

绪 论

一、影像电子学基础的主要内容

影像电子学基础是研究电能和半导体器件在工程技术上应用的学科，是医学影像技术专业一门重要的专业基础课。本课程的主要任务是使学生获得电工和电子技术方面的基本知识和基本技能，为学习专业知识、从事影像技术工作，以及进一步提高科学技术水平打下良好的基础。

本教材注意处理经典内容与现代科学成就的关系、先进性与教学适用性的关系、传授知识与培养学生能力的关系。教材内容着眼于影像电子学的基础性、应用性和先进性，以电路、电子电路的基本概念、基本理论和基本分析方法为重点，以这些理论、方法和技术应用为主导，融入影像电子技术领域的新技术、新成果，以增强教材的活力和生命力。

本教材的主要内容有：直流电路、正弦交流电路和三相交流电路、变压器和电动机、半导体二极管和晶体管、交流放大电路、直流稳压电源、晶闸管及基本电路、门电路和逻辑电路等。

影像电子学基础是一门实践性很强的专业技术基础课，因此，必须重视和加强实践教学，努力培养学生的动手能力，实践教学是提高影像电子学基础教学质量不可缺少的重要环节。在能力培养方面，要求学生能正确连接电路，能分析简单的电路原理图，能阅读设备的电路方框图，初步具备辩证思维能力；学习必备的影像电子学基础知识和技能，了解这些知识与技能在医学领域中的应用，了解影像技术在医学发展中状况；学习科学探究方法，发展自主学习能力，养成良好的思维习惯，能运用电子学知识和医学探究方法解决一些问题；保持好奇心与求知欲，发展科学探索兴趣，有坚持真理、勇于创新、实事求是的科学态度与科学精神；有振兴医学事业，将医学服务于人类的社会责任感；了解医学与电子技术在经济和社会的主要作用。

二、影像电子学和医学联系

影像电子学作为一门独立的学科，从确立以来，在医学领域中起到了很大作用，大量的电子学科学技术知识和成果得到广泛应用，促成了医学工作者与工程师或物理学家之间的密切合作。影像电子学发展十分迅速，研究领域不断拓宽，地位日益重要，展示了广阔的发展前景。影像电子学综合应用电子学和有关工程技术的理论和方法，从工程科学的角度研究生物、人体的结构和功能以及功能与结构之间的相互关系。作为交叉学科，影像电子学的介入是双向的：一方面将电子学用于生物和医学领域，使这些领域的研究方式从定性提高到定量；另一方面，生命过程中揭示出的许多规律，特别是经过亿万年进化而形成的生物信息处理的优异特性将会给电子学科以重要的启示，这不仅会推动电子学的发展，还将使信息科学发生革命性的变革。

现代医学的发展将会在越来越大的程度上依赖于医学仪器。无论从人民的健康保障还是从市场经济利益角度考虑，医学治疗、诊断、监护、模拟和管理方面的仪器设备研究和发展都是十分重要的。这里简单介绍一些医学仪器：

影像诊断仪。以核磁共振、X射线、超声波、放射性射线为探测源的成像系统为主。

监护仪器。监护仪器的发展趋势是高性能的传感器和信号处理系统的紧密结合，以实现小型化、集成化、图像化、智能化和长时期的实时监护。

心电诊断仪器。包括：Holter 系统，时间压缩阵发式动态心电记录系统，微弱希氏电位和电位的检测仪器。

康复器械。包括：心脏起搏器、电子耳蜗、假胶以及各类声控仪器、超声盲人眼镜、人工视网膜的研究，生物传感器和人工智能结合研制出具有嗅觉和味觉功能的系统。

总之，医学和医学影像电子学有着千丝万缕的联系，随着电子学的发展，医疗诊断手段和医疗治疗手段也不断提高。

三、课程的基本理念

（一）在课程目标上注重提高全体学生的科学素养

职业教育影像电子学的基础课程旨在进一步提高学生的科学素养，从知识与技能、过程与方法、情感态度与价值观三个方面培养学生，为学生终身发展、应对现代社会和未来医学发展的挑战奠定基础。

（二）在课程结构上重视基础，体现课程的选择性

职业教育仍属于基础教育，应该注重全体学生的共同基础，同时应该针对学生的兴趣、发展潜力和今后的职业需求，设计供学生选择的影像电子学模块，以满足学生的不同学习需求，促进学生自主地、富有个性地学习。

（三）在课程内容上体现时代性、基础性和可选择性

影像电子学基础应加强与学生生活、现代社会及医学发展的联系，反映当代医学影像技术发展的重要成果和新的医学思想，关注影像电子学的技术应用所带来的医学领域的热点问题，培养学生的社会参与意识和职业道德。

（四）在课程实施上注重自主学习，提倡教学方式多样化

影像电子学基础旨在从电子技术中精选必备的基础知识与技能，关注医学影像与其他学科的联系，在培养学生基本能力的同时，应促进学生自主学习，让学生积极参与，乐于探究，勇于实验，勤于思考。通过多样化的教学方式，帮助学生学习影像电子学的知识与技能，培养其科学探究能力，使其逐步形成科学态度与科学精神。

（五）在课程评价上强调更新观念，促进学生发展

影像电子学基础应体现评价的内在激励功能和诊断功能，关注过程性评价，注意学生的个体差异，帮助学生认识自我、建立自信，促进学生在已有水平上发展。通过评价还应促进教师的提高以及教学实践的改进等。

四、怎样学好影像电子学

要学好影像电子学，首先要对影像电子学有兴趣，能领略医学界的奇妙与和谐，保持好奇心与求知欲，乐于探究医学领域的奥秘；有参与影像技术改进活动的热情，有将电子技术知识应用于生活和医疗实践的意识，勇于探究与医学有关的电子技术问题；具有敢于坚持真理、勇于创新 and 实事求是的科学态度和科学精神；有主动与他人合作的精神，有将自己的见解与他人交流的愿望，敢于坚持正确观点，勇于修正错误，具有团队精神；关心国内外医学影像发展现状与趋势，有

振兴医学影像的使命感与责任感，有将影像电子学服务于人类的意识。

要学好影像电子学，还要重视观察和实验，要认真做好影像电子学实验，注意认真观察实验现象和结果，并且分析实验现象产生的条件和原因，能通过实验研究一些医学影像方面的问题，有意识地提高自己的观察能力和动手能力。写好实验报告，学会使用医疗仪器，并且能处理数据。

学习过程中要理论联系实际，学会把知识用到实践中去，学会解决相关课程的问题，能和其他课程的知识融合在一起。学会提出问题，多问为什么，这样才能把知识学得扎实。理论知识要记牢，但不能死记硬背，学会解决实际问题。要注意知识的运用，在运用中学会分析问题、解决问题的方法。要在不断的实践中，扩展和加深自己的影像电子学知识，学会具体问题具体分析，提高自己分析问题、解决问题的能力。

第一章 直流电路

学习要点 本章在已有物理学知识的基础上，将复习并加深理解一些有关电路的基本知识。本章将介绍电路的组成、作用和模型电路等概念；学习电路的基本定律，并用其对电路进行分析和计算；还将学习电容器的串、并联规律及其充、放电过程等有关知识。

第一节 电路的基本概念

一、电路的基本概念

(一) 电路的组成和作用

电路也就是电流的通路，其作用一般有两个方面：一是实现电能的输送和转换；二是对电路信号进行适当的处理。电路通常由电源、负载和中间环节三部分组成。其中，电源是提供电能的装置，它把其他形式的能转化成电能；负载是使用电能的装置；中间环节由导线、开关及测量、控制和保护装置等组成。图 1-1(a) 所示是一个最简单的电路，其中的干电池即电源，是提供电能的装置；白炽灯是负载，它把电池提供的电能转化为光能和发热的内能；中间环节由导线和开关组成，其主要作用是把电池提供的电能输送给白炽灯并控制其亮、暗。而在电视机、X光机、CT 机等仪器中，其中间环节是由导线和其他各种元件组成的复杂电路，主要作用是进行信号的传递和处理。

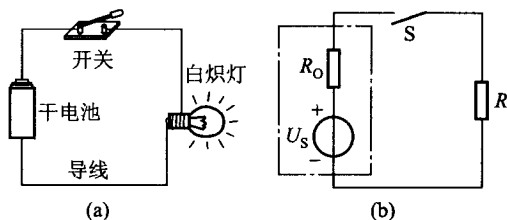


图 1-1 最简单的电路及其模型电路
(a) 最简单的电路;(b) 模型电路

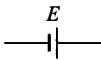
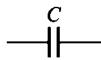
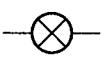
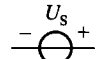
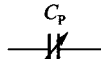
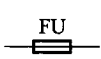
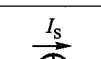
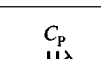
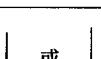
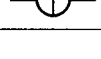
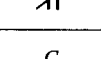

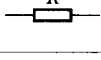
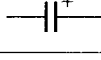

(二) 模型电路

组成电路的各种器件称为电路元件。表征电路元件性能的量称为元件的参数。电路元件在电路中的性能和作用往往是多方面的，例如，白炽灯的主要性能是电阻性，但电流经过灯丝又会产生磁场，因而又具有电感性；电感线圈的主要性能是电感性，但也同时具有电阻性（一般用铜导线绕制，电阻很小）和电容性（匝与匝之间的分布电容，一般也很小）。为了便于分析和计算，常常把实际的电路元件理想化，即在一定条件下，突出元件的主要性能，略去其次要性能，这样得到的元件称为理想元件。例如，略去白炽灯的电感性，白炽灯就可看做一个只具有电阻性的理想元件——纯电阻元件。同理，若实际电感线圈的电阻和分布电容很小，可以略去不计，则这一线圈就可看做只具有电感性的纯电感线圈；实际中的电容器，如果略去其漏电电阻和分布电感，它也可简化为一个只具有电容性的纯电容元件。显然，理想元件只具有单一的性能。有时，某些电路元件不能看做理想元件，例如，电源的内阻不能忽略时，电源就不能看做是一个理想电源。此时，可以把电源看成是由一个理想电源（没有内阻）和一个纯电阻元件（阻值等于电源内阻）的串联组

合。常用的理想电路元件有电阻元件、电感元件、电容元件和电源等。

由理想元件及其组合连成的电路，就是实际电路的模型电路。图 1-1(b)就是图 1-1(a)的模型电路。在绘制电路图时，各种元器件均需用规定的符号表示。部分元器件的图形符号如表 1-1 所示。

表 1-1 部分元器件的图形符号

图形符号	名称	图形符号	名称	图形符号	名称
	电池		电容		白炽灯
	理想电压源		可变电容		熔断器
	理想电流源		微调电容		接地
	电阻		电解电容		两线相接
	可变电阻电位器		电感		两线交叉

(三) 有关电路的几个概念

支路：没有分支的一段电路称为支路。图 1-2 中有三条支路。显然，同一支路中流过的是同一电流。

节点：三条或三条以上支路的连接点称为节点。图 1-2 中有两个节点：b 点和 d 点。

回路：电路中任何一个闭合路径都可称为一个回路。图 1-2 中有三个回路，分别是 abcda、abda 和 bcdb。

网孔：内部不含支路的回路称为网孔。图 1-2 中有两个网孔，分别是 abda 和 bcdb。

网络：指比较复杂的电路，如集成电路或电视机电路等。

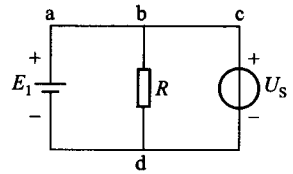


图 1-2 有分支电路

二、电路的基本物理量

研究电路问题时，经常要涉及的电学量有电流、电压、电位和电动势等。

(一) 电流

电荷的定向移动形成电流。单位时间内通过导体截面的电荷量称为电流。大小和方向均不随时间改变的电流称为稳恒电流，简称直流，用大写字母 I 表示。设时间 t 内通过某一截面的电荷量为 Q 则有

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1-1)$$

如果电流的大小和方向都随时间而变化,则称为交流电流,用小写字母 i 表示。设在时间 dt 内通过某一截面的电荷量为 dq 则有

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-2)$$

在国际单位制中,电荷量的单位为库[仑],符号为 C 时间的单位为秒 符号为 s 电流的单位为安[培]符号为 A。实用中,电流的单位还有毫安(mA)和微安(μA) 各单位的换算关系为

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

电流的方向规定为正电荷定向移动的方向。在同一支路上,电流总是处处相等,这一结果称为电流的连续性原理。

(二) 电压和电位

电路中任意两点间的电压等于将单位正电荷从一点移到另外一点时电场力所做的功。设将一正电荷 q 从 a 点移到 b 点时,电场力所做的功为 W_{ab} 则 a 、 b 两点间的电压为

$$U_{ab} = \frac{W_{ab}}{q} \quad (1-3)$$

在国际单位制中,电压的单位为伏[特],符号为 V。实用中还有千伏(kV)、毫伏(mV)和微伏(μV)等 其换算关系为

$$1 \text{ kV} = 10^3 \text{ V} = 10^6 \text{ mV} = 10^9 \mu\text{V}$$

为了便于研究电路问题,给电压规定一个方向:正电荷在电场力作用下移动的方向,即电位降低的方向。故电压也常常称为电压降。下标 ab 标示了电压的方向是由 a 指向 b 。

电路中某点的电位就是这一点到参考点之间的电压。在图 1-2 中,如果选定 d 点为参考点,即设定电位为 0 的点 $V_d = 0$ 则 a 点的电位 $V_a = U_{ad}$, b 点的电位 $V_b = U_{bd}$ 。电位的单位和电压的单位相同,也是伏[特](V)。任意两点间的电压就是这两点间电位的差值,即

$$U_{ab} = V_a - V_b \quad (1-4)$$

引入电位的概念后,电压的实际方向就是由高电位点指向低电位点。在一个闭合电路的外电路上,由电源正极到负极,电位逐渐降低;在电源内电路上,由负极到正极,电位逐渐升高。

有关电路中电位的计算问题,将在本章第五节中专门讨论。

(三) 电动势

电源电动势是表示电源的非静电力做功把其他形式的能转化为电能能力的物理量。在数值上等于电源把单位正电荷经电源内部由负极移送到正极时,非静电力所做的功。设电源把正电荷 q 从电源负极移送到正极时,非静电力做的功为 W_E 则电动势 E 的大小为

$$E = \frac{W_E}{q} \quad (1-5)$$

电动势的单位是伏[特](V),其方向由电源的负极指向电源的正极,与电源电压的实际方向相反,如图 1-3 所示。

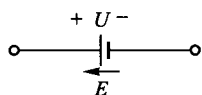


图 1-3 电源电动势的方向

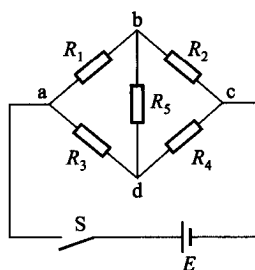


图 1-4 桥式电路

(四) 电流、电压和电动势的参考方向

在简单的直流电路中，如已知电源的极性，则电流、电压和电动势的方向很容易就可以判断出来。但在复杂的电路中，某些支路中电流和电压的实际方向就很难预先判断出来，如图 1-4 所示桥式电路中 R_5 支路的电流和电压方向。在交流电路中，电流、电压和电动势的方向随时间做周期性变化，无法在电路图中标出或判断出它们的实际方向。因此，在分析电路之前，任意为它们假定一个方向，这个假定的方向就称为参考方向（又称为正方向），并用箭头（电流、电动势）或十、一号（电压、电位）标明在电路图上。选好参考方向后，就可以此为依据，进行电路的分析和计算。若计算出的结果为正值，则表明所选参考方向与实际方向一致。若结果为负值，则表明所选参考方向与实际方向相反。需要指出的是，电流、电压和电动势的实际方向都是客观存在的，不会因参考方向选取的不同而不同。

只有选定好参考方向之后，电流和电压才有正、负值之分。参考方向的选取原则上是任意的，但在实际当中，常常需要把元件上电流和电压的参考方向选取一致，称为关联参考方向。这样，在电路图中只需标出电流或电压的参考方向中的一个即可。同理，电源上电动势和电压的关联参考方向是相反的。

电流和电压的参考方向除了用箭头和 +、一号表示以外，还可以用带双下标的字母表示，如 I_{ab} （或 U_{ab} ）表示其参考方向由 a 指向 b；而 I_{ba} （或 U_{ba} ）表示它的参考方向由 b 指向 a 两者之间差一个负号即 $I_{ab} = -I_{ba}$, $U_{ab} = -U_{ba}$ 。

三、欧姆定律

欧姆定律是电路的基本定律之一，用于确定电路中电流、电压（或电动势）及电阻等各量之间的关系。

假设有一段电路的电阻为 R ，加在其两端的电压为 U 则该段电路中的电流 I 为

$$I = \frac{U}{R} \quad (1-6)$$

这一规律只适用于一段不含电源的电阻电路，故称为部分电路的欧姆定律。

一个完整的闭合电路必定含有电源，设闭合电路的电源电动势为 E ，内阻为 R_0 ，外电路电阻为 R 则该电路中的电流 I 为

$$I = \frac{E}{R + R_0}$$

这一规律适用于含有电源的闭合电路，故称为闭合电路的欧姆定律。

四、电路中的电能与电功率

一个工作着的电路中必定存在着能量的转换：电源把其他形式的能转化为电能，而负载则把电能转化为其他形式的能。大家知道，功是能量变化的量度，所以，知道了功也就知道了能量转移或转化的多少。

电源通过非静电力做功，把其他形式的能转化为电能。设电源电动势为 E 电路中的电流为 I 在时间 t 内电源所做的功（等于电源产生的电能） W_E 为

$$W_E = EIt \quad (1-7)$$

在外电路上，通过电场力做功，把电能转化为其他形式的能。设外电路负载两端的电压为 U ，通过的电流为 I 则时间 t 内电流对负载做的功（即负载取用或消耗的电能） W 为

$$W = UIt$$

单位时间内所做的功称为功率。所以，电源的功率为

$$P_E = EI \quad (1-8)$$

负载的功率为

$$P = UI \quad (1-9)$$

如负载为纯电阻性元件，由欧姆定律，上式又可写为

$$P = I^2 R \quad (1-10)$$

或

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (1-11)$$

注意对电动机或充电器等非电阻性负载，由式（1-10）算出的功率仅为其发热功率，而式（1-11）则一般不能用于这类电路。

假设有一闭合电路，其电源电动势为 E 内阻为 R_0 ，外电路是电阻为 R 的电阻性负载，则负载从电源获取的功率为

$$\begin{aligned} P &= I^2 R = \left(\frac{E}{R + R_0} \right)^2 R = \frac{E^2 R}{(R + R_0)^2} = \frac{E^2 R}{(R + R_0)^2 - 4R_0 R + 4R_0 R} \\ &= \frac{E^2}{\frac{(R - R_0)^2}{R} + 4R_0} \end{aligned}$$

在上式中，对于给定电源， E 、 R_0 一定 故功率 P 随负载电阻 R 的变化而变化，当 $R = R_0$ 时负载获取的功率最大，为

$$P = \frac{E^2}{4R_0}$$

在电子线路中，常常利用上述理论，设法满足 $R = R_0$ 条件，使负载获取最大的功率，这一过

程称为负载与电源的匹配。由 $R=R_0$ 可知，此时电源产生的功率为负载和电源内阻平分，电源的效率仅为 50%，故这种方法在电力系统中是不允许使用的。

第二节 电阻的串联、并联和混联

一、电阻的串联

两个或两个以上的电阻首尾相连的连接方式称为电阻的串联。图 1-5(a)所示是三个电阻串联组成的电路。

几个电阻串联后可用一个等效电阻 R 来代替，如图 1-5(b)所示。串联电路的特点是：

(1) 串联电路中的电流处处相等，即流过 R_1 、 R_2 、 R_3 的电流相等，是同一电流 I 。

(2) 串联电路两端的总电压等于串联电路中各个电阻两端的分电压之和，即

$$U=U_1+U_2+U_3 \quad (1-12)$$

(3) 串联电路的总电阻等于各分电阻之和，即

$$R=R_1+R_2+R_3 \quad (1-13)$$

(4) 各电阻上分得的电压与其阻值成正比，即

$$\frac{U_1}{R_1}=\frac{U_2}{R_2}=\frac{U_3}{R_3}=I$$

当只有两个电阻串联时，可简化其分压计算式。

因为
$$I=\frac{U}{R_1+R_2}$$

所以
$$U_1=\frac{R_1}{R_1+R_2}U \quad U_2=\frac{R_2}{R_1+R_2}U$$

(5) 串联电路消耗的总功率等于各电阻上消耗的功率之和，即

$$P=P_1+P_2+P_3 \quad (1-14)$$

(6) 各电阻上消耗的功率与其阻值成正比，即

$$\frac{P_1}{R_1}=\frac{P_2}{R_2}=\frac{P_3}{R_3}=I^2$$

电阻串联在实际中有广泛的应用。在图 1-6(a)中，利用 R_1 的分压作用，可以把额定电压较低的白炽灯（或其他电器）接到电压较高的电源上使用。此外，利用串联电阻的分压作用还可以扩大电压表的量程。在图 1-6(b)中，利用可变电阻 R_1 可以调节通过负载 R_2 的电流，这一作用称为串联电阻的限流作用；在图 1-6(c)中，利用可变电阻 R_2 可以调节输出电压 U_0 的大小。

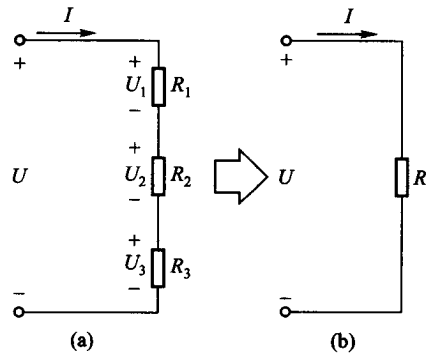


图 1-5 电阻的串联及其等效电路
(a) 电阻的串联；(b) 等效电路

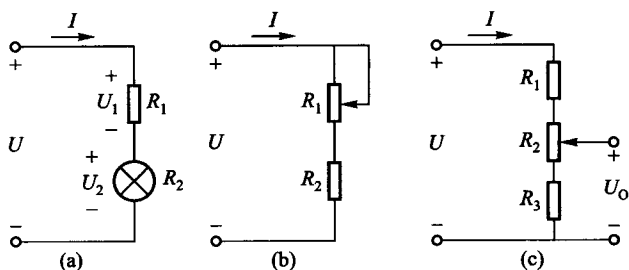


图 1-6 电阻串联的应用

(a) 分压 ;(b) 限流 ;(c) 调压

例 1-1 在图 1-6(a) 中,若白炽灯上标有“6 V、3 W”则当电源电压 $U=9\text{ V}$ 时 要使白炽灯正常发光,分压电阻 R_1 的阻值应为多大?

解 白炽灯的电阻
$$R_2 = \frac{U^2}{P} = \frac{6^2}{3} \Omega = 12 \Omega$$

根据串联电路的特点
$$\frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2}$$

要使白炽灯正常发光
$$U_2 = 6\text{ V} \quad U_1 = U - U_2 = (9 - 6)\text{ V} = 3\text{ V}$$

则分压电阻值应为
$$R_1 = \frac{U_1}{U_2} R_2 = \frac{3}{6} \times 12 \Omega = 6 \Omega$$

例 1-2 在图 1-6(c) 中, $R_1 = R_3 = 10\text{ k}\Omega$, $R_2 = 30\text{ k}\Omega$, $U = 20\text{ V}$ 求输出电压 U_o 的变化范围。

解 当触点滑到 R_2 的上端时 输出电压最大 则

$$U_{O\max} = \frac{R_2 + R_3}{R_1 + R_2 + R_3} U = \left(\frac{30 + 10}{10 + 30 + 10} \times 20 \right) \text{ V} = 16\text{ V}$$

当触点滑到 R_2 的下端时, 输出电压最小, 则

$$U_{O\min} = \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} U = \left(\frac{10}{10 + 30 + 10} \times 20 \right) \text{ V} = 4\text{ V}$$

则输出电压的变化范围为 4~16 V。

二、电阻的并联及分流

两个或两个以上的电阻连接在两个公共节点之间的连接方式称为电阻的并联, 如图 1-7(a) 所示。几个并联电阻可用一个等效电阻 R 来代替, 如图 1-7(b) 所示。

电阻并联的特点是:

(1) 并联电路中各电阻两端的电压相等, 为同一电压。

(2) 并联电路总电流等于各支路的电流之和, 即

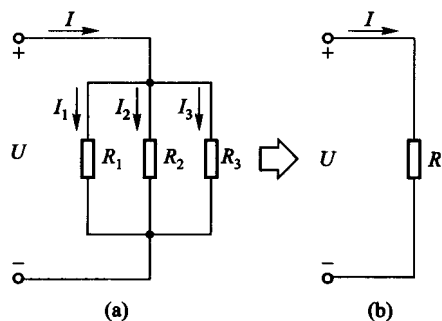


图 1-7 电阻的并联及其等效电路

(a) 电阻的并联 (b) 等效电路

$$I = I_1 + I_2 + I_3 \quad (1-15)$$

(3) 并联电路总电阻的倒数等于各支路电阻的倒数之和, 即

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad (1-16)$$

(4) 并联电路中各支路分得的电流值与该支路的电阻值成反比, 即

$$U \cdot I_1 R_1 = I_2 R_2 = I_3 R_3$$

当只有两个电阻并联时, 分析可得各支路电流为

$$I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I \quad I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I$$

(5) 并联电路消耗的总功率等于各支路消耗的功率之和, 即

$$P = P_1 + P_2 + P_3 \quad (1-17)$$

(6) 并联电路各支路消耗的功率与该支路的电阻成反比, 即

$$P_1 R_1 = P_2 R_2 = P_3 R_3 = U^2$$

并联电阻的主要作用是分流, 利用这一作用可以扩大电流表的量程。

例 1-3 在图 1-8 所示的电路中总电流 $I = 5 \text{ A}$, 电流表的内阻 $R_A = 0.5 \Omega$ 量程为 0.6 A 。试求 ① A B 间的总电阻 R_{AB} ; 通过电流表的电流, 分析这个电路接通后会有什么后果。

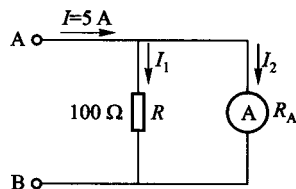


图 1-8 例 1-3 图

解 (1) $R_{AB} = \frac{R R_A}{R + R_A} = \frac{100 \times 0.5}{100 + 0.5} \Omega \approx 0.5 \Omega$

(2) 根据分流公式得

$$I_2 = \frac{R}{R + R_A} I = \left(\frac{100}{100 + 0.5} \times 5 \right) \text{ A} \approx 5 \text{ A}$$

$$\frac{I_2}{I_A} = \frac{5}{0.6} \approx 8.33$$

故流经电流表的电流为其量程的 8.33 倍。电路接通后电流表将被烧坏。

在本例中, 两个并联的电阻值相差悬殊, 即 $R \gg R_A$, 如果不要求精确计算, 在求等效电阻时可将阻值大的电路视为断路, 阻值小的电阻值近似为并联电路的等效电阻值。同时, 大电阻的分流作用也可以忽略不计。同理, 阻值相差悬殊的两个电阻串联时, 小电阻的分压限流作用也可以忽略不计。

三、电阻的混联

一个电路, 若既有电阻的串联, 又有电阻的并联, 则称为电阻的混联。分析、计算混联电路时, 首先要明确计算哪两个端点之间的等效电阻, 以及正确判定各电阻之间的串、并联关系; 然后, 根据电阻的串、并联特点, 对电路进行等效简化和计算。

例 1-4 在图 1-9 a) 中 $R_1 = 6 \Omega$ $R_2 = R_6 = 8 \Omega$ $R_3 = R_7 = 2 \Omega$ $R_4 = 3 \Omega$ $R_5 = 12 \Omega$ $U =$

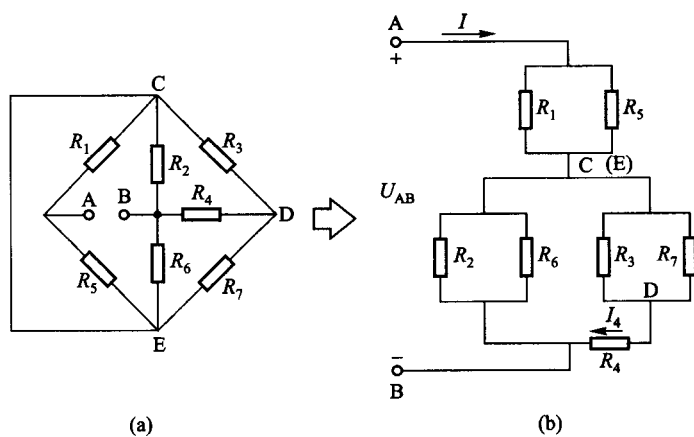


图 1-9 例 1-4 图

12 V。求 ① A、B 两点之间的等效电阻；② R_4 支路的电流。

分析 该电路为一混联电路，难于直接分辨各电阻之间的串、并联关系。此时，可将电路图重新改画。

改画电路图的目的是能看清各电阻之间的串、并联关系。图 1-9(b) 为改画后的电路图，电阻的串、并联关系已变得十分清晰。在改画电路图时，可从电路的一个端点出发，一步步画向另一个端点，将电位相等的点合并（如本例中的 C、E 两点）。注意：改画电路图时，导线的长度可根据需要任意调整。

解 R_3 与 R_7 并联后再与 R_4 串联，有

$$R_{374} = \frac{R_3 R_7}{R_3 + R_7} + R_4 = \left(\frac{2 \times 2}{2 + 2} + 3 \right) \Omega = 4 \Omega$$

R_2 与 R_6 并联，有

$$R_{26} = \frac{R_2 R_6}{R_2 + R_6} = \frac{8 \times 8}{8 + 8} \Omega = 4 \Omega$$

R_{374} 与 R_{26} 并联，有

$$R_{37426} = \frac{R_{374} R_{26}}{R_{374} + R_{26}} = \frac{4 \times 4}{4 + 4} \Omega = 2 \Omega$$

R_1 与 R_5 并联，有

$$R_{15} = \frac{R_1 R_5}{R_1 + R_5} = \frac{6 \times 12}{6 + 12} \Omega = 4 \Omega$$

R_{15} 与 R_{37426} 串联，则可以求出 A、B 间的等效电阻

$$R_{AB} = R_{15} + R_{37426} = (4 + 2) \Omega = 6 \Omega$$

电路的总电流为

$$I = \frac{U_{AB}}{R_{AB}} = \frac{12}{6} \text{ A} = 2 \text{ A}$$

由并联电路的分流特点，可求出 R_4 支路的电流，为

$$I_4 = \frac{R_{26}}{R_{26} + R_{374}} I = \frac{4}{4+4} \times 2 \text{ A} = 1 \text{ A}$$

第三节 基尔霍夫定律

基尔霍夫定律和欧姆定律一样，是电路的基本定律之一，是分析电路的基本依据，常用于解决复杂电路的计算问题。基尔霍夫定律由基尔霍夫电流定律（简记为 KCL）和基尔霍夫电压定律（简记为 KVL）两个定律组成。

一、基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律是用于确定流入和流出节点的电流之间关系的。由于电流具有连续性，电路中的任何一点均不能堆积电荷，所以在任一瞬间，流入某一节点的电流之和应等于流出该节点的电流之和 即

$$\sum I_{\lambda} = \sum I_{\mu} \quad (1-18)$$

这一规律称为基尔霍夫电流定律，又称为节点电流定律。

对于图 1-10 中的节点 A，根据节点电流定律可写出

$$I_1 + I_2 = I_3 + I_4$$

把上式移项后，可得

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

或

$$I_1 + I_2 + (-I_3) + (-I_4) = 0$$

显然，如果规定流入节点的电流为正，流出节点的电流为负，则在任一瞬间，一个节点上的电流之和恒等于 0 即

$$\sum I = 0 \quad (1-19)$$

式(1-19)为节点电流定律的另一种表达形式。

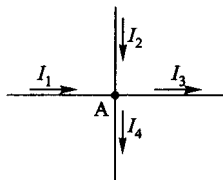


图 1-10 节点电流定律

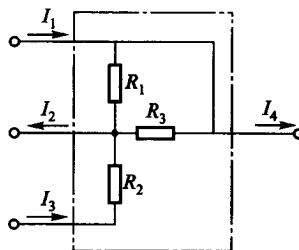


图 1-11 举例

节点电流定律不仅适用于节点，也适用于一个虚拟的封闭面，如图 1-11 所示。无论封闭面内有多少个元件，电路如何连接，流入封闭面的电流之和总等于流出封闭面的电流之和。如图 1-11 中，有

$$I_1 + I_3 = I_2 + I_4$$

应用节点电流定律列方程时，首先应在电路图中标出待求电流的参考方向。因为所列方程中，各项电流前的正、负号都是由电流的参考方向决定的，参考方向选取不同，计算式中电流的正、负号也不同；但参考方向选取不同，不影响计算的结果。

例 1-5 (1) 在图 1-12(a) 中，有五条支路连接于 A 点，在图示的电流参考方向下， $I_1 = -6 \text{ A}$ ， $I_2 = -3 \text{ A}$ ， $I_3 = 5 \text{ A}$ ， $I_4 = 4 \text{ A}$ ，求第五条支路的电流 I_5 ；(2) 在图 1-12(c) 所示的晶体管电路中，已知 $I_B = 30 \mu\text{A}$ ， $I_C = 1.3 \text{ mA}$ ，求 I_E 。

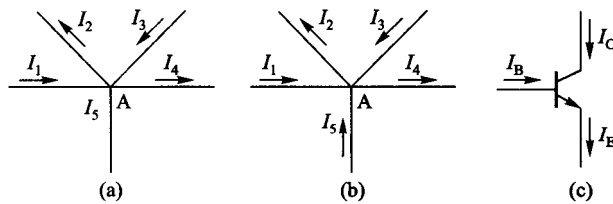


图 1-12 用基尔霍夫电流定律计算电流

解 (1) 首先应给待求电流 I_5 假定参考方向，并用箭头标明在电路图上，如图 1-12(b) 所示；然后对节点 A 列出基尔霍夫电流定律方程，为

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

即

$$-6 \text{ A} + 5 \text{ A} + I_5 = (-3) \text{ A} + 4 \text{ A}$$

解出

$$I_5 = 2 \text{ A}$$

结果为正值，说明假定的参考方向和电流的实际方向一致，是流入节点的。事实上，未知电流的参考方向可以任意假定。本例中是假定电流 I_5 流入节点的，如果假定其流出节点，则

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

即

$$-6 \text{ A} + 5 \text{ A} = I_5 + (-3) \text{ A} + 4 \text{ A}$$

解出

$$I_5 = -2 \text{ A}$$

结果为负值，说明假定的参考方向和电流的实际方向相反，仍是流入节点的。显然，参考方向选取不同，不影响计算的结果。

(2) 本例中，把晶体管用一个虚拟的封闭面围起来，仍可用基尔霍夫电流定律求解。待求电流 I_E 的参考方向在图 1-12(c) 中已经标出，则

$$I_B + I_C = I_E$$

即

$$I_E = (0.03 + 1.3) \text{ mA} = 1.33 \text{ mA}$$

本例的计算中，要注意 I_B 的单位和 I_C 的单位不同，应统一后再进行计算。

二、基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律是用来确定回路中各段电压之间关系的。两点间电压的大小等于这两点间电位的差值，电压的方向指向电位降低的方向。在沿回路绕行一周回到出发点的过程中，有些地方的电压使电位升高，有些地方的电压使电位降低，但升、降的总和必为 0 即沿闭合回路绕行一周使电位升高的电压（电压升）之和等于使电位降低的电压（电压降）之和，记为

$$\sum U_{\text{升}} = \sum U_{\text{降}} \quad (1-20)$$

这一结论称为基尔霍夫电压定律，又称为回路电压定律。

在图 1-13 中，若按虚线箭头方向绕行一周，回路中的电压升是 U_1 和 U_4 ，电压降是 U_2 和 U_3 ，则

$$U_1 + U_4 = U_2 + U_3 \quad (1-21)$$

或记为
$$U_1 + (-U_2) + (-U_3) + U_4 = 0 \quad (1-22)$$

显然，若规定使电位升高的电压为正，使电位降低的电压为负，则沿回路绕行一周，回路中各段电压的代数和为 0 即

$$\sum U = 0 \quad (1-23)$$

式(1-23)为基尔霍夫电压定律的另一种表达形式。

从图 1-13 中可以看出

$$U_1 = E_1 \quad U_2 = E_2 \quad U_3 = I_1 R_1 \quad U_4 = I_2 R_2$$

将此结果代入式(1-21)中，可得

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

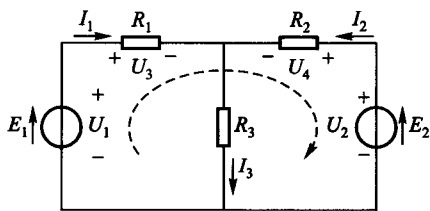


图 1-13 回路电压定律

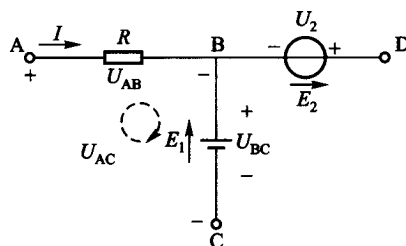


图 1-14 基尔霍夫电压定律的推广应用

据此就可进行电路的计算了。基尔霍夫电压定律不仅适用于闭合电路，也适用于虚拟回路。例如，在图 1-14 中，A、C 两点间从图上看并未闭合，但 A、C 两点间存在电压 U_{AC} ，可假设其构成一个回路 ABCA，也就是虚拟回路。对该回路应用基尔霍夫电压定律，得

$$U_{AC} = U_{AB} + U_{BC}$$

或

$$U_{AC} = IR + E_1$$

应用基尔霍夫电压定律列方程时，应首先在电路图上标明电流、电压或电动势的参考方向及回路绕行方向。因为所列方程中，各项前面的正、负号是由其参考方向和回路绕行方向共同决定的。

下面通过例题介绍应用基尔霍夫定律解题的基本方法。

例 1-6 在图 1-15 中 已知 $E_1=12\text{ V}$, $E_2=8\text{ V}$, $R_1=0.6\ \Omega$, $R_2=0.5\ \Omega$, $R_3=3\ \Omega$ 求各支路的电流。

解 首先在图中标明各电流和电动势的参考方向及回路绕行方向。因为要取关联参考方向，故电压参考方向不必标出。要求三个未知量 I_1 、 I_2 和 I_3 ，需列出三个独立方程。根据 KCL 有对节点 a 有

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

对节点 b 有 $I_3 - I_1 - I_2 = 0$ (2)

以上两个方程中，只有一个是独立的。如果电路中有 n 个节点，只能列出 $(n-1)$ 个独立的电流方程。另外两个方程可由回路电压定律列出：

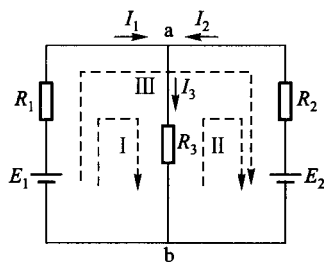


图 1-15 例 1-6 图

回路 I $E_1 = I_1 R_1 + I_3 R_3$ (3)

回路 II $I_3 R_3 + I_2 R_2 = E_2$ (4)

回路 III $E_1 - E_2 = I_1 R_1 - I_2 R_2$ (5)

以上三个回路电压方程中，只有两个是独立的，如，式 (3) 减去式 (4) 可得式 (5)。方程是否独立和回路的选取有关。要使方程独立，回路中至少要有一条新的支路。一般来说，一个电路能列出的独立电压方程数等于其网孔数 m 。本例中有两个网孔，故可列出两个独立的电压方程。

将已知数代入三个方程 (1)、(3)、(4) 中 可得

$$\begin{aligned} I_1 + I_2 - I_3 &= 0 \\ 12\text{ V} &= 0.6 I_1 + 3 I_3 \\ 3 I_3 + 0.5 I_2 &= 8\text{ V} \end{aligned}$$

联立求解，可得

$$I_1 = 5\text{ A} \quad I_2 = -2\text{ A} \quad I_3 = 3\text{ A}$$

本题是以支路电流为未知量，直接应用基尔霍夫电流和电压定律求解，称为支路电流法，它是复杂电路最基本的计算方法。本例中有三个支路，用支路电流法求解需列出三个独立方程联立求解。如果再有更多个支路，则需列出更多个独立方程联立求解。方程数多，联立求解会很烦琐。如果有一电路的支路较多，但只有两个节点，则可以用节点电压法求解：先求出两节点之间的电压 U_{AB} (称为节点电压) 然后利用 KVL 再求各支路的电流，这种方法称为节点电压法。下面通过具体例题介绍上述方法。

例 1-7 试用节点电压法计算图 1-16 中各支路的电流。已知 $E_1=16\text{ V}$, $E_2=8\text{ V}$, $E_3=4\text{ V}$, $R_1=R_2=R_3=R_4=4\ \Omega$.

解 把图 1-16(a) 改画为图 1-16(b)。可以看出，每一个支路都可以与节点电压 U_{AB} 构成虚拟回路。在 I、II、III、IV 回路中分别应用 KVL 在图示参考方向下 可得

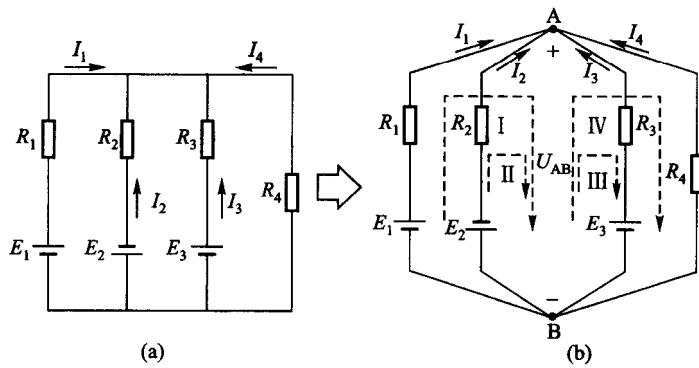


图 1-16 例 1-7 图

$$\left. \begin{aligned}
 E_1 &= I_1 R_1 + U_{AB} & I_1 &= \frac{E_1 - U_{AB}}{R_1} \\
 -E_2 &= I_2 R_2 + U_{AB} & I_2 &= \frac{-E_2 - U_{AB}}{R_2} \\
 U_{AB} &= -I_3 R_3 + E_3 & I_3 &= \frac{E_3 - U_{AB}}{R_3} \\
 U_{AB} &= -I_4 R_4 & I_4 &= -\frac{U_{AB}}{R_4}
 \end{aligned} \right\} \quad (1-24)$$

应用 KCL 于节点 A, 可得

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

将式 (1-24) 中的 $I_1 \sim I_4$ 代入上式, 可得

$$\frac{E_1 - U_{AB}}{R_1} + \frac{-E_2 - U_{AB}}{R_2} + \frac{E_3 - U_{AB}}{R_3} - \frac{U_{AB}}{R_4} = 0$$

上式整理后, 可得出节点电压的计算式为

$$U_{AB} = \frac{\frac{E_1}{R_1} - \frac{E_2}{R_2} + \frac{E_3}{R_3}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}} = \frac{\sum \frac{E}{R}}{\sum \frac{1}{R}} \quad (1-25)$$

把 $E_1 = 16 \text{ V}$, $E_2 = 8 \text{ V}$, $E_3 = 4 \text{ V}$, $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 4 \Omega$ 代入上式 可得

$$U_{AB} = 3 \text{ V}$$

代入式 (1-24) 中, 可求出

$$I_1 = 3.25 \text{ A} \quad I_2 = -2.75 \text{ A} \quad I_3 = 0.25 \text{ A} \quad I_4 = -0.75 \text{ A}$$

这种方法避免了联立求解的麻烦, 是很方便的一种计算方法。注意上面的节点电压计算式中, 分母各项总为正值, 分子各项可正可负, 当电动势的参考方向与节点电压的参考方向相反时取正值, 相同时取负值。用节点电压法解题时, 式 (1-24) 和式 (1-25) 可作为公式直接使用。