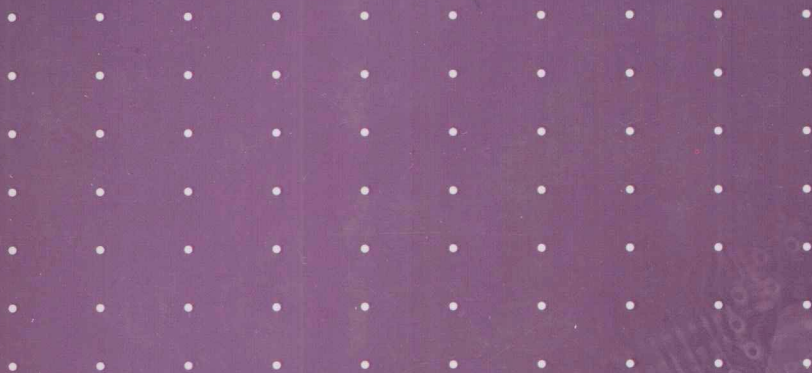


教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会推荐教材

电路理论教程

■ 陈希有 主编



013062858

TM13
258

教育部高等学校电子电气基础课程教学指导委员会推荐教材

电路理论教程

Dianlu Lilun Jiaocheng

■ 陈希有 主编



1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
19	19	19	19	19	19	19	19	19	19
20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
28	28	28	28	28	28	28	28	28	28
29	29	29	29	29	29	29	29	29	29
30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
33	33	33	33	33	33	33	33	33	33
34	34	34	34	34	34	34	34	34	34
35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
36	36	36	36	36	36	36	36	36	36
37	37	37	37	37	37	37	37	37	37
38	38	38	38	38	38	38	38	38	38
39	39	39	39	39	39	39	39	39	39
40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
42	42	42	42	42	42	42	42	42	42
43	43	43	43	43	43	43	43	43	43
44	44	44	44	44	44	44	44	44	44
45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
46	46	46	46	46	46	46	46	46	46
47	47	47	47	47	47	47	47	47	47
48	48	48	48	48	48	48	48	48	48
49	49	49	49	49	49	49	49	49	49
50	50	50	50	50	50	50	50	50	50

3970-018-00-04
 ms.alio.net/www/11111
 hd.ms.alio.net/www/11111
 www.compass/www/11111
 www.compass/www/11111
 5970-018-00-04
 限开大：美元 8 平 2102
 (益光合)元 00.10

http://www.
 http://

TM13
258



高等教育出版社·北京
 HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

8385828 013085828

内容简介

本书介绍电路理论的基本知识。在故事性地概括了电磁发展的主要事件之后,接着阐述了电路理论的基础性问题。然后按照电压和电流的变化规律依次介绍了直流电路、正弦交流电路、三相电路、非正弦周期电路、电路的频率特性和暂态电路等内容。其次介绍了电网络的端口分析和图论分析的入门知识。最后介绍了与线性电路构成对照的非线性电路、与集中参数电路构成对照的分布参数电路(以均匀传输线为例)。

为使读者快速了解电路的计算机辅助分析方法,随书所附光盘提供了实践 Multisim 和 MATLAB 的示例,以及“电路仿真平台 Multisim 概要”和“数值计算工具 MATLAB 概要”两个简短的使用说明。此外还提供了教材主要插图,以便教师制作教学课件。为查阅方便,还编写了“常用数学公式与方法”和“麦克斯韦方程组”两个附录。

本书注重电磁学原理和数学方法在电路理论中的应用,以加强电路理论的电磁学基础,并培养学生的数学应用能力;将工程问题融入理论内容之中,以培养学生用电路理论解决实际问题的能力;将基本知识顺理延伸,为学有余力的学生提供恰当的选读内容;【导读】使各章开篇平缓,【结语】让读者产生回味;每章之后的开放性思考题,引导读者勤于思索电路理论的概念性和原理性问题,避免只会计算。

本书可作为高等院校电气类、电子信息类、自动化类专业本科生“电路理论基础”、“电路分析基础”课程教材或教学参考书,也可供研究生、工程技术人员和电路爱好者参考。

图书在版编目(CIP)数据

电路理论教程 / 陈希有主编. -- 北京:高等教育出版社,2013.8

出版社,2013.8

ISBN 978-7-04-037927-3

I. ①电… II. ①陈… 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(2013)第 159518 号

策划编辑 杜 炜
插图绘制 尹 莉

责任编辑 杜 炜
责任校对 刘 莉

封面设计 赵 阳
责任印制 田 甜

版式设计 马敬茹

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
印 刷 廊坊市科通印业有限公司
开 本 787mm × 1092mm 1/16
印 张 36.5
字 数 890 千字
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
版 次 2013 年 8 月第 1 版
印 次 2013 年 8 月第 1 次印刷
定 价 61.00 元(含光盘)

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 37927-00

前 言

教材建设是个永恒话题。随着高等学校人才培养目标的多元化以及教育质量工程的实施,教材建设呈现出多样化的发展趋势。就电路类教材而言,多样化包括:增加计算机辅助分析内容,以培养学生使用计算工具的能力;增加联系实际的内容,以培养学生的工程应用能力;融入电子技术内容,以淡化电路理论与电子技术的界限,并强调电路的信息处理功能。无疑,这些建设成果都是值得肯定的。

此外,在教材内容呈现上述多样化的同时,还应该有一批教材特别注重它的基础作用,因为电路理论课程是重要的技术基础课程。未来的大多数科技创新,不是单靠像发现壶盖振动和苹果落地这样的启发性事件就能完成的。“核磁共振”、“嫦娥绕月”、“蛟龙探海”、“全球定位”等,实现这些尖端技术都需要具备扎实的理论基础。创新源于基础。

因此,在电路理论教学中,适当追溯电路问题的电磁学渊源、加强数学方法的运用、注重物理原理的阐述等,都是十分重要的。由此可以使电路理论的电磁根基更加扎实、逻辑推理更加严密、物理概念更加突出,从而有利于培养具有扎实电工基础的专业人才。这便是编写本教材的主要动因。编者在编写过程中主要做了如下尝试:

1. 加强电路理论的电磁学基础

电路理论源于电磁学和电子学,但自电路理论建立以来,渐渐地将电路理论的基本定律和电路元件以公理或人为定义的方式提出,研究对象也都是理想化的电路模型。这样虽然给课程教学带来许多方便,但不利于学生准确理解电路问题的电磁学背景,因而影响对电路中电磁现象的深入认识,因为实际电路的电磁现象并不像电路模型那样单纯。

基尔霍夫定律是关于集中参数电路中电流和电压的定律,为阐明其正确性,本教材从电流现象逐步引出电流变量;从电场性质逐步引出电压变量;对实际电路进行科学抽象得到集中参数电路;将电流连续性定律应用于集中参数电路得到基尔霍夫电流定律;将电磁感应定律应用于集中参数电路得到基尔霍夫电压定律。这样有助于学生理解基尔霍夫定律与电磁学普遍规律的关系。

在讲述电路元件时,通过忽略实际电器元件的次要特征而保留主要特征,使理想电路元件成为实际电器元件经过这些忽略后而保留的分析模型。这样的过程更符合电路建模规律,更能强调电路模型与实际电路的关系。

根据均匀传输线实际存在的物理现象,利用基本的电磁学原理建立均匀线电压和电流方程,使建立过程和谐对称,体现电磁规律的对称美。

诸如上述示例,密切了电路理论与电磁学的关系。

2. 引导学生多用数学方法进行思维

电路理论除用电磁学原理来阐释外,还可用数学方法加以证明。例如,①通过矩阵求逆建立星形和三角形网络的等效变换关系;②基于互感储能非负的客观事实和半正定二次型的性

质,证明了耦合系数小于1的结论;③基于线性方程组的可加性建立了叠加定理,并很自然地说明了叠加定理的应用条件和应用方法;④将正弦量的相量表示建立在数学变换基础上,以期减少相量等于正弦量的常见错误,并与后面的拉普拉斯变换相呼应;⑤将全响应等于零输入响应与零状态响应叠加的结论建立在线性微分方程解的可叠加性基础上;⑥用拉普拉斯变换求解无畸变传输线方程的通解,等等。这些数学方法的运用一方面可以使得电路理论的叙述更加严密,另一方面有助于引导学生面对工程问题时,学会使用数学方法进行理性思维,并注重对后续数学课程的学习。

3. 将工程问题融入理论内容之中

在电路理论教学中加强工程应用能力的培养是当前教学改革和教材建设的重要动向。为此,本教材在陈述某个理论内容的同时顺便联系与之密切相关的工程问题,使理论与实践有机结合,以培养理论联系实际的工程观点。例如,①在介绍实际器件主要电磁特性之后,简要介绍它们的额定值,以便正确应用这些器件;②总结了实际电源与理想电源的差别;③在介绍运算放大器时,分析了采用平衡电阻的必要性和有源滤波器不使用电感的原因;④通过分析RC充电效率低下的原因,提出了提高充电效率的方法;⑤对电弧、碳化硅陶瓷、双极型绝缘栅晶体管、电滞特性的非线性电容的介绍,使抽象的非线性元件有了具体的工程背景;⑥介绍直流稳态电路模型、交流稳态电路模型、暂态电路模型的适用场合,以培养学生能够根据所研究的工程问题选择合适的电路模型。

4. 强调概念的重要性

电路理论是概念与方法的集合。相比之下,基本概念更为重要,因为它是建立分析方法的基础。为强调基本概念的重要性,本教材:①按照做功—消耗或储存能量—做功速率(即功率)的物理顺序,介绍电阻、电容和电感元件的能量特性和功率计算。因为电路实际上是能量的转化系统,电信号也离不开能量,所以能量的概念比功率更加基本,功率只是反映能量变化的速率。②在阐述回路电流法和节点电压法时,主张直接根据基尔霍夫定律列写方程。这样,方程中每项都对应具体元件的电压或电流,因而概念清楚,遇到诸如纯电流源、纯电压源支路以及运算放大器时也知道如何列写电路方程,以免机械地使用自阻、互阻或自导、互导的规则所导致的列写错误。③在讨论换路后的初始条件时,从能量连续变化的客观事实入手,阐述电容电压和电感电流的连续变化特性并建立换路定律。④在阐述戴维南定理时,从线性电路的性质入手,得出—端口网络电压与电流关系是一条直线,再通过分析这条直线得出戴维南等效电路,等等。

5. 顺理延伸教学内容

本教材内容适度超出教学基本要求,但这些超出的内容是基本内容的顺理延伸。这样做—是为了使基本内容的来龙去脉更加清楚,二是给学有余力的学生带来阅读上的满足感。教材用带“*”号的章节或用带【扩展】的标题来表示这些内容。例如,①特别介绍了基尔霍夫的最初论文,以使读者了解基尔霍夫定律与当年基尔霍夫论文的关系,并对基尔霍夫产生敬仰之情;②以参数变动电路的计算为示例,介绍了置换定理的特殊应用;③通过对灵敏度的简单分析,为特勒根第二定理和互易定理找到了特有的应用场所;④利用互感储能是电流状态单值函数的概念,证明了两个互感系数相等的结论;⑤结合中性点位移的概念,详细分析了相序指示器原理,并启发学生针对存在的问题提出改进措施;⑥在双绕组变压器基础上,分别介绍了三绕组变压器、带中心抽头变压器和自耦变压器,这些都是实践中常用的电工设备;⑦通过对忆阻器的

介绍,使教材能够反映电路元件的最新研究进展,并激发读者的探求欲望。

6. 引导学生使用现代计算工具

随着计算机技术的发展,分析或设计电路已由人工计算转为使用商业软件,掌握这些软件的使用方法也是大学毕业生不可或缺的技能。但教材不专门讲授这些内容,待学生具备一定的电路理论之后,告诉学生可以采用计算机仿真方法来计算较复杂的例题或绘制复杂的曲线。在教材的配套光盘中专门介绍了电路仿真平台 NI Multisim 和数值计算工具 MathWorks MATLAB 的入门知识,并编制了供学生参照练习和教师课堂教学的仿真示例。这些做法既能逐步引导学生使用现代计算工具的意识,又能强调学好基础理论的重要性。

7. 把绪论当做故事

绪论是教材或教学的重要序幕。本教材认真梳理了人们对电磁技术的认识过程,按照从无意识观察到有意识探索;从定性研究到定量研究;从分散研究到系统归纳;从理论研究到造福人类的发展规律,给电磁重大历史事件在电磁技术发展的长河中找到恰当的位置。这样可以引导读者站在发展的角度看待这些历史事件所起的作用和彼此之间的内在联系,并由此对电工巨匠们产生由衷的敬仰之情。对培养学生兴趣、了解发展脉络、立志科学研究,一定会起到有益的作用。在总结发展规律、阐明电的重要地位和电路理论在当代科学中所起的基础作用之后,顺理成章地阐述了课程地位、课程性质、教学目的、教学内容和学习方法。这种叙事性的描写方式,经教师发挥之后,绪论便成为引人入胜的故事。

8. 采用平易近人的叙述方式

根据作者以往的教材建设经验,并参照国内外优秀教材特点,本教材努力采用平易近人的叙述方式,期望读者能够感受到作者是以近距离交流的方式在徐徐地阐述知识,从而产生阅读上的亲切感。具体做法是遵循逻辑上的深入浅出原则、文法上的亲近平和原则。

深入浅出原则是指对电路的主要概念和定理,先采用若干简单例子作为引导,然后再通过概括和推广的办法来阐述概念和定理。这样可以做到循序渐进、步步深入,使理解理论内容变得更加顺畅自如。例如,在阐述齐性定理、叠加定理、等效电源定理、置换定理和特勒根定理时,都采取了这样的原则。

亲近平和原则是指在文法用词上,多采用流畅简短的句式、通俗易懂的修辞、现场交流的语气。

教材各章以【导读】开始,序幕性地介绍本章内容的背景、地位、与前序章的关系、研究对象及方法特点等,以便平缓切入正文。在正文后的【结语】中,以灵活自由的形式,介绍教学感悟、内容评价、学习指导、历史敬仰等。【导读】和【结语】也是为了更加亲近读者。

9. 培养读者的思考和归纳习惯

教材在每章的【思考题】中提出了具有扩展性和开放性特点的问题,以加深对物理概念的理解和甄别,在正文中一般找不到直接回答这些问题的文字,需要读者自己去思考。对这些问题的回答都不需要严格的计算,避免仅以计算的方式学习电路理论。各章没有小结部分,意在让读者以个人之见自我思索,结合课堂学习形成自己的归纳结果,因为良好的归纳习惯也是一种重要的学习方法。正文中用黑点和黑体字对重要结论、概念和术语进行了标注,这些可以帮助读者进行总结。

参加本教材编写的还有大连理工大学电气工程学院的李冠林博士和自动化学院的王宏伟博

士,他们在正文编写、习题设计、素材搜集和内容审读等方面完成了大量且卓有成效的工作。

本教材使用效果有待读者的反馈,教材质量的提高更离不开读者的关怀,您的意见就是对教材的最佳爱护。意见请直接发送至作者邮箱:chenxy@dlut.edu.cn。

陈希有

2013年1月于大连理工大学

致 谢

在本教材编写过程中,作者就电流、电压和集中参数电路的阐释方法,以及电磁学历史事件等问题,多次请教中国工程院院士俞大光教授。俞老师不顾年迈的身体,在关键性问题上给予耐心讲解,受益匪浅。真诚感谢俞老师的长期关怀,并祝俞老师学术之树常青!

我的教学工作指导教师许承斌教授,欣然答应我的请求,仔细地评阅了全书。从概念、逻辑、内容,到文法、修辞,都给予了详尽的修改,众多合理性见解已成为我教材建设的准则,为确保教材质量起到了重要作用。真诚感谢许老师的热情相助,并祝许老师安康幸福!

作者还就电磁学基础性问题,专门请教了北京航空航天大学雷银照教授和大连理工大学刘军民教授,对两位老师在电磁学方面的斧正表示诚挚谢意!

感谢我的同行,大连理工大学董维杰教授,她结合自身的教学和教材建设经验,对全书进行了认真审读,并提出恰如其分的修改建议。对董老师百忙之中奉献时间与智慧表示由衷的感谢!

感谢我的母校哈尔滨工业大学电工基础教研室的同事们,他们对我以往教材建设工作提出了许多诚恳的建议,在本教材中充分考虑了这些建议。

还要感谢我的学生们,他们在学习电路课程时,及时向我表达了听课感受和阅读以往教材的体会,这些都为教材建设指明了努力方向。

全书成稿后,分别承蒙两位国家教学名师——西安交通大学罗先觉教授和西北工业大学段哲民教授主审。他们分别从各自的角度对教材提出了中肯的修改意见,大部分意见已被采纳。他们严谨的学术作风和精湛的学术水平,使教材质量得以严格检验。为此,特别对罗教授和段教授在事务繁忙之中所做的耐心审阅致以诚挚谢意!

在编写过程中,大量参阅了中外同类教材和其他相关教材,深受启发,并引用了部分观点。参考资料目录已在书后列出,衷心感谢这些参考资料的作者们。

编写工作还得到了大连理工大学教材出版专项基金的资助,为确保按计划完成教材编写工作提供了重要支持。在此向大连理工大学教务处致以特别的谢意!

感谢“教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会”将本书列为推荐教材,这是对教材特点的充分肯定。

感谢高等教育出版社编辑与作者的长期合作,他们细致、耐心的工作使本书以优美规范的版式和通俗流畅的文法得以面世。

陈希有

2013年1月于大连理工大学

绪论	1
第1章 电路理论的基础性问题	8
1.1 电流现象与电流变量	8
1.2 电场与电压 电动势	12
1.3 耗能元件——电阻	16
1.4 储能元件——电容	19
1.5 储能元件——电感	23
1.6 独立电源	27
1.7 受控电源	33
1.8 实际电路的科学抽象	35
1.9 基尔霍夫定律	38
习题一	44
第2章 线性直流电路	49
2.1 直流电路模型的客观背景	49
2.2 电阻的串联与单回路电路	51
2.3 电阻的并联与双节点电路	55
2.4 戴维南电路与诺顿电路	59
2.5 电阻的星形和三角形联结	61
2.6 支路电流法与基尔霍夫的研究	63
2.7 回路电流法及其改进方法	69
2.8 节点电压法及其改进方法	73
习题二	80
第3章 电路定理	88
3.1 齐性定理与叠加定理	88
3.2 等效电源定理	92
3.3 最大功率传输定理	96
3.4 置换定理及其应用	98
3.5 特勒根定理及其应用	103
3.6 互易定理及其应用	107
3.7 对偶原理	112
习题三	114

第4章 正弦交流电路	123
4.1 正弦电路的特点和正弦量的概念	123
4.2 正弦量的相量变换	128
4.3 基尔霍夫定律的相量形式	133
4.4 单一元件电压与电流关系的相量形式	134
4.5 <i>RLC</i> 串联电路的阻抗	139
4.6 <i>RLC</i> 并联电路的导纳	143
4.7 给定频率下一端口网络的等效电路	145
4.8 正弦电路的相量分析法	147
4.9 正弦电路单一元件的功率	152
4.10 正弦一端口网络的功率	156
4.11 功率因数的提高	163
4.12 正弦电路中的最大功率传输	165
习题四	169
第5章 含磁耦合器件的电路	177
5.1 磁耦合现象与互感元件	177
5.2 互感元件的等效化简	182
5.3 含互感元件的正弦交流电路	184
5.4 电磁变压器	190
习题五	197
第6章 三相电路	203
6.1 三相制的初步认识	203
6.2 三相电源及三相负载的连接	206
6.3 三相电路的连接与对称条件下的计算	209
6.4 不对称三相电路	215
6.5 三相电路功率的计算	220
6.6 三相电路功率的测量	224
习题六	228

第 7 章 线性非正弦周期电流电路 ····· 232	10.12 状态变量分析法* ····· 346
7.1 非正弦周期量的存在性 ····· 232	习题十 ····· 350
7.2 非正弦周期信号的频谱 ····· 234	第 11 章 线性电路暂态响应的
7.3 有效值、平均值及波形性质的 描述 ····· 240	复频域分析 ····· 357
7.4 平均功率和视在功率 ····· 243	11.1 拉普拉斯变换与复频域概述 ····· 357
7.5 非正弦周期电流电路的计算 ····· 245	11.2 复频域中的电路定律与电路 模型 ····· 358
7.6 对称三相电路中的谐波* ····· 251	11.3 暂态响应的复频域分析法 ····· 363
习题七 ····· 254	11.4 复频域网络函数及其性质 ····· 373
第 8 章 电路的频率特性 ····· 257	习题十一 ····· 379
8.1 电路响应与频率的关系 ····· 257	第 12 章 二端口网络 ····· 384
8.2 <i>RLC</i> 串联电路的频率特性 ····· 262	12.1 二端口网络概述 ····· 384
8.3 <i>RLC</i> 并联电路的频率特性 ····· 268	12.2 导纳参数 ····· 386
8.4 网络函数及其频率特性 ····· 271	12.3 阻抗参数 ····· 390
习题八 ····· 277	12.4 传输参数 ····· 393
第 9 章 运算放大器及其应用 ····· 281	12.5 混合参数 ····· 396
9.1 运算放大器简介 ····· 281	12.6 二端口网络的等效电路 ····· 400
9.2 运算放大器在信号运算中的应用 ··· 284	12.7 二端口网络与电源和负载的 连接 ····· 403
9.3 运算放大器在信号处理中的 应用* ····· 290	12.8 二端口网络的互联与反馈原理 ····· 410
习题九 ····· 296	习题十二 ····· 415
第 10 章 线性电路暂态响应的	第 13 章 电网络的图论分析 ····· 420
时域分析 ····· 300	13.1 网络的图 ····· 420
10.1 时域分析概述 ····· 300	13.2 关联矩阵与基尔霍夫定律 ····· 422
10.2 电路变量的初始值 ····· 302	13.3 基本回路和基本割集 ····· 424
10.3 一阶电路的零输入响应 ····· 304	13.4 基本回路矩阵与基尔霍夫定律 ····· 428
10.4 阶跃和脉冲电源作用下的零状态 响应 ····· 310	13.5 基本割集矩阵与基尔霍夫定律 ····· 430
10.5 冲激电源作用下的零状态 响应* ····· 316	13.6 广义支路及其方程的矩阵形式 ····· 433
10.6 正弦电源作用下的零状态响应 ····· 321	13.7 用矩阵运算建立电路方程 ····· 434
10.7 任意电源作用下的零状态 响应——卷积* ····· 324	习题十三 ····· 437
10.8 暂态过程的全响应 ····· 326	第 14 章 非线性电路 ····· 441
10.9 一阶电路暂态响应的普遍形式 ····· 329	14.1 非线性电阻的分类认识 ····· 441
10.10 微分电路和积分电路* ····· 336	14.2 非线性电感与非线性电容 ····· 450
10.11 二阶电路的暂态响应 ····· 338	14.3 非线性直流电路 ····· 454
	14.4 分段线性的直流电路 ····· 459
	14.5 周期性电源作用下的非线性 电路 ····· 461

14.6 直流和交流小信号电源作用下的 非线性电路	465	15.5 无损线上的驻波现象	508
14.7 非线性暂态电路的状态方程	468	15.6 均匀线的集中参数等效电路	516
14.8 状态平面分析*	471	15.7 信号的无畸变传输*	519
14.9 分段线性的暂态电路	473	15.8 均匀线暂态过程的一般描述	522
14.10 小扰动作用下的暂态电路	477	15.9 无损线始端阶跃电压的发出	525
14.11 平衡状态的稳定性与自激 振荡*	479	15.10 无损线上波的反射与透射	527
习题十四	484	15.11 无损线上波的多次反射*	534
第 15 章 均匀传输线	491	习题十五	538
15.1 均匀传输线参数与方程	491	附录 A 常用数学公式与方法	542
15.2 均匀线的正弦稳态响应	493	附录 B 麦克斯韦方程组	548
15.3 给定边界条件下的电压与电流 分布	500	附录 C 电路理论知识导图	549
15.4 正弦交流工作下的无损线	505	附录 D 部分习题参考答案	550
		附录 E 中英文名词对照	561
		参考文献	568
		结束语	570

绪 论

(二)

(一)

电磁是神奇的,虽不能用肉眼视之,但却无处不在。在一些人看来,电磁的奥秘已经被揭穿,但并不是所有人都能看透这些奥秘。尤其是对刚刚升入大学的学生们,在你们面前还有许多电磁奥秘尚不知晓,因此需要努力探索。

探索电磁奥秘首先要带着强烈的好奇心并敏锐观察,就像对电磁的最初发现那样。起初人类从自然界的电闪雷鸣和天然磁石中开始注意到电磁现象,完全是无意识发现和好奇观察,并不是生存所驱使,因为当时人类并不知道电磁到底能做什么。人们把雷电解释成雷神在敲打锤子。希腊学者泰勒斯(Thales of Miletus, 约公元前 624 年—公元前 546 年)记录了毛皮与琥珀相互摩擦后能够吸引轻小物体的摩擦生电现象。我国关于磁石的最早记载(也是世界最早记载)见于春秋时期管仲学派的《管子·地数篇》,时值公元前 650 年左右。此后战国时期吕不韦领编的《吕氏春秋·精通篇》(公元前 249 年)载有“慈石召铁,或引之也”。人们还发现磁石具有指示方向的作用,春秋战国时期的《韩非子》和东汉王充(27—约 97)著《论衡·是应篇》中提到的“司南”就是这种用来指示方向的仪器。我国发明的指南针则是由北宋年间的指南鱼改进而来。沈括(1031—1095)所著《梦溪笔谈》(成书于 1086—1093 年)中记载了指南针的使用方法。《论衡·乱龙》中还有“顿牟掇芥,慈石引针”的记载,最早把静电现象和磁现象相并列。以上这些都是对电磁现象的偶然发现和简单记载与应用。由于认识所限,只好用“气”来解释这些现象。经过岁月的发展,起初的偶然发现和好奇观察,就像牛顿力学一样,终于引起了新的技术革命,彻底改变了人类的生存方式。所以好奇心极为重要。

无意识的好奇性观察有了一定频次之后,就会变成主动探索和定性研究。16 世纪下半叶,英国女王的御医吉尔伯特(William Gilbert, 1540—1603)研究了地磁,又通过实验使人们有了“带电体”和“非带电体”的概念;1729 年,英国发明家格雷(S. Gray, 1670—1736)在研究电究竟能传多远时,将所有材料分成了两大类:导体和绝缘体。导体的发现意义重大,没有导体就难以给电流规定路径,也就难以诞生如今的电气工程和电子工程;1733 年,法国人杜菲(C. F. Dufay, 1698—1739)发现了两种带有不同电性的物质,并总结出同性电相斥、异性电相吸的规律;1745 年,荷兰莱顿大学设计了能够储存电的容器——莱顿瓶,促进了静电研究;18 世纪中期,美国科学家富兰克林(Benjamin Franklin, 1706—1790)发现电荷有两种:正电和负电,并于 1747 年通过实验发现了电荷守恒原理;1752 年 7 月,他做了著名的风筝实验,把风筝系在莱顿瓶上,在莱顿瓶上搜集到了“天电”,并统一了“天电”和“地电”。意大利物理学家伏打(Alessandro Volta, 1745—1827)精心研究了意大利医生伽伐尼(Luigi Galvani, 1737—1798)对青蛙“触电”的发现,即用两个不同的金属与青蛙腿接触并构成闭合回路,那条腿就会抽搐起来。此发现后来成为接

触电动势学说的依据。受此启发,伏打于1799年发明了世界上第一个电池——伏打电池,这虽与接触电有关,但与动物(青蛙)并无联系。动物的肌肉并不会产生电流,相反是肌肉神经在电流的刺激下发生了抽搐。用导体将伏打电池的两极接通,就会有电流产生,这就是人类历史上的第一个电路。伏打电池的发明使人们从对静电的研究迈入了对动电的研究阶段。

(二)

定性研究有了足够积累之后,便需要定量研究,以便寻找一般规律。1785年法国物理学家库仑(Charles-Augustin de Coulomb,1736—1806)以高超的实验技巧测量出了静电力,并在牛顿万有引力定律 $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} r_0$ 的启发下,总结出了电荷的作用力公式,即库仑定律 $F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} r_0$,这是人们开始从定性研究到定量研究的重要转折。库仑定律酷似万有引力定律,说明从其他科学中获得启发的重要性。1820年丹麦科学家奥斯特(Hans Christian Oersted,1777—1851)在一次讲座安排的实验中,发现了电流的磁效应。同年,法国物理学家安培(Andre-Marie Ampere,1775—1836)在奥斯特的基础上,发现了两个载导体相互作用力的规律,通过精心实验,并运用高度的数学技巧,总结出了电流元之间的作用力定律,从而奠定了电动力学基础。安培曾评价奥斯特说:“奥斯特先生……已经永远把他的名字和一个新纪元联系在一起了。”奥斯特和安培共同揭开了电磁研究的崭新一页,即电能够产生磁。

实验天才、英国化学家和物理学家法拉第(Michael Faraday,1791—1867)坚信自然力是统一的,既然电能生磁,那么磁也能生电。在他对电磁研究的兴趣被释放以后,于1831年终于发现了磁生电现象,并向英国皇家学会报告了能产生感应电流的五种情况。感应电动势与磁通变化率成正比,这一重大发现是研究对象从“静止”到“运动”的重要飞跃,它使机械能转变为电能成为可能,并由此奠定了后来的电力工业基础。法拉第起初通过电磁感应产生的微弱电动势和电流,就像新生婴儿一样,渐渐成长为促进人类发展的有用之材。今天的绝大多数发电机、电动机和变压器仍然是利用电磁感应原理工作的。法拉第的另一重大贡献是提出了“场”的概念,这一概念为麦克斯韦用来建立统一的电磁理论奠定了关键基础,并导致新的物理学研究领域的诞生。爱因斯坦(Albert Einstein,1879—1955)曾高度评价法拉第:“对于我们,迈克尔·法拉第的一些概念,可以说是同我们母亲的奶一道吮吸来的,他的伟大和大胆难以估量。”奥斯特、安培和法拉第的研究成果,奠定了当今许多电工设备赖以工作的理论基础。

美国物理学家约瑟夫·亨利(Joseph Henry,1797—1878)意外地发现,通有电流的线圈在断路的时候有电火花产生。1832年他发表了题为《在长螺旋线中的电自感》的论文,宣布发现了电的自感现象。经反复试验,搞清楚了产生这种现象的规律,于1835年又发表了解释自感现象的论文。

1840年,英国物理学家焦耳(James Prescott Joule,1818—1889)把环形线圈放入装水的试管内,测量不同电流和电阻时的水温,以研究电流生热的规律。12月他在英国皇家学会上宣读了关于电流生热的论文,提出电流通过导体产生热量的定律。之后不久,俄国物理学家楞次(Lenz,1804—1865)也独立地发现了同样的定律,该定律因此被称为焦耳-楞次定律。

在电生磁、磁生电和电生热的研究期间,1826年,德国电学家欧姆(Georg Simon Ohm,1789—

1854)受傅里叶(Jean Baptiste Joseph Fourier,1768—1830)研究热传导得出的热流量与温度差成正比的结论启示,从实验和理论上证明了导体上电压与电流的正比规律,再次说明借鉴其他科学成果的重要性。德国物理学家基尔霍夫(Gustav Robert Kirchhoff,1824—1887)在深入研究欧姆的成果之后,于1845年在大学阶段就提出了电路中电流和电压所遵循的两条基本定律,即本课程要反复使用的基尔霍夫定律。1847年,他又研究了导体电压电流的线性分布问题的解,证明了用这两条定律列出的独立方程的个数正好等于支路电流个数,并给出了计算电流的公式,从而奠定了系统分析电路问题的方法基础。

(三)

分散的专门规律性研究有了足够的积累之后,就需要提升理论高度。英国物理学家麦克斯韦(James Clerk Maxwell,1831—1879)依据库仑、奥斯特、安培、欧姆、法拉第、基尔霍夫等前人的发现和实验成果,并接受了“场”的概念。他以惊人的数学才能,对电磁场的各种现象进行了严密的数学表述,并创造性地提出了电场变化产生位移电流的假设,以满足任何矢量旋度的散度都等于零的数学原理(见附录B)。根据麦克斯韦的理论,不仅传导电流能够产生磁场,位移电流也按着同样的规律——毕奥-萨伐尔定律形成磁场。因此在安培环路定律中,如果把电流理解成全电流,便可适用于时变电磁场,扩展了安培的研究成果。麦克斯韦这一假设的成立被后来赫兹的实验所证实。

麦克斯韦潜心十余年,于1873完成了划时代科学巨著——《电学和磁学专论》(《A TREATISE ON ELECTRICITY AND MAGNETISM》),由此建立了完整的电磁理论体系。书中不仅预言了电磁波的存在,而且还揭示了电、磁、光现象在本质上的统一性,完成了物理学的又一次伟大综合,奠定了现代电气技术、电子技术和通信技术的基础。被简化成4个方程的麦克斯韦方程组和谐对称,充分彰显了电磁规律的对称美。在牛顿力学早已受到相对论挑战的今天,这4个方程依然毫不动摇。爱因斯坦高度赞美麦克斯韦的研究:“在我求学的时代,最着迷的课题是麦克斯韦理论”,“特殊的相对论起源于麦克斯韦的电磁场方程”。麦克斯韦的工作“是自牛顿以来,物理学最深刻和最富有成果的工作”。法拉第由于没有上过大学,数学基本功比不上麦克斯韦,因而没有完成统一电、磁、光的愿望。所以学好数学极为重要,哪怕暂时还不知道所学的内容在将来会有什么用途。

德国物理学家赫兹(H. R. Hertz,1857—1894),在1886—1888年间,通过实验确认了电磁波是横波,具有与光类似的特性,从而全面验证了麦克斯韦的电磁理论的正确性;并且进一步完善了麦克斯韦方程组,使它更加优美、对称。1888年1月,赫兹将这些成果总结在《论动电效应的传播速度》一文中。由法拉第开创,麦克斯韦总结的电磁理论,至此才取得了完美的结果。赫兹的发现,其重要意义是开创了无线通信的新纪元。

(四)

在电磁奥秘逐渐被揭开的同时,人们自然就要主动探索电磁为人类所用的技术。1838年,美国艺术家兼发明家莫尔斯(S. F. B. Morse,1791—1872),在亨利的帮助下掌握了初步的电磁学

基础,由此产生浓厚兴趣,果断地放弃了绘画职业。他从电线中流动的电流在电线突然断开时会迸出火花这一事实得到启发,发明了电报和莫尔斯电码。电报的问世,增加了对电路分析的需求。

1847年,德国企业家西门子(Siemens,1816—1892)以敏锐的商业眼光意识到,电报在未来一定会得到广泛应用。于是他和机械工程师哈尔斯克建立了西门子-哈尔斯克电报机制造公司,用来生产西门子发明的指南针式电报机,这个公司也就是后来西门子公司的前身。1848年,该公司赢得了法兰克福至柏林的电报线路合同,从此开始了大发展。

1866年,西门子研究了发电机的工作原理,并发明了第一台直流电动机。西门子研发的这些技术往往马上被产品化投入市场,或者将其应用到新的产品中。例如有轨电车、无轨电车、电梯、电气火车等都是西门子公司利用其创始人的发明最先投入市场的。

1882年,爱迪生(Thomas Alva Edison,1847—1931)建成美国第一座商业直流发电厂,其后又建立了威斯康星州亚普尔顿水电站,完成了初步的电力工业体系。爱迪生是商业和发明天才,他一生完成了许多发明,这些发明促进了电的普及和应用。另一方面,1886年,美国工程师乔治·威斯汀豪斯(George Westinghouse,1846—1914)领导的公司建成了交流发电、交流供电系统。

出生于克罗地亚的美籍工程师尼古拉·特斯拉(Nikola Tesla,1856—1943)于1886年发明第一台三相感应电机,1888年发明两相异步特斯拉电动机,1897年建成了10万马力的尼亚加拉水电站交流发电机组,首次实现了电能的远距离传输,并且至今仍在运行。特斯拉对交流电十分感兴趣,因而离开了爱迪生加入了威斯汀豪斯的企业。经过长达10年的争论,最终他与威斯汀豪斯的交流输电战胜了爱迪生和汤姆逊的直流输电。他的多相交流发电和输配电技术被社会所接受。特斯拉是科技天才,他发明的特斯拉线圈被广泛用于无线电、电视机等。他还是无线电能传输的先导者。人们应该更多地记住特斯拉的贡献。此外,1888年俄国工程师德布罗夫斯基和德尔伏发明了三相交流制,为三相交流电在世界上的普及奠定了重要基础。

出生于德国的美籍电机工程师斯泰因梅茨(Charles Proteus Steinmetz,1865—1923)受瑞士数学家阿根德所提出的用矢量表示复数方法的启发,用复平面上的相量来表示正弦交流电。1893年他向国际电工委员会报告了用复数计算正弦交流电路的方法,他称为符号法。该方法提升了人们计算交流电路的能力,从而促进了交流电事业的发展。

到19世纪末期,人类基本结束了由瓦特发明的蒸汽机所开创的蒸汽时代,进入了电气时代,带来了第二次工业革命,产生了电气工程。

伴随电气工程的发展,通信技术和电子技术也在不断进步。1894年,年仅20岁的意大利人马可尼(G. M. Marconi, 1874—1937),获悉赫兹几年前所做的实验,认识到电磁波是存在的,并以光速在空中传播。他很快就想到可以利用这种波向远距离发送信号而又不需要线路,这就使电报完成不了的许多通信有了新的希望。经过一年的努力,马可尼于1895年成功地发明了电报装置。他用赫兹的火花振荡器作为发射器,通过电键的开、闭产生断续的符合莫尔斯电码的电波信号。1896年他在英国做了该装置的演示试验,首次获得了这项发明的专利权。1899年他发送的无线电信号穿过了英吉利海峡。

就在此时,俄国发明家波波夫(1859—1906)同样被赫兹的发现强烈吸引,提出了可以用电磁波进行无线电通信的设想。1894年,他制成了一台无线电接收机,第一次在接收机上使用了天线。这也是世界上的第一根天线。1895年5月7日,在彼得堡俄国物理化学学会的物理分会上,波波夫表演了他发明的无线电接收机。几十年以后,这一天被定为“无线电发明日”。

由于马可尼和波波夫发明的无线电,人类从此开始了无线通信时代,并逐渐发展成今天人们所依赖的无线移动通信,极大地满足了人们相互交流的需要。

19世纪末,荷兰物理学家洛伦兹(Hendrik Antoon Lorentz, 1853—1928)建立了古典电子理论。随之而来的是,1904年,英国物理学家弗莱明(John Ambrose Fleming, 1849—1945)制成了带有阴极和阳极的世界第一只真空二极管,使爱迪生在研究灯丝时发现的“爱迪生效应”有了真正的实用价值,而爱迪生由于忙于商业活动没能顾及此项发明;1906年,美国人德福雷斯特(De Forst Lee, 1873—1961)在真空二极管的阴极和阳极之间巧妙地加了一个栅板,从而发明了真空三极管;1920年,第一家无线电广播电台在匹兹堡开播;1936年英国广播公司建成第一家电视台;1946年,在美国宾州大学诞生第一台电子计算机;1947年,布拉顿(W. H. Brattain, 1902—1987)、巴丁(J. Bardeen, 1908—1991)和肖克利(W. B. Shockley, 1910—1989)发明了晶体三极管……由电气工程衍生出的电子工程、通信工程和计算机工程,又将人类带入了信息时代,并与原子能技术、航天技术、分子生物学和遗传工程学一起产生了第三次工业革命。可以说,在人类经历的三次工业革命中,有两次是由电磁技术引起的。

大约至20世纪30年代,由于欧姆定律、基尔霍夫定律、等效电源定理以及阻抗、暂态响应、电路模型等概念的相继建立,从一般电磁理论中生长出了新的分支即电路理论,并逐渐形成了独立学科,主要是为满足当时电力工程和通信工程的需要。20世纪30—40年代,电路理论进一步成熟,不仅研究电路分析,还涉及电路综合。20世纪40年代以后,由于生产的发展和第二次世界大战的需要,除了电力和电讯以外,自动控制技术也在飞速发展。这样,在电气科学技术领域内就形成了三足鼎立的体系:电力系统、通信系统和控制系统。而电路理论乃是这三个系统的共同基础。通常把20世纪60年代以前的发展阶段称为经典电路理论阶段。

到20世纪50年代中后期,控制、信息、电子、计算机技术及航天等尖端技术的发展,又促进了电路理论内容和体系的革新,从而形成了近代电路理论。其特征是:出现了多端器件和集成电路;建立了计算机辅助分析方法;研究有源网络综合以及最优化设计;对非线性电路研究更加深入;出现数字或数字与模拟混合电路。新方向更是不断涌现,电路故障诊断、开关电容网络、超大规模集成电路等开始成为电路理论的重要研究内容。

由此可见,电路理论的产生背景是电磁学和电子学,起初主要研究发电、输电和用电的能量属性。随着电子技术和信息技术的产生,又着眼于电的信息属性,目前已形成了能量属性与信息属性并重的局面。在当今各行业的仪器设备中,大都含有电子技术部分。而仪器设备在生产、科研、医疗诊断等方面都起着举足轻重的作用。因此,电路理论同时是当今电气工程、电子工程、通信工程、计算机工程、控制工程和测量工程的技术基础,这是由于电具有易于传输、易于变换和易于控制的自然属性。

当今社会,毫无疑问,电使我们的生活变得无限美好,使人们摆脱了繁重的体力劳动,使生产力极大进步,使信息传输极度灵便。电不仅改变着人们的生活方式,还改变着人们看世界的方式。不难体会,电如同衣食住行一样,与人类活动密不可分。从大世界到小家庭,到处都有电的身影。蓝天下的超高压电网将巨大电能从发电厂送入工厂、矿山和千家万户;跨洋通信也早已不是梦想,手里握着用超大规模集成电路制作的通信产品,缩短了地球上人与人之间,甚至人与遥远宇宙之间的时空距离。这样的事实不胜枚举,只要我们闭目设想,如果突然没了电,这个世界将会是什么样子,就会感叹电在这个世界中所占据的重要地位。

由于人类活动对电的强烈依赖性,一旦电网运行不当导致大面积停电,哪怕是片刻也会带来惊人的损失,并可能造成社会混乱。2003年8月14日的美加地区大停电,一天损失大约300亿美元,并使城市交通和航空运输陷入瘫痪。人们被困在路上或无空调的楼内,收款机无法使用,商店停业,大部分手机因停电而无法接通,核电站关闭……2005年5月,因设备老化和系统备用容量不足而引发的莫斯科大停电,使莫斯科电网321座变电站全部停止工作,约一半地区的工业生产、商业活动和交通运输陷入瘫痪,43条地铁中断运行,236个交通信号灯熄灭,引发一系列交通事故,使1500余人困在电梯内,一家化工厂发生爆炸……2008年1—2月间中国南方电网遭受十余天的雨雪冰冻灾害,大量的高压铁塔被压垮,造成大面积长时间停电,同样给中国经济造成巨大损失,给即将迎来节日的人们生活带来诸多麻烦。这样的事实反证了电与人类社会的密不可分性,也证明了电的脆弱性。

与其他技术一样的是,电磁也具有两重性,是双刃剑。“电子制导”、“电磁发射”、“电磁脉冲”这些先进技术一旦用于战争,杀伤的准确性极高,摧毁力极强。电子监听、高空侦察早已成为敌对势力相互窃取机密的有效手段。无论在明里还是暗里、进攻还是防守,使用电子技术的武器都是最先进的武器。因此说,如果人类活动是无秩序的,那么每个想到未来的人都必然生活在担忧和恐惧中。

电磁自有其规律。如果遵循规律并有节制地合理利用,电会造福人类、促进文明;如果违背规律或无约束地放肆利用,电所带来的灾难便是巨大的,甚至会导致文明的倒退。

电路理论是一门系统研究电所遵循的规律的理论,是将来从事电气工程、电子科学与技术、信息与通信工程、控制科学与工程所必备的技术基础。如果把上述学科之中的任何一个电磁问题抽象出来,都离不开电路、磁路或电磁场的范畴。从大学培养方案上看,电路理论课程是电气类、电子信息类、自动化类专业学生第一门系统学习电路知识、探索电路奥秘的课程,是后续的电子技术、通信技术、计算机原理、电机学、电力系统、电力电子技术、高电压技术等课程的基础课程。掌握电路理论还能使个人生活更加舒心 and 愉悦。所以,无论从未来事业、后续课程,还是从个人生活的角度看,都有充分理由学好电路理论课程。电路理论和电磁场理论曾被西方人比作是电气工程师的“黄油”与“面包”,现在这种比喻仍不为过。