点和不能忽视的细节。
 - 用花边框总结概念、归纳方法。
 - 用逻辑主线引导思维。
 - 用归纳和总结提升知识掌握效果。
 - 用步骤化方式降低学习难度。
- 对学习效果进行层次化检测。全书贯彻“提出问题、展开分析、归纳总结、例题应用、目标检测、综合检测、工程应用”的教学思路。
 - 知识点由问题引出,知识应用由例题示范,紧随例题的目标检测题(附答案)起着模仿知识运用的作用。
 - 习题分为按节内容综合运用与按章内容综合检测。本套教材共有270道例题、285道目标检测题、588道按节内容综合运用习题、116道按章内容综合检测习题、48个拓展与应用问题。
 - 许多例题与习题设计成多问形式,用逐步追问的方式引导分析复杂问题,并培养结果正确性自我验证习惯。
 - 知识运用由模仿例题开始,按节内容综合运用习题加深理解,按章内容综合检测习题训练灵活运用,拓展与应用问题引导创新。
- 满足工程专业培养目标中解决复杂工程问题能力培养的要求。每章末有1~7个拓展与应用问题,内容贴近工程实际、题材广泛。包含从最简单的安全用电,到复杂的脉冲反射法电缆故障测距原理。一些拓展与应用问题来自于作者的科学研究项目,它们既能展示电路理论的应用,又能体现解决工程问题的方法。
- 特别针对讨论式、翻转课堂教学模式。讨论式教学、翻转课堂教学,是把课堂变为对学生

自主学习效果检验的场所,它有效地将学习主动权转移到学生。此时,构建知识体系、提升思维能力的任务必须由教材来承担。本套教材力求用符合逻辑的知识分层与分步、恰当的总结与归纳、递进式的效果检测、引导式的综合运用来配合教学方法改革,消除因知识碎片化、学习方式零散化导致的知识掌握不系统、综合运用不足、逻辑思维能力提升不够等隐忧。从精品课程建设、到精品资源共享课程建设,再到 MOOC 建设,这些改革的重点是教学方式与手段,虽然知识的呈现形式变得丰富多样,但经过多年各类教学资源的建设与使用,作者还是认为教材是知识的核心载体,具有不可替代的地位。教材是串起碎片化知识与零散化学习方式的主线,教学视频和课件等是围绕主线的辅助手段。掌握理论知识、培养思维方式、学习工程问题解决方法三者结合则是教学的目标。

➤ 用简单、直接的方式,将常用的数学知识融入与之相关的内容中。对线性代数方程组求解、一阶和二阶微分方程求解、三角函数运算、傅里叶级数、拉普拉斯变换等数学知识,从应用的角度进行论述,不仅为不具备或没有掌握好这些知识的读者提供方便,也会逐渐提高读者用数学语言严密阐述工程问题的意识和能力。

2. 内容体系

➤ 本套教材分为《电路理论——基础篇》和《电路理论——高级篇》,基础篇可以单独使用。具体内容如下表。

《电路理论——基础篇》	电阻电路	第1章 电路模型与基本定律 第2章 电阻电路等效变换 第3章 电路分析方程 第4章 电路定理 第5章 含运算放大器的电路 第6章 非线性电阻电路
	暂态电路	第7章 电容、电感及动态电路 第8章 一阶电路的暂态分析 第9章 二阶电路的暂态分析
	正弦稳态电路	第10章 正弦稳态分析 第11章 正弦稳态电路的功率 第12章 三相正弦稳态电路 第13章 含磁耦合的电路
《电路理论——高级篇》	复杂电路	第14章 正弦稳态电路的频率响应 第15章 周期性非正弦稳态电路 第16章 二端口网络 第17章 暂态过程的复频域分析法 第18章 暂态过程的状态变量分析法 第19章 电路的计算机辅助分析基础
	分布参数电路	第20章 均匀传输线的正弦稳态分析 第21章 均匀传输线的暂态分析

- 每章以“概述”开始,以“拓展与应用”结束。拓展意指基于本章内容的拓展学习,应用则指知识的工程应用,具有综合性。少量打*号的内容有一定的难度,它们能对优秀学生起引导作用,但与后续内容没有太紧密的联系,可以取舍。
- 对相关内容设计逻辑主线。例如:
 - 设计从串并联,到桥式电路对称,再到桥式电路平衡,最后到星-三角变换的从简单到复杂的逻辑主线,不断提出问题又解决问题,兼顾学习兴趣、思维方法与学习效率。
 - 以含耦合电感电路的分析方法为主线,将电压-电流关系运用、映射阻抗运用、去耦等效串起来,三种方法用于同一例题,将这些知识有机地联系在一起。
 - 在讨论特勒根定理与互易定理时,设计从功率守恒,到似功率守恒,再到线性电阻二端口网络的似功率守恒的从一般到特殊的逻辑主线,使得理解与应用互易定理较为容易。
- 在第1章阐明非线性元件的概念,第6章介绍非线性电阻电路的分析方法。因此去掉第6章的内容,不影响对非线性元件概念的建立与认识,包括分析含理想二极管的电路。
- 图论的概念与运用集中在第19章。去掉第19章内容不会对其他内容的学习带来影响。19.1节至19.3节是比较容易理解的基础内容,学习该章其他节的内容则要具备较好的电路理论和数学基础。学习第19章时,可以组织学习小组开展电路分析程序设计。
- 对于暂态过程分析的经典法,在内容编排上有以下几点特别的考虑。
 - 为了能够理解电气工程中因不合理操作引起的过电流或过电压现象,在7.3.5小节讨论电容串联与并联、7.4.5小节讨论电感串联与并联时,考虑连接前已具有储能的情况,并由此引出了电荷守恒、磁链守恒、跳变换路等概念。
 - 暂态分析的概念较多,为了加强这部分内容的逻辑性,首先阐述经典法的总体思路,在分析一阶电路的暂态过程时再提出相关概念。因此,7.5节专门阐述经典法的思路,包括列写微分方程、计算初始值的一般思路,以及求解一阶与二阶微分方程。
 - 第8章分析一阶电路的暂态过程,由于有了7.5节的基础,这一章的教学重点是理解暂态过程的规律和相关的物理概念。
 - 二阶电路有着广泛的工程应用,为了加深理解,第9章专门阐述二阶电路的暂态过程。
 - 冲激响应通常是教学中的难点。掌握冲激响应的概念是十分必要的,而用时域方法计算冲激响应则可以取舍。因此,将冲激响应的概念与冲激响应的计算方法分离。如果对冲激响应只要求有概念,则可舍去关于冲激响应计算的8.7节和9.6节。

3. 预备知识

- 《电路理论——基础篇》以微积分、电磁学为基础。知识涉及的数学内容包括:微分与积分计算、线性微分方程求解、线性代数方程组求解、复数及三角函数运算、矩阵与行列式的概念。相关的电磁学知识包括:麦克斯韦方程,电荷、电压、电流、电场、磁场等概念。
- 《电路理论——高级篇》除了上述数学和物理基础外,需要完整地学习了《电路理论——基础篇》,还需要积分变换、偏微分方程的知识,最好还掌握了计算机程序设计基础。

4. 使用方法

本套教材能满足多种层次的教学要求,内容选取建议如下表。“拓展与应用”的知识综合度

较高,可以灵活掌握。舍去 7.5 节可以降低暂态分析的起点和难度。

层次	适用对象	参考学时	建议教学内容
基础	非电类专业	40 ~ 60 学时	内容:第 1 章至第 13 章,不包含打 * 的内容。 1. 2. 4、3. 6、4. 7、4. 8、第 6 章、7. 5、8. 6、8. 7、9. 6、9. 7、10. 6、11. 6、12. 5、12. 6 等内容可取舍。 舍去以上内容后,第 5 章、8. 5、9. 4、10. 5. 6 等内容还可取舍。
中级	电子、信息与自动化专业	60 ~ 90 学时	内容:第 1 章至第 16 章。 3. 6、4. 7、4. 8、7. 5、8. 6、8. 7、9. 6、9. 7、10. 5. 4、10. 6、13. 6. 3、14. 3. 4、14. 4、15. 5 等内容可取舍。
高级	电气专业	90 ~ 110 学时	内容:第 1 章至第 21 章。 19. 4. 3、19. 4. 4、19. 4. 5、19. 5、19. 6、21. 3. 2 等内容可取舍。

5. 致谢

大连理工大学陈希有教授全面审读了书稿,提出许多宝贵意见,陈希有教授严谨的治学态度与很高的专业水准给我留下深刻印象。写作过程中,与电磁场理论和变压器相关的问题,得到过华中科技大学陈德智教授、周理兵教授颇有意义的启发。在作者近 30 载的教学生涯中,电路理论教学楷模、老前辈陈崇源教授给予过颇多指点。与我共同承担电路理论教学与教改的同事谭丹、曹娟、袁芳、李妍、石晶,对电路理论教学内容与方法提出过诸多宝贵意见。谨在此向各位表示衷心感谢!

本书不妥与错误之处,恳请读者批评指正。联系方式:yan_qiurong@sina.com。

颜秋容
2017 年 4 月于华中科技大学

目 录

第 1 章 电路模型与基本定律	1	4.7 特勒根定理与互易定理	145
1.1 概述	1	*4.8 电路定理综合运用	152
1.2 电路模型	3	4.9 拓展与应用	160
1.3 电路变量	9	习题 4	165
1.4 电路元件	16	第 5 章 含运算放大器的电路	173
1.5 基本定律	24	5.1 概述	173
1.6 拓展与应用	36	5.2 集成运算放大器	173
习题 1	40	5.3 理想运算放大器	177
第 2 章 电阻电路等效变换	46	5.4 运算放大电路	181
2.1 概述	46	5.5 运算放大电路的级联	190
2.2 串联与并联	47	5.6 拓展与应用	192
2.3 星形电路与三角形电路	54	习题 5	193
2.4 电源变换	66	第 6 章 非线性电阻电路	200
2.5 拓展与应用	73	6.1 概述	200
习题 2	79	6.2 电路方程分析法	201
第 3 章 电路分析方程	86	6.3 分段线性化方法	203
3.1 概述	86	6.4 图解法	206
3.2 线性代数方程组的解	87	6.5 小信号分析法	208
3.3 结点方程	91	6.6 拓展与应用	215
3.4 网孔方程	104	习题 6	217
3.5 结点法与网孔法对比	114	第 7 章 电容、电感及动态电路	221
*3.6 回路方程	116	7.1 概述	221
3.7 拓展与应用	117	7.2 广义函数	221
习题 3	118	7.3 电容	230
第 4 章 电路定理	124	7.4 电感	241
4.1 概述	124	7.5 动态电路的暂态分析概述	252
4.2 线性特性与线性电路	125	7.6 拓展与应用	268
4.3 叠加定理	126	习题 7	269
4.4 替代定理	132	第 8 章 一阶电路的暂态分析	279
4.5 戴维南定理与诺顿定理	135	8.1 概述	279
4.6 最大功率传输定理	143	8.2 零输入响应(自然响应)	280

8.3 直流电源激励下的响应	292	11.2 瞬时功率	447
8.4 正弦电源激励下的 RC 电路 ...	315	11.3 有功功率与无功功率	450
8.5 含运算放大器的一阶电路	317	11.4 视在功率及功率因数	453
8.6 线性非时变特性	321	11.5 复功率及功率守恒	454
*8.7 冲激响应计算	328	11.6 功率因数校正	457
8.8 拓展与应用	333	11.7 最大有功功率传输	460
习题 8	335	11.8 有功功率测量	466
第 9 章 二阶电路的暂态分析	345	11.9 拓展与应用	468
9.1 概述	345	习题 11	471
9.2 零输入响应(自然响应)	346	第 12 章 三相正弦稳态电路	476
9.3 直流电源激励下的响应	355	12.1 概述	476
9.4 一般二阶电路	361	12.2 三相电路	477
9.5 RLC 串联电路的方波响应	368	12.3 对称三相电路的计算	481
*9.6 二阶电路的冲激响应	369	12.4 对称三相电路的功率	490
9.7 电路的对偶性	372	12.5 不对称三相电路	495
9.8 拓展与应用	375	12.6 三相电路有功功率的测量 ...	502
习题 9	378	12.7 拓展与应用	505
第 10 章 正弦稳态分析	383	习题 12	507
10.1 概述	383	第 13 章 含磁耦合的电路	515
10.2 正弦电量	384	13.1 概述	515
10.3 相量法	389	13.2 耦合电感	515
10.4 阻抗与导纳	403	13.3 含耦合电感电路的分析	524
10.5 复杂正弦稳态电路分析	414	13.4 变压器原理	531
*10.6 位形相量图	428	13.5 理想变压器	536
10.7 拓展与应用	434	13.6 拓展与应用	548
习题 10	439	习题 13	554
第 11 章 正弦稳态电路的功率	447	附录 证明互感 $M_{12} = M_{21}$	561
11.1 概述	447	参考文献	563

电路模型与基本定律

1.1 概述

电路(electric circuits)是由电器件互相连接、能够实现电能转换的系统。电路存在于电力系统、通信系统、计算机系统、控制系统和信号处理系统中。图 1-1-1 为某一电路实例。

电力系统将煤、油、气等化石能源,光、风、潮汐、地热等可再生能源,以及原子核裂变(或聚变)的能量,通过发电机等能量转换部件转换为电能,通过传输网络(电网)将电能传输到各地用户,用户再通过电动机等能量转换部件,将电能转换为其他形式的能量。电能传输

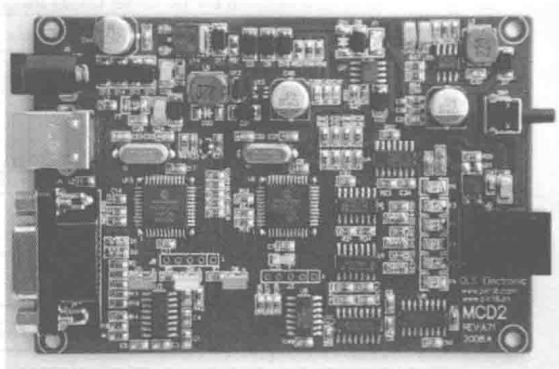


图 1-1-1 电路实例

网络是一个庞大而复杂的、电压和电流等级高的电路,电压可高达 1 000 kV,电流可达千安级。

通信系统将语音、图像、数据等信息转换为电信号,并对电信号进行放大、滤波、组合、调制、压缩等处理,通过空间电磁波(无线通信)、电缆(有线通信)、光缆(光纤通信)等传输方式传输到接收部件,接收部件再将电信号转化为语音、图像、数据等信息。通信系统电压在几伏至几十伏范围内,电流为毫安级。

计算机系统的科学计算、文字处理、数据存储都是通过电信号来实现的,系统包含多种集成芯片,一个集成芯片内可包含成千上万个器件,构成复杂电路,电压为几伏、电流为微安级。

控制系统对炼钢、炼油等工业生产过程的控制,对电梯、汽车、机器人的控制,对高速列车、飞机的控制,均要通过电信号来实现。控制电路根据要求,按一定的原理产生相应的电信号,电信号驱动执行机构完成相应的操作。

信号处理系统对包含信息的电信号进行处理(处理方法包括:滤波、变换、检测、谱分析、估计、压缩、识别),提取能反映某些特征的电信号,并用一定的方式呈现出来。X 射线断层扫描是图像处理系统的典型例子。

任何电路都包含电源或信号源部件、负载部件、连接和控制部件。电源或信号源将其他形式的能量转换为电能并提供给电路。负载部件消耗电能,将电能转换为其他形式的能量。连接和控制部件在电源或信号源、负载之间起着电能输送、信号处理和控制的作用。

电路理论是表 1-1-1 所示一级学科的基础理论。以电气工程学科的本科教育为例,与电路

理论相关的主要课程大致如图 1-1-2 所示。数学、物理是工程学科的公共基础课程,电路理论、电磁场理论是电气工程学科的基础理论课程。电路理论以微积分、微分方程、工程数学、电磁学为基础,应用于学科基础课程、专业基础课程和专业方向课程。

表 1-1-1 以电路理论为基础的一级学科

学科门类	一级学科名称	包含电路的系统
工学	电气工程	电力系统
	电子科学与技术	集成电路
	信息与通信工程	通信系统
	控制科学与工程	控制系统
	计算机科学与技术	计算机系统
	生物医学工程	信号处理系统

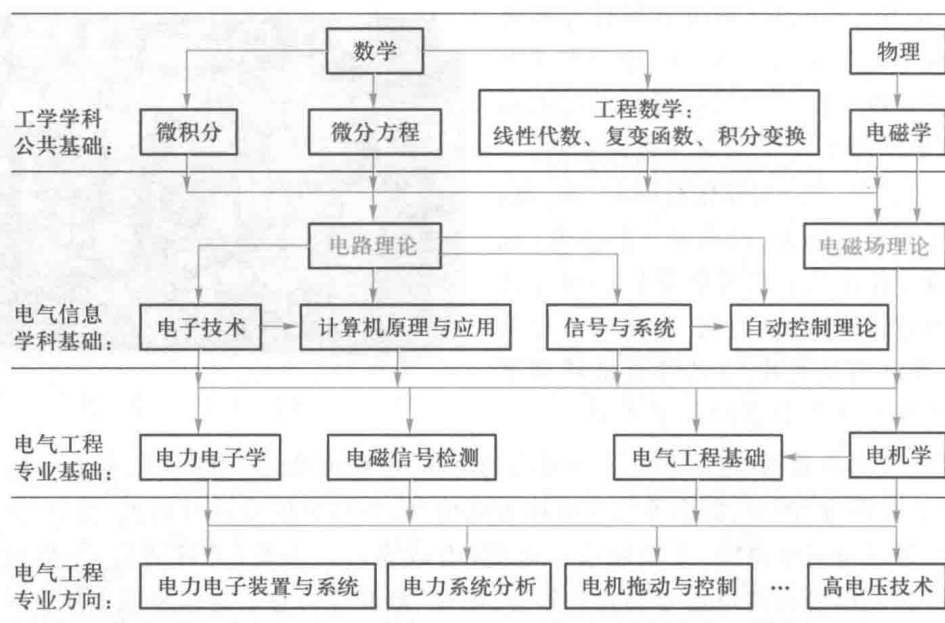


图 1-1-2 电路理论课程在电气工程学科课程体系中的地位

电路理论解决三方面的问题:电路分析问题、电路综合(或电路设计)问题和电路故障诊断问题。

电路分析是在给定电路结构和电器件参数条件下获得电路中的变量。电路分析问题是电路理论的基本问题。

电路分析: 电路结构+ 电器件参数 → 电路变量

电路综合是在给定电路功能的条件下,设计具体的电路结构、选定电器件参数。电路设计要综合性能、成本、可靠性等多个方面进行优化设计,遵循“设计—分析—修改设计—再分析”的流程,电路分析是电路设计的基础。

电路综合: 电路变量 → 电路结构+ 电器件参数

电路故障诊断是对运行不正常的电路进行故障判断和定位。电路故障源于某个(或某几个)电器件的参数变化或电路结构的局部改变,表现为电路变量的实测结果偏离了设计值。在已知电路原始结构和电器件原始参数条件下,通过一些实测的电路变量来进行故障类型判断和故障定位。电路分析也是故障诊断的基础。

电路故障诊断: 电路变量+电路结构 $\longrightarrow$ 电器件参数

电路理论首先要解决的是电路分析问题,因此,电路分析是电路理论的基础,是本科电路理论课程的主要内容。

- 目标1 理解电路模型、集中参数电路假设。
- 目标2 理解电压、电流、电功率的含义,能正确使用参考方向。
- 目标3 理解电阻、独立电源、受控电源的特性。
- 目标4 理解基尔霍夫定律的含义,能正确应用基尔霍夫定律。

难点 理解集中参数电路假设;理解独立电源、受控电源的特性。

1.2 电路模型

用电路理论分析电路时,首先建立实际电路的电路模型,然后对电路模型展开分析计算。

1.2.1 电路分析思路

电路分析的基本思路为:

(1) 确定分析目标,列出所有已知条件与假设条件。工程问题常常出现已知条件不够的情况,需要假设一些条件才能获得目标。

(2) 建立电路模型,称为建模。电路模型也简称为电路或原理图,画出电路,标明已知条件和目标变量。

(3) 选用恰当的分析方法对电路模型进行计算,获得目标变量。分析电路模型的方法有多种,计算最简单的方法就是最恰当的方法。

(4) 对结果进行校验。判断结果的合理性,采用一定的方法验证结果的正确性。

以手电筒电路为例具体说明电路分析思路。图1-2-1(b)为手电筒电路,两节干电池串联构成电源,灯珠为负载,导线、开关为连接与控制部件。假定分析目标为手电筒点亮时流过灯珠的电流,则电路模型如图1-2-1(c)所示。

干电池的特性曲线如图1-2-1(d)所示的实线,其端电压随电流增大而略有下降,当电流超过 $I_{\max}$ 后,电压快速下降。用图1-2-1(d)中的虚线近似干电池的特性曲线,该虚线对应的电路模型为电压源 U_s 和电阻 R_s 串联,如图1-2-1(c)所示。 R_s 代表电池工作时内部消耗的功率。由于金属的电阻率随其温度上升而增大,灯珠的灯丝为金属,灯丝电阻随电流增大而增大,特性如图1-2-1(e)所示的实线,用虚线近似灯珠的特性曲线,因此图1-2-1(c)中 R_L 为灯珠的模

型。滑动开关用接通电阻为零、断开电阻为 ∞ 的理想开关为近似模型,导线用没有电阻的理想导线为近似模型。

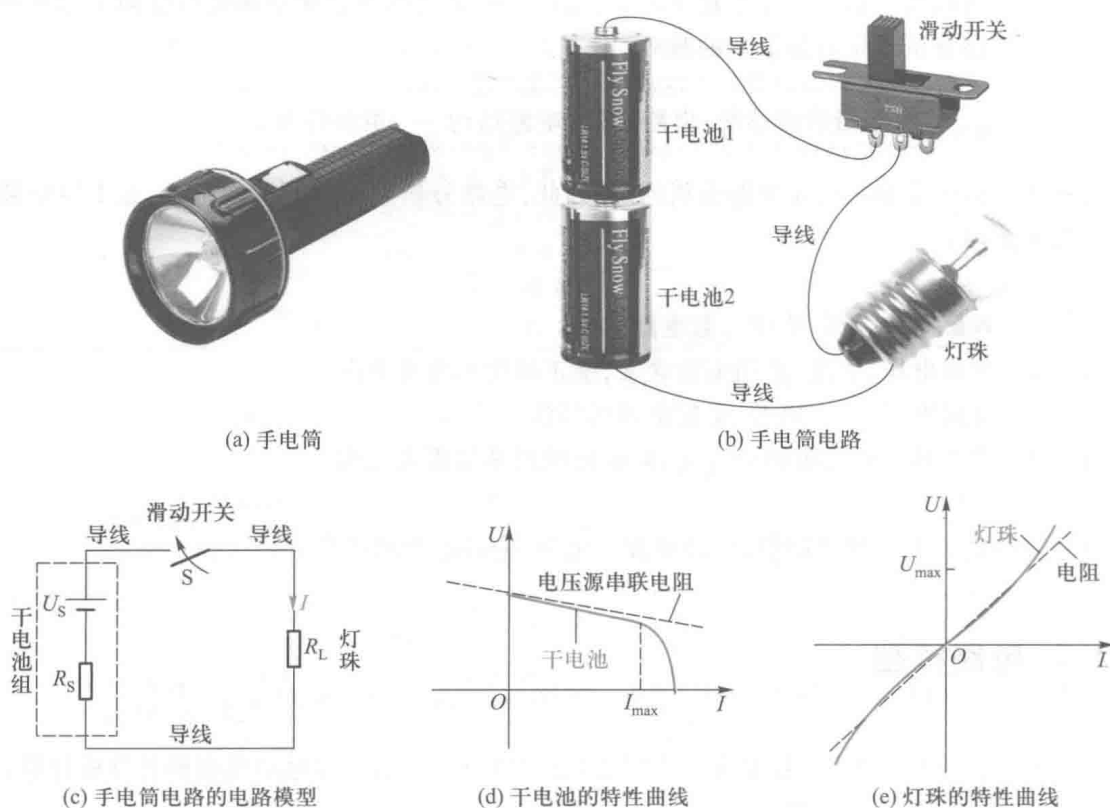


图 1-2-1 手电筒电路及其电路模型

选择列写方程的方法分析图 1-2-1(c) 所示的电路模型。开关闭合时有

$$U_s = (R_s + R_L)I$$

由此得到电路变量

$$I = \frac{U_s}{R_s + R_L} \quad (1-2-1)$$

电路分析思路

1. 确定分析目标:通常为计算电压、电流、功率等变量。
2. 建立电路模型:用理想电路元件的特性或理想电路元件组合所得特性来近似电路中每个电器件的特性,得到电路模型。
3. 分析电路模型:选择恰当的电路分析方法,对电路模型进行计算,获得目标变量。但由于电路模型的近似性,得到的结果是目标变量的近似值。

1.2.2 理想电路元件

要完成电路建模,既要掌握电器件的特性,也要有满足拟合电器件特性需求的理想电路元件。有些电器件的特性可通过实验测量获得,如干电池、灯珠的特性曲线。有些电器件的特性

要通过专门的课程学习才能掌握,例如,在电子技术课程中掌握晶体管的特性,在电机学课程中掌握发电机、电动机、变压器的特性。电路理论作为基础理论,定义了能满足其服务学科需求的若干理想电路元件。

理想电路元件(简称为电路元件)符合以下要求:① 没有空间大小;② 表征单一电磁现象;③ 有精确的特性方程。图 1-2-1(c)中的电压源 U_s 、电阻 R_s 、开关 S 都是理想电路元件,电路模型是理想电路元件的相互连接,电路模型中的电路变量与对应的实际电路相近似。

虽然电器件种类繁多,但电磁现象可分类为:提供电能、消耗电能、变换电能、存储电场能量、存储磁场能量、变量耦合。定义对应于这些电磁现象的电路元件,用电路元件组合得到不同电器件的电路模型。

消耗电能、存储电场能量、存储磁场能量是最基本的电磁现象。定义电阻元件、电感元件、电容元件,分别表征消耗电能、存储电场能量、存储磁场能量。图 1-2-2 为这 3 个元件的电路符号,它们没有空间大小,电阻元件只消耗电能,电容元件只存储电场能量,电感元件只存储磁场能量。本书将分别在 1.4 节、7.3 节、7.4 节详细介绍电阻元件、电容元件、电感元件的特性。

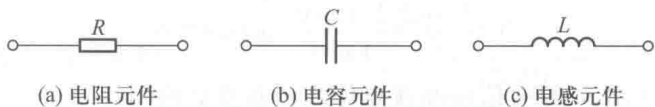


图 1-2-2 电路元件

通常,多种电磁现象共存于一个电器件中。图 1-2-3 所示的线圈(即螺线管)通有电流时,内部和周围存在磁场 B ,电能转换为磁场能量存储于线圈内部和周围;同时,由于导线的电阻和磁心的磁化,线圈发热,电能转换为热能;另外,线圈匝间存在电场 E ,电能转换为电场能量存储于匝间。如果工作电流的频率低,则线圈的感应电动势小,因而匝间电场小,存储的电场能量相比于磁场能量可以忽略,其电路模型如图 1-2-4(a)所示。如果工作电流的频率高,则不能忽略电场储能,其电路模型如图 1-2-4(b)所示。

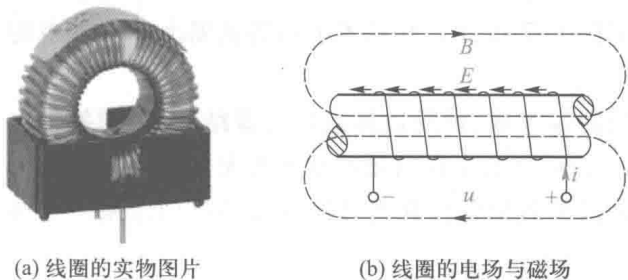


图 1-2-3 通有电流的线圈

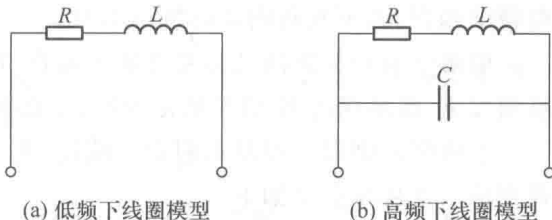


图 1-2-4 线圈的电路模型

1.2.3 集中参数电路模型

任何实际电路都有空间大小,电路中的电磁场在空间中分布,消耗电能也有空间分布特点。严格来说,电路变量是时间和空间的函数,以电磁波的形式传播。当电路变成电路模型后,理想电路元件没有空间大小,电路模型并不表征上述空间分布性。那么,这种忽略空间分布性的近似,在什么条件下可以接受呢?

当电路的尺寸 d 远小于电磁波的波长 λ 时,电磁波在电路中传播的时间可以忽略,电路就可以近似为由理想电路元件互连而成的电路模型。工程上通常要求

$$d \leq 0.01\lambda \quad (1-2-2)$$

满足 $d \leq 0.01\lambda$ 的电路称为集中参数电路(lumped circuits),否则称为分布参数电路(distributed circuits)。理想电路元件也称为集中参数元件。由理想电路元件互连而成的电路模型称为集中参数电路模型。

电力系统中的架空输电线路,电磁波在架空输电线上的传播速度 v 接近于光速($c = 3 \times 10^8$ m/s),当传输电流的频率 $f = 50$ Hz(周期 $T = f^{-1}$)时,其波长

$$\lambda = vT = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{50} \text{ m} = 6 \times 10^6 \text{ m}$$

按照式(1-2-2),长于 6×10^4 m(60 km)的架空输电线路就要作为分布参数电路。有线通信网络中的电缆,若传输的信号频率 $f = 10^6$ Hz(1 MHz)、电磁波在电缆中的传播速度要低于光速,取 $v = 0.6c$,则波长

$$\lambda = \frac{0.6c}{f} = \frac{1.8 \times 10^8}{1 \times 10^6} \text{ m} = 180 \text{ m}$$

按照式(1-2-2),长于 1.8 m 的通信电缆就要作为分布参数电路。

集中参数电路

当电路的几何尺寸 d 远小于电路中信号的波长 λ 时,信号与空间坐标的关系可以忽略,使用没有空间大小的理想元件构成电路模型,称其为集中参数电路。

$$d \leq 0.01\lambda$$

1.2.4 电路理论的基本假设

电路问题是电磁场问题,可用电磁学的方法精确分析,在满足一定假设条件下,又可用电路理论方法近似分析,两种分析理论的对比概括于图 1-2-5 中。理解本节内容需要大学物理中的电磁学知识,若不具备则暂时跳过本节。

电磁学的分析思路是将麦克斯韦方程、媒质特性方程、媒质边界条件三者结合,得到关于电场强度 E 、磁场强度 H 的矢量方程组,计算繁杂,分析复杂工程问题的难度太大。

电路理论则以三点基本假设为前提,利用电路的近似模型获得可以接受的近似结果。电路理论的三点基本假设如下:

基本假设 1 电磁效应瞬时传遍全电路。当电路的尺寸 d 和信号的波长 λ 满足 $d \ll \lambda$ 时,电路可用集中参数电路模型来近似。这是因为电源产生的电磁效应以有限速度 v 向电路传播,若电源的变化规律为

$$u(t) = U_m \cos \omega t$$

则在距离电源 x 处,要滞后 $\frac{x}{v}$ 的时间才能体现电源的变化规律,即 x 处的电磁波为

$$u(x, t) = U_m(x) \cos \left[\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) + \theta \right]$$

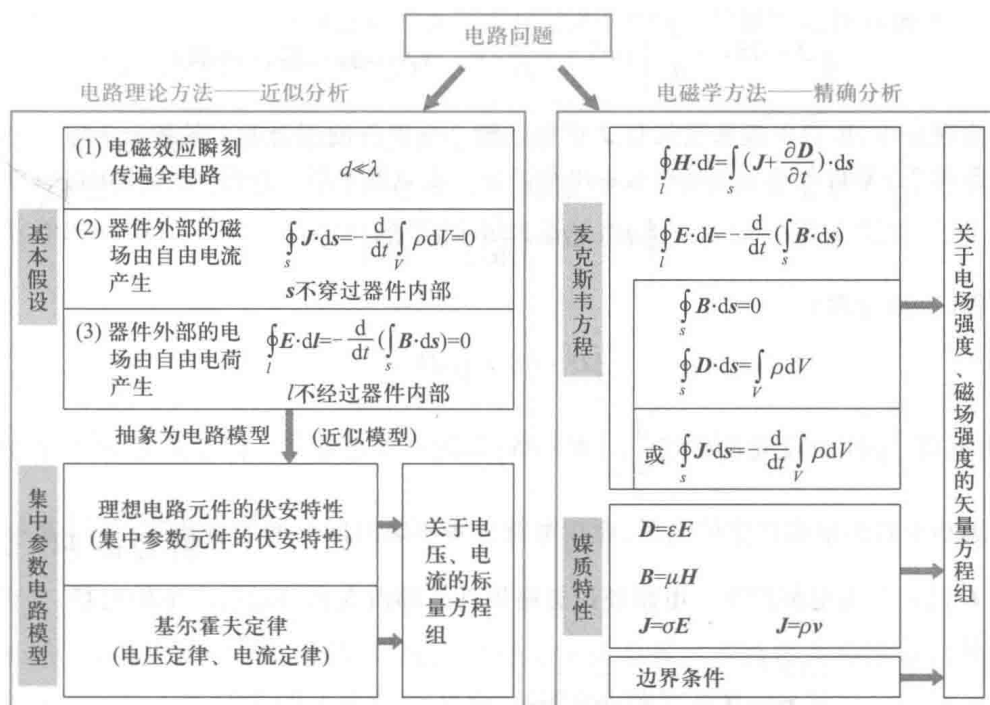


图 1-2-5 电路问题的两种分析理论对比

电磁波从 $x=0$ 传输到 $x=d$ 所需时间为 d/v , 当这个时间远小于电磁波的周期 T 时, 滞后效应可忽略。因此要求

$$\frac{d}{v} \ll T$$

若波长为 λ 、周期为 T , 则有

$$\frac{\omega\lambda}{v} = 2\pi, \quad \omega T = 2\pi$$

将 $v = \frac{\omega\lambda}{2\pi}$ 、 $T = \frac{2\pi}{\omega}$ 代入 $\frac{d}{v} \ll T$, 得

$$\boxed{d \ll \lambda} \quad (1-2-3)$$

基本假设 2 器件外部的磁场由自由电流产生。麦克斯韦第一方程(全电流安培环路定理)

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_s \left(\mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) \cdot d\mathbf{S}$$

表明: 由自电流密度矢量 $\mathbf{J}$ 和变化的电场 $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$ 共同产生磁场 $\mathbf{H}$ 。但在低频下, $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \ll \mathbf{J}$, 而在 $\mathbf{J}$ 不随时间变化的直流下, $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = 0$ 。电路理论忽略器件外部由 $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$ 产生的磁场, 麦克斯韦第一方程变为

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_s \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} \quad (l \text{ 不经过器件内部}) \quad (1-2-4)$$

由此导出电路满足的电荷守恒定律为

$$\oint_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} = -\frac{d}{dt} \int_V \rho dV = -\frac{dq}{dt} = 0 \quad (S \text{ 不穿过器件内部}) \quad (1-2-5)$$

因此在电路理论中,由自电流密度矢量 $\mathbf{J}$ 在包围整个电器件的闭合面上的积分为零。

基本假设 3 器件外部的电场由自由电荷产生。麦克斯韦第二方程(法拉第电磁感应定律)

$$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \left(\int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \right)$$

和第四方程(高斯定理)

$$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \int_V \rho dV$$

表明:自由电荷 $\int_V \rho dV$ 和变化的磁场 $\frac{d}{dt} \left(\int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \right)$ 都能产生电场 $\mathbf{E}$ 。但在低频下,变化的磁场产生的电场远小于自由电荷产生的电场,而在电荷分布不随时间而变的直流下, $\frac{d}{dt} \left(\int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \right) = 0$, 此时电场 $\mathbf{E}$ 仅由自由电荷产生。电路理论忽略器件外部由变化的磁场产生的电场,麦克斯韦第二方程变为

$$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \left(\int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \right) = 0 \quad (l \text{ 不经过器件内部}) \quad (1-2-6)$$

因此在电路理论中,电场 $\mathbf{E}$ 对不经过器件内部的闭合路径的线积分为零,即 $\mathbf{E}$ 的线积分与路径无关。

在上述三点基本假设下,电路可用集中参数模型来近似,且用电压 u 取代电场强度 $\mathbf{E}$ 、电流 i 取代磁场强度 $\mathbf{H}$,电压 u 、电流 i 分别满足基尔霍夫电压定律、电流定律。分析电路的方程是关于电压、电流的方程组。电路理论使得复杂工程问题的分析变得容易,结果的准确度能满足大多数工程问题的要求。

值得说明的是:电路理论的三点基本假设并非相互独立,从基本假设 2 可得基本假设 1,从基本假设 3 也可得基本假设 1。基本假设 1 的意义在于用相对直观的方式确定了集中参数电路模型的适用范围。我们将从基本假设 2、基本假设 3 导出电路理论的基本定律,即基尔霍夫定律。

建模与计算是电路分析的两个主要方面,电路理论课程一般包含:

- (1) 建立集中参数电路模型的思路;
- (2) 计算集中参数电路模型的方法;
- (3) 分析电气、电子与信息工程中的电路问题。

计算集中参数电路模型的方法又分为三大类:等效变换方法、电路方程分析法和电路定理分析法。本套教材第 2 章介绍等效变换方法,第 3 章介绍电路方程分析法,第 4 章介绍电路定理分析法。从第 5 章开始,讨论与电路相关的各种工程问题及其分析计算,包括:含运算放大器的电路分析(第 5 章),非线性电阻电路分析(第 6 章),电路的暂态过程分析(第 7、8、9、17、18 章),正弦稳态电路分析(第 10、11、12、13、14 章),非正弦稳态电路分析(第 15 章),二端口网络分析(第 16 章),电路计算机辅助分析(第 19 章)、分布参数电路分析(第 20、21 章)。

本套教材中,“电路”既指由实际电器件相连的“实际电路”,又指由理想电路元件相连的