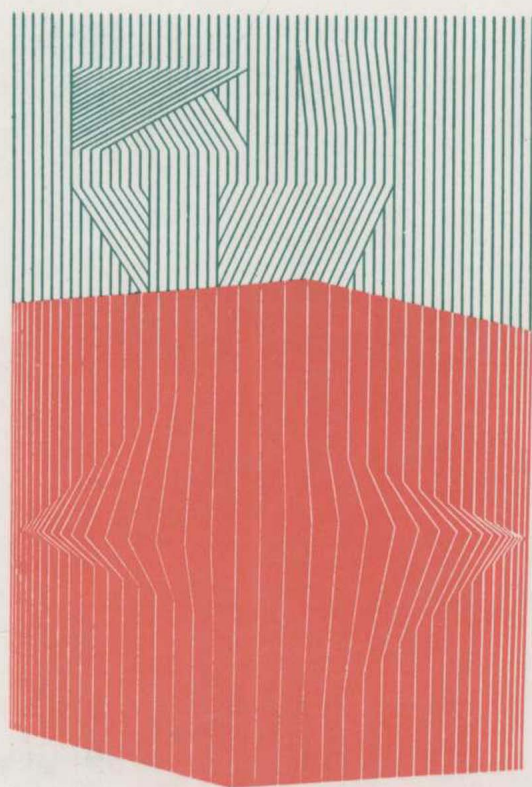


电工学基本教程

DIANGONGXUE
JIBENJIAOCHENG

唐 介 主 编



大连理工大学出版社

电工学基本教程

唐 介 主编



大连理工大学出版社

(辽)新登字 16 号

电工学基本教程

Diangongxue Jibenjiaocheng

唐 介 主 编

* * *

大连理工大学出版社出版发行

(邮政编码:116024)

大连海事大学印刷厂印刷

* * *

开本:787×1092 1/16 印张:18 $\frac{1}{2}$ 字数:433千字

1995年4月第1版 1995年4月第1次印刷

印数:1—6000册

* * *

责任编辑:于明珍

责任校对:邓玉萍

封面设计:孙宝福

* * *

ISBN 7-5611-0983-0

定价:17.80元

TM • 8

前 言

电工学是一门研究电磁现象的自然规律在工程上应用的科学。众所周知,电能是转换、输送和控制最容易和最经济的能量形态,是传递、处理和储存信息的最方便和最有效的工具。因而,无论是工业、农业、国防建设和科学技术各个方面,还是人们日常的衣、食、住、行以及文化生活,电都是不可须臾或缺的了。电工技术和电子技术与其它学科的结合或向其它学科的渗透,已经或正在促进这些学科的发展和开拓出学科的新领域。

“电工学”包括“电工技术(电工学 I)”和“电子技术(电工学 II)”,是高等工业学校为本科非电专业设置的一门技术基础课,通过本课程的学习,使学生能掌握和获得电工技术和电子技术必要的基本理论、基本知识和基本技能,为学习后续课程以及从事与本专业有关的工程技术等工作打下一定的基础。

本书是根据国家教委颁布执行的新修订的教学基本要求编写的,是少学时的电工学教材,本书内容力图少而精,图形和文字符号一律遵照国家标准。

参加本书编写的有大连理工大学电工学教研室的唐介(主编)、汪复安(第一、二章)、李洪春(第三、四章)、刘凤春(第五、九章)、林淑英(第六、七章)、王春茹(第八章)、宋文贵(第十、十二章)、赵重冶(第十一章)、姜永春(第十三、十四章)、陈连陞(第十五、十六章)。

限于编者的水平,书中难免存在缺点和错误,殷切期望使用本书的教师和读者予以批评指正。

目 录

前 言

| | |
|---------------------------|----|
| 第一章 直流电路 | 1 |
| § 1-1 电路 | 1 |
| § 1-2 电压和电流的正方向 | 2 |
| § 1-3 电路模型 | 3 |
| § 1-4 电压源和电流源 | 5 |
| § 1-5 克希荷夫定律 | 7 |
| § 1-6 支路电流法 | 9 |
| § 1-7 叠加原理 | 11 |
| § 1-8 戴维南定理 | 12 |
| § 1-9 非线性电阻电路 | 14 |
| 练习题 | 15 |
| 第二章 电路的暂态分析 | 18 |
| § 2-1 暂态分析的基本概念 | 18 |
| § 2-2 储能元件和换路定律 | 19 |
| § 2-3 RC 电路的暂态分析 | 22 |
| § 2-4 RL 电路的暂态分析 | 27 |
| § 2-5 一阶电路暂态分析的三要素法 | 29 |
| 练习题 | 30 |
| 第三章 交流电路 | 32 |
| § 3-1 正弦交流电的基本概念 | 32 |
| § 3-2 正弦交流电的相量表示法 | 34 |
| § 3-3 单一参数交流电路 | 37 |
| § 3-4 串联交流电路 | 42 |
| § 3-5 并联交流电路 | 46 |
| § 3-6 交流电路的功率 | 47 |
| § 3-7 电路的功率因数 | 50 |
| § 3-8 非正弦周期信号线性电路 | 52 |
| 练习题 | 54 |
| 第四章 三相电路 | 58 |
| § 4-1 三相电源 | 58 |
| § 4-2 三相负载的星形接法 | 60 |
| § 4-3 三相负载的角形接法 | 63 |

| | |
|--------------------------------|------------|
| § 4-4 三相电路的功率 | 65 |
| 练习题 | 66 |
| 第五章 变压器 | 69 |
| § 5-1 磁路的基本概念 | 69 |
| § 5-2 铁芯线圈电路 | 72 |
| § 5-3 单相变压器 | 75 |
| § 5-4 三相电压的变换 | 80 |
| § 5-5 绕组的极性 | 81 |
| 练习题 | 81 |
| 第六章 异步电机 | 84 |
| § 6-1 三相异步电动机的基本结构 | 84 |
| § 6-2 三相异步电动机的工作原理 | 86 |
| § 6-3 三相异步电动机的铭牌数据 | 89 |
| § 6-4 三相异步电动机的电磁转矩 | 90 |
| § 6-5 三相异步电动机的机械特性 | 92 |
| § 6-6 三相异步电动机的经济运行 | 95 |
| § 6-7 三相异步电动机的使用 | 96 |
| § 6-8 单相异步电动机 | 101 |
| 练习题 | 103 |
| 第七章 电动机的继电器-接触器控制 | 106 |
| § 7-1 笼式电动机起停手动控制电路 | 106 |
| § 7-2 笼式电动机的直接起动控制电路 | 109 |
| § 7-3 笼式电动机的正反转控制电路 | 113 |
| § 7-4 行程控制 | 114 |
| § 7-5 时间控制 | 115 |
| § 7-6 顺序联锁控制 | 117 |
| 练习题 | 119 |
| 第八章 电工测量 | 122 |
| § 8-1 电工测量仪表的种类 | 122 |
| § 8-2 电工测量仪表的误差 | 122 |
| § 8-3 电流表和电压表 | 124 |
| § 8-4 功率表 | 126 |
| § 8-5 万用表 | 128 |
| § 8-6 兆欧表 | 130 |
| 练习题 | 131 |
| 第九章 安全用电 | 133 |
| § 9-1 触电事故 | 133 |
| § 9-2 安全电压和增强绝缘 | 134 |

| | | |
|-------------|-------------------------|------------|
| § 9-3 | 保护接地和保护接零 | 135 |
| § 9-4 | 漏电开关 | 137 |
| § 9-5 | 静电防护 | 137 |
| § 9-6 | 电器防火和防爆 | 138 |
| | 练习题 | 139 |
| 第十章 | 整流电路 | 140 |
| § 10-1 | 半导体的基础知识 | 140 |
| § 10-2 | 半导体二极管 | 143 |
| § 10-3 | 整流电路 | 145 |
| § 10-4 | 滤波电路 | 147 |
| § 10-5 | 稳压电路 | 149 |
| § 10-6 | 晶闸管及其应用 | 151 |
| | 练习题 | 155 |
| 第十一章 | 放大电路 | 158 |
| § 11-1 | 双极型晶体管 | 158 |
| § 11-2 | 放大电路概述 | 163 |
| § 11-3 | 固定偏置放大电路 | 164 |
| § 11-4 | 分压偏置放大电路 | 171 |
| § 11-5 | 射极输出电路 | 174 |
| § 11-6 | 多级放大电路 | 176 |
| § 11-7 | 差动放大电路 | 179 |
| § 11-8 | 互补对称放大电路 | 184 |
| § 11-9 | 场效应管 | 187 |
| | 练习题 | 191 |
| 第十二章 | 集成运算放大器 | 195 |
| § 12-1 | 集成电路和集成运算放大器 | 195 |
| § 12-2 | 放大电路中的反馈 | 198 |
| § 12-3 | 理想运算放大器 | 202 |
| § 12-4 | 基本运算电路 | 203 |
| § 12-5 | 电压比较器 | 207 |
| § 12-6 | RC 正弦波振荡电路 | 208 |
| | 练习题 | 211 |
| 第十三章 | 数字电路的基本知识 | 214 |
| § 13-1 | 脉冲的波形及其参数 | 214 |
| § 13-2 | 数字电路中数的表示法 | 215 |
| § 13-3 | 逻辑代数 | 216 |
| | 练习题 | 219 |
| 第十四章 | 逻辑门和组合逻辑电路 | 221 |

| | |
|---|------------|
| § 14-1 集成与非门电路 | 221 |
| § 14-2 基本门电路 | 224 |
| § 14-3 组合逻辑电路的分析 | 225 |
| § 14-4 几种常用的组合逻辑电路 | 226 |
| 练习题 | 233 |
| 第十五章 触发器和时序逻辑电路 | 235 |
| § 15-1 基本双稳态触发器 | 235 |
| § 15-2 钟控双稳态触发器 | 236 |
| § 15-3 几种常用的时序逻辑电路 | 245 |
| § 15-4 集成定时器 | 250 |
| 练习题 | 255 |
| 第十六章 模拟信号与数字信号的相互转换 | 259 |
| § 16-1 数模转换器 | 259 |
| § 16-2 模数转换器 | 263 |
| § 16-3 数字电路的应用举例 | 264 |
| 练习题 | 266 |
| 附录 I 国产半导体器件型号命名法 | 267 |
| 附录 II 小电流低电压硅整流二极管 | 268 |
| 附录 III 2CW 系列普通硅稳压管部分型号和主要参数 | 269 |
| 附录 IV 部分集成运算放大器主要技术指标 | 270 |
| 附录 V 国标半导体集成电路型号命名方法 | 271 |
| 部分练习题答案 | 272 |

第一章 直流电路

本章在物理学电学的基础上,从工程技术的观点出发,着重讨论电路的基本知识,基本定律和定理,并且应用这些定律和定理分析计算直流电路。所有的分析方法,只要稍加扩展,原则上对交流电路也是适用的。

§ 1-1 电 路

一、电路的作用和组成

电路,简单地讲就是电流所通过的路径。实际的电路都是由某些电气设备或器件按一定的方式连接起来构成的。电路中的这些电气设备或器件称为实际的电路元件,例如发电机、变压器、整流器、电动机、电灯、变阻器、晶体管等等都是在实际电路中执行某一职能的元件。

电路按其作用的不同,大致可以分为两类。一类是**力能电路**,用于实现能量的输送和转换;另一类是**信号电路**,用于传递和处理由非电量转换来的各种微弱的电信号。

组成电路的元件及其连接方式虽然是多种多样的,但都包含有**电源**、**负载**和**连接导线**三个基本组成部分,其典型的电路结构如图 1-1 所示。

电源是将其它形态能量转换为电能的供电装置,例如蓄电池、发电机、信号源等,其中蓄电池将化学能转换成电能,发电机将机械能转换成电能,而信号源则将非电量转换成电信号。

负载是将电能转换为其它形态能量的用电设备。例如,电动机将电能转换为机械能;电灯将电能转换为光能和热能。负载的大小通常用负载取用功率的大小来衡量。

连接导线起沟通电路、输送电能的作用。连接导线和电阻一般很小,常可忽略不计。若连接导线较长,就应考虑它的电阻。

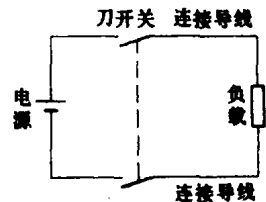


图 1-1 电路的组成

在实际电路中,除了这三个基本部分之外,还常常根据实际的需要增添一些辅助设备,例如开闭电路用的控制电器(如刀开关)和保障安全用电的保护装置(如熔断器)等。从电源来看,电源本身的电流通路称为**内电路**,电源以外的电流通路称为**外电路**。当电路中的电流是不随时间变化的直流电流时,这种电路称为**直流电路**。

二、电路的状态

电路在不同的工作条件下,会处于不同的状态。电路的状态有以下三种:

1. 通路

当电源与负载接通,例如图 1-1 中的刀开关闭合时,电路中有了电流及能量的输送和

转换,电路的这一状态称为通路,而电源这时的状态称为任载。

电路处于通路状态时,电源产生的电功率应该等于电路各部分消耗的电功率之和;电源输出的电功率应该等于外电路中各部分消耗的电功率之和。也就是说,功率应该是平衡的。

各种电气设备在工作时,其电压、电流和功率都有一定的限额,这些限额是用来表示它们的正常工作条件和工作能力的,称为电气设备的额定值。额定值通常在铭牌上标出,也可从产品目录中查出。使用时务必遵守这些规定。如果实际值超过这些额定值,将会引起电气设备的损坏或者降低使用寿命。如果低于这些额定值,某些电器设备也会损坏或者降低使用寿命,或者不能发挥正常的效能,通常当实际值都等于额定值时,电气设备的工作状态称为额定状态。当实际功率或电流大于额定值时称为过载。当实际功率或电流小于额定值时称为欠载。

2. 开路

当某一部分电路与电源断开,该部分电路中没有电流,亦无能量的输送和转换,这部分电路所处的状态称为开路。如果电源与负载全部断开,例如图 1-1 中的刀开关断开时,电源这时的工作状态称为空载。

3. 短路

当某一部分电路的两端被电阻可以忽略不计的导线或开关连接起来,使得该部分电路两端的电压为零,电流全部被导线或开关所旁路,这一部分电路所处的状态称为短路或“短接”

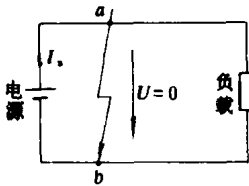


图 1-2 短路

如果如图 1-2 所示,整个负载被短路,或者电源两端被短路,电源这时的状态亦称短路(但一般不称短接)。电源短路时,电流比正常工作电流大得多,因此,通常都必须在电路中接入熔断器或自动断路器等短路保护装置,以防因电源短路、电流过大而造成电源或其它设备的损坏。

§ 1-2 电压和电流的正方向

在进行电路的分析和计算时,需要知道电压和电流的方向。习惯上,我们规定以正电荷的运动方向作为电流的实际方向。在外电路中它是由高电位流向低电位的,在内电路中它是由低电位流向高电位的(图 1-3)。电压的实际方向规定为由高电位点指向低电位点的方向,即电压的方向是电位降的方向。而电源中电动势的实际方向则规定为由电源的负极指向电源的正极的方向,即电动势的方向是电位升的方向。所以电源两端电压的方向与电源内电动势的方向是相反的。

在比较复杂的直流电路中,电压和电流的实际方向往往是无法预知的。在交流电路中,电压、电流及电动势的实际方向是随时间不断变化的。因此,只能给它们假定一个方向作为电路

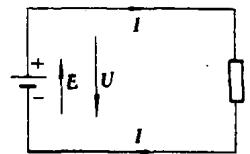


图 1-3 电压和电流的方向

分析和计算时的参考。这些假定的方向称为正方向或参考方向，如果根据假定的正方向解得的电压或电流为正值。说明假定的正方向与它们的实际方向一致。如果解得的电压或电流为负值，说明所假定的正方向与实际方向相反。因而在规定的正方向下，电压和电流都是一些代数量。

原则上，正方向是可以任意选择的，但是在分析同一个电路元件的电压和电流的关系时，它们的正方向则需联系起来考虑。这样假定的正方向称为关联正方向。电源和负载的关联正方向一般如图 1-4 所示。负载中电流的正方向是由电压正方向假定的高电位流向低电位的。电源中电流的正方向是由电压或电动势的正方向假定的低电位流向高电位的。电流、电压和电动势的正方向符合上述规定的，称为正方向一致。

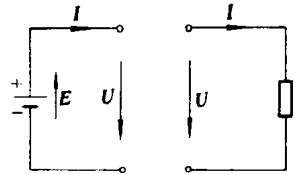


图 1-4 关联正方向

§ 1-3 电路模型

由实际电路元件组成的电路称为电路实体。由于电路实体的形式和种类多种多样不胜枚举，为了找出它们的共同规律，我们把电路实体中的各个实际的电路元件都用表征其物理性质的理想电路元件来代替。这种用理想电路元件组成的电路称为电路实体的电路模型。

实际电路元件的物理性质，从能量转换的角度来看，有电能的产生、电能的消耗以及电场能量和磁场能量的储存。理想电路元件就是用来表征上述这些单一物理性质的理想元件，它有以下两类五种。

一、理想无源元件

理想无源元件包括理想电阻元件、理想电容元件和理想电感元件三种。简称电阻元件、电容元件和电感元件，或直接简称为电阻、电容和电感。这样，电阻、电容和电感这三个名词既代表了三种理想电路元件，又是表征它们量值大小的参数。

电阻是表征电路中电能消耗的理想元件，电容是表征电路中电场能量储存的理想元件，电感是表征电路中磁场能量储存的理想元件。电容和电感又统称为储能元件。

本章主要介绍电阻元件，电容和电感元件留待下一章再讨论。因而本章所讨论的直流电路是由电阻和下面即将介绍的理想电源元件组成的电路模型为研究对象的。

当电路的某一部分只存在电能的消耗而没有电场能量和磁场能量储存的话，这一部分电路便可用图 1-5 所示的理想电阻元件来代替它。根据欧姆定律，这段电路两端的电压 U 与电路中通过的电流 I 成正比。在图 1-5 所示的电压与电流的正方向一致的情况下，比值

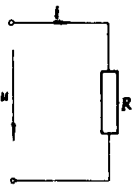


图 1-5 电阻

$$R = \frac{U}{I} \quad (1-1)$$

是一个常数，称为这一部分电路的电阻。电压与电流的乘积即电功率

$$P = UI = RI^2 = \frac{U^2}{R} \quad (1-2)$$

在 t 时间内消耗的电能

$$W = Pt \quad (1-3)$$

这些电能或变成热能散失于周围的空间,或转换成其它形态的能量作有用功了。

二、理想电源元件

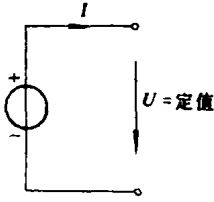


图 1-6 理想电压源

理想电源元件是从实际电源元件中抽象出来的电路模型。当实际电源本身的功率损耗可以忽略不计、而只起产生电能的作用时,这种电源便可以用一个理想电源元件来表示。理想电源元件分理想电压源和理想电流源两种。

1. 理想电压源

理想电压源简称恒压源,符号如图 1-6 所示。其输出电压 U 是由它本身确定的定值,与输出电流和外电路的情况无关。而输出电流 I 不是定值。与输出电压及外电路的情况有关。例如空载时,输出电流 $I=0$;短路时, $I=\infty$;输出接有电阻 R 时, $I=\frac{U}{R}$ 。

实际的电源,例如大家熟悉的干电池和蓄电池,在其内部功率损耗可以忽略不计时,即电池的内电阻可以忽略不计时,便可以用理想电压源来代替。其输出电压 U 就等于电池的电动势 E 。

2. 理想电流源

理想电流源简称恒流源,符号如图 1-7 所示。其输出电流 I 是由它本身确定的定值,与输出电压及外电路的情况无关,而输出电压 U 不是定值,与输出电流及外电路的情况有关。例如短路时,输出电压 $U=0$;空载时, $U=\infty$,输出端接有电阻 R 时, $U=RI$ 。

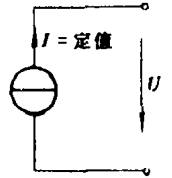


图 1-7 理想电流源

实际的电源,例如光电池在一定的光线照射下,能产生一定的电流,称为电激流。在其内部的功率损耗可以忽略时,便可以用理想电流源来代替,其输出电流就等于电池的电激流。

实际的电源元件,例如蓄电池,它既可以用作电源,将化学能转换成电能供给电路,而在充电时,它又是负载,输入电能并转换成化学能。

理想电源元件也有两种工作状态。当它们的电压和电流的实际方向与图 1-4 中规定的电源关联正方向相同,也就是与图 1-6 或图 1-7 中的关联正方向相同时,它们输出(产生)电功率,起电源作用。当它们的电压和电流的实际方向与图 1-4 中规定的负载的关联正方向相同时,它们输入(消耗)电功率,起负载作用。

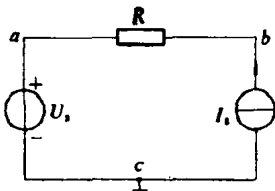


图 1-8 例 1-1 的电路

例 1-1 在图 1-8 所示直流电路中,已知理想电压源的电压 $U_s=3V$,理想电流源的电流 $I_s=3A$,电阻 $R=1\Omega$ 。求:

- (1) a, b, c 三点的电位;
- (2) 讨论电路的功率平衡关系。

解:(1) a, b, c 三点的电位

图中 c 点标有符号“ \uparrow ”,表示该点被选作参考点,电位为零,被称为“地”。电路中其它各点的电位就是该点与“地”之间

的电压,因此

$$V_a = U_a = U_s = 3\text{V}$$

$$V_b = U_b = U_R + U_a = RI_s + U_s = 1 \times 3 + 3 = 6\text{V}$$

$$V_c = 0$$

(2) 电路中的功率平衡关系

由于电路中的电流为 I_s , 由电流和电压的方向可知, 理想电压源处于负载状态, 它输入电功率的数值为

$$P_1 = U_s I_s = 3 \times 3 = 9\text{W}$$

理想电流源处于电源状态, 它输出电功率的数值为

$$P_2 = U_b I_s = 6 \times 3 = 18\text{W}$$

电阻 R 消耗的电功率为

$$P_3 = RI_s^2 = 1 \times 3^2 = 9\text{W}$$

可见 $P_2 = P_1 + P_3$, 电路中的功率是平衡的。

§ 1-4 电压源和电流源

实际的电源元件不仅产生电能, 本身还要消耗电能。因而实际电源的电路模型通常由两部分组成: 一是用来表征产生电能的理想电源元件, 即理想电压源或理想电流源; 另一部分是表征消耗电能的理想电阻元件。故实际电源的电路模型有两种。

一、电压源

用理想电压源和电阻的串联来表示实际电源的电路模型称为电压源, 电路如图 1-9(a) 所示。图中 R_0 称为电压源的内电阻。从图中不难知道, 电压源的输出电压 U 与输出电流 I 的关系是

$$U = U_s - R_0 I \quad (1-4)$$

用函数曲线来表示则如图 1-9(b), 称为电压源的外特性。

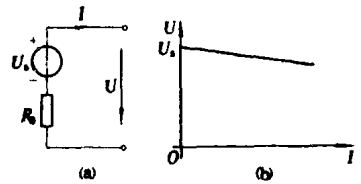


图 1-9 电压源

可见, 电压源的 U 和 I 都不是定值, 都与外电路的情况有关。内电阻越小, 输出电流变化时, 输出电压的变化就越小, 即输出电压越稳定。内电阻等于零时, 输出电压 $U = U_s$, 不随输出电流的变化而变化, 即成为理想电压源。

二、电流源

用理想电流源和电阻的并联来表示实际电源的电路模型称为电流源, 电路如图 1-10(a) 所示。从图中不难知道, 电流源的输出电流 I 与输出电压 U 之间的关系是

$$I = I_s - \frac{U}{R_0} \quad (1-5)$$

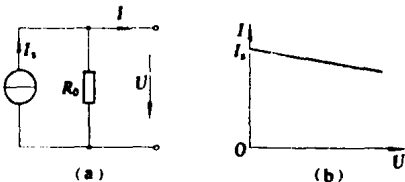


图 1-10 电流源

用函数曲线来表示则如图 1-10(b)所示,称为电流源的外特性。

可见,电流源的 I 和 U 也不是定值,也与外电路的情况有关。内电阻 R_0 越大,输出电压变化时,输出电流的变化就越小,即输出电流越稳定。当内电阻 $R_0 = \infty$ 时,输出电流 $I = I_s$,不随输出电压的变化而变化,即成为理想电流源。

三、电压源与电流源的等效变换

电压源和电流源在对外部电路等效的条件下,即保持输出电压和输出电流不变的条件下,相互之间可以进行等效变换(图 1-11)。由式(1-4)和式(1-5)可以得出:电压源变换成电流源时

$$I_s = \frac{U_s}{R_0} \quad (1-6)$$

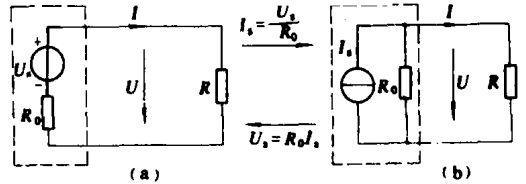


图 1-11 电压源与电流源的等效变换

电流源变换成电压源时

$$U_s = R_0 I_s \quad (1-7)$$

变换时内电阻 R_0 不变, I_s 的方向应为由 U_s 的负极流向正极的方向。

最后必须指出,电压源与电流源的“等效”是仅指对外电路而言的,其内部之间并不等效,即内部的电压、电流和功率是不相等的。其次,理想电压源和理想电流源之间不能等效变换,因为它们无法满足对外部电路等效这一条件。

利用电压源和电流源的等效变换,常常可以用来简化电路的分析和进行电路的计算。在分析和计算的过程中,等效变换并非只局限于电压源和电流源本身,只要是一个理想电压源与一个电阻串联的电路都可以变换成一个理想电流源与电阻的并联电路,或者作相反的变换。

例 1-2 试用电压源与电流源等效变换的方法求图 1-12(a)所示电路中通过 8Ω 电阻的电流 I 。

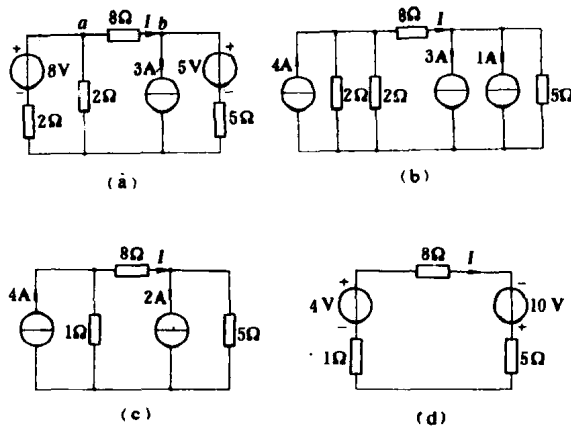


图 1-12 例 1-2 的电路

解:依次变换后的电路如图 1-12(b),(c),(d)所示。最后求得:

$$I = \frac{4 + 10}{1 + 5 + 8} = 1A$$

§ 1-5 克希荷夫定律

克希荷夫定律是分析与计算电路的基本定律。克希荷夫定律分为两条，即电流定律和电压定律，它们分别说明了电路中各部分电流之间和各部分电压之间的相互关系。在叙述定律的内容之前，先要介绍几个名词术语。

1. 节点

电路中三个或三个以上电路元件的联接点称为节点。例如在图 1-13 所示的电路中有 a 和 b 两个节点。具有节点的电路称为分支电路，不具节点的电路称为无分支电路。

2. 支路

两节点之间的每一条分支电路称为支路。支路中通过的电流是同一电流。在图 1-13 所示电路中有 acb 、 adb 、 ab 三条支路。

3. 回路

由电路元件组成的闭合路径称为回路，在图 1-13 所示电路中有 $adbca$ 、 $abda$ 和 $abca$ 三个回路。

4. 网孔

未被其它支路分割的单孔回路称为网孔，例如图中的 $adbca$ 和 $abda$ 回路。

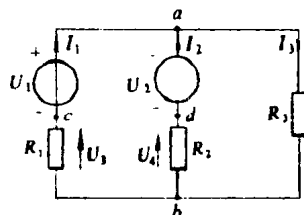


图 1-13 克希荷夫定律

一、克希荷夫电流定律(KCL)

克希荷夫电流定律是说明电路中任何一个节点上各部分电流之间相互关系的基本定律。由于电流的连续性，流入任一节点电流之和必定等于流出该节点的电流之和。例如对图 1-15 所示电路的节点 a 来说

$$I_1 + I_2 = I_3$$

或改写成

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

这就是说，如果流入节点的电流前面取正号，流出节点的电流前面取负号，那么节点 a 上电流的代数和就等于零。这一结论不仅适用于节点 a ，显然也适用于任何电路的任何节点，而且不仅适用于直流电流，对任意波形的电流来说，上述结论在任一瞬间也是适用的。因此克希荷夫电流定律可表述为：在电路的任何一个节点上，同一瞬间的电流的代数和等于零。

国家标准规定随时间变化的物理量用小写字母表示，不随时间变化的物理量用大写字母表示。因此克希荷夫电流定律用公式来表示时，对任意波形的电流来说为

$$\sum i = 0 \quad (1-8)$$

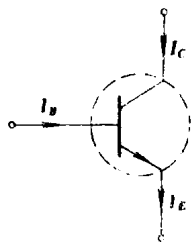


图 1-14 广义节点

在直流电路中为

$$\sum I = 0 \quad (1-9)$$

克希荷夫电流定律不仅适用于电路中任一节点,而且还可以推广应用于电路中任何一个假定的闭合面,即对电路中的任何一个闭合面来说,电流的代数和也等于零。例如在图 1-14 所示的晶体三极管中,对虚线所示的闭合面来说,三个电极的电流的代数和应等于零,即

$$I_C + I_B - I_E = 0$$

由于闭合面具有与“节点”相同的性质,因此称为**广义节点**。

例 1-3 在图 1-15 所示的部分电路中,已知 $I_1=3A$, $I_4=-5A$, $I_5=8A$, 试求 I_2 , I_3 和 I_6 。

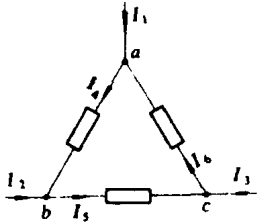


图 1-15 例 1-3 的电路

解:根据图中标出的电流的正方向,应用克希荷夫电流定律,分别由节点 a, b, c 求得

$$I_6 = I_4 - I_1 = -5 - 3 = -8A$$

$$I_2 = I_5 - I_4 = 8 - (-5) = 13A$$

$$I_3 = I_6 - I_5 = -8 - 8 = -16A$$

在求得 I_2 后, I_3 也可以由广义节点求得,即

$$I_3 = -I_1 - I_2 = -3 - 13 = -16A$$

二、克希荷夫电压定律(KVL)

克希荷夫电压定律是说明电路中任何一个回路中各部分电压之间相互关系的基本定律。例如对图 1-13 所示电路中的回路 $adbca$ 来说,由于电位的单值性,若从 a 点出发,沿回路环行一周又回到 a 点,电位的变化应等于零。因而在该回路中与回路环行方向一致的电压(电位降)之和,必定等于与回路环行方向相反的电压(电位升)之和,即

$$U_2 + U_3 = U_1 + U_4$$

或改写成

$$U_2 + U_3 - U_1 - U_4 = 0$$

这就是说,如果与回路环行方向一致的电压前面取正号,与回路环行方向相反的电压前面取负号,那么该回路中电压的代数和就等于零。这一结论不仅适用于回路 $adbca$,显然也适用于任何电路的任一回路。而且不仅适用于直流电压,对任意波形的电压来说,上述结论在任一瞬间也是适用的。因此克希荷夫电压定律可表述为:在电路的任何一个回路中,同一瞬间的电压的代数和等于零。用公式表示即

$$\sum u = 0 \quad (1-10)$$

在直流电路中则可写成

$$\sum U = 0 \quad (1-11)$$

如果回路中理想电压源两端的电压改用电动势表示(图 1-16),电阻元件两端的电压改用电阻与电流的乘积来表示。由于电动势代表电位升,电阻与电流的乘积代表电压降,因而在该回路中电位降的代数和应等于电位升的代数和。于是克希荷夫电压定律还可以

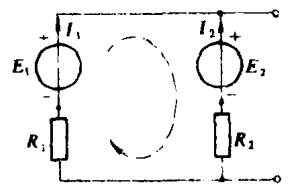


图 1-16 KVL 的另一表示方法

表示为：

$$\sum RI = \sum E \quad (1-12)$$

其中与回路环行方面一致的电流和电动势前面取正号，不一致的前面取负号。按图中虚线所示回路方向，由公式(1-12)列出的回路方程为：

$$R_1 I_1 - R_2 I_2 = E_1 - E_2$$

克希荷夫电压定律不仅适用于电路中任一闭合的回路，而且还可以推广应用于任何一个假想闭合的一段电路，例如在图 1-17 所示电路中，只要将 ab 两点间的电压作为电阻电压降一样考虑进去，按照图中选取的回路方向，由式(1-12)可列出

$$RI - U = -E$$

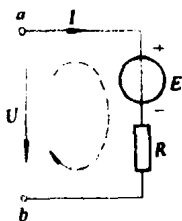


图 1-17 KVL 推广到一段电路

例 1-4 在图 1-18 所示的回路中，已知 $E_1 = 20V$, $E_2 = 10V$, $U_{ab} = 4V$, $U_{cd} = -6V$, $U_{ef} = 5V$ ，试求 U_{ad} 和 U_{ad} 。

解：由回路 $abcdefa$ ，根据 KVL 可列出

$$U_{ab} + U_{cd} - U_{ef} = E_1 - E_2$$

求得

$$\begin{aligned} U_{cd} &= U_{ab} + U_{ef} - E_1 + E_2 \\ &= 4 + 5 - 20 + 10 = -7V \end{aligned}$$

由假想的回路 $abcd$ ，根据 KVL 可列出

$$U_{ab} + U_{cd} - U_{ad} = -E_2$$

求得

$$U_{ad} = U_{ab} + U_{cd} + E_2 = 4 + (-6) + 10 = 8V$$

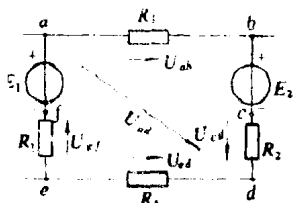


图 1-18 例 1-4 的电路

§ 1-6 支路电流法

支路电流法是求解复杂电路最基本的方法，它是以支路电流为求解对象，直接应用克希荷夫定律，分别对节点和回路列出所需的方程组，然后解出各支路电流。

现在我们先以不含理想电流源的电路(图 1-19)为例来说明支路电流法解题的一般步骤。

1. 确定支路数，选择各支路电流的正方向。

在不含理想电流源的电路中，若有 b 条支路，就有 b 个待求支路电流。解题时，就需列出 b 个独立的方程式。本题中， c 与 d 之间无电路元件，这两点可视为一个节点 O ，因此该电路 $b=5$ ，需列出 5 个独立的方程式。选择各支路电流的正方向如图所示。

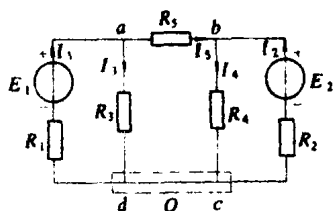


图 1-19 支路电流法

2. 确定节点数，列出独立的节点电流方程式。

在图 1-19 所示电路中，有 a, b 和 O 三个节点。利用 KCL 列出的节点方程式如下：