

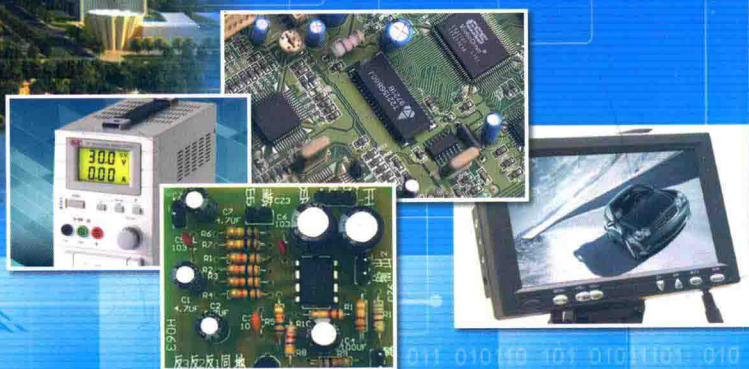


全国高等职业教育“十二五”规划教材
中国电子教育学会推荐教材
全国高等职业院校规划教材·精品与示范系列

无线电调试工 实训教程

◎ 阴家龙 贾艳丽 主编 ◎ 庄海军 主审

- 电子信息产业快速发展
- 急需大量的电子工程技能人才
- 获得无线电调试工职业技能资格证书
- 有利于快速上岗就业



努力, 将成就明日梦想, 加油!

- ◆ 根据《无线电调试工》国家职业标准构建课程内容
- ◆ 按照无线电调试工职业技能鉴定考核要求进行编写
- ◆ 结合国家示范建设成果及应用实例优化课程内容
- ◆ 为教学方便, 本书配有免费的电子教学课件等



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

全国高等职业教育“十二五”规划教材
中国电子教育学会推荐教材
全国高等职业院校规划教材·精品与示范系列

无线电调试工实训教程

主 编 阴家龙 贾艳丽
主 审 庄海军
参 编 林咏海 张洪明 王海燕
周友兵 沙 祥 马 勇

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书根据国家人力资源和社会保障部制定的《无线电调试工》国家职业标准,以无线电调试工的应知、应会内容为核心,结合职业技能鉴定考核要求进行编写。全书分为8章:电路、模拟电子技术、数字电子技术、高频电子技术、电子测量原理、无线电整机调试原理、单片机技术、安全文明生产等知识。每个章节包含基本知识、技能训练、调试实例、单元测试题及答案,知识内容与技能训练紧密结合,方便读者学习与应试。在编写过程中,注重基础技能到复杂整机调试的过渡,由浅入深,尽量结合电子行业企业最新的工作岗位需求及职业发展要求,与现有高职教学现状相融合,突出新知识、新技术、新工艺,注重职业能力培养,提高学生的学习兴趣 and 探索能力。

本书为高等职业院校电子信息类专业职业技能资格认证培训教材,也可作为开放大学、成人教育、自学考试、中职业学校和电子产品生产、调试与维修岗位的培训教材,以及广大电子爱好者的参考书。

本书配有电子教学课件等,详见前言。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

无线电调试工实训教程/阴家龙,贾艳丽主编. —北京:电子工业出版社,2016.2

全国高等职业院校规划教材·精品与示范系列

ISBN 978-7-121-27356-8

I. ①无… II. ①阴… ②贾… III. ①无线电技术—高等职业教育—教材 IV. ①TN014

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第233971号

策划编辑:陈健德(E-mail: chenjd@phei.com.cn)

责任编辑:刘真平

印 刷:三河市华成印务有限公司

装 订:三河市华成印务有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:13.5 字数:345.6千字

版 次:2016年2月第1版

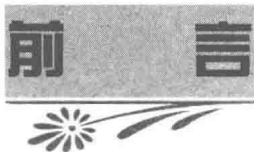
印 次:2016年2月第1次印刷

定 价:36.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。



本书以国家人力资源和社会保障部制定的《无线电调试工》国家职业标准为依据,在多年从事无线电调试工教学培训的基础上,结合职业技能鉴定考核要求和高职高专学校课程实际需要进行编写。无线电调试工是高职高专院校电子信息类专业学生一项重要的职业资格认证项目,技术性和实践性都很强。随着无线电电子技术的飞速发展,新知识、新技术、新工艺层出不穷,电子行业企业对岗位从业人员提出了更高要求,为了指导学生更好地掌握无线电调试工知识与技能,结合行业领域最新的工作岗位需求及职业发展要求,与现有高职教学现状相融合,组织院校骨干教师和行业工程师共同编写了本书。

全书以无线电调试工的应知、应会内容为核心,共分为8章:电路、模拟电子技术、数字电子技术、高频电子技术、电子测量原理、无线电整机调试原理、单片机技术、安全文明生产等知识。通过典型的实例对不同部分的调试方法进行细致的介绍,力求让读者循序渐进地掌握调试的方法和技能。教材编写贯穿“以职业标准为依据,以企业需求为导向,以职业能力为核心”的理念,依据国家职业标准,结合企业实际,反映岗位要求,突出新知识、新技术、新工艺、新方法,注重职业能力培养。本书具有如下特点:

(1) 教材编写中充分与南京熊猫数字机顶盒有限公司、南京夏普电子有限公司等骨干企业合作,以职业岗位技能培养为核心,以国家人力资源和社会保障部制定的《无线电调试工》国家职业标准为依据,将企业最新工作流程引入到教学过程中,突出新知识、新技术、新工艺,注重学生职业能力的培养;

(2) 将无线电调试工的应知、应会内容嵌入到相应课程载体中,让学生通过具体的训练来掌握相关的基本理论与实践技能,采用“教、学、做一体化”教学方式,实现教学目标与职业资格认证的融合;

(3) 内容按照电子信息类技术专业学生的知识结构,从基础理论知识与基础技能训练入手,到专业理论与技能,层层递进、由浅入深,突出职业技能培训特色,是对高职学生职业技能培训与鉴定考核的有益探索。

本书由淮安信息职业技术学院阴家龙、贾艳丽主编和统稿。具体编写分工为:林咏海编写第1章,张洪明编写第2章,王海燕编写第3章,贾艳丽编写第4章,周友兵编写第5章,阴家龙编写第6章,沙祥编写第7章,马勇编写第8章。全书由庄海军主审。

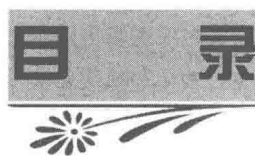
在编写过程中,参考了大量国内文献,得到了南京夏普电子有限公司、南京熊猫信息产业有限公司等企业技术人员的大力支持,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在错误与不妥之处,恳请广大读者批评指正。

为方便教学,本书配有免费的电子教学课件,请有需要的教师登录华信教育资源网(<http://www.hxedu.com.cn>)免费注册后进行下载,如有问题请在网站留言或与电子工业出版社联系(E-mail: hxedu@phei.com.cn)。

编者





第 1 章 电路	(1)
1.1 电路基本知识	(1)
1.1.1 电路分析的基本变量	(1)
1.1.2 电路元件	(3)
1.1.3 电压源	(5)
1.1.4 基尔霍夫定律	(7)
1.1.5 正弦交流电的基本概念	(9)
1.2 电工基本技能	(14)
1.2.1 电阻器的识别与测量	(14)
1.2.2 常用电容的识别方法	(16)
1.2.3 电感器的识别方法	(18)
1.3 万用表调试实例	(19)
单元测试题 1	(24)
第 2 章 模拟电子技术	(27)
2.1 模拟电子技术基本知识	(27)
2.1.1 常用半导体器件	(27)
2.1.2 放大器基础知识	(29)
2.1.3 负反馈电路	(33)
2.1.4 运算放大器	(33)
2.2 模拟电子技术基本技能	(35)
2.2.1 二极管的识别与测量	(35)
2.2.2 三极管的识别与测量	(36)
2.2.3 晶闸管的识别与测量	(37)
2.2.4 集成运放的识别与应用	(38)
2.2.5 基本放大电路的参数测试	(40)
2.3 线性稳压电源调试实例	(42)
单元测试题 2	(46)
第 3 章 数字电子技术	(51)
3.1 数字电子技术基本知识	(51)
3.1.1 数字电路基础知识	(51)
3.1.2 逻辑代数知识、逻辑表达式	(52)
3.1.3 组合逻辑电路基础	(54)

3.1.4	时序逻辑电路基础	(56)
3.1.5	数模与模数转换	(59)
3.2	数字电子技术基本技能	(61)
3.2.1	常用元器件的识别与测量技能	(61)
3.2.2	时钟振荡器	(62)
3.2.3	方波信号产生电路	(63)
3.3	数字钟调试实例	(64)
	单元测试题 3	(67)
第 4 章	高频电子技术	(71)
4.1	无线电基础知识	(71)
4.1.1	无线电波波段划分	(71)
4.1.2	无线电波传播方式	(72)
4.1.3	无线电信号的发射与接收	(74)
4.2	高频放大器与高频振荡器	(75)
4.2.1	高频放大器	(75)
4.2.2	高频振荡器	(77)
4.3	调制与解调	(81)
4.3.1	振幅调制电路	(81)
4.3.2	振幅检波电路	(83)
4.3.3	混频电路	(86)
4.3.4	调频电路	(86)
4.3.5	鉴频电路	(88)
4.4	锁相环路与频率合成	(88)
4.4.1	锁相环路的工作原理	(88)
4.4.2	频率合成器	(89)
4.5	高频电子技术基本技能	(89)
4.5.1	高频元器件的测试技能	(89)
4.5.2	高频单元电路的调试技能	(90)
4.5.3	高频整机的调试技能	(95)
4.6	收音机调试实例	(98)
	单元测试题 4	(102)
第 5 章	电子测量原理	(105)
5.1	电子测量的主要内容	(105)
5.2	测量误差与数据处理	(105)
5.2.1	测量误差的表示方法	(106)
5.2.2	测量误差的来源	(106)
5.3	常用测量仪器及注意事项	(107)
5.4	电子测量基本技能	(110)

5.4.1 信号发生器的使用	(110)
5.4.2 示波器的使用	(114)
5.4.3 电子计数器的使用	(121)
5.4.4 扫频仪的使用	(124)

单元测试题 5	(128)
---------------	-------

第 6 章 无线电整机调试原理

6.1 CRT 彩色电视机工作原理	(130)
6.1.1 CRT 彩色显像管	(130)
6.1.2 彩色电视机的框图结构	(131)
6.2 液晶电视原理	(132)
6.2.1 液晶电视电路结构	(132)
6.2.2 液晶显示屏	(133)
6.3 机顶盒原理	(133)
6.3.1 数字机顶盒的概念与分类	(133)
6.3.2 DVB 机顶盒的工作原理	(134)
6.3.3 DVB 机顶盒的结构	(135)
6.4 无线电整机调试技术	(137)
6.4.1 无线电整机调试流程	(137)
6.4.2 无线电整机维修方法	(139)

6.5 电视机调试实例	(141)
-------------------	-------

单元测试题 6	(148)
---------------	-------

第 7 章 单片机技术

7.1 单片机的发展	(151)
7.2 单片机的结构	(152)
7.2.1 计算机的经典结构	(152)
7.2.2 单片机的基本结构	(152)
7.3 AVR 单片机	(153)
7.3.1 AVR 单片机的特点	(153)
7.3.2 AVR 单片机的选型	(153)
7.3.3 AVR 单片机的工具软件	(154)
7.3.4 AVR 单片机的开发用具	(154)
7.4 单片机开发与使用	(154)
7.4.1 单片机最小系统	(154)
7.4.2 ICC AVR 开发编译环境	(159)
7.4.3 AVR Studio 下载调试工具	(163)
7.5 单片机调试实例	(168)

单元测试题 7	(172)
---------------	-------

第 8 章 安全文明生产 (175)

8.1 安全生产管理 (175)

8.1.1 安全用电 (175)

8.1.2 安全用电措施 (176)

8.2 生产技术管理 (178)

8.3 6S 管理 (179)

附录 A 无线电调试工国家职业标准 (183)

附录 B 单元测试题答案 (191)

参考文献 (205)



第1章

电 路

电路是为了实现某种预期的目的而将电气设备和元件按一定方式连接起来的总体。一个基本的电路通常由电源、负载、中间环节等组成。电源是产生电能和电信号的装置，如各种发电机、稳压电源、信号源等。负载是取用电能并将其转换为其他形式能量的装置，如电灯、电动机、电炉、扬声器等。中间环节是传输、控制电能或信号的部分，如连接导线、控制电器、保护电器、放大器等。

1.1 电路基本知识

1.1.1 电路分析的基本变量

电路的变量是描述电路特性的物理量，常用的电路变量有电流、电压和功率。

1. 电流

在物理中我们已经知道，电子和质子都是带电粒子，电子带负电荷，质子带正电荷。电荷的有规则移动形成电流（Current）。计量电流大小的物理量是电流，电流的定义是：单位时间内通过导体路径中某一横截面的电荷量，即

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

习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的方向。上式中电荷 q 的单位是库[仑]（C），时间的单位是秒（s）时，电流 i 的单位为安[培]（A）。电流的单位还有千安（kA）、毫安（mA）、微安（ μA ）。它们之间的关系是



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

如果在任一瞬间通过导体横截面的电量都是相等的，而且方向也不随时间变化，则这种电流叫作恒定电流，简称直流（Direct Current，简写为 dc 或 DC）。它的电流用符号 I 表示。如果电流的大小和方向都随时间变化，则称之为交变电流，简称交流（Alternating Current，简写为 ac 或 AC），它的电流用符号 i 表示。

尽管规定正电荷运动方向为电流方向，但在求解较复杂的电路时，往往很难事先判断电流的真实方向，为了分析电路方便，引入参考方向概念。参考方向就是在分析电路时可以先任意假定一个电流方向，如果电流的真实方向与参考方向一致，则电流为正值，否则为负值。这样，在指定参考方向的前提下，结合电流的正负值就能够确定电流的实际方向。电流参考方向一般直接用箭头标记在电流通过的路径上。

2. 电压

电荷在电路中流动，就必然有能量的交换发生。电荷在电路中的一些部分（如电源处）获得电能，而在另一些部分（如电阻处）失去电能。为了计量电荷得到或失去能量的大小，引入电压（Voltage）这一物理量，记为 $u(t)$ 或 u 。其定义是：电路中 a、b 两点之间的电压表明了单位正电荷由 a 点转移到 b 点时所获得或失去的能量，即

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

式中， $dq(t)$ 为由 a 点转移到 b 点的电荷量，单位为库仑； $dw(t)$ 为转移过程中，电荷 $dq(t)$ 所获得或失去的能量，单位为焦耳；电压的单位为伏特。电压的单位还有千伏（kV）、毫伏（mV）。

电压也可用电位差表示，即

$$u = u_a - u_b \quad (1-1-3)$$

式中： u_a 和 u_b 分别为 a、b 两点的电位。电位是描述电路中电位能分布的物理量。如果正电荷由 a 点转移到 b 点时获得能量，则 a 点为低电位，即负极；b 点为高电位，即正极。反之亦然。正电荷在电路中转移时电能的得到或失去体现为电位的升高或降低。

根据电压随时间变化的情况，电压可分为恒定电压与交变电压。如果电压的大小和极性都不随时间而变动，这样的电压称之为恒定电压或直流电压，用符号 U 表示。

根据定义，电压也是代数量。与电流类似，分析计算时，需要指定一个参考方向（也称参考极性）。当参考方向与实际方向一致时，记电压为正值；否则，记电压为负值。这样，在指定电压参考方向以后，在对电路进行分析计算后，依据电压的正负，就可以确定电压的实际方向。

在进行电路分析时，既要为通过元件的电流指定参考方向，也要为该元件两端的电压指定参考方向，彼此是完全独立的。但为了方便起见，常采用关联的参考方向：对于某一电路元件而言，电流的参考方向与电压的参考方向的“+”极到“-”极的方向一致，换句话说，电流与电压的参考方向一致。否则称为非关联参考方向。实际使用时，常采用关联参考方向。

3. 功率

如图 1-1-1 所示的简单电路中，正电荷从高电位端 a，经过电阻 R 移至低电位端 b，是电场力对电荷做功的结果，电场力做功所消耗电能被电阻吸收。正电荷由 b 端经电压源移至



a 端, 是外力对电荷做功, 通过做功将其他形式的能量转换为电能, 从而使电源具有向外电路提供电能的特性。

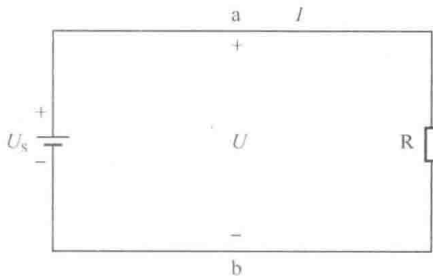


图 1-1-1 简单电路

单位时间内消耗的电能即为电功率, 记为 $p(t)$ 或 p , 表示式为

$$p(t) = \frac{dw(t)}{dt} \quad (1-1-4)$$

又 $dw(t) = u(t)dq(t)$, $i(t) = \frac{dq(t)}{dt}$, 则有

$$p(t) = u(t)i(t) \quad (1-1-5)$$

在直流的情况下, 有 $P = UI$ 。

若元件的电压、电流不一致, 只需在上述公式中冠以负号, 即

$$p = -ui \quad \text{或} \quad P = -UI$$

综合以上两种情况, 将元件吸收功率的计算公式统一表示为

$$P = \pm UI$$

当 $p > 0$ 时, 表示在 dt 时间内电场力对电荷 dq 做功为 dw , 这部分能量被元件吸收, 所以 p 是元件的吸收功率; 在 $p < 0$ 时, 表示元件吸收负功率, 换句话说, 就是元件向外部电路提供功率。

1.1.2 电路元件

电路元件是实际电路器件的理想化模型, 是构成电路的基本单元。实际的电路器件是为达到某种目的而制造的, 电路设计就是利用这些器件的主要物理特性实现规定的要求。用来构成集中参数电路常用的实际元件有电阻器、电源、晶体管、电容器、电感器、变压器等。从元件对能量的表现划分为: 耗能元件、供能元件、储能元件和能量控制元件几大类。

1. 电阻

电阻元件是一种对电流呈现阻力的元件, 有阻碍电流流动的特性, 如电阻器、白炽灯、电炉等。如果电阻元件的电阻为 R , 则电阻元件中电压与通过其中的电流关系为

$$U = RI \quad (1-1-6)$$

式中, R 为电阻, 单位为 Ω ; I 为流过该电阻的电流, 单位为 A ; U 为该电阻元件两端的电压, 单位为 V 。这就是人们所熟知的欧姆定律 (Ohm's Law)。它表明了电阻元件的特性, 即电流流过电阻, 就会沿着电流的方向出现电压降, 其值为电流与电阻的乘积。

电压与电流是电路的变量, 从欧姆定律可知, 电阻元件可以用它的电阻 R 来表征它的特



性, 因此, R 是一种“电路参数”(Parameter)。习惯上, 常把电阻元件叫作电阻。电阻元件也可以用另一个参数——电导 (Conductance) 来表征, 电导用符号 G 表示, 其定义为

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-1-7)$$

在国际单位制中电导的单位是西门子, 简称西 (S)。

元件端电压与流经它的电流之间的关系, 称为伏安特性 (简记为 VAR, Volt Ampere Relationship, 或称为 VAC, Volt Ampere Characteristics)。VAR 可以用来表征元件的外特性, 电路中经常遇到的是线性定常电阻。

线性定常电阻的伏安特性是一条不随时间而变化且经过原点的直线, 如图 1-1-2 (a) 所示。该直线的斜率倒数是电阻值 R 。严格地讲, 没有绝对的线性定常电阻, 因为电阻器中流过电流不同、通电时间长短不同, 电阻器的温度会不同, 电阻器的电阻值将随温度变化而变化。只要电阻值随温度的变化很小, 就可以认为是线性定常电阻。

线性定常电阻的两种特殊情况是开路 and 短路。所谓开路就是不管支路电压值是多少, 支路的电流值恒等于零; 而短路则意味着不管支路的电流值为多少, 该支路的电压值恒为零。这两种情况的伏安特性如图 1-1-2 (b)、(c) 所示。

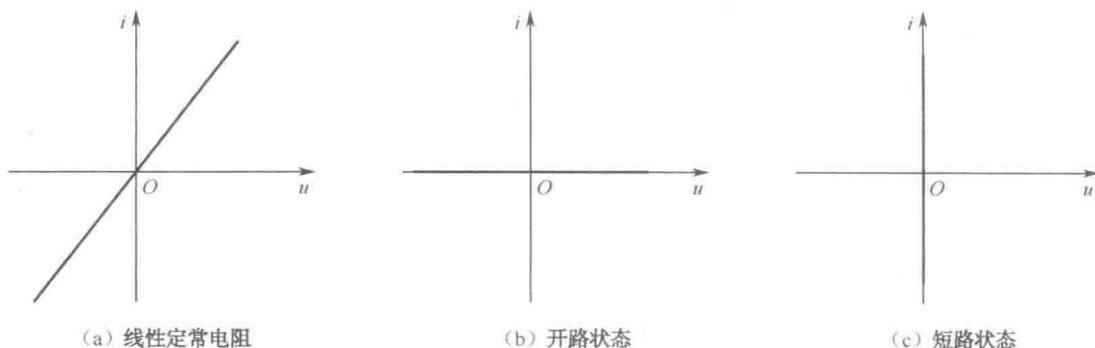


图 1-1-2 线性电阻的伏安特性

2. 电容

电容器通常由两导体 (极板) 及两个导体中间隔以介质组成。电容器加上电源后, 极板上分别带上等量异号电荷。带正电荷的极板称为正极板, 带负电荷的极板称为负极板。接上电源后, 在电容器两极板之间的介质中建立起电场, 并储存了电场能量。当切断电源后, 电容器两极板上仍然有电荷的积累, 内部电场仍然存在, 所以电容器是一种储存电场能量的元件。

电容器的电容: 若电容器极板上所带的电量为 q , 电容器两端的电压为 u , 且参考方向规定由正极板指向负极板, 则 q 与 u 的比值称为电容器的电容, 即

$$C = \frac{q}{u} \quad (1-1-8)$$

当 C 为一常数, 与电压无关时, 这种电容称为线性电容, 否则称为非线性电容。在国际单位制中, 电容的单位是法拉, 用字母 F 表示。实际应用中电容的单位还有微法 (μF)、皮法 (pF) 等。其换算关系为

$$1 \text{ F (法拉)} = 10^6 \mu\text{F (微法)} = 10^{12} \text{ pF (皮法)}$$



当电容两端电压发生变化时，电容极板上的电荷也相应地发生变化，此时，电容所在电路中就有电荷的定向移动，形成了电流。

当电容两端的电压不变时，电容极板上的电荷也不变化，因此电路中便没有电流。电容上电压 u_C 与电路中电流 i 的关系如下式所示：

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du_C}{dt} \tag{1-1-9}$$

3. 电感

凡能产生自感、互感作用的器件均称为电感器。电感器一般分为电感线圈和变压器两类。

电感器都由线圈构成，所以又称电感线圈。电感线圈由导线绕制而成，除具有电感外还有电阻。由于电感线圈的电阻很小，常可忽略不计，它就成为一种只有电感而没有电阻的理想线圈，即纯电感线圈，简称电感。电感既可以表示电路中的一个组件，又可以表示电路中的一个参数。在电路中用字母 L 表示，单位是亨利（H）。

电感线圈的用途极为广泛，在交流电路中线圈有阻碍电流通过的能力，常在电路中做阻流、变压、交流耦合器负载等。当线圈和电容配合时可用作调谐、滤波、选频、分频等。电感器的主要性能参数如表 1-1-1 所示。

表 1-1-1 电感器的参数及意义

代 号	参 数 名 称	意 义 说 明
L	电感量 及误差	电感量是表示电感线圈的电感数值大小的量。其表面所标的电感量为线圈的额定电感量
I	额定电流	电感器正常工作时，允许通过的最大电流
Q	质量因数	线圈中储存能量与消耗能量的比值称为质量因数，又称 Q 值，是表示线圈质量的一个物理量，线圈的 Q 值越高，回路的损耗越小
C	固有电容	电感器线圈的匝与匝之间通过空气、导线的绝缘层、骨架等存在着寄生电容；绕组与地之间、与屏蔽罩之间也存在着电容，这些电容是电感器固有的

4. 欧姆定律

在同一电路中，导体中的电流跟导体两端的电压成正比，跟导体的电阻阻值成反比，这就是欧姆定律，基本公式是 $I=U/R$ 。欧姆定律由德国科学家乔治·西蒙·欧姆提出，为了纪念他对电磁学的贡献，物理学界将电阻的单位命名为欧姆，以符号 Ω 表示。

$$R=U/I \tag{1-1-10}$$

1.1.3 电压源

电源可分为独立（Independent）电源和非独立（Dependent）电源。独立电源的电压或电流是时间的函数。而非独立电源的电压或电流却是电路中其他部分的电压或电流的函数，因此，又称作受控源（Controlled Source）。为方便起见，将“独立电压源”和“独立电流源”分别称为“电压源”和“电流源”，而对于非独立的电压源或电流源，用受控源来说明。这里只讨论独立电源。



电流在纯电阻电路中流动时就会不断地消耗能量，电路中必须要有能量的来源——电源，由它不断提供能量。没有电源，在一个纯电阻电路中是不可能存在电流和电压的。

如果一个二端元件接到任一电路后，该元件的两端能保持规定的电压 $u_s(t)$ ，则此二端元件就称为理想电压源（Ideal Voltage Source）。

与电阻元件不同，理想电压源的电压与电流并无一定关系。它有两个基本性质：

- (1) 它的端电压是定值 U_s 或是一定的时间函数 $u_s(t)$ ，与流过的电流无关；
- (2) 流过它的电流不是由电压源本身就能确定的，而是由与之相连接的外部电路来决定的。

理想电压源的符号及其直流情况的伏安特性如图 1-1-3 所示。其中图 1-1-3 (a) 所示的符号常用来表示直流理想电压源，特别是电池，长线段代表高电位端，即正极，短线段代表低电位端，即负极。电压源的端电压，也代表电压源的电动势。这就是说，从电源的正极到负极有一电压降，其值为 U_s ，或从电源的负极到正极有一电压升，其值为 $-U_s$ 。图 1-1-3 (b) 表示理想电压源的一般符号。图 1-1-3 (c) 表示其直流伏安特性。

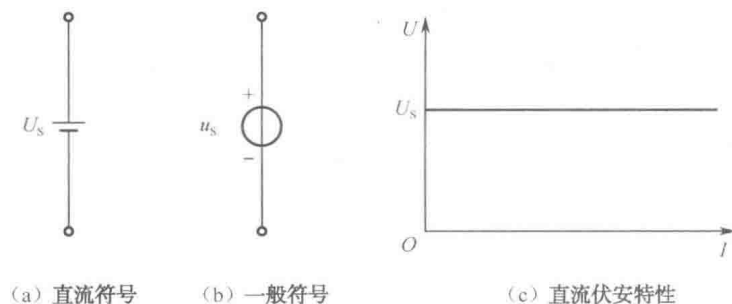


图 1-1-3 理想电压源

理想的电压源实际上是不存在的。比如常用的电池，它总是有内阻，当每库仑的正电荷由电池的负极转移到正极后，所获得的能量是化学反应所给予的定值能量与内阻损耗的能量的差额，因此，这时电池的端电压将低于定值电压（电动势） U_s 。由于内阻损耗与电流有关，电流越大，损耗也越大，端电压就越低，这就不再具有端电压为定值的特点。在这种情况下，可以用一个理想电压源 U_s 和内阻 R_s 相串联的模型来表征实际的电压源，如图 1-1-4 所示。

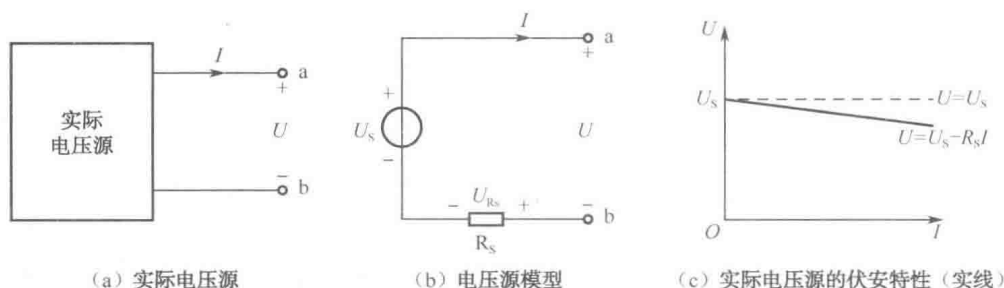


图 1-1-4 实际电压源

电压源使用的特殊情况是：当电压源短路时，电压源的端电压为零；当电压源同外部电路不连接（开路）时， $U=U_s$ 。



1.1.4 基尔霍夫定律

一般把含元件较多的电路称为网络。在电路中经常用的是基尔霍夫定律。

基尔霍夫定律有两条：一是电流定律，二是电压定律。

基尔霍夫电流定律 (KCL)：在任一时刻，流入一个节点的电流总和等于从这个节点流出电流的总和。这个定律是电流连续性的表现。

对于图 1-1-5，根据基尔霍夫定律可得出

$$I_1 + I_2 + I_3 = I_4 + I_5$$

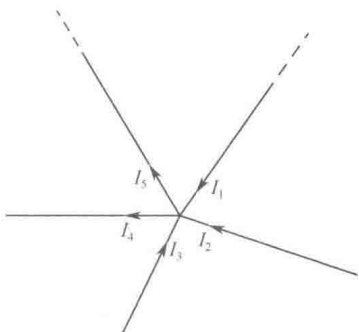


图 1-1-5 电路中的一个节点

这个定律也可换另一种说法：流出节点电流的代数和为零。如果我们将流出电流定义为正，则流入电流为负。上式就可以写为

$$-I_1 - I_2 - I_3 + I_4 + I_5 = 0$$

用电流的代数形式表示，可把这个定律写成一般形式，得

$$\sum I = 0$$

即在电路中任一节点上，各支路电流的代数和总等于零。这一结论与各支路上接的是什么样的元件无关，不论是线性电路还是非线性电路，它都是普遍适用的。

图 1-1-6 是电路的 Proteus 仿真图，从图中可以看出流经 R_1 的电流为 0.045 A，是流经 R_2 、 R_3 、 R_4 的电流总和。且 R_1 中的电流为流入 A 点，其余三条支路则为流出。

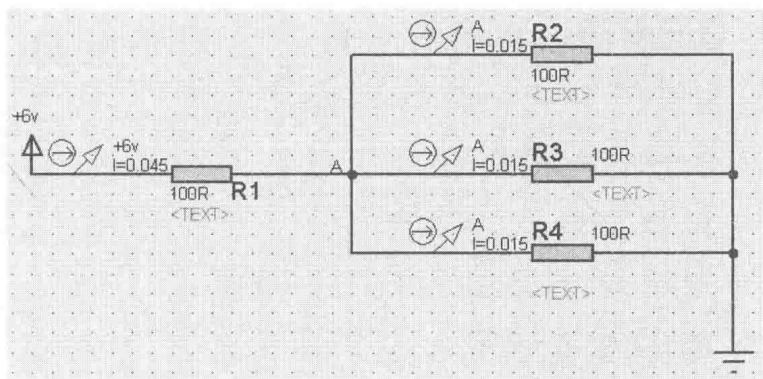


图 1-1-6 基尔霍夫电流定律的仿真图

KCL 是运用于电路中节点的，也可以将其推广运用到电路中的一个封闭面。流入的电流之和必须等于流出的电流之和。



基尔霍夫电流定律表明了电路中各支路电流之间必须遵守的规律，这个规律体现在电路中各个节点上。基尔霍夫电压定律则表明电路中各元件电压之间必须遵守的规律，这个规律体现在电路中的各个回路中。

基尔霍夫电压定律 (KVL): 在任一时刻，沿闭合电路的电压降的代数和总等于零。

电压定律是电路中两点间电压与所选择路径无关这一性质的表现。

把这一定律写成一般形式，即在一闭合回路中有

$$\sum U = 0$$

显然，这一定律也是和沿闭合回路会遇到什么样的元件无关，定律表明的只是这些元件电压降的代数和应为零。

基尔霍夫第一定律揭示了电路中各支路间电流的相互关系，并可列出各节点的电流方程；基尔霍夫第二定律揭示了回路各支路间电压的相互关系，并可列出各回路的电压方程。因此上述两个定律是分析计算电子电路重要的基本定律，而支路电流法、节点电位法、叠加原理等则是定律的具体应用。

一般过程如下：

- (1) 首先选定各支路电流的参考方向。
- (2) 任意选定回路绕行方向。
- (3) 确定电压符号。凡与绕行方向一致的则电压取正，反之取负。
- (4) 确定电动势的符号。凡电动势实际方向与绕行方向一致的取正号，反之取负号。

例 1-1-1 在图 1-1-7 所示电路中，已知 $E_1=7\text{ V}$ ， $E_2=6.2\text{ V}$ ， $R_1=0.2\ \Omega$ ， $R_2=0.2\ \Omega$ ， $R_3=3.2\ \Omega$ ，求各支路电流和 R_3 两端电压。

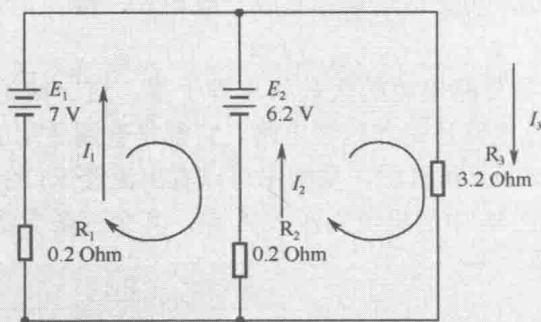


图 1-1-7 电路图

解：根据图中标出的电流方向与绕行方向，可得出下列方程组：

$$\begin{aligned} I_1 + I_2 &= I_3 \\ R_1 I_1 - R_2 I_2 &= E_1 - E_2 \\ R_2 I_2 + I_3 R_3 &= E_3 \end{aligned}$$

解得： $I_1=3\text{ A}$ ， $I_2=-1\text{ A}$ ， $I_3=2\text{ A}$ 。

R_3 两端电压 $U_3=I_3 R_3=6.4\text{ V}$ 。

电流 I_2 为负值，说明实际电流方向与图中标注的电流方向相反。



1.1.5 正弦交流电的基本概念

所谓正弦交流电路，是指含有正弦交流电源的电路。交流发电机产生的电动势、低频信号发生器输出的信号电压、许多测量仪表中的自校信号等，都是按正弦规律变化的，其周期性变化的规律如图 1-1-8 (a) 所示。

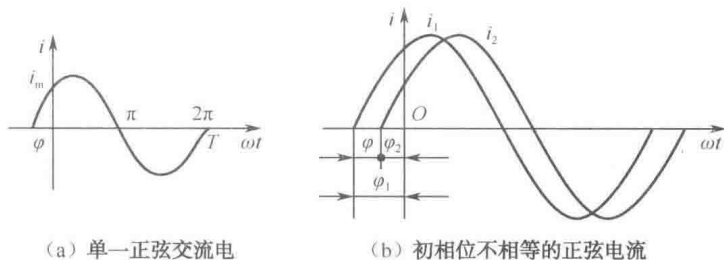


图 1-1-8 正弦交流电

1. 交流电的表示

正弦交流电的电压、电流、电动势都可以用正弦曲线表示，也可以用正弦函数式来表示，如： $i = I_m \sin(\omega t + \varphi)$ 。其中， I_m （最大值）、 ω （角频率）、 φ （初相角）称为正弦量的三要素。

1) 周期、频率、角频率

正弦电量是周期性变化的，每变化一次所需的时间称为周期，用符号 T 表示，单位是秒 (s)；每秒时间内正弦量周期性变化的次数称为频率，用符号 f 表示，单位是赫兹 (Hz)；正弦量变化的快慢还可以用角频率 (ω) 表示，单位是弧度/秒 (rad/s)。它们三者之间的关系是

$$T = 1/f \quad \text{或} \quad f = 1/T \quad (1-1-11)$$

$$\omega = 2\pi / T = 2\pi f \quad (1-1-12)$$

2) 瞬时值、最大值、有效值

交流电在交变过程中，任一瞬时的数值称为瞬时值，用小写字母表示， u 、 i 和 e 分别表示电压、电流和电动势的瞬时值。

交流电的有效值是根据它的热效应与相应的直流电量比较而确定的，可用 I 、 U 、 E 分别表示交流电流、电压、电动势的有效值。正弦交流电量的最大值等于有效值的 $\sqrt{2}$ 倍。

$$U_m = \sqrt{2}U \quad (1-1-13)$$

$$I_m = \sqrt{2}I \quad (1-1-14)$$

$$E_m = \sqrt{2}E \quad (1-1-15)$$

有效值是我们今后分析、计算电路时经常用到的，无论是交流电压表、电流表测得的数值，还是各种交流用电设备铭牌上所标注的额定电压、电流，都是指交流电的有效值。

3) 相位、初相位、相位差

交流电周期性变化的情况可以从三个方面来说明：一是交变的快慢，用频率、角频率或周期表示；二是交变的幅度，用最大值表示；三是交变的起始状态，用初相位来表示。如：

$$i_1 = I_m \sin(\omega t + \varphi_1)$$