

高等学校教材



工程电路分析

赵录怀 主编
刘正兴 杨育霞 编

 高等教育出版社

高等学校教材

工程电路分析

赵录怀 主编

刘正兴 杨育霞 编

高等教育出版社

内容简介

本书是作者在对国内外教材深入研究的基础上,结合多年教学实践经验编写而成。本书共分12章,内容有:基本电路元件、电阻电路的初步分析、动态电路的时域分析、正弦稳态分析、磁耦合元件、三相电路、频率响应、受控源和运算放大器、电路方程、单口电路的等效、双口电路的方程、非线性电路简介。每章给出要点提示,便于学生对所学内容归纳总结。书后附有中英文索引。

本书教学理念先进,注重工程应用,对基本内容讲解细致,注重物理概念。教学上可进可退,某些拓展性内容可根据教学需要灵活取舍。编写的例题和习题具有可延伸性,注重学生分析问题和解决问题能力的培养。

本书可作为高等院校电气信息类与电子信息类专业电路课程教材使用,也可供工程人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程电路分析/赵录怀主编;刘正兴,杨育霞编. —北京:高等教育出版社,2007.3

ISBN 978 - 7 - 04 - 021209 - 9

I.工… II. ①赵…②刘… ③杨… III. 电路分析 - 高等学校 - 教材 IV. TM133

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第013868号

策划编辑 杜 炜 责任编辑 王莉莉 封面设计 张志奇
责任绘图 朱 静 版式设计 陆瑞红 责任校对 杨雪莲
责任印制 尤 静

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010 - 58581118
社 址	北京市西城区德外大街4号	免费咨询	800 - 810 - 0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010 - 58581000		http://www.hep.com.cn
		网上订购	http://www.landaco.com
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司		http://www.landaco.com.cn
印 刷	化学工业出版社印刷厂	畅想教育	http://www.widedu.com
开 本	787 × 960 1/16	版 次	2007年3月第1版
印 张	18.25	印 次	2007年3月第1次印刷
字 数	340 000	定 价	21.20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 21209 - 00

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话：(010) 58581897/58581896/58581879

传 真：(010) 82086060

E - mail: dd@hep.com.cn

通信地址：北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社打击盗版办公室

邮 编：100011

购书请拨打电话：(010)58581118

前 言

本书主要介绍模型电路的基本规律和基本分析方法,为各种实际电路的分析和后续电类课程的学习奠定必要的理论基础。为适应 21 世纪我国高等教育迅速发展的新形势,不断提高教学水平和实际效果,本书从易于教学和学习的角度精心组织课程的内容和编排体系,注重理论联系工程实际,其主要特色如下:

(1) 本书按照从易到难的顺序编排课程的体系,先以较简单的电路(基本上为串、并联结构),由浅入深地阐明电路的基本概念、基本定律和一些基本方法,适当降低初学难度,注重打好基础,然后逐步提高理论学习的高度和深度,以达到本科电路教学的基本要求。这种体系层次分明,便于取舍,同时也有利于理论教学与实验教学更加紧密地结合,以避免某些矛盾。

(2) 本书正文楷体字编排的一些内容为扩展和开阔学生视野的内容,让学生有理论发展的空间,可根据教学需要灵活取舍和裁剪,不会影响基本内容的讲授。

(3) 考虑工程实用和当前人才培养模式,借鉴当前国际上著名电路教材的先进教学理念,并充分考虑到电路分析软件(如 OrCAD/PSpice)和数学工具软件(如 MATLAB)的普及和发展水平,对电路课程的传统内容进行精选和更新,削枝强干,突出重点。同时,适度引入线性集成芯片应用电路的分析,提升并强化分析方法,加强理论的实际应用。

(4) 精心编写了适量例题和习题,着重基本概念和基本分析方法的训练和掌握,不刻意追求解题技巧的训练。习题中有少量难度稍大的题目,旨在培养学生思维的深度,进一步提高分析问题和解决问题的能力。

稍做处理后,第 3 章动态电路的时域分析内容可根据一些授课教师的习惯放在第 7 章之后讲授(或在第 12 章之前讲授),对本科一年级第二学期就开始学习电路课程的学生,这样处理或许比较合适。

本书由赵录怀任主编,西安交通大学刘正兴教授编写了第 4、5、6 章,郑州大学杨育霞教授编写了第 8、12 章,其余由赵录怀编写。

本书承西安电子科技大学张永瑞教授仔细审阅并提出非常宝贵的修改意见,谨致以衷心感谢。

本书能够达到现有水平,也要十分感谢西安科技大学田一涵教授和西安交通大学罗先觉教授,他们及时指出了本书试用稿中的一些错误和疏漏,并给作者

II 前言

提供了一些很有益的建议。

限于编者水平,书中定有不足甚至错误之处,希望读者予以批评指正。

编者

2006年12月

目 录

第 1 章 基本电路元件	1
1.1 电路	1
1.2 电流和电压	4
1.3 功率	7
1.4 电阻元件	9
1.5 电容元件和电感元件	11
1.6 电压源和电流源	17
要点提示	18
习题 1	19
第 2 章 电阻电路的初步分析	22
2.1 基尔霍夫定律	22
2.2 单回路电路与双结点电路的求解	29
2.3 元件的串联和并联	31
2.4 电压源与电流源的变换	37
2.5 叠加定理	43
要点提示	46
习题 2	48
第 3 章 动态电路的时域分析	54
3.1 电路的初始值	54
3.2 一阶 RC 电路的响应	56
3.3 一阶 RC 电路响应的通用公式	63
3.4 一阶 RL 电路	67
3.5 单位阶跃响应	71
3.6 二阶电路	75
要点提示	81
习题 3	82

第4章 正弦稳态分析 85

- 4.1 复数 85
- 4.2 正弦量 88
- 4.3 相量法的基础 91
- 4.4 阻抗和导纳 99
- 4.5 正弦稳态电路的功率 104
- 要点提示 110
- 习题4 111

第5章 磁耦合元件 116

- 5.1 磁耦合电感 116
- 5.2 磁耦合电感的串联与并联 120
- 5.3 线性变压器 124
- 5.4 理想变压器 126
- 要点提示 129
- 习题5 130

第6章 三相电路 133

- 6.1 三相电源和三相电路 133
- 6.2 三相电路的计算 136
- 6.3 三相电路的功率 141
- 要点提示 143
- 习题6 144

第7章 频率响应 147

- 7.1 谐振 147
- 7.2 频率响应 153
- 7.3 非正弦周期函数的傅里叶分解 159
- 7.4 非正弦周期信号输入电路的分析 166
- 要点提示 170
- 习题7 170

第8章 受控源和运算放大器 173

- 8.1 受控源 173

8.2 理想运算放大器	179
8.3 运算放大器应用电路举例	182
要点提示	186
习题8	186
第9章 电路方程	189
9.1 电路方程的典型形式	189
9.2 结点方程	192
9.3 含有电流变量的结点方程	201
9.4 回路方程	203
9.5 相量形式的电路方程	207
9.6 状态方程简介	213
要点提示	217
习题9	218
第10章 单口电路的等效	224
10.1 等效电阻	224
10.2 单口电路的等效(戴维宁定理和诺顿定理)	226
10.3 最大功率问题	234
要点提示	238
习题10	238
第11章 双口电路的方程	241
11.1 双口电路	241
11.2 电流控制型方程与电压控制型方程	242
11.3 电阻的 Δ 形联结与Y形联结的等效变换	245
11.4 混合方程和传输方程	247
11.5 双口参数的约束	251
要点提示	255
习题11	255
第12章 非线性电路简介	258
12.1 非线性电路元件	258
12.2 小信号分析	262

12.3 分段线性电路	266
12.4 非线性电路的方程	271
要点提示	274
习题 12	274

参考书目	277
------------	-----

索引	278
----------	-----

基本电路元件

本章介绍电路的基本物理量和基本电路元件,主要内容有:电流和电压,电功率的计算公式,电阻、电容、电感、电压源、电流源 5 种基本电路元件的电压电流关系式。

1.1 电 路

经过近一个半世纪的发展,电工程已形成多个学科:电气工程、通信工程、电子工程、自动控制、计算机科学、信号处理等,这些学科的一个共同的基础就是电路理论。所有实际电路都是以电能或电信号的传输、变换、处理为目的。例如,电力系统的主要作用是远距离传输能量,发电机把水能、矿物能、核能、太阳能等转换为电能,经传输线再把电能传输给远距离的负载,而在自动控制、语音处理、视频信号处理、测量等系统中,一些电流或电压的变化蕴含了所携带的某种信息,这些电流或电压被称为电信号,电路的功用是对电信号进行传输、存储、处理和显示。

习惯上把电路也称为网络(电网络),以强调各个功能模块之间的互连。尽管“网络”一词在当今常常指计算机互联网,但在电路研究的一些文献中,仍然把电路称为网络。有时,电路也称作“系统(电系统)”。

实际电路是由电气部件连接成的系统或装置,伴随电流的流动,电路中发生着电磁能与非电磁能的相互转换。例如,手电筒中的电池和电珠组成一个极简单的电路,有电流情况下,电池持续提供电能,电珠把电能转换为光或热,总是消耗电能。通常,把提供电能的元件^①称为电源,而把用电元件称为负载。

电磁理论对电磁现象已给出了完美的数学描述,然而,对满足集总假设条件的电路问题,非常严密的数学描述不便于工程实际中使用,基尔霍夫通过研究发

^① 本书对元件、器件、部件 3 个术语不予区分,今后统一称为元件。

现,这类电路中的电压和电流总是遵从某种非常简单的规律,与电路元件的类型无关。

当电路线长的最大跨距 d 远远小于电磁波波长 λ 时,即

$$d \ll \lambda \text{ 或 } d < 0.1\lambda \quad (1-1)$$

式(1-1)称为集总假设条件,满足该条件的电路称为集总电路,否则称为分布电路。

电磁波波长 λ 与电磁波的传播速度 v (其中 $v \approx 3 \times 10^8$ m/s) 和电路工作频率 f 之间的关系为 $\lambda = v/f$, 式(1-1)也可表示为

$$d \ll \frac{v}{f} \quad (1-2)$$

举例来说,对最大跨距 $d = 1$ m 的电路,若最高工作频率为 $f_1 = 10^6$ Hz,则电磁波的波长

$$\lambda_1 = \frac{3 \times 10^8}{10^6} \text{ m} = 300 \text{ m}$$

该电路满足集总假设条件,为集总电路。若最高工作频率为 $f_2 = 10^9$ Hz,则

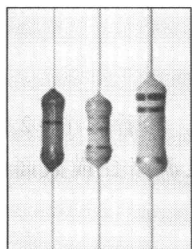
$$\lambda_2 = \frac{3 \times 10^8}{10^9} \text{ m} = 0.3 \text{ m}$$

则该电路就不满足集总假设条件,应为分布电路。可见,同一个电路在不同工作条件下,其性能却是不一样的。本书只涉及集总电路的基本理论。

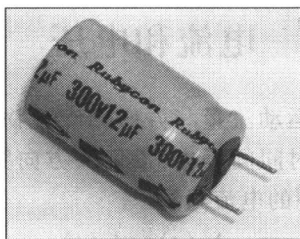
在满足集总假设条件下,实际电路所界定区域的电磁场在任何时刻可近似为稳恒电磁场,导线的长度、实际元件的体积就可忽略不计,电压和电流就仅仅是时间的函数,与空间坐标无关。集总电路假定电磁过程全部集中于电路内部,可用具有特定电磁性能的、理想的电路元件的组合,来模拟实际电路的电磁过程,用符合工程要求的数学模型来表示实际电路。

实际电路元件的种类很多:电阻器主要用于分压或分流,在电路中要消耗一定的电能;电容器用于存储电场能量,在电子电路中常常用于隔断直流电流和抑制电压的变化;电感线圈能够存储磁场能量,具有抑制电流变化的功能;变压器依靠一次、二次绕组的磁耦合作用传递电能和信号,具有隔离和变换电压、电流的功能;半导体二极管使电流只能单向流动;晶体管主要起信号放大或开关作用。一些实际电路元件的外形如图1-1所示。

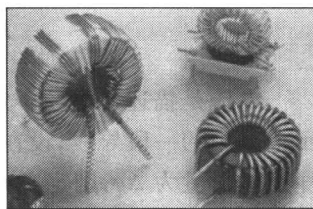
根据元件的引脚数目,2个引脚的称为二端元件,如电阻、二极管等;3个引脚的称为三端元件,如晶体管、三端稳压器等。随着微电子技术的飞速发展,集成电路的种类繁多,集成度也越来越高,如今在一个芯片上已能集成上千万个晶体管。单片机芯片、信号处理专用芯片、计算机中央处理单元等已在计算机工



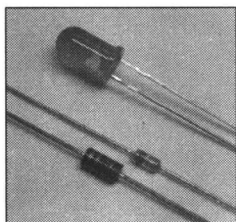
(a) 电阻



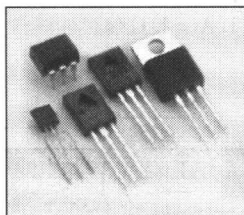
(b) 电容



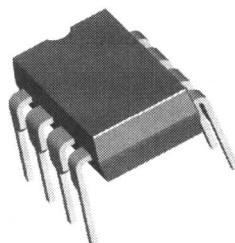
(c) 线圈



(d) 二极管



(e) 晶体管



(f) 运算放大器

图 1-1 一些实际元件的外形图

程、信号处理、自动控制、家用电器等领域被广泛使用,这些模块的引脚有的多达几十个。

实际电路元件的电特性在严格意义上是非常复杂的,元件的特性与温度、工作电压和电流的范围、频率等多种因素有关,为此,电路理论中定义了一些元件,这些元件用某些电路变量给予严格定义,具有特定的电压电流关系式。例如,电路理论中定义的线性电阻元件,用电压和电流变量定义,二者总是成正比关系,当然,实际电阻器是不可能具有这一理想特性的,它在电路中的工作状况总会与理论上定义的电阻元件有一定差别。可以说,电路教材中所定义的元件都是一些理想元件,从严格意义上讲,实际中是不存在的。

电路理论中定义的基本元件有:电阻、电感、电容、电压源、电流源、受控电压源和受控电流源,用这些元件的组合可以描述所有实际元件的电学行为特性。例如,一个实际电感线圈可以粗略地用一个电感元件表示,当线圈的电阻不容忽视时,该线圈往往用电阻元件和电感元件的串联表示,这种用于描述实际电路电学行为的由理想元件所连接成的电路称为实际电路的模型,本书中所涉及的电路都由理想元件组成,至于一个实际电路究竟该如何用模型表示,这需要有关实

实际元件的专门知识,本书不做讨论。

1.2 电流和电压

电流是描述带电粒子定向运动流量和方向的宏观物理量。参看图 1-2 所示电路中的一段导线,设在 Δt 时间间隔内,沿箭头方向穿越电流路径横截面的净正电荷量为 Δq ,则定义 t 时刻的电流为

$$i(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q(t)}{\Delta t} = \frac{dq(t)}{dt} \quad (1-3)$$

式中,时间 t 的单位是秒,用 s 表示;电荷 $q(t)$ 的单位是库[仑],用 C 表示;电流 $i(t)$ 的单位是安[培],用 A 表示, $1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$ 。

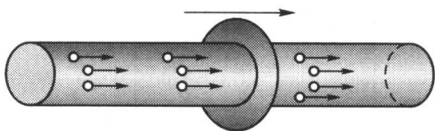


图 1-2 导线中的电流

电荷量为代数量,正电荷的电荷量大于零,负电荷的电荷量小于零。若在导体中有运动的带负电粒子,应当换算为等效的正电荷来考虑。对复杂电路中的某一段导线,正电荷的运动方向有可能在电路分析之前无法做出判断,还有可能随时间变化。因而,在电路理论中,为了能用数学函数表示电流和与电流有关的方程,必须预先设定电流的方向,在电路中用箭头表示,称为电流的参考方向。因此,电路中的电流也为代数量,只有在明确给出电流参考方向的情况下,写出随时间变化的电流函数 $i(t)$ 才有意义。

根据电流的参考方向和任一时刻电流的数值(或正,或负),就可以判断电路中电荷的实际流向。当电流为正值时,说明正电荷的运动方向与电流的参考方向一致;否则,则相反,如图 1-3 所示。今后所述的电流方向均指电流参考方向。



图 1-3 电流的参考方向

电流的参考方向与通常所说的电流的实际方向是两个不同的概念,前者把电流定义为具有正值和负值的代数量,而后的电流只能取正值,指正电荷的运动方向,或负电荷运动方向的相反方向。

当电流不随时间变化(恒为正值或恒为负值)时,称为恒定电流或直流电流(DC),用大写字母 I 表示。随时间 t 变化的电流称为时变电流,用 $i(t)$ 或 i 表示。图 1-4 所示为周期方波电流,在 $0 < t < \frac{T}{2}$ 内, $i = I_m$, 正电荷的运动方向与参考方向相同;在 $\frac{T}{2} < t < T$ 内, $i = -I_m$, 正电荷的运动方向与参考方向相反。按正弦函数变化的电流称为正弦交变电流,简称交流电流(AC)。

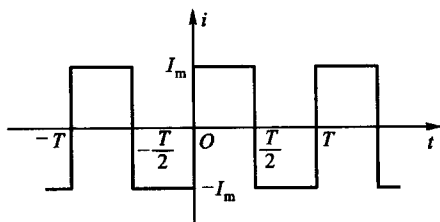


图 1-4 方波电流

严格讲,电荷 q 是离散量,它是基本电荷(一个电子所带电荷)的整数倍,因而不能进行求导运算。但由于电路中 q 的实际数值远远大于基本电荷,因而 q 可近似地看做是时间的连续变量。

对式(1-3)两边在区间 (t_0, t) 积分,还可得它的逆关系式

$$q(t) = \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau \quad (1-4)$$

为了避免符号混淆,式中积分变量改用 τ 表示。当已知 $t > t_0$ 的电流 $i(t)$ 时,根据式(1-4)就可以求出 (t_0, t) 内通过的电荷(量) $q(t)$ 。

对二端电路元件,在集总条件下,总是假定在元件内部不能积累净电荷,故在任何时间,从一个端子流进的电荷(电流)一定等于从另一个端子流出的电荷(电流),因而,对二端电路元件,电流的参考方向只需在一个端子上标记,如图 1-5 所示。



图 1-5 二端元件电流的表示

由物理学知识可知,电场中任两点之间存在一个电压,当电感线圈的磁通变化时,在电感线圈两端也存在感应电压。

电路中,电压是对两个连接点或元件两个端子之间所定义的一种物理量。对图 1-6 所示二端元件,设在 Δt 时间内,从端子 a 到端子 b 流过元件的正电荷量为 Δq ,若元件吸收的能量为 ΔW ,则定义端子 a 与端子 b 之间的电压 u_{ab} 为

$$u_{ab} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta W}{\Delta q} = \frac{dW}{dq} \quad (1-5)$$

式中,能量 W 的单位是焦[耳],用 J 表示;电压 u_{ab} 的单位是伏[特],用 V 表示, $1 \text{ V} = 1 \text{ J/C}$ 。

若正电荷按图 1-6 所示箭头方向流动时,且元件确实吸收能量(存储能量或把电能转化为其他形式的能量),这时,电场力推动电荷做功,则电压 u_{ab} 就大于零,或者说端子 a 的电位^①比端子 b 的电位高 u_{ab} ,也可以说端子 a 相对于端子 b 的电位 $v_a = u_{ab}$ 。

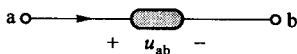


图 1-6 二端元件的电压

若正电荷按图 1-6 所示箭头方向流动时,且是非电场力推动电荷做功,元件发出能量,这时端子 b 的电位高于端子 a 的电位,即 $u_{ba} > 0$ 。

对一只电池来说,不论它是否连接负载,电压总是存在的。

与电流物理量类似,电压也为代数量,必须预先设定两个端子上电位的“高”、“低”,用“+”、“-”号表示,称为电压的参考极性。在标出参考极性后,电压的函数表示才有意义,时变电压用 $u(t)$ 或 u 表示,直流电压用大写字母 U 表示。在任一时刻,若电压的数值大于零,则元件端子上实际电位的高、低与假设的相同,否则,则相反。很自然地有,端子 b、a 间的电压 u_{ba} 应该等于端子 a、b 间电压 u_{ab} 的负值,即

$$u_{ba} = -u_{ab}$$

例如,在图 1-7 中,端子 a 的电位比端子 b 的电位高 12 V,则 $u_{ab} = 12 \text{ V}$, $u_{ba} = -12 \text{ V}$ 。在电路分析中,可以预先任意指定电压的极性。

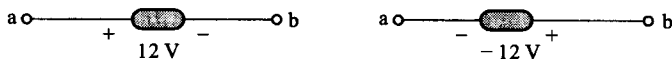


图 1-7 参考极性下的电压

电压的参考极性也可用箭头方式表示,本书中规定:箭头从参考极性的

^① 若把电路中某一连接点作为参考点,其余连接点处相对于参考点电压称为该点的电位,则参考点的电位应为零。

“+”指向“-”，即按电位降低的方向画。图1-8所示电压的两种表示在本书中含义相同，故把电压的参考极性也说成电压的参考方向。



图1-8 电压的参考方向

1.3 功 率

对一个电气设备或电路元件，除考虑电压和电流的大小外，(电)能量和功率也是必须要考虑的一个物理量。例如，一个实际电阻器在正常工作时要求它的功率不能超过所允许规定的额定值。

功率定义为能量随时间的变化率，即

$$p = \frac{dW}{dt} \quad (1-6)$$

能量 W 的单位是焦[耳]，用 J 表示；功率 p 的单位是瓦[特]，用 W 表示， $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$ 。对二端元件，设在 dt 时间内流过元件的电荷为 dq ，采用链式求导法，上式也可写作

$$p = \frac{dW}{dq} \frac{dq}{dt}$$

由式(1-5)和式(1-3)，得

$$p = ui \quad (1-7)$$

式(1-7)具有非常简单的形式，但它表示元件吸收还是发出功率呢？要回答这一问题，必须根据元件上电压和电流的参考方向来判断。对图1-9(a)，电流从元件电压的正极流向负极，根据电压的定义，元件在吸收能量，故 $p = +ui$ 表示元件吸收功率；对图1-9(b)，电流从元件电压的负极流向正极，元件吸收的功率 $p = -ui$ ，或元件发出的功率 $\hat{p} = ui$ 。

今后，在本书中称图1-9(a)所示元件的电流与电压的(参考)方向相同(或一致)^①，而图1-9(b)所示元件的电流与电压的(参考)方向相反^②。

例1-1 求图1-10所示元件吸收的功率。

解：图1-10(a)中电流与电压的方向相同，故元件吸收的功率为

① 中文教材中一般称其为关联参考方向，英文教材中称这种参考方向满足 Passive Sign Convention。

② 非关联参考方向，或满足 Active Sign Convention。