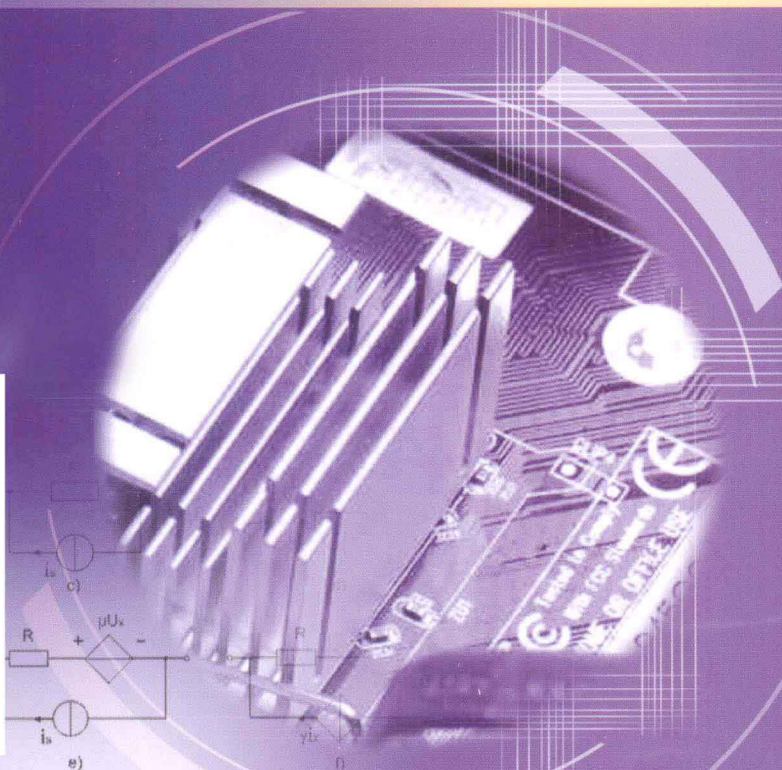




普通高等教育“十二五”电工电子基础课程规划教材

电路与模拟电子技术原理

胡世昌 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”电工电子基础课程规划教材

电路与模拟电子技术原理

胡世昌 编著



机械工业出版社

本书为《电路》和《模拟电子技术基础》以及《大学物理》电学部分相关知识的综合,既阐述了模拟电路的分析,更强调了模拟电路的设计。在电路分析部分,从元件连接和整体功能两个角度,分别以基尔霍夫定律和叠加定理贯穿全部电路分析过程;在电路设计部分,则以功能分解、理论设计、电路实现为主线,详细讲解每一个经典电路的设计与实现过程,目的在于使读者不仅能学会分析典型电路,更能学会设计电路。

本书适合高等院校和培训机构用于电路和模拟电子技术课程的教学,也适合一般读者自学使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

电路与模拟电子技术原理/胡世昌编著. —北京:机械工业出版社, 2014. 1

普通高等教育“十二五”电工电子基础课程规划教材

ISBN 978-7-111-45390-1

I. ①电… II. ①胡… III. ①电路理论—高等学校—教材②模拟电路—电子技术—高等学校—教材 IV. ①TM13②TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 004856 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:王 康 责任编辑:王 康 卢若薇

版式设计:霍永明 责任校对:肖 琳

封面设计:张 静 责任印制:乔 宇

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2014 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 18.25 印张 · 451 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-45390-1

定价:37.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

每一个初学 C 语言的人，都会兴奋地发现自己会设计计算机程序了；而每一个初学模拟电子技术的人，却会沮丧地发现自己几乎没学会设计任何电路。作者所见到的所有电路与模拟电子技术方面的教材，都是围绕着如何分析电路而写——不惜笔墨地详细讲解这个电路是如何满足要求的，那个电路是怎样优秀的，就是没有写明白一个电路的完整设计过程。学完了电路理论，只能分析电路而不能设计电路，这样的结果无疑令人遗憾，本书就是为了解决这个问题而写的。

1. 本书既注重电路分析，更注重电路设计

作者认为，电路分析之于电路设计，好比计算机组成原理之于计算机程序设计，前者是后者的基础，后者是前者的升华。一本电路书，如果只能让读者学会分析电路，就好比一本计算机书只能让读者学会分析程序一样，即使不能说它好笑，至少可以说它不够完备，多数读者也很难对这种学而乏用的知识感兴趣。

电路不是从天上掉下来的，它的设计和创新实际上就是一个不断改进的过程。针对本书所提到的每种经典电路，作者都给出了完整的设计过程。读者所学到的不仅仅是一个个具体的解决方案，更是从功能需求到电路实现的完整设计过程。这样的写法，有助于读者摆脱简单的照搬照抄，真正理解电路设计的思想方法，实现从模仿者向创新者的转变。

2. 关于电路分析

作者坚信，多数具有实用意义的创新并不是基于高深莫测的理论，而是基于常识的灵活运用，多数人并非欠缺常识，而是没能把这些常识用好。所以在写作此书的时候，作者坚持用浅显易懂的语言和基于常识的观点，去阐述所牵涉到的知识。不是万不得已，尽可能回避数学公式的推导，简单地说，八个字——“创新说够，原理说透”。

本书把叠加原理（也称叠加定理）写入第 1 章，并添加了替代定理。这样写的原因绝不仅仅是为了标新立异，为了不同而不同没有任何意义。

（1）叠加定理的重要性

为了与多数教材的表述方式相同，本书使用了“叠加定理”的表述，但是作者更倾向于使用“叠加原理”这个词，因为它有着“不证自明”的含义。

叠加定理有着十分重要的理论意义，它不仅是电路理论方面的基础，而且是线性理论的基础。如果我们仅仅把它放到电阻电路的分析里面，并且十分好笑地要求学生会用叠加定理求解电路，那就太荒唐了。

还有一个问题与叠加定理是相关联的，这就是一阶电路中零状态响应和零输入响应的问题。从求解电路变量的角度看，既然有了三要素法，为什么还要让学生明白哪些是零状态响应，哪些是零输入响应；从分析响应的角度看，会算而且知道零状态、零输入的情况下也可能有响应就可以了嘛，为什么要区别得那么清楚呢？三要素法本身也不难，为什么非要弄出几个意义不大的新概念？

但是如果从叠加定理的角度看,意义就完全不同了。因为区分零状态响应和零输入响应的目的是要强调动态电路中初始状态和独立源一样,也起着激励的作用。动态电路中的响应、是所有激励(包括初始状态和独立源)所产生的响应的叠加,只有在这个前提下,强调零状态响应和零输入响应才是有意义的。

对于叠加定理的适用范围,本书没有照搬大部分教材的表述,比如把叠加定理的适用范围说成“在线性电路中……”,这样的表述本身没有问题,问题在于几乎没有教材给出了线性电路的定义。如果说不能告诉读者怎样的电路是线性电路,那么用这样的词汇去限定叠加定理的使用范围有何意义?

如果把叠加定理放到电阻电路中,就回避了定义线性电路这个概念的问题,可是又如何把电阻电路中的叠加性扩展到一阶电路呢?这也回答了前面的问题,只有在把叠加定理放到总体概念中的时候,才能在动态电路分析中顺理成章地强调初始状态、零状态、零输入等概念。

实际上,线性与叠加性是紧密相连的两个概念,自然界的本质是非线性的,为了便于分析,才有了线性这一概念。线性的定义本身就包含了叠加性,二者有着“鸡和鸡蛋”的关系,对于线性系统而言,叠加定理是不证自明的,所以用线性来限定叠加性的使用范围有点不伦不类。

叠加定理是整个线性系统理论的基础,正是基于此,本书把线性与叠加性两个概念紧密结合地放在了第1章,作为全书的理论基础。

(2) 替代定理的作用

很多教材把替代定理去掉,这样做有其合理性,因为它对于现实电路问题的求解意义不大。本书从理论完整性的角度考虑保留了替代定理。如果没有替代定理,我们只能把戴维南定理看成是从天上掉下来的。如果我们把所有的定理的都神秘化为上天所赐,读者就只能按部就班了。打破发明创新发现的神秘化,让读者学习和理解创新之源,这是本书的重要目的。

替代定理在本书中的另一个作用是为非线性电路的线性化提供合理性。尽管这是一个直观上就能接受的观点,但是理论上严密一些总是没有坏处的。

(3) 非线性电路的理论基础:线性化、差动和反馈

本书第8章详细地讲解了差动电路形成的完整过程,并彻底回避了其放大性能的具体计算。这是从目标读者的角度考虑的,本书的多数读者学会使用集成电路就可以了,不太可能深入集成电路内部去设计差动电路,所以详细繁琐的计算对他们而言意义不大。与其教会他们现有电路的详细计算,倒不如使其明白这些解决方案是怎样实现的。而且,差动设计的方案并不是只对电路设计有意义,对任何领域都是有意义的。

反馈概念也是如此,本书第9章详细地讲解了反馈的概念以及反馈电路的分析,其中反馈理论的形成过程是作者演绎的。从发明者花了2年时间发明、美国专利局用了9年时间审批的事实就可以看出,反馈绝对不是一个很容易从知识理论升华到实际应用的概念。对其形成过程的演绎,是希望读者能够明白:其实很多具有实用意义的发明创新往往就是在于非常关键的一个观念的飞跃。

3. 关于电路设计

电路设计的思路，简单而言分为两部分：一是电路设计理论，如叠加定理、戴维南定理、反馈理论和差动理论，它们相当于计算机程序设计的“算法”；二是基本电路模块，如各类基本放大电路、反馈电路、差动电路和恒流源电路，它们相当于计算机程序设计的“语句”。有了自己的算法和语句，电路设计也就不再神秘了。

本书对于电路设计的讲解思路如下：第7章介绍基本放大电路，构成模拟电路设计的基础。第8章首先讲解差动理论，然后在差动理论的指导下逐步设计出差动放大电路以及集成运算放大器。第9章首先讲解反馈理论，然后在负反馈理论指导下实现负反馈放大电路。第10章首先从理论上分析正弦波振荡器的组成，随后针对每个理论上的组成部分寻找其不同类型的实现电路，最后把各个部分电路组合起来构成不同类型的正弦波振荡器。第11章分别介绍线性稳压电源和开关稳压电源。从理论到实现逐步分析，并以无变压器直流变压电路的设计思路分析作为结尾。

4. 关于技术学习和社会人生

一本好书应该让读者受益终生，“书呆子”这个词，不仅是对读者的讽刺，更是对书籍本身的讽刺。作者在本书的结尾，对于学习的目的做了一些讨论，分别从技术学习和社会人生的角度对读者提出了少许建议，它是本书的有机组成部分，希望能够对读者有益。

胡世昌
2013年12月

目 录

前言

第 1 章 电路与定律	1
1.1 引言	1
1.1.1 电路及其组成	1
1.1.2 计量单位制	2
1.2 电路变量	3
1.2.1 电荷	3
1.2.2 电流	3
1.2.3 电流的方向	4
1.2.4 电压	5
1.2.5 功率	8
1.3 电阻和欧姆定律	10
1.3.1 欧姆定律	10
1.3.2 电阻的伏安特性	11
1.3.3 电阻的功率	12
1.3.4 电导	12
1.3.5 开路与短路	13
1.4 电源	13
1.4.1 独立电源	13
1.4.2 受控电源	15
1.4.3 无源元件和有源元件	17
1.5 基尔霍夫定律	18
1.5.1 基尔霍夫电流定律	19
1.5.2 基尔霍夫电压定律	19
1.5.3 有源电路欧姆定律和全电路欧姆定律	20
1.6 线性电路与叠加定理	22
1.6.1 从结构(元件与连接)的角度看电路	23
1.6.2 从功能(激励与响应)的角度看电路	23
1.6.3 线性电路	24
1.6.4 线性电路的齐次性和叠加性	27
1.6.5 叠加定理	28
1.6.6 线性电路理论应用举例	31
1.7 替代定理	32
1.8 学习电路的方法	34
习题	35

第 2 章 线性电阻电路	37
2.1 等效变换法	37
2.1.1 电路的等效变换	37
2.1.2 串并联电路	39
2.1.3 电源的变换	44
2.1.4 Υ - Δ 变换	47
2.2 网络方程法	49
2.2.1 支路电流法	49
2.2.2 节点分析法	50
2.2.3 网孔分析法	53
2.3 线性系统法	56
2.3.1 线性电阻电路叠加定理	57
2.3.2 戴维南与诺顿定理	59
2.3.3 最大功率传输定理	64
习题	65
第 3 章 动态元件和动态电路	67
3.1 电容	67
3.2 电感	70
3.3 电容的串并联	72
3.4 电感的串并联	74
3.5 线性动态元件	75
3.5.1 线性电容的线性特征	75
3.5.2 线性电感的线性特征	77
3.6 线性动态电路	77
3.6.1 线性动态电路方程的微分-积分形式	78
3.6.2 线性动态电路方程的微分形式	79
3.6.3 线性动态电路分析方法概述	79
习题	81
第 4 章 一阶电路分析	82
4.1 一阶电路方程	82
4.1.1 一阶 RC 电路	82
4.1.2 一阶 RL 电路	83
4.1.3 一阶电路方程及其解的形式	84
4.2 三要素分析法	85
4.2.1 换路定则与初始值	86
4.2.2 直流激励的稳态值	88
4.2.3 过渡过程与时间常数	90

4.2.4 三要素法求解一阶电路	94	习题	139
4.3 线性动态电路叠加定理	97	第6章 半导体元器件	142
4.3.1 零状态响应和零输入响应	98	6.1 从电子管到晶体管	142
4.3.2 受迫响应和自由响应	102	6.2 半导体	143
4.3.3 暂态响应和稳态响应	103	6.2.1 本征半导体	143
习题	104	6.2.2 杂质半导体	144
第5章 正弦稳态分析	106	6.2.3 PN结	145
5.1 正弦交流电	106	6.3 半导体二极管	147
5.1.1 正弦信号的三要素	106	6.3.1 基本结构	148
5.1.2 正弦信号的相位差	107	6.3.2 二极管的特性	149
5.1.3 正弦信号的参考方向	107	6.3.3 二极管的应用	150
5.1.4 正弦信号的有效值	108	6.4 晶体管	154
5.1.5 正弦信号的运算	109	6.4.1 晶体管的基本结构	155
5.2 相量	110	6.4.2 晶体管的工作原理	156
5.2.1 复数及其运算	110	6.4.3 晶体管的特性	160
5.2.2 将微分方程转化为代数方程	112	6.4.4 晶体管的应用	163
5.2.3 正弦信号的相量表示	113	6.5 场效应晶体管	165
5.2.4 正弦量的微分、积分的相量 表示	114	6.5.1 结型场效应晶体管	165
5.2.5 从时域表示到频域表示	115	6.5.2 绝缘栅型场效应晶体管	169
5.3 相量分析	116	6.5.3 场效应晶体管的特性	173
5.3.1 电路元件伏安特性的相量形式	116	6.5.4 场效应晶体管的应用	174
5.3.2 基尔霍夫定律的相量形式	119	习题	174
5.4 阻抗与导纳	120	第7章 基本放大电路	175
5.4.1 欧姆定律的相量形式	120	7.1 放大电路概述	175
5.4.2 阻抗的串并联	121	7.1.1 放大电路的功能与参数	176
5.4.3 阻抗的意义	121	7.1.2 放大电路的基本结构	180
5.5 谐振	124	7.2 晶体管放大电路	181
5.5.1 串联谐振(电压谐振)	124	7.2.1 晶体管放大电路的组成	181
5.5.2 并联谐振(电流谐振)	124	7.2.2 晶体管放大电路的近似估算	183
5.5.3 谐振的物理本质	126	7.2.3 晶体管放大电路的图解分析	189
5.5.4 谐振的品质因数	127	7.2.4 晶体管放大电路的失真	193
5.6 相量分析法	128	7.2.5 静态工作点稳定电路	194
5.7 交流电路的功率	130	7.2.6 再说模型	195
5.7.1 平均功率	130	7.3 场效应晶体管的放大电路	195
5.7.2 复功率、有功功率和无功功率	131	7.3.1 场效应晶体管放大电路的工作 原理	195
5.7.3 最大功率传输定理	133	7.3.2 场效应晶体管放大电路的组成	197
5.8 三相电路	134	7.3.3 场效应晶体管放大电路的近似 估算	199
5.8.1 三相电源	134	7.4 功率放大电路	201
5.8.2 三相电路的负载	136	7.4.1 功率放大电路的参数	201
5.8.3 三相电路负载的星(丫)形联结	136	7.4.2 甲类放大电路的功率放大特性	202
5.8.4 三相电路负载的三角(△)形联 结	138	7.4.3 变压器输出的甲类功率放大 电路	203
5.8.5 三相电路的功率	138		

7.4.4 乙类推挽功率放大电路	204	估算	244
7.4.5 甲乙类推挽功率放大电路	205	习题	249
7.5 多级放大电路	206	第10章 正弦波振荡器	251
7.5.1 基本放大电路的局限性	206	10.1 正弦波产生原理	251
7.5.2 多级放大电路的组成与性能指标估算	207	10.1.1 正反馈的妙用	251
7.5.3 多级放大电路的耦合方式	208	10.1.2 正弦波振荡器的组成	253
习题	209	10.2 选频网络	254
第8章 集成运算放大器	211	10.2.1 RC串并联选频	254
8.1 从分立元件到集成电路	211	10.2.2 LC选频	255
8.2 集成运算放大器的原理与组成	212	10.2.3 石英晶体选频	256
8.2.1 直接耦合与零点漂移	212	10.3 典型正弦波振荡器	257
8.2.2 差动放大电路	213	10.3.1 文氏桥振荡器	258
8.2.3 集成运放的组成	219	10.3.2 LC振荡器	258
8.3 集成运放的特性参数	219	10.3.3 石英晶体振荡器	261
8.4 理想运放的线性与非线性特征	221	习题	262
8.4.1 理想化运放	221	第11章 直流稳压电源	264
8.4.2 理想运放的线性特征:虚短和虚断	222	11.1 整流-滤波电源	264
8.4.3 理想运放的非线性特征:正饱和与负饱和	222	11.1.1 整流:交流电变单向电	264
8.5 集成运放应用举例	222	11.1.2 滤波:脉动电变直流电	265
8.5.1 运放的线性应用(运算电路)	223	11.1.3 整流-滤波电源的组成	267
8.5.2 运放的非线性应用(比较器)	225	11.2 线性稳压电源	268
习题	227	11.2.1 并联稳压管稳压电路	268
第9章 负反馈放大器	229	11.2.2 负反馈并联稳压电路	269
9.1 负反馈	229	11.2.3 串联调整管稳压电路	270
9.1.1 前馈和反馈(开环与闭环)	229	11.2.4 线性稳压电源的组成	271
9.1.2 利用负反馈稳定放大倍数	231	11.3 开关稳压电源	272
9.1.3 相移、正反馈与自激振荡	233	11.3.1 高频变压器和开关管:降压与逆变	272
9.2 负反馈放大电路	234	11.3.2 电压负反馈调整占空比:稳压	273
9.2.1 输出采样:电压反馈和电流反馈	234	11.3.3 非隔离型开关变换器	274
9.2.2 输入叠加:串联反馈和并联反馈	236	11.4 电容变压电路	275
9.2.3 负反馈放大电路的四种组态	237	11.4.1 倍压整流(升压)电路	275
9.2.4 直流反馈和交流反馈	238	11.4.2 电容降压电路	276
9.2.5 负反馈对放大电路性能的改善	238	11.5 无变压器直流变压电路的设计思路分析	276
9.3 负反馈放大电路分析举例	240	11.5.1 电容滤波和电感滤波	277
9.3.1 判断反馈类型	240	11.5.2 电容升压和电感升压	277
9.3.2 深度负反馈放大电路的近似		11.5.3 三类非隔离型变换器的构建	279
		习题	280
		跋 吾生也有涯	281
		参考文献	283

第1章 电路与定律

对电的认识和使用是人类生产和生活现代化的重要基础，电作为方便的动力能源用于驱动机械运动；电作为重要的信息载体用于通信、计算机等信息处理领域；电还广泛用于各类用电设备，电灯把电转换为光，电子音视频设备显示和保留声音和图像，医院用电子医疗设备检查和治疗疾病，车站、机场用电子安检设备检查危险物品等。

电路和模拟电子技术知识是使用、维护、设计、生产和改进这些设备的基础，也是学习通信、自动化和计算机等学科的重要前提。

1.1 引言

电路是电荷运动的通路。因为微观上电荷的运动很难把握，所以通常用电流、电压等物理量从宏观上描述电荷的运动，电路中这些物理量之间所遵循的规律就是电路定律。

1.1.1 电路及其组成

电路是由电气元件互相连接而成并具有一定功能的整体。组成实际电路的元器件种类繁多、性能各异，电池、电阻、电容、电感、开关和晶体管等都是我们很熟悉很常用的电子元器件。电路的基本功能可以分为两类：一类是实现电能的产生、传输、分配和转换；一类是完成电信号的产生、传输、存储和转换。

图 1-1a 是一个简单的照明电路，由电池、开关、连接导线和灯泡组成。其作用是将由电池提供的电能传送给灯泡并转换成光能。其中电池用于提供电能，灯泡消耗电能并将其转换成光能，开关和导线则用于将电池和灯泡连接起来。

图 1-1b 是一个简单的扬声设备电路，话筒产生的声音信号经放大器放大后，通过扬声器转换为人耳能够听到的声音信号。

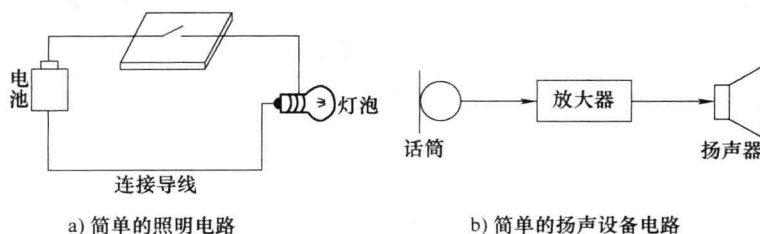


图 1-1 实际电路举例

在电路理论中，常将提供电能或信号的元器件或装置称为电源；将使用电能或信号并将电能转换成其他形式能量的设备称为负载。连接在电源和负载之间起着电能的传输和分配作用的其他元器件则构成了中间环节。电源、负载和中间环节共同构成了完整的电路。

实际电路的电气元件的特性都是十分复杂的，为了便于分析，可以抽取出某个主要的电磁特性，构建出它的数学模型来近似代表实际元件，这种数学模型称为理想电路元件，由理

想电路元件构成的电路称为电路模型。

图 1-2a 是一个由电池、开关和灯泡组成的简单的实际电路，图 1-2b 是它对应的电路模型，或者称为它的电路图。由图中可见，实际电路和表示它的电路图有很大的差别，因为电路图是用实际元件的数学模型（即理想电路元件）建立的，实际应用中多种多样的电气元件被表示成了有限的几种理想电路元件，所以从电路图中无法看出原来的实际电路元件究竟是什么。为了完整起见，这里也给出了它的电气连接图，如图 1-2c 所示，本书对电气图不做过多的介绍。

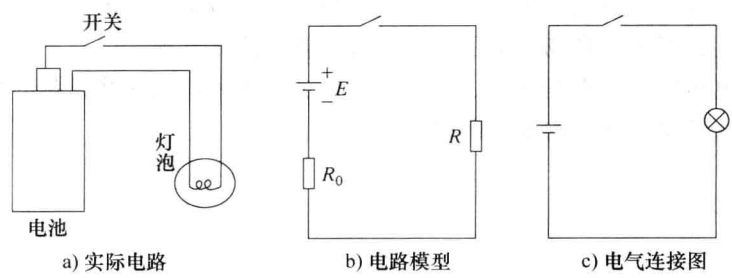


图 1-2 电路的几种表达方式

同一个理想电路元件对应着多种多样的实际电路元件，相应地，同一个实际元件也可能有着不同的理想模型，根据应用场合的不同，其理想模型也可能有所不同。随着课程的深入，读者会逐步加深理解。

通过使用理想电路元件，可以对其进行精确的数学分析，并对实际中存在的种类繁多的实际元件进行统一分析。比如，实际的电阻都有着不同的外观和不同的应用，而在电路模型中，我们是用同样的电路元件来替代的。

电路理论分析的研究对象是电路模型，而不是实际电路。为此首先要熟悉一些计量单位制的概念和基本的电路变量。

1.1.2 计量单位制

使用最为广泛的计量单位制是国际单位制，它是 1960 年在国际计量大会上通过的，此后又经过了多次修订。国际单位制建立在 7 种基本单位之上，如表 1-1 所示。

表 1-1 国际单位制

量的名称	单位名称	单位符号
长度	米	m
质量	千克（公斤）	kg
时间	秒	s
电流	安 [培]	A
热力学温度	开 [尔文]	K
物质的量	摩 [尔]	mol
发光强度	坎 [德拉]	cd

国际单位制的优点是通过十进制与 7 个基本单位相联系，可以表达出很大和很小的量，并用词头来表达 10 的幂次，表 1-2 是常用的词头。

表 1-2 常用的国际单位制词头

所表示的因数	词头名称	词头符号	所表示的因数	词头名称	词头符号
10^{24}	yotta (尧)	Y	10^{-24}	yocto (幺)	y
10^{21}	zetta (泽)	Z	10^{-21}	zepto (仄)	z
10^{18}	exa (艾)	E	10^{-18}	atto (阿)	a
10^{15}	peta (拍)	P	10^{-15}	femto (飞)	f
10^{12}	tera (太)	T	10^{-12}	pico (皮)	p
10^9	giga (吉)	G	10^{-9}	nano (纳)	n
10^6	mega (兆)	M	10^{-6}	micro (微)	μ
10^3	kilo (千)	k	10^{-3}	mili (毫)	m
10^2	hecto (百)	h	10^{-2}	centi (厘)	c
10	deka (十)	da	10^{-1}	deci (分)	d

其他单位，如力、能量等的单位都是从 7 个基本单位推导而来的。比如功或能量的基本单位焦耳 (J)，国际单位制定义 $1\text{J} = 1\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$ ；功率的单位瓦特 (W)， $1\text{W} = 1\text{J}/\text{s}$ 。还有一些计量单位并不属于国际单位制，如热量单位卡 (cal)， $1\text{cal} = 4.1868\text{J}$ ；功率单位马力， $1\text{马力} = 739.499\text{W}$ ；等等。不建议使用这些非国际单位制单位。

1.2 电路变量

电路分析的主要对象是电流、电压和功率。其他相关的变量则有助于理解电路模型及其规律。

1.2.1 电荷

根据原子理论，物质是由原子组成的，原子又是由原子核和围绕原子核高速运动的电子组成的。原子核由带正电荷的质子和不带电荷的中子组成，所以整体上原子核带正电荷。电子带负电荷，电子的负电荷与质子的正电荷平衡，而且每个原子的质子数与电子数相等，因此原子呈中性。

带电粒子所带的电荷数称为电荷量。电荷量的国际单位是库伦 (C)。1 库伦的电量等于 6.24×10^{18} 个电子所带的电荷量。单个电子所带的电荷量是 $-1.602 \times 10^{-19}\text{C}$ ，单个质子所带的电荷量是 $1.602 \times 10^{-19}\text{C}$ 。

1.2.2 电流

不随时间变化的电荷量常用大写字母 Q 表示。瞬间电荷量（可以随时间变化，也可以不随时间变化）则用 $q(t)$ 表示，也常常简记为 q 。这是工程上的一种习惯用法：大写字母表示常量；小写字母则用于更一般的表示，可以是常量，也可以是变量。原子最外层的电子在适当条件下可以克服原子核的吸引力，而从原子中挣脱出来，成为带负电的自由电子，失去电子的原子则会变成带正电荷的粒子。电荷既不能创造，也不能消失，这种特性叫做电荷守恒性。但是在一定的条件下，电荷能从一个地方转移到另一个地方，这种电荷的移动就形

成了电流。

图 1-3 表示了金属导体中产生电流的情况, 外加电压的作用使金属导体中的电子发生迁移。图中的箭头表示正电荷的运动方向, 电子的运动方向实际上是与箭头方向相反的。

由于电荷在工程上难以测量, 因此常常将电流作为分析和测量的对象。

任何物体的运动都存在着速率和方向的问题, 电荷运动也不例外。微观上这种电荷运动的速率和方向的不同, 反映到宏观上就是电流的大小和方向的不同。

大小和方向均不随时间变化的电流称为直流电流, 用大写字母 I 表示。大小或方向随时间变化的电流则称为时变电流, 用 $i(t)$ 表示, 简写为 i 。

如果电路中电荷运动的速率大, 则电流就强; 反之, 电流就弱。衡量电路中电荷速率大小的指标称为电流, 其定义是单位时间内通过电路某截面的电荷量, 可表达为电荷对时间的变化率, 即

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

式中, q 为电荷量, 单位为库仑 (C); t 为时间, 单位为秒 (s); i 为电流, 单位为安培 (A), 这是以法国物理学家安培 (A. M. Ampere) 命名的。1 A = 1 C/s, 表示在 1 秒内通过导体横截面的电荷量为 1 库仑时电流为 1 安培。

安培 (Andre-Marie Ampere, 1775-1836) 是法国数学家和物理学家, 出生于法国里昂, 安培于 1820 年给出电流的定义和测量电流的方法。他发明了电磁铁和安培表, 是电动力学的奠基人。

1.2.3 电流的方向

物理学中规定正电荷的运动方向为电流方向, 带负电的自由电子的运动方向与电流方向相反。不同媒介中的导电粒子是不同的, 最常见的金属导体中主要的导电粒子是自由电子, 如果电流方向是从 A 端向 B 端, 其内部实际发生的是自由电子从 B 端向 A 端运动, 在效果上这相当于等量的正电荷从 A 端向 B 端的运动。

在分析复杂电路时, 通常难以事先判定电流的真实方向, 并且在—根金属线上, 电流只能有两种不同的方向, 因此可以任意假定一种方向作为参考方向, 当实际电流方向与它相同时, 电流是正值; 反之, 电流是负值, 如图 1-4a、b 所示。图中用实线箭头表示参考方向, 虚线箭头表示该电路中电流的真实方向。



图 1-4 电流的参考方向

电流参考方向是任意指定的, 如果根据这个参考方向进行计算的结果是正值, 说明实际电流方向与参考方向相同; 如果结果是负值, 说明实际电流方向与参考方向相反。

必须强调, 当提到电流的时候必须同时指明其大小和方向, 忽略其中任何一个方面, 其

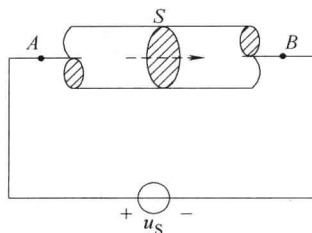


图 1-3 金属导体中的电流

描述都是不完整的。

大小和方向均不随时间变化的电流称为直流电流，简称为 DC。大小和方向按正弦变化的电流称为交流电流，简称为 AC。此外还可能有按照其他规律变化的电流。但直流和交流电流是工程中最常遇到的两个类型。

【例 1-1】1 A 的电流由 A 向 B 通过电路元件，实际方向如图 1-5a 和图 1-5b 中虚线箭头所示，电流参考方向如图中实线所示，求 I_1 和 I_2 的值。

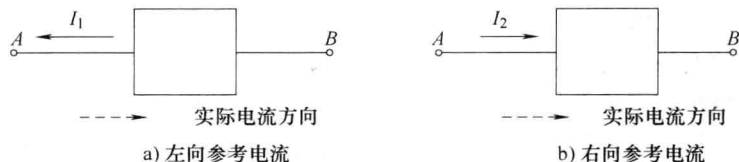


图 1-5 例 1-1 图

【解】

$$I_1 = -1 \text{ A} \quad I_2 = 1 \text{ A}$$

1.2.4 电压

1. 电势能

在平面上移动任何物体时，都必须用力。但是，物体从高处自由落下，水从高处向低处流，树叶落向地面，是谁在用力呢？物理学已经告诉我们，这是重力在起作用。在重力的作用下，处在地面不同高度的物体有着不同的重力势能。相同质量的物体在相同的高度具有相同的重力势能。物体在重力作用下下落时，会失去重力势能而获得动能。根据能量守恒定律，物体失去的重力势能和获得的动能大小相等。

推动电荷移动的力称为电场力。电荷处在电场中会受到电场力的作用，正电荷会沿着电场力的方向运动，负电荷则会沿着电场力的相反方向运动，从而在电路中产生电流。在没有电场力的地方，电荷会保持静止，而不会自发地发生移动，自然也就不会产生电流。电场力对于处于电场中的电荷的作用，与重力对于处于地球引力范围内的物体的作用十分相似。处于电场中的不同位置的电荷也有着不同的势能，这种势能被称为电势能。

等量的电荷在相同的电场中的相同位置具有相同的电势能，或者说电势能只与电荷量和电场的特性这两个因素有关。电荷在电场力的作用下移动时，也会失去电势能。根据能量守恒定律，这些失去的电势能会转化成等量的其他形式的能量。

为了计量电势能的大小，必须设定一个电势能为零的位置，物理学上认为距离电场无限远处的电势能为零（这一点也和重力势能的约定相似，回忆一下，在计算重力势能时通常认为地面的重力势能为零）。所以，电势能是一个相对的量。

2. 电势

电势能与电荷量的比值称为电势，由于电势能只与电荷在电场中的位置以及电荷量有关，所以可以用电势的分布来表征电场的特性。如果电场力将电荷 q 从某点移动到无限远处所做的功为 w ，那么该点电势的计算公式为

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

式中， w 是电场力对电荷所做的功，单位为焦耳 (J)； q 是电荷量，单位为库仑 (C)； v 是

该点的电势，单位为伏特（V）。

在前文关于电势能的叙述中，已经指出“等量的电荷在同一电场中的相同位置具有相等的电势能”。公式（1-2）在计算电势时通过微分去掉了电荷量的影响，所以它就只与电场本身的特性有关了，即电势的大小只与电场本身的特性有关，电场中的相同位置具有相同的电势。这个结论对于理解许多基本概念来说十分重要。

如果电荷在电场力的作用下移动，则说明电场力对电荷做了功，相应地电荷失去了电势能。在分析时可设定电路中某一点的电势为零，相应地电荷在该点的电势能也为零，称为零参考点，其他点的电势都是相对于零参考点而言的。

某点的电势也称该点的电位，在工程上后一个名称更常用。用符号 V_A 表示 A 点的电位。电位是一个相对的量，当我们说“ A 点电位”时就是指 A 点相对于零参考点的电位差，电位可能为正，也可能为负。正电位说明 A 点电位高于零参考点，负电位说明 A 点电位低于零参考点。

工程上习惯约定电路的“接地点”为零参考点。

电路的接地：

电路中的“接地”也叫公共端，有三类常见的“接地”（Earth Ground）类型，分别称为“大地”、“信号地”和“机壳地”，其符号分别如图 1-6a、b 和 c 所示。

这三种接地的意义是不同的，图 1-6a 表示的公共端为大地，意味着电路必须以某种方式与大地相连。图 1-6b 表示的公共端是信号地，信号地通常（但不是必须的）与大地之间存在着一个大的



图 1-6 三种表示接地方法的符号

的电位差。图 1-6c 表示的公共端是机壳地（Chassis Ground），它表示设备的所有电路的公共端都与设备的外壳连在一起，由于机壳与大地之间可能会具有较大的电位差，因此有可能给操作人员带来安全问题。

3. 电压的物理表述

由于电位（即电势）只与电荷在电场中的位置有关，因此任意两点之间的电位差是唯一的，即不论沿什么路径运动，电荷在两点间移动时发生的电势能的变化是相同的。我们称电场中 A 、 B 两点之间的电势差为 A 、 B 两点之间的电压，用符号 u_{AB} 表示。于是有

$$u_{AB} = v_A - v_B$$

显然电压是个绝对量，与零参考点的选择无关。电压值可正可负， $u_{AB} > 0$ 说明 A 点电位高于 B 点电位， $u_{AB} < 0$ 说明 A 点电位低于 B 点电位。在国际单位制中，电压的单位与电势的单位一样，都是伏特（V）。

根据电势的物理意义，电压也可以定义为：电路中 A 、 B 两点间的电压，在数值上等于单位正电荷从 A 点沿电路约束的路径移动至 B 点时电场力所做的功。电场力对电荷做功，同时也就意味着电荷本身失去了电势能，因此也可以这样说： A 、 B 两点间的电压，在数值上等于单位正电荷从 A 点移至 B 点时所失去的电势能。按照此定义得出的计算公式如下

$$u_{AB} = \frac{dw_{AB}}{dq} \quad (1-3)$$

式中， u_{AB} 表示 A 、 B 两点间的电压； w_{AB} 表示电荷 q 从 A 点沿电路约束的路径移动至 B 点时电场力所做的功； q 为电荷量。

伏特 (Alessandro Antonio Volta, 1745-1827), 意大利物理学家, 出生于意大利科莫, 他于 1796 年发明了电池, 这对电的使用是一个巨大的贡献。伏特还是电容器的发明者, 是电路理论的奠基人。

4. 电压的方向

根据前面的叙述, 电压表示了电路中两点之间的电位差。而电压值为正或负则标志了电位在 A 、 B 两点之间的降低或升高。为了便于分析, 规定电路中从高电位点向低电位点的方向为电压的实际方向。

由于在电路分析时难以事先判定电压的真实方向, 因此可以假定一个方向为电压的参考方向, 并据此来进行相应的计算。表示方法可以用“+”、“-”号标识在元件或电路的两端, 表示电压的参考方向是从“+”端指向“-”端, 如图 1-7a 所示; 也可以直接用箭头标识在电路上, 如图 1-7b 所示。

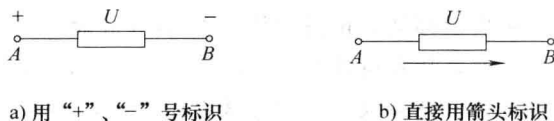


图 1-7 电压的参考方向

电压的参考极性可以任意假定, 如果计算出的结果为正, 表示实际极性与参考极性相同; 如果结果为负, 表示实际极性与参考极性相反。

理论上讲, 电流和电压的参考方向或参考极性可以任意假定, 互不相关。但在实际应用中, 为了便于分析和计算, 常常采用关联参考方向, 或称一致参考方向, 其含义是: 为某一个元件或某一个电路端口选定电压和电流的参考方向, 参考电流从参考电压的正极到负极流过该元件或电路时, 就称电压和电流的参考方向对于该元件或电路是关联的 (或一致的), 如图 1-8 所示。

5. 电动势

下面来考虑电路整体的情况。参考图 1-9, 可以将整个电路分成电源和外电路两部分, 外电路的电压和电流参考方向已经设定为关联参考方向。

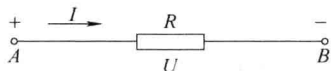


图 1-8 设定电压和电流
为关联参考方向

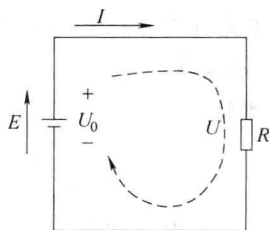


图 1-9 电压和电动势

在外电路中, 金属导体中的电子在电场力的作用下, 产生了如图 1-9 所示方向的电流 I , 而电压的方向如图 1-9 中的虚线箭头所示。

而在电源内部, 电流将发生从电源负极向正极的流动, 只有这样整个电路才能形成一个闭合的流通回路。可以看到在电源内部电荷是逆着电场力的方向运动的, 因此驱动这种流动的并不是电场力, 而是外力。这种情况就像物体向上运动必须克服重力一样。

在不同的电源内部, 这种外力是不同的: 在电池内部是化学作用, 在发电机内部则是电

磁力的作用。正是由于这种外力作用的结果,才使电源产生电能,进而在电路中产生了电压和电流,并对负载(在本例中是电阻 R)做功。

想象一下整个电路中到底发生了哪些过程:一方面,在电源内部,外力对电荷做功,从而使电荷具有了电势能;另一方面,在外电路中,具有了电势能的电荷在电场力的作用下运动,形成电流,此时电荷失去电势能,并对负载(如电阻)做功,形成热能或其他形式的能量。这两个过程周而复始地进行着,从而形成了电路中持续不断的能量转换过程。

为了衡量电源内部的外力对电荷做功的能力,引入了电动势这个物理量。它在数值上等于外力将单位正电荷由电源负极移动到电源正极时所做的功,也就是单位正电荷在电源内部,从负极移动到正极时所获得的电势能。电动势越大,表明外力移动单位正电荷做功越多,也就意味着将其他形式的能转化为电能的能力越强。电动势是电源的一个特征量,仅由电源本身的性质决定,与外接电路无关,其大小等于电源的开路电压,即在没有接入电路时电源两极间的电压。

电动势的单位和电压单位一样,也是伏特(V),其方向则是由电源负极指向正极,或者说是电位升高的方向。在计算时,也和电压一样,可任意选择参考方向,计算结果为正,表示实际方向与参考方向相同,结果为负,表示实际方向与参考方向相反。但通常也选择如图1-9所示的关联参考方向。

在图1-9中,电动势 E 、电源内部压降 U_0 以及电源端电压 U 之间的关系为

$$E = U_0 + U \quad (1-4)$$

为了分析方便,常常假定电流流过电源内部时没有能量损耗,并称这种电源为理想电源。理想电源两端的电压等于电源的电动势,即总是等于电源的开路电压,与流过电源内部的电流无关。真实的电源在接入电路之后,由于电源内阻的存在,其两端电压会略微低于电源的电动势。



图1-10 例1-2图

【例1-2】电路如图1-10所示,矩形框表示电路元件。已知电位 $V_A = 5\text{V}$, $V_B = -5\text{V}$, $V_C = -2\text{V}$, D 为参考点,求电压 U_{AB} 、 U_{CD} 的值和实际极性。

【解】根据

$$U_{AB} = V_A - V_B = 5 - (-5)\text{V} = 10\text{V}$$

$$U_{CD} = V_C - V_D = (-2) - 0\text{V} = -2\text{V}$$

$U_{AB} > 0$,可知电压实际方向由 A 指向 B ,或者 A 为高电位端, B 为低电位端。 $U_{CD} < 0$,表明电压实际方向与参考方向相反,即 D 为高电位端, C 为低电位端。

1.2.5 功率

功率是能量随时间的变化率,用 P 或 $p(t)$ 表示,简写为 p ,单位是瓦特(W)。如果1s内通过某个元件传递的能量是1J,那么能量传递的功率就是1W。根据功率的定义可得到功率与能量的关系

$$p = \frac{dw}{dt} \quad (1-5)$$

上式中, w 代表电路元件或电路所吸收的能量,单位为焦耳(J); t 为时间,单位为秒(s)。