

● 电子工业工人技术等级培训教材
● (家用电子产品维修专业)

家用电子产品维修 技术基础

● (中级本)

● 全国家用电子产品维修管理中心

● 胡焱山 主编



电子工业出版社

电子工业工人技术等级培训教材

家用电子产品维修技术基础 (中级本)

全国家用电子产品维修管理中心

胡焱山 主编

電子工業出版社

(京)新登字 055 号

内 容 提 要

本书为电子类工人技术等级培训教材(中级本)。全书共分十三章,分别为:直流分析、谐振电路、多级放大电路、模拟集成电路及其应用、开关稳压电源、锁相技术介绍、集成逻辑门电路、数字电路基础、组合逻辑电路、触发器、时序逻辑电路、数模和模数转换、磁记录基本知识。每章末尾附有小结和习题。

该书文字简炼通顺易懂,图文并茂,具有中等文化的人都能读懂。适于作工人等级培训和维修技工培训教材,也可供广大电子爱好者阅读。

电子工业工人技术等级培训教材
家用电子产品维修技术基础(中级本)

全国家用电子产品维修管理中心 编

· 责任编辑 王德声

电子工业出版社出版(北京市万寿路)

电子工业出版社发行 各地新华书店经售

中国科学院印刷厂印刷

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 17.875 字数: 450 千字

1994 年 4 月第 1 版 1994 年 4 月第 1 次印刷

印数: 6000 册 定价: 14.80 元

ISBN7-5053-2313-X/TN·663

出版说明

为了适应电子科学技术飞速发展,提高电子工业技术工人素质,劳动部与原机械电子工业部于一九九三年二月颁发了《电子工业工人技术等级标准》。根据新标准,电子工业部组织有关省市电子工业主管部门和企事业单位有关人员成立了“电子整机专业”,“家用电子产品维修专业”,“真空电子器件、接插件、继电器、绝缘介质专业”,“半导体器件及集成电路专业”,“计算机专业”,“磁性材料,电池专业”,“电子元件专业”共七个工人技术培训教材编审委员会。制定了19个专业、311个工种的教学计划、教学大纲。并根据计划大纲的要求,制定了1993~1995年培训教材编审出版规划。列入规划的教材78种和相应的教学录像带若干种。

这套教材的编写是按“技术工人要按岗位要求开展技术等级培训”的要求,以文化课为专业课服务,专业课为提高工人实际操作和分析解决生产实际问题的能力服务为原则。教材既注重了电子工业技术工人要有一定专业理论知识的要求,又克服了以往工人培训教材片面强调理论的倾向;保证了必要的知识传授,又强调了技能培训和解决生产实际问题能力的培养。

这套教材在认真研究了311个工种的共性基础知识要求的基础上,编写了八种统编教材,供311个工种工人进行基础知识培训时选用;并以19个专业为基础,根据每个专业共性的专业知识、专业技能编写了70种教材供311个工种工人进行专业知识、专业技能培训时使用。

每种教材在反映初、中、高三级技术工人培训的不同要求的基础上,注意了基础知识、专业知识、专业技能培训的系统性。因此,多数教材是初、中、高三级合在一起的,更好地体现由浅入深、由低及高的教学规律。

在教材编写上,针对工人培训的特点,突出教材的实用性、针对性,力求文字简炼、通俗易懂、内容上紧密结合教学大纲要求,在讲授理论知识的同时还注意了对生产工艺和操作技能的培养,使教师易于施教,工人便于理解和操作。知识性强的教材,每章后配有练习题和思考题,以便巩固应掌握的知识。技能性强的教材,配有适当的技能训练课目,以便提高工人操作技能。在有关工艺和设备的教材中,主要介绍了通用性较强的内容和典型产品、设备。使用这类教材的工厂企业,由于各自的产品设备不同可酌情自编相应的补充讲义与教材结合起来进行培训。另外,为适应技术发展、工艺改革、设备更新的需要,这套教材在编写中还注意了新技术、新工艺、新设备及其发展趋势,以拓宽工人的知识面。

参加这套教材编审工作的有北京、天津、上海、江苏、陕西五省市电子工业主管部门和河北、河南、山东、山西、辽宁、江西、四川、广东、湖南、湖北等十个省市的有关单位的专家、教师、技术人员等。在此谨向为此付出艰辛劳动的全体编审人员和各地、各单位支持这项工作的领导表示衷心感谢。

由于电子工业的迅速发展,这套教材的涉及面广、实用性强,加之编写时间仓促,教材中肯定有不妥之处,恳请使用单位提出宝贵意见。以便进一步修订,使之更加完善。

电子工业部

1993年7月

前 言

随着我国家用电子产品生产的发展,家电维修行业与生产企业产品售后服务部门的联系越来越密切,售后服务已成为生产企业产品质量保证体系的重要环节,维修行业维修人员的技术水平高低直接影响着生产企业的信誉和人民群众的利益,为此全国家电维修中心委托我们编写一套家用电子产品维修技术培训教材。这套教材分基础知识和专业知识两大部分。基础知识部分按学习培训对象的不同分为初、中、高三级,即初级本、中级本和高级本。初级本的主要阅读对象是具有初中以上文化程度,从事或准备从事家电维修工作,参加家用电子产品维修培训班的学员;也可供从事电子类产品生产的技术工种的工人上岗培训的教材,亦可作广大电子技术爱好者的参考书。中级本的主要阅读对象是学完初级读本的学员或具有一定程度电子技术基础知识的维修人员、技术工人,亦可作为中级维修技术人员或技术工人等级培训教材,高级本是针对高级维修技术人员或准备晋升高级技工或技师而编写的。

鉴于家用电子产品涉及的知识面宽,且新技术、新工艺已大量用于家电产品,数字化,智能化,多功能的新型家电产品已逐步批量生产,因此,考虑到电子工业发展的需要,《家用电子产品维修技术基础》教材在内容上,作了必要的知识储备。但不同地区,不同企业,由于产品、工艺的不同,因此在培训教学过程中,可结合实际情况有所侧重。

本课程的参考教学时数为 120 学时,其中应有一定学时的实验教学。

本书共十三章。第一章介绍较复杂的直流电路的分析方法;第二章介绍谐振放大电路;第三章在基本放大电路的基础上介绍多级放大电路,包括放大电路中的负反馈;第四章介绍集成运算放大电路;锁相技术不仅在通信导航中广泛应用,而今也逐渐进入家电产品,因此第五章对这一技术作了简略介绍;开关电源广泛应用于家电产品,如电视机、录像机等,因此第六章介绍了开关电源的原理及分类;数字化技术在现代家用电子产品中的应用越来越广泛,因此从第七章起用六章的篇幅分别介绍数字技术方面的有关理论,包括逻辑门电路、数字电路基础、组合逻辑电路、触发器、时序电路和 D/A 和 A/D 电路;最后第十三章还简略介绍了磁记录的基本原理。

本书由胡焱山高级讲师担任主编。第一、二和十三章由强世锦讲师编写;第七至第十二章由徐忠山讲师编写;第五章由刘骋讲师编写,其余章节由胡焱山编写,全书由胡焱山统稿并进行技术核准和文字润色。由于我们水平有限,书中难免出现缺点与错误。我们殷切希望广大读者批评指正。

编 者

一九九三年九月 于武汉

目 录

第一章 直流电路分析	1
第一节 引言	1
一、电路基本概念的回顾	1
二、欧姆定律的回顾	3
第二节 基尔霍夫定律	3
一、基尔霍夫第一定律	4
二、基尔霍夫第二定律	4
第三节 直流电路分析方法	5
一、支路电流法	5
二、叠加原理	7
三、回路电流法	8
四、节点电位法	9
第四节 代文宁定理	11
第五节 电压源与电流源的等效变换	14
一、电压源和电流源	14
二、电压源与电流源的等效变换	15
第六节 电桥电路介绍	17
一、电桥的平衡条件	17
二、应用电桥测量电阻	18
小结	19
习题	20
第二章 谐振电路	24
第一节 电抗元件及其特性	24
一、电感线圈及其串并等效	24
二、电容及其串并等效	25
第二节 串联谐振电路	26
一、串联谐振电路的特点	26
二、谐振曲线	27
三、串联谐振电路的通频带	29
第三节 并联谐振电路	30
一、并联回路的阻抗与频率关系	30
二、并联谐振的特性	32
三、并联谐振电路的谐振曲线及通频带	33
四、复杂并联谐振电路	34
第四节 耦合谐振电路	36
一、耦合系数和矩形系数	36
二、电容耦合双谐振电路	37

三、互感耦合双谐振电路介绍	39
小结	40
习题	42
第三章 多级放大电路	44
第一节 多级放大电路的耦合方式	44
一、阻容耦合	44
二、直接耦合	45
三、变压器耦合	46
第二节 多级放大电路的电压放大倍数和输入、输出电阻	47
一、电压放大倍数	47
二、多级放大器输入和输出电阻	49
第三节 多级放大电路的频率特性	51
一、共射基本放大电路频率特性的回顾	51
二、多级放大电路的频率特性	52
三、多级放大电路的上限频率	53
第四节 多级负反馈放大电路	53
一、多级负反馈放大电路的一般原理	54
二、负反馈放大电路的级联方式	54
三、负反馈对管放大电路	56
四、多级负反馈放大电路的分析方法	57
五、多级负反馈放大电路的稳定性	61
第五节 多级调谐放大电路	63
一、引言	63
二、多级单调谐放大器的电压放大倍数	65
三、多级单调谐放大器的通频带	64
四、多级单调谐放大器的矩形系数	65
五、多级单调谐放大电路介绍	66
小结	68
习题	69
第四章 模拟集成电路及其应用	72
第一节 模拟集成电路的分类、特点及其基本技术指标	72
一、模拟集成电路的分类	72
二、模拟集成电路的特点	72
三、集成电路的基本技术指标	73
第二节 模拟集成电路中的基本单元电路	74
一、恒流源偏置电路	74
二、有源负载电路	78
三、稳压源电路	78
四、差动放大电路	79
五、电平移动电路	82
六、输出级电路	83
第三节 集成运放电路分析举例	85

一、集成运放的基本组成框图	85
二、F007 集成运放电路分析	86
三、MOS 集成运算放大器电路	87
第四节 集成运放电路的应用	88
一、集成运放的外部接线及理想特性	88
二、集成运放在信号运算方面的应用	89
三、集成运放在信号比较方面的应用	96
四、集成运放在信号产生方面的应用	97
五、集成运放应用中应注意的问题	100
第五节 集成稳压电源电路	102
一、电路的组成及工作原理	102
二、基本接法和参数	104
三、增大 5G14 输出电流的电路	105
四、提高 5G14 输出电压的电路	105
五、三端点集成稳压器介绍	106
第六节 集成功率放大电路介绍	106
一、MC1554G 集成功放的组成及工作原理	106
二、MC1554 集成功放应用时的外部连接法	108
第七节 集成模拟乘法器及其应用	109
一、集成模拟乘法器的电路结构及工作原理	109
二、模拟乘法器的应用	111
小结	113
习题	114
第五章 开关稳压电源	117
第一节 概述	117
一、开关稳压电源的分类	117
二、开关稳压电源的基本组成框图	118
第二节 他激式开关电源主回路分析	118
一、降压型开关电源	118
二、反相型开关电源	122
三、升压型开关电源	122
第三节 变压器耦合开关电源主回路介绍	123
一、主回路结构及工作过程	123
二、输入电压与输出电压关系	124
三、变压器耦合开关电源的特点	124
第四节 开关电源的控制电路	126
一、脉宽调制控制电路的组成框图及稳压原理	126
二、国产 CW3524 脉宽调制控制器介绍	127
第五节 自激式和同步式开关稳压电源	131
一、自激式开关电源中的振荡器——间歇振荡器	131
二、自激式开关稳压电源电路分析举例	133
三、同步式开关稳压电源电路	136

第六章 锁相技术介绍	138
第一节 锁相环路的基本组成	138
第二节 环路的相位模型	139
一、鉴相器	139
二、环路滤波器	141
三、压控振荡器	141
四、锁相环路的相位模型	142
第三节 锁相环路的捕捉、锁定与跟踪	142
一、环路的捕捉和锁定	142
二、环路的跟踪	144
三、锁相环路的窄带特性	144
第四节 锁相环路的应用	144
一、锁相 FM(PM)调制器	145
二、锁相鉴频(鉴相)器	145
三、同步检波器	145
四、锁相倍频与分频	146
五、锁相接收机	146
习题	147
第七章 集成逻辑门电路	148
第一节 基本逻辑门电路	148
一、与逻辑关系及“与”门	148
二、“或”逻辑关系及“或”门	149
三、“非”逻辑关系及“非”门	151
四、常见的逻辑门电路	152
五、TTL “与非”门电路	154
第二节 MOS 门电路	156
一、MOS 集成反相器	156
二、MOS 门电路	159
第三节 MOS 门电路应用	162
一、CMOS 门电路的应用举例	162
二、使用注意事项	163
小结	164
习题	164
第八章 数字电路基础	167
第一节 二进制和 BCD 码	167
一、二进制	167
二、BCD 码	169
第二节 逻辑代数的基本概念	170
一、基本逻辑运算和逻辑变量	170
二、逻辑函数及其表示方法	171
第三节 逻辑代数的基本运算规律	172
一、基本公式	172

二、常用公式	173
第四节 逻辑代数的应用	174
一、化简的意义和最简概念	174
二、公式法化简逻辑函数	175
三、卡诺图化简逻辑函数	176
小结	182
习题	182
第九章 组合逻辑电路	184
第一节 概述	184
一、组合电路的特点	184
二、组合电路的一般分析方法	184
三、组合电路的一般设计方法*	186
第二节 编码器	187
一、二进制编码器	187
二、BCD 编码器	188
三、优先编码器	190
第三节 译码器	194
一、二进制译码器	194
二、BCD 译码器	196
三、显示译码器	197
小结	202
习题	203
第十章 触发器	206
第一节 RS 触发器	206
一、基本 RS 触发器	206
二、同步 RS 触发器	208
第二节 主从触发器	210
一、主从 RS 触发器	210
二、主从 JK 触发器	211
三、T 触发器	214
四、T' 触发器	215
第三节 维持阻塞 D 触发器	215
一、电路组成	215
二、功能分析	215
三、逻辑功能描述	217
第四节 CMOS 触发器介绍	217
一、电路组成	218
二、功能分析	218
小结	219
习题	219
第十一章 时序逻辑电路	222
第一节 概述	222

一、时序电路的组成特点	222
二、时序电路的一般分析方法	222
第二节 寄存器	223
一、数码寄存器	223
二、移位寄存器	224
第三节 计数器	228
一、同步计数器	228
二、异步计数器	237
三、集成计数器介绍	240
第四节 移位寄存器型计数器	242
一、环形计数器	242
二、扭环形计数器	243
第五节 顺序脉冲发生器	244
一、节拍分配器	244
二、脉冲发生器	245
小结	245
习题	246
第十二章 数模和模数转换	248
第一节 概述	248
一、转换概念	248
二、转换要求	248
第二节 数模转换器 (DAC)	248
一、T 型网络 DAC	248
二、AD7541 集成 DAC 简介	251
第三节 模数转换器 (ADC)	253
一、模数转换步骤	253
二、并行比较型 ADC	255
三、逐位逼近型 ADC	257
四、集成 ADC(AD751)	259
五、ADC 的主要指标	259
小结	259
习题	260
第十三章 磁记录基本知识	261
第一节 引言	261
一、录音方法简介	261
二、磁带录音机的分类	261
三、磁带录音机的基本结构	262
第二节 录音基本原理	262
一、磁化现象与磁滞回线	262
二、磁带录音原理	265
三、偏磁录音原理	266
第三节 抹音原理	268
一、直流抹音	268

二、交流抹音	268
第四节 磁头的分类及使用与维护	269
一、磁头及分类	269
二、磁头的特性	270
三、磁头的使用、维护	272
小结	273
习题	273

第一章 直流电路分析

【内 容 提 要】

本章在进一步阐明电路基本概念的基础上,讲述了电路另一个最基本的定律——基尔霍夫定律。然后,以欧姆定律和基尔霍夫定律为依据讨论了在复杂直流电路中,几种常用的分析方法;随后提出电路和电源的等效概念,并由此介绍代文宁定理及电源等效变换。最后介绍常见的电桥电路。

第一节 引 言

一、电路基本概念的回顾

在初级本中,我们已对电路中的一些基本物理量做过较为详细的论述,本章将在此基础上介绍几种对较复杂电路的常用分析方法。为了便于学习,本节首先对已学过的概念作一简单的回顾。

电路是电流的通路,它是为了某种需要由某些电工设备或元件按一定方式组合起来的。

电路的形式是多种多样的,最典型的例子是电力系统。其电路示意图如图 1-1(a) 所示。它的作用是实现电能的传输和转换,其中包括电源、负载和中间环节三个组成部分。

发电机是电源,是供应电能的设备,它把热能等其它形式的能转换为电能。除发电机外,电池也是常用的电源。

电灯、电动机、电炉等都是负载,是取用电能的设备。它们分别把电能转换为光能、机械能、热能等。

变压器和输电线是中间环节,是联接电源和负载的部分。它起传输和分配电能的作用。

电路的另一种作用是传递和处理信号。常见的例子如扩音机,其电路示意图如图 1-1(b) 所示。先由话筒把语言或音乐(通常称为信息)转换为相应的电压和电流,它们就是电信号;而后通过电路传递到扬声器,把电信号还原为语言或音乐。由于由话筒输出的电信号比较微弱,不足以推动扬声器发音。因此中间还要用放大器来放大。信号的这种转换和放大,称为信号的处理。

在图 1-1(b) 中,话筒是输出信号的设备,称为信号源,相当于电源,但与上述的发电机、电池这种电源不同。它输出的电信号(电压和电流)的变化规律是取决于所加的信息

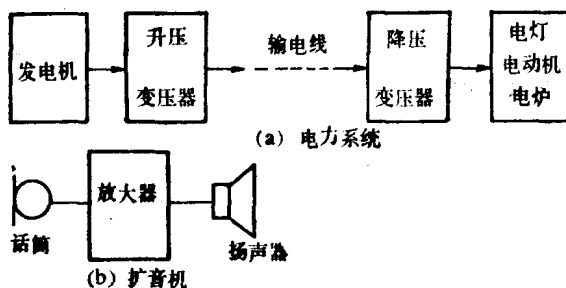


图 1-1 电路形式示意图

的。扬声器是接受和转换信号的设备,也就是负载。

信号传递和处理的例子是很多的。如收音机和电视机,它们的接收天线(信号源)把载有语言、音乐、图像信息的电磁波接收后转换为相应的电信号,而后电路将信号加以传递和处理(调谐、变频、检波、放大等),并送到扬声器和显像管(负载),还原为原始信息。

不论电能的传输和转换,或者信号的传递和处理,都是通过电流、电压和电动势来实现的。所以在分析与计算电路之前,首先回顾一下电路的这几个基本物理量。

1. 电流 I

我们习惯上规定正电荷运动的方向或负电荷运动的相反方向为电流的方向。电流的方向是客观存在的。但在分析较为复杂的直流电路时,往往难于事先判断某支路中电流的实际方向;对交流讲,其方向随时间而变,也无法用一个箭头来表示它的实际方向。为此,在分析与计算电路时,常可任意选定某一方向作为电流的正方向,或称为参考方向。所选的电流的正方向并不一定与电流的实际方向一致。当电流的实际方向与其正方向一致时,则电流为正值(图 1-2(a));反之,当电流的实际方向与其正方向相反时,则电流为负值(图 1-2(b))。因此,在正方向选定之后,电流之值才有正负之分。

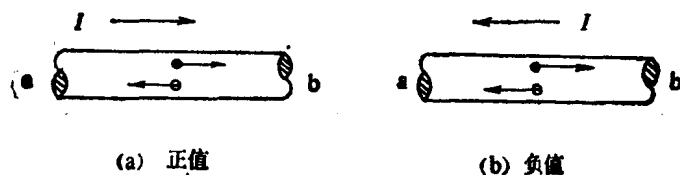


图 1-2 电流的正方向

电流的正方向除用箭标表示外,还可用双下标表示。如图 1-2(a)中的 I_{ab} 即表示正方向是由 a 指向 b 的电流。如果正方向选定为由 b 指向 a,则为 I_{ba} ,两者之间相差一个负号,即

$$I_{ab} = -I_{ba} \quad (1-1)$$

2. 电动势 E

电动势 E 的方向是从低电位指向高电位,表示的是电位升,并用箭头表示在电路图上,见图 1-3 中的 E 。它的方向是力图驱使正电荷流动的方向。在电源发出电功率时,它的方向和它产生的电流方向一致。如果电源的电流与电动势方向相反,例如蓄电池的充电状态,则电源吸收电功率,属于负载状态。

3. 电压 U

它的方向规定为从高电位到低电位,也用箭头表示在电路图上,但这表示的是电位降,也称电压降,见图 1-3 中的 U_1 和 U_2 。前者称电源端电压,后者称负载端电压。

当用下标表示电动势和电压的方向时,应注意它们和所标两点的电位之间的关系:

E_{ab} 表示从 a 点到 b 点的电位升 $E_{ab} = U_a - U_b$

E_{ba} 表示从 b 点到 a 点的电位升 $E_{ba} = U_b - U_a$

U_{ab} 表示从 a 点到 b 点的电位降 $U_{ab} = U_a - U_b$

U_{ba} 表示从 b 点到 a 点的电位降 $U_{ba} = U_b - U_a$

因此

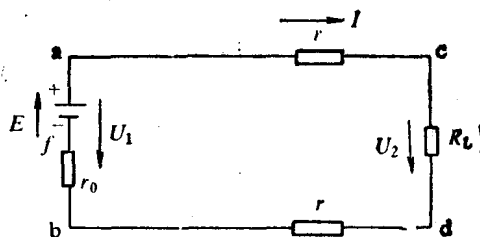


图 1-3 电路中的电动势与电压

$$E_{ab} = -E_{ba} = -U_{ab} = U_{ba} \quad (1-2)$$

在分析计算电路时,常常用到这种关系,有时还可以不用下标。例如

$$E = U$$

就是用电动势或电位升以及电压降表示同一个电位差。

二、欧姆定律的回顾

设图 1-4 中 a、b 两端间接有电阻 R , R 上的电压 U 和电流 I 的方向如图 1-4 所示。欧姆定律阐明了它们的关系,数学表示式是

$$U = IR$$

应该注意,上式中电压正方向和电流正方向是一致的,见图 1-4 (a)。

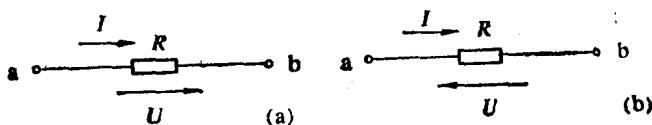


图 1-4 欧姆定律的应用

如果电压正方向和电流正方向相反,见图 1-4 (b),欧姆定律的表示式就应改为

$$U = -IR$$

欧姆定律用于闭合电路时,作为一般形式,公式应表示为

$$I = \frac{\sum E}{\sum R} \quad (1-3)$$

其中, $\sum E$ 表示闭合电路中多个电动势的代数和。其中 E 的正方向与 I 的正方向一致时为正,不一致时为负。

将公式(1-3)应用于图 1-3 的电路时,得

$$I = \frac{E}{R_L + 2r + r_0}$$

电源端电压 U_1 可表示为

$$U_1 = I(R_L + 2r)$$

如表示为与电源电动势的关系,则为

$$U_1 = E - Ir_0 \quad (1-4)$$

由上式看出,电流越大,电源端电压越下降。可见,电源端电压将随负载电流的增大而降低。这一特性称为电源的外特性。所以电灯并联过多时,亮度变暗,就是因为端电压下降过多引起的。

第二节 基尔霍夫定律

分析与计算电路的基本定律,除了欧姆定律外,还有基尔霍夫电流定律和电压定律。为了研究电路,先说明几个常用的名词。

(1) 支路: 由一个或几个元件(电阻或电源)串联成的无分支电路叫做支路。在同一个支路中各元件通过的电流是相等的。在图 1-5 中, fab 和 bcd 都叫支路。

(2) 节点: 由三条或更多条的支路联接的地方叫做节点。图 1-5 中 b、c、f 为节点。

(3) 回路：由支路构成的闭合路径叫回路。一个回路可能包含几个支路，并通过若干个节点。图 1-5 中 $abefa$ 、 $bcdeb$ 、 $abcdefa$ 都是回路。

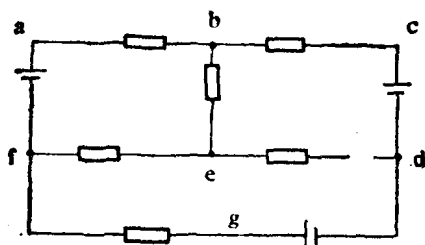


图 1-5 支路构成

(4) 网孔：在确定的电路图中不能再分的最简单的回路叫网孔。图 1-5 所示电路有三个网孔。它们是 $fedgf$ 、 $abefa$ 、 $bcdeb$ 。

一、基尔霍夫第一定律

图 1-6 所示某电路中节点 A 联接的五个支路。各支路电流分别用 I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4 、 I_5 表示。基尔霍夫第一定律告诉我们：所有流进节点的电流之和等于流出节点的电流之和。这个定律也称为节点电流定律。由此，图 1-6 中 A 点的电流关系如下：

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

如果把流入节点的电流定为正值，流出节点的电流定为负值，该定律也可以表达为流入任一节点的电流代数和为零，那么上述 A 点的电流关系写为

$$I_1 - I_2 - I_3 - I_4 + I_5 = 0 \quad (1-5-1)$$

节点电流定律说明电荷不会在任何节点发生堆积，一般表示成下式

$$\sum I = 0 \quad (1-5-2)$$

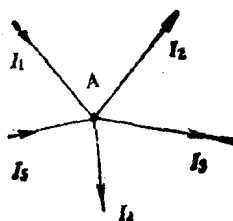


图 1-6 节点电流

二、基尔霍夫第二定律

基尔霍夫第二定律研究的是一个闭合回路中各段电压的关系。为了研究这个问题，

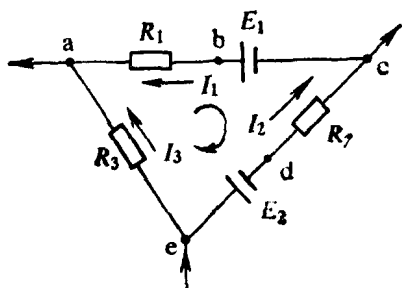


图 1-7 回路电压

用图 1-7 电路来说明。先假设一个回路的环绕方向，比如顺时针方向（已标在图中），再将各支路电流方向标好，这些电流的方向并不一定是实际电流方向。在一个回路中从任一固定点出发，按照任意方向绕行一周，又回到出发点，电位是不会改变的。

在图 1-7 中，从 a 点出发有

$$U_{ac} + U_{ce} + U_{ea} = 0 \quad (1-6)$$

在绕行过程中，环绕方向与电流方向一致，电压取正号，反之电压取负号；环绕方向与电源电动势负极向正极的指向一致，电动势取负号，反之电动势取正号。根据上述原则，各电压为：

$$U_{ac} = -I_1 R_1 + E_1$$

$$U_{ce} = -I_2 R_2 - E_2$$

$$U_{ea} = I_3 R_3$$

将上面三式代入 (1-6) 式得

$$-I_1 R_1 + E_1 - I_2 R_2 - E_2 + I_3 R_3 = 0 \quad (1-7)$$