

21 世纪高职高专电子与信息类专业系列教材



DIANLU FENXI JICHU

电路分析基础

主 编 王明慧

胡 峥

主 审 姚建永



华中科技大学出版社

<http://press.hust.edu.cn>

21 世纪高职高专电子与信息类专业系列教材

电路分析基础

主 编	王明慧	胡 峥	
副主编	彭宏娟	彭友桂	
参 编	李亚清	陈 文	
	赵 洪	陈 刚	郭利霞
主 审	姚建永		

华中科技大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

电路分析基础/王明慧 胡峥 主编

武汉:华中科技大学出版社,2004年7月

ISBN 7-5609-3184-7

I. 电…

II. ①王… ②胡… ③彭… ④彭…

III. 电路分析-电路理论

IV. TM133

电路分析基础

王明慧 胡峥 主编

责任编辑:谢燕群

封面设计:潘 群

责任校对:陈 骏

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:华中科技大学惠友文印中心

印 刷:湖北恒吉印务有限公司

开本:787×960 1/16

印张:15.25

字数:266 000

版次:2004年7月第1版

印次:2004年7月第1次印刷

定价:21.00元

ISBN 7-5609-3184-7/TM·93

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

内 容 简 介

本书是以教育部制定的《高职高专教育电路基础课程教学基本要求》为依据编写的高职高专电类专业教材。

本书主要介绍的内容有直流电路、正弦稳态电路、谐振电路、三相电路、二端口网络、非正弦周期电路、电路的暂态分析、互感电路,需 60~90 学时。

本书特点是:注重培养学生的技术应用能力和职业素质,增加了大量的例题,分散难点,突出重点,把握概念,推进认知,注重基础理论的实用性,在掌握主要理论知识的同时,侧重于实际电器、电路的应用。

本书可作为高职高专院校电子与信息类专业的专业基础教材,也可用做成人高校或自学等的相关专业教材。

21 世纪高职高专电子与信息类专业 系列教材编委会

主 任 谢自美(华中科技大学电子与信息工程学院教授)

委 员 (以姓氏笔画为序)

尹立贤(湖南信息职业技术学院信息工程系主任)

刘小芹(武汉职业技术学院副院长)

刘继清(武汉船舶职业技术学院电气与信息工程系主任)

刘晓魁(湖南生物机电职业技术学院计算机信息工程系主任)

李绍唐(湖南科技职业学院院长)

姚建永(武汉职业技术学院电子信息工程系主任)

黄新民(湖南信息职业技术学院副院长)

韩卫宏(武汉市仪表电子学校副校长)

熊 绪(武汉船舶职业技术学院教务处处长)

前 言

根据教育部《关于加强高职高专教育人才培养工作的意见》精神,为满足高职高专电类相关专业教学的基本建设的需要,经过广泛的调研,组织编写了面向 21 世纪的高职高专电类专业系列教材。

由于本套教材具有整体策划性,从而保证了专业基础课与专业课内容的衔接、理论教材与实验教材的配套,体现了专业的系统性和完整性。在编写的过程中,力求深入浅出,将知识点与能力点紧密结合,注重培养学生的应用能力和解决现场实际问题的能力。

编写本书时力求突出高等职业教育的特点,降低理论深度,删除一些数学推导内容,注重学生实际应用能力的培养。

本书由武汉船舶职业技术学院王明慧和武汉市仪表电子学校胡峥担任主编,王明慧编写了第 5 章;胡峥编写了第 4,6 章;湖南信息职业技术学院彭宏娟、鄂州大学彭友桂任副主编,彭宏娟编写了第 8,9 章;武汉市仪表电子学校李亚清、陈文、赵洪、陈刚分别编写了第 1,7,3,2 章;武汉船舶职业技术学院郭丽霞编写了第 10 章。武汉职业技术学院姚建永担任主审。

在编写本书过程中,得到了华中科技大学出版社、武汉船舶职业技术学院、武汉市仪表电子学校领导及有关同志的指导、支持和帮助,在此一并表示感谢。

由于时间仓促、编者水平有限,书中难免有不妥之处,敬请同行给予批评指正。

编 者

2004 年 4 月

目 录

第 1 章 电路的基本概念和基本定律	(1)
1.1 电路和电路模型	(1)
1.1.1 电路	(1)
1.1.2 电路模型	(2)
1.2 电路的基本物理量	(3)
1.2.1 电流	(3)
1.2.2 电压	(6)
1.2.3 电功率和能量	(7)
1.3 电阻元件和欧姆定律	(9)
1.3.1 电阻元件	(9)
1.3.2 欧姆定律	(11)
1.4 电压源和电流源	(13)
1.4.1 电压源	(13)
1.4.2 电流源	(15)
1.5 基尔霍夫定律	(16)
1.5.1 电路中几个名词	(16)
1.5.2 基尔霍夫电流定律	(17)
1.5.3 基尔霍夫电压定律	(19)
第 2 章 电路的等效变换	(26)
2.1 电阻的串联、并联、混联及等效变换	(26)
2.1.1 电阻的串联及等效变换	(26)
2.1.2 电阻的并联及等效变换	(29)
2.1.3 电阻的混联及等效变换	(31)
2.2 电阻的星形与三角形连接及等效变换	(33)
2.2.1 Y 形连接等效变换为 Δ 形连接	(33)
2.2.2 Δ 形连接等效变换为 Y 形连接	(35)

2.3	电源模型的连接及等效变换	(37)
2.3.1	理想电压源的连接	(37)
2.3.2	理想电流源的连接	(38)
2.3.3	电源模型的等效变换	(39)
2.4	受控源及含受控源电路的等效变换	(42)
2.4.1	受控源	(42)
2.4.2	含受控源电路的等效变换	(44)
第3章	线性网络的一般分析方法	(48)
3.1	支路电流法	(48)
3.2	回路电流法	(49)
3.3	节点电压法	(54)
第4章	线性网络的基本定理	(62)
4.1	叠加定理	(62)
4.1.1	叠加定理	(62)
4.1.2	齐次性定理	(64)
4.2	替代定理	(66)
4.3	戴维南定理	(66)
4.3.1	二端网络	(67)
4.3.2	戴维南定理	(67)
4.3.3	诺顿定理	(69)
第5章	正弦稳态电路	(74)
5.1	正弦量的基本概念	(74)
5.1.1	频率、周期、有效值	(74)
5.1.2	相位及相位差	(76)
5.2	正弦量的相量表示法	(78)
5.2.1	复数	(78)
5.2.2	正弦量的复数表示	(80)
5.3	电阻元件伏安关系的相量形式	(82)
5.3.1	相量形式	(82)
5.3.2	电阻元件的功率	(83)
5.4	电感元件及其伏安关系的相量形式	(84)

5.4.1 电磁感应定律与电感元件	(84)
5.4.2 纯电感电路中电压和电流的关系	(86)
5.4.3 电感元件的瞬时功率	(88)
5.4.4 电感元件的无功功率	(89)
5.5 电容元件及其伏安关系的相量形式	(90)
5.5.1 电容及其单位	(90)
5.5.2 纯电容电路中电压和电流的关系	(91)
5.5.3 电容元件的功率	(93)
5.6 基尔霍夫定律的相量形式	(95)
5.7 R 、 L 、 C 串联电路及复阻抗	(96)
5.8 R 、 L 、 C 并联电路及复导纳	(100)
5.9 无源二端网络的等效复阻抗和复导纳	(103)
5.9.1 复阻抗(复导纳)的串联和并联	(103)
5.9.2 无源二端网络的等效电路	(104)
5.10 实际元件的电路模型	(106)
5.11 正弦电流电路的分析计算	(108)
5.12 二端网络的功率	(111)
5.12.1 瞬时功率	(111)
5.12.2 有功功率(平均功率)和功率因数	(112)
5.12.3 无功功率	(113)
5.12.4 视在功率	(113)
5.13 功率因数的提高	(115)
5.13.1 功率因数提高的意义	(115)
5.13.2 提高功率因数的方法	(116)
5.14 串联电路的谐振	(118)
5.14.1 谐振条件	(118)
5.14.2 串联谐振电路的基本特征	(119)
5.14.3 特性阻抗和品质因数	(120)
5.14.4 谐振曲线与选择性	(120)
5.15 并联电路的谐振	(122)
第6章 互感电路	(132)
6.1 互感及互感电压	(132)
6.1.1 互感现象	(132)

6.1.2	互感系数	(133)
6.1.3	耦合系数	(133)
6.1.4	互感电压	(134)
6.2	互感线圈的同名端	(135)
6.3	互感电路的计算	(137)
6.3.1	互感线圈的串联及其等效电路	(137)
6.3.2	互感线圈的并联及其等效电路	(140)
6.4	空心变压器	(141)
第 7 章	三相电路	(148)
7.1	三相电源	(148)
7.2	三相电源的连接	(150)
7.3	三相负载的连接	(152)
7.3.1	单相负载	(152)
7.3.2	三相负载的连接	(154)
7.4	对称三相电路的计算	(155)
7.4.1	对称 Y 形连接三相电路的计算	(156)
7.5	不对称三相电路的计算	(163)
7.5.1	三相四线制 Y 形连接不对称负载	(163)
7.5.2	三相三线制 Y 形连接不对称负载	(164)
7.5.3	Δ 形连接不对称负载	(166)
7.6	三相电路的功率及其测量	(168)
7.6.1	三相电路的功率	(168)
7.6.2	三相电路功率的测量	(172)
第 8 章	非正弦周期电流电路	(176)
8.1	非正弦周期信号及其分解	(176)
8.1.1	非正弦周期量的产生	(176)
8.1.2	非正弦交流电的分解	(177)
8.1.3	非正弦周期曲线的种类	(179)
8.2	非正弦周期电流电路中的有效值、平均值、平均功率	(182)
8.3	非正弦周期电流电路的计算	(184)
8.4	滤波器	(187)
8.4.1	低通滤波器	(188)

8.4.2	高通滤波器	(189)
8.4.3	谐振滤波器	(189)
第 9 章	线性电路过渡过程的一般分析法	(193)
9.1	电路的动态过程及初始值的确定	(194)
9.1.1	电路的动态过程	(194)
9.1.2	电路的初始状态和初始条件	(196)
9.2	一阶电路的零输入响应	(199)
9.2.1	RC 电路的零输入响应	(199)
9.2.2	RL 电路的零输入响应	(201)
9.3	一阶电路的零状态响应	(204)
9.3.1	RC 电路的零状态响应	(204)
9.3.2	RL 电路的零状态响应	(206)
9.4	一阶电路的全响应与三要素法	(209)
9.4.1	一阶电路的全响应	(209)
9.4.2	三要素法	(211)
第 10 章	二端口网络	(219)
10.1	二端口网络的概念	(219)
10.2	二端口网络的参数方程	(220)
10.2.1	导纳参数方程	(220)
10.2.2	阻抗参数方程	(223)
10.2.3	传输参数方程	(225)
10.2.4	混合参数方程	(227)
参考文献		(230)

第 1 章 电路的基本概念和基本定律

【内容提要】 本章首先介绍电路、电路模型的概念,指出电路的基本物理量,然后介绍电阻、电压源和电流源等电路元件的特性,同时阐明基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律。

1.1 电路和电路模型

1.1.1 电路

人们在工作和生活中使用着种类繁多的电路,无论在家庭、学校、车间还是汽车中,到处都能找到它的身影。例如,用于传输电能的超高压输电线路;为采光而使用的照明电路;电视机和收音机中将微弱信号进行放大的放大电路;从各种不同信号中选取所需信号的输入调谐电路;交通运输中使用的各种信号的控制电路,帮助飞机飞行和着陆的自动导航和自动着陆的控制系统;电梯中电机、门和灯光的控制机构等。那么,什么是电路呢?

电流流通的闭合路径称为电路。电路的另一个名称叫电网络。只不过一般电网络是指复杂些的电路。电路由电源、负载、连接导线、控制和保护装置四部分组成。

1. 电源

电路中供给电能的设备或器件称为电源。它能把其他形式的能转换成电能,常见的电源有干电池、蓄电池、发电机等。

2. 负载

电路中使用电能的设备或器件称为用电器,也常被称为电源的负载。它是把电能转换成其他形式能的用电器,如电灯、电铃、电动机、电熨斗等。

3. 连接导线

连接电源与用电器的金属线称为导线。它把电源产生的电能输送到用电器。一般常用的导线是铜线和铝线。

4. 控制和保护装置

它是用来控制电路通、断,保护电路的安全,使电路能够正常工作的装置,如开

关、熔断器、继电器等。

图 1-1 所示的是一个简单的手电筒实际电路,而图 1-2 所示为手电筒电路模型。这个电路是由一个电源即干电池,一个负载即小灯泡,一个开关和两根导线组成的。

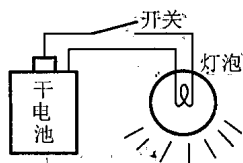


图 1-1

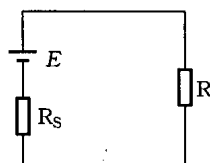


图 1-2

1.1.2 电路模型

实际使用的电路可能是简单的,也可能是复杂的,有时会复杂到难以想像的程度。即使在最简单的电路中,实际的电气器件牵涉到的知识也很广泛。这里我们只是对电路中的一些基本规律进行探讨,按照所掌握的规律对电路进行分析。为此,为了便于对实际的复杂电路进行分析和计算,常常把实际的电路元件理想化。在一定的条件下,忽略其次要性质,用足以表征其主要特征的“模型”来表示,即用理想元件代替实际电路元件。例如,有的元件主要消耗电能,那么具有消耗电能这一特征的电阻器、电灯、电炉、电烙铁等实际电路元件都可以用“电阻元件”这个“模型”来近似表示。再如,有的实际电器元件主要储存磁场能量,那么具有储存磁场能量这一特征的日光灯镇流器、收音机用天线线圈、滤波扼流圈、固定电感器等实际电路元件都可以用“电感元件”来近似表示。有的元件主要储存电场能量,如各种类型的电容器,都可以用“电容元件”来近似表示。有的元件和设备主要供给电能,如电池和发电机,就用“电压源”或“电流源”模型来表示。

用理想元件代替实际元件构成的电路就叫实际电路的电路模型。在设计、安装或修理各种设备和用电器等的实际电路时,常用特定符号表示电路元件连接情况。这种用规定符号表示电路连接情况的图称为电路图。

任何实际电路都可以用电路图表示。电路图理想元件要用特定的图形符号来表示。国家标准对其有统一的规定,使用时要遵守国家标准。表 1-1 所示为几种常用的标准图形符号。

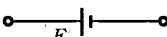
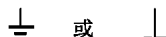
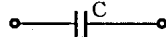
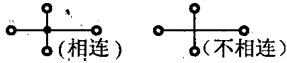
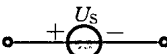
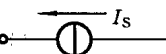
以后各章节中,当谈到电路的时候除非另有说明,均指由理想元件构成的电路模型,而非实际电路。理想基本电路元件有三个特征。

①只有两个端子(即有两个与外部连接的端钮,又叫二端电路元件)。这些端子是连接其他电路元件的连接点。

②可以用电压或电流按数学方式描述。

③不能被分解为其他元件。

表 1-1 几种常见的标准图形符号

名 称	符 号	名 称	符 号
固定电阻		可调电阻	
电灯		开关	
电池		接地	
电感		电容	
熔断器		导线	
理想电压源		理想电流源	

1.2 电路的基本物理量

1.2.1 电流

在初中物理课中已经学过:电荷的定向移动形成电流。

要形成电流,必须有能够自由移动的电荷——自由电荷。金属导体中的自由电子,电解质溶液(酸、碱、盐的水溶液)中的正、负离子都是自由电荷。那么,在什么条件下,自由电荷才能发生定向移动呢?

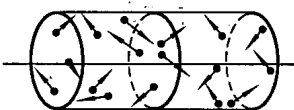


图 1-3

当导体内没有电场时,导体中大量的自由电荷就像气体中的分子一样,不停地做无规则的热运动,向各个方向运动的机会相等,因而对于导体的任一横截面在一段时间内从两侧面穿过这个截面的自由电荷大致相等,如图 1-3 所示。从宏观上看,导体中的自由电荷没有定向移动,所以导体中没有电流。

如果把导体放进电场内,导体中的自由电荷,除了做无规则的热运动外,还会在电场力的作用下做定向运动,形成电流。但很快就达到静电平衡状态,电流消失,导体内部的场强为零,整块导体成为等位体,如图 1-4 所示。

可见,要想得到持续的电流,就必须使导体两端保持一定的电压(电位差)。导体内部存在电场,才能持续不断地推动自由电荷做定向移动。所以导体产生电流

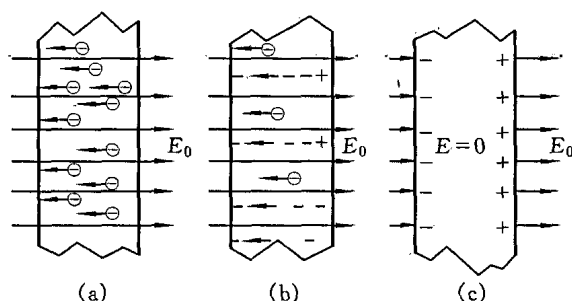


图 1-4

的条件是：导体两端存在电压。干电池、蓄电池、发电机等都是电源，它们的作用是保持导体两端的电压，使导体中有持续的电流。

导体中的电流可以是正电荷的定向移动，也可以是负电荷的定向移动，还可以是正、负电荷沿相反方向的定向移动。习惯上约定，正电荷的定向移动方向为电流的方向。

在金属导体内部，参加导电的只有带负电荷的自由电子，所以在图 1-4(a) 所示中，电子运动的方向与电流方向相反。

电流有强、弱之分。电流的强弱常用电流强度这个物理量来表示。通过导体横截面的电荷量 q 与通过这些电荷量所用的时间 t 的比值称为电流强度。

电流分为两类：一类为强弱和方向均不随时间改变的电流，叫做恒定电流。通常所说的直流指的是恒定电流，其强度用符号 I 表示。另一类为流动方向轮流改变的电流。通常，交流则指随时间按正弦规律变化的电流。其强度用符号 i 表示，如图 1-5 所示。

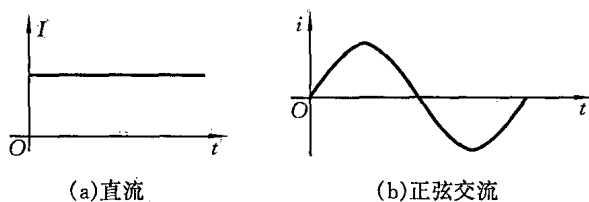


图 1-5

对于直流电流，单位时间内通过横截面的电荷量是恒定不变的，其电流强度

$$I = q/t$$

在国际单位制中，电流的单位是安培，简称安，符号是 A。如果在 1s 内通过导体横截面的电荷量是 1C，则导体中的电流就是 1 A。电流的常用单位还有毫安 (mA)，微安 (μA)，其关系为

$$1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ A}, \quad 1 \mu\text{A} = 10^{-6} \text{ A}$$

例 1.1 有一根导线, 3 min 通过其横截面的电荷量是 1.8 C, 通过导线的电流是多大? 合多少毫安? 多少微安?

解 根据电流强度的定义式, 有

$$I = q/t = 1.8/3 \times 60 \text{ A} = 0.01 \text{ A} = 10 \text{ mA} = 10\,000 \mu\text{A}$$

在分析电路时, 有很多时候是事先无法确定电路中电流的真实方向的。为了计算方便, 常常事先假定一个电流方向, 这个假定的电流方向就叫做电流的参考方向。电流的参考方向可以任意指定, 一般用箭头表示。如图 1-6 所示, 如果电流的实际方向与参考方向一致, 则电流值为正值; 如果电流的实际方向与参考方向相反, 则电流值为负值。这样, 在指定的电流参考方向下, 电流值的正和负就可以反映出电流的实际方向。

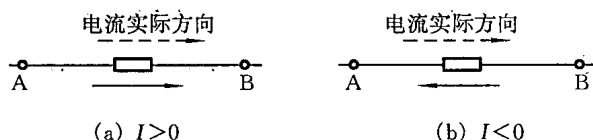


图 1-6 电流的参考方向

例 1.2 如图 1-7 所示, 电路上电流的参考方向已选定, 已知 $I_1 = 2 \text{ A}$, $I_2 = -5 \text{ A}$, $I_3 = -3 \text{ A}$, $I_4 = 4 \text{ A}$, 试指出电流的实际方向。

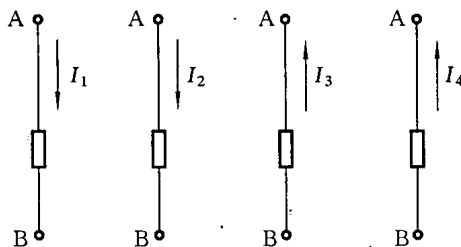


图 1-7

解 $I_1 = 2 \text{ A} > 0$, I_1 的实际方向与参考方向相同。电流 I_1 由 A 流向 B, 大小为 2 A。

$I_2 = -5 \text{ A} < 0$, I_2 的实际方向与参考方向相反。电流 I_2 由 B 流向 A, 大小为 5 A。

$I_3 = -3 \text{ A} < 0$, I_3 的实际方向与参考方向相反。电流 I_3 由 A 流向 B, 大小为 3 A。

$I_4 = 4 \text{ A} > 0$, I_4 的实际方向与参考方向相同。电流 I_4 由 B 流向 A, 大小为 4 A。

1.2.2 电压

电压的概念涉及功,功则涉及力和距离。功的国际制单位是焦耳,单位符号是 J。力的国际单位是牛顿,单位符号是 N。距离的单位是米,符号是 m。

为使物体在抵抗力的作用下运动,需要做功。例如,为抵抗重力而举起物体要做功。一般地说,需要的功(用焦耳计量)等于力和距离的乘积(力用牛顿计量,距离用米计量)。

$$W(\text{焦耳}) = F(\text{牛顿}) \times S(\text{米})$$

式中, W 、 F 和 S 分别是功、力和距离的计量符号。能是做功的本领,能的一种形式是位能,它是来自物体位置的能量。

初中物理电学中也学过电场力做功的问题。在图 1-8 所示匀强电场中,正电荷在电场力 F 作用下,由 a 点移动到 b 点,电场力所做功为 W ,则 a 点到 b 点的电压 $U = W/q$ 。

同理,在电路的导线中,图 1-9 所示正电荷 q 在电场力 F 的作用下,由 a 点移到 b 点,电场力所做的功为 W ,则 a 点到 b 点的电压 $U = W/q$ 。

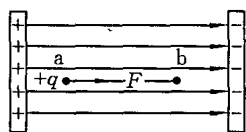


图 1-8

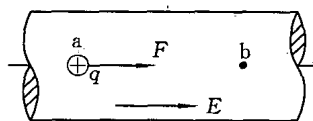


图 1-9

电路中 a、b 两点间电压的大小等于电场力由 a 点移动单位正电荷到 b 点所做的功,其表达式为

$$U = W/q$$

电压的国际制单位是伏特,单位符号是 V。有时也需用千伏(kV)、毫伏(mV)或微伏(μV)做单位。它们之间的关系是

$$1 \text{ kV} = 10^3 \text{ V}, \quad 1 \text{ V} = 10^3 \text{ mV}, \quad 1 \text{ V} = 10^6 \mu\text{V}$$

电压总是指两点之间的电压,所以有时用双下标表示电压。前一个下标代表起点 a(正电荷运动的起点),后一个下标代表终点 b。电压的方向则由起点指向终点。或在起点标以正号,终点标以负号。

电压是标量,但它和电流一样有规定的方向。当正电荷顺电场方向由 a 点移动到 b 点时,电场力做正功,即 $W > 0$,电荷失去能量,因此正电荷在 a 点具有比在 b 点更大的能量,此时,电压的实际方向为从 a 到 b,即电压的实际方向就是正电荷在电场中受电场力作用移动的方向。

当正电荷逆电场方向由 a 点移向 b 点时,电场力做负功(外力做功)。在电源