

高等学校教材

电路原理

浙江大学

范承志
江传桂
孙士乾

编

机械工业出版社
China Machine Press

高等学校教材

电路原理

范承志 江传桂 孙士乾 编
周庭阳 主审

机械工业出版社



全书共分十二章,内容为直流电路的基本概念和基本定律,网络的基本计算方法和定理,正弦交流电路,谐振互感及三相交流电路,双口网络,非正弦电路分析,网络的矩阵方程、过渡过程的经典解法,拉普拉斯变换、卷积积分和状态方程,非线性电路,分布参数电路,以及用MATLAB作电路计算。

本书每章均附有习题,书末有习题答案。

本书可作为高校电类各专业本科学生电路课程的教材,也可作为非电类专业高年级学生、研究生及教师的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电路原理/范承志等编. —北京:机械工业出版社, 2001.5

高等学校教材

ISBN 7-111-08491-8

I. 电... II. 范... III. 直流电路-电路理论-高等学校-教材
IV. TM131.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第030644号

机械工业出版社(北京市百万庄大街2号 邮政编码100037)

责任编辑:韩清 王保家 版式设计:张世琴 责任校对:张媛

封面设计:姚毅 责任印制:陈

北京机工印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行

2001年7月第1版·第1次印刷

1000mm×1400mm B5·15.5印张·604千字

0 001—5 000册

定价:35.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010) 68993821、68326677-2527

前 言

本书为高校电类本科学生的电路课程教材，也可作为非电类高年级学生、研究生和教师的参考书。本书内容符合教育部电路电磁场信号系统课程指导小组制定的电路原理课程教学大纲的要求。

本书编者所在的教研室近年来已编写了五套电路课程的教材（见参考文献），这些教材各具特色，在教学中取得了较好的效果。我们在编写本教材过程中，吸收了以上教材的优点，并结合自身的教学实践经验，力求做到内容精炼、论证严谨、重点突出、强调基本概念、基本定理和基本计算方法。

本书遵循从简到繁、从易到难的原则，在体系上采用先静态（直流电路分析），后稳态（正弦和非正弦周期信号电路），再动态（过渡过程分析）的安排，力求使难点分散，便于教学。网络定理安排在直流静态中讲授，在正弦稳态分析中集中精力讲述复数（相量）的概念。由于过渡过程中的经典法、运算法需要用到直流、交流稳态中许多概念，故放在其后是合适的。非线性电路和分布参数电路两章则安排在后面章节。最后一章讲述电路的计算机辅助分析问题，初步介绍用MATLAB软件来分析计算电路的稳态、动态和非线性问题。

本书第一、二、五、八、九、十、十一、十二章由江传桂和孙士乾执笔，第三、四、六、七章和第十二章的一部分由范承志执笔。全书承浙江大学周庭阳教授仔细审阅，并提出许多宝贵的意见，谨致以衷心的感谢。

由于编者水平有限，缺点和错误在所难免，希望读者给予批评指正。

编 者

2000年6月于杭州

目 录

前言

第一章 直流电路的基本概念

和基本定律 1

第一节 直流电路中的物理模型 ——电路元件 1

第二节 电流、电压的参考方向、 功率 7

第三节 基尔霍夫定律和支路电 流法 10

第四节 电压源和电流源间的 等效 14

第五节 无源一端口网络的化简 16

第六节 网络图论的概念 20

第七节 拓扑方程的独立性和 2b 方法 23

习题一 25

第二章 网络的基本计算方法

和定理 30

第一节 网孔电流法（网孔法） 30

第二节 回路电流法（回路法） 33

第三节 节点电压法（节点法） 37

第四节 改进节点法 41

第五节 叠加定理 42

第六节 替代定理 46

第七节 戴维南定理和诺顿定理 47

第八节 特勒根定理 53

第九节 互易定理 56

第十节 电源的移动 59

第十一节 增量网络法 61

第十二节 灵敏度计算 63

习题二 67

附录 2-1 定理：网孔数 = 支路数

—（节点数-1） 71

附录 2-2 用节点电压法推导 Δ -Y 变换公式 71

附录 2-3 在复杂线性网络中叠加定 理的证明 72

第三章 正弦交流电路 75

第一节 正弦交流电量的基本概念 75

第二节 周期交流电量的有效值 78

第三节 正弦交流电的相量表示 79

第四节 正弦交流电路中的电阻 元件 82

第五节 正弦交流电路中的电感 元件 83

第六节 正弦交流电路中的电容 元件 85

第七节 基尔霍夫定律的相量 形式 88

第八节 正弦交流电路的阻抗、 导纳及等效转换 90

第九节 正弦电路的功率计算 95

第十节 复杂正弦交流电路的 计算 103

习题三 108

第四章 谐振、互感及三相交流 电路 113

第一节 电路的谐振现象分析 113

第二节 互感耦合电路 119

第三节 对称三相正弦交流电路 133

第四节 不对称三相电路概念 140

第五节 三相电路的功率及测量 方法 141

习题四 145

第五章 双口网络 149

第一节	双口网络概述	149	第六节	节点电压方程	214
第二节	双口网络的开路阻抗 矩阵	151	第七节	回路电流方程	222
第三节	双口网络的短路导纳 矩阵	154	第八节	割集电压方程	224
第四节	双口网络的混合参数 矩阵	158	习题七		225
第五节	双口网络的传输参数 矩阵	161	第八章 过渡过程的经典解法 ...	228	
第六节	双口网络矩阵参数的 换算	163	第一节	概述	228
第七节	双口网络的等效电路	165	第二节	换路定律和初始条件	229
第八节	双口网络的连接	167	第三节	RL 电路的过渡过程	233
第九节	运算放大器	172	第四节	RC 电路的过渡过程	241
第十节	回转器	174	第五节	全响应、零输入响应和零 状态响应间的关系	248
第十一节	负阻抗变换器	177	第六节	阶跃响应和冲激响应	249
习题五		178	第七节	RLC 电路的过渡过程： 零输入响应	254
第六章 非正弦周期电路分析 ...	183		第八节	RLC 电路的过渡过程： 冲激响应、阶跃响应和全 响应	260
第一节	非正弦周期信号的傅里叶 级数分解	183	第九节	用经典法求解复杂电路的 过渡过程	267
第二节	非正弦周期信号电路的 稳态计算	188	习题八		269
第三节	对称三相电路中的高次 谐波	193	第九章 拉普拉斯变换、卷积 积分和状态方程	274	
第四节	非周期信号的傅里叶 变换	197	第一节	拉氏变换的定义	274
第五节	电路的频率特性分析	198	第二节	拉氏变换的若干定理	275
习题六		201	第三节	有理分式的展开定理	279
第七章 网络矩阵方程	205		第四节	用拉氏变换方法分析动态 线性电路	282
第一节	概述	205	第五节	网络函数及其零极点	292
第二节	关联矩阵与节点电流 定律	205	第六节	网络函数与各种响应的 关系	298
第三节	回路矩阵与回路电压 定律	208	第七节	冲激函数电源及其时间积分 的响应	306
第四节	割集矩阵与节点电流 定律	210	第八节	卷积积分、任意输入波形的 过渡过程	310
第五节	关联矩阵、回路矩阵和 割集矩阵的关系	212	第九节	状态方程的列写	314
			第十节	状态方程的求解	320
			习题九		323
			第十章 非线性电路	327	

第一节	概述	327	第十节	无损线的暂态分析	396
第二节	直流非线性电阻电路	330	第十一节	无损线边界上的反射 ...	399
第三节	分段线性化模型	334	习题十一		404
第四节	非线性正弦稳态电路	339	第十二章 利用 MATLAB 作电		
第五节	一阶非线性动态电路的过渡 过程	344	路计算	406	
第六节	非线性动态电路的状态方程、 平衡状态和稳定性	347	第一节	概述	406
第七节	非自主网络中的小信号 分析	356	第二节	M 文件的建立和使用	408
第八节	小信号分析与稳定性分析的 关系	360	第三节	绘图功能	410
第九节	相平面法	363	第四节	input 和 ginput 语句	412
第十节	用欧拉法绘制相迹	366	第五节	电路的传递函数及其频率 特性	414
习题十		369	第六节	非线性直流电路解法	415
第十一章 分布参数电路	375	第七节	多项式求根和有理分式的 展开	420	
第一节	概述	375	第八节	非正弦电路的计算	424
第二节	均匀传输线方程	375	第九节	过渡过程的时域计算	432
第三节	均匀传输线正弦稳态 分析	376	第十节	状态方程的求解	444
第四节	行波	382	第十一节	节点电压矩阵方程	452
第五节	无反射长线	384	第十二节	均匀传输线方程	456
第六节	无畸变长线	386	第十三节	输入、输出数据文件的 直接建立	457
第七节	无损耗长线	387	习题十二		464
第八节	无损长线的某些应用	392	习题答案	466	
第九节	长线作为双口网络	395	中英文电路词汇对照	483	
			参考文献	489	

第一章 直流电路的基本概念和基本定律

第一节 直流电路中的物理模型 ——电路元件

一、实际电路及其理想模型

电路是由若干电气设备或器件组成的总体，通常其间有电流通路。例如手电筒就是一个最简单的电路，它由电池、灯泡和导电的电筒构成。电池、发电机等提供电能，称为电源，电源将其他形式的能量（如化学能、机械能、热能、光能等）转化为电能；灯泡、电动机等消耗电能，称为负载，负载将电能转化为其他形式的能量（如热能、光能、机械能、化学能等）。

电路在电工应用中起着输送电能和处理电信号的作用。在电力系统、电子及通信设备、自动控制系统、计算机系统以及其他各行各业中都有大量的各种各样的电路在运行。

有些电路很复杂，如超高压电力网络、大规模集成电路和高级生物的神经网络等。复杂的电路常称为网络，本书对电路、网络不予区分。

为便于分析、综合、设计网络，需要将其中的各部件按其主要的物理性质加以简化，建立它们的物理（或数学）模型。一些基本的物理模型常称为电路元件，例如电阻元件、电感元件、电容元件、电源元件等。由这些理想化了的电路元件组成的电网络模型当然也是理想化的，它们只是实际电路的一种近似。如何对各种实际部件建模，需要丰富的电路知识和专业知识。按照实用上精确度的要求，并便于分析计算，一个实际电路可简化为若干个从简单到复杂的理想电路模型。例如一个电感线圈在直流稳定状态下，可抽象成为一个电阻；在交流低频情况下，可抽象成为电阻和电感的串联；在高频情况下，还需考虑线圈的匝间分布电容和层间分布电容，此时可抽象成为电阻和电感串联后再与电容并联；在超高频情况下，一个实际电感线圈甚至可以抽象成为电容链形网络，完全忽略其中的电阻（消耗热能）和电感（储存磁场能）的影响，只考虑电场能的影响即可。

电池、直流发电机等在电路中形成的电流、电压在稳定状态下不随时间改变，该电路称为直流电路。某元件中的电流是单位时间流过的电量（电荷），单位是安培（1安培=1库仑/秒），符号为A。对于很大的电流用千安（kA）表示，对于很小的电流用毫安（mA）、微安（ μA ）表示，它们的换算关系为

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

直流电流的符号用 I 表示。

电路中某两点 a 、 b 间的电压是指从点 a 到点 b 的电压降落（电位降落），单位是伏特（1 伏特 = 1 焦耳/库仑），符号为 V。对于很高的电压用千伏（kV）、兆伏（MV）表示，对于很小的电压用毫伏（mV）、微伏（ μ V）表示，它们的换算关系为

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

直流电压的符号用 U 表示（请注意不要写成 u 或 v ，以免和正弦电路中的符号相混淆）。

电路元件可分为无源元件和有源元件，直流电路中无源元件就是电阻，有源元件有独立电源和受控电源。

二、电阻元件

这是一个只表征有热能损耗的二端电路元件，符号如图 1-1-1a 所示。线性电阻元件的端电压 U 和电流 I 的关系（简称伏安特性）为一过原点的直线，见图 1-1-1b，满足欧姆定律，即两

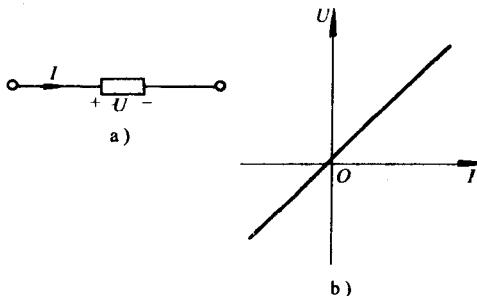


图 1-1-1

端电压 U 与通过它的电流 I 成正比，其特性方程为

$$U=RI, \text{ 或 } I=GU \quad (1-1-1)$$

式中，比例系数 R 称为电阻； G 称为电导， $G=1/R$ 。当电压、电流的单位分别是伏特（V）和安培（A）时，电阻 R 的单位是欧姆，符号为 Ω ；电导 G 的单位是西门子，符号为 S。

式（1-1-1）是表征欧姆定律的数学式子，称为电阻元件的数学模型。

从线性代数的观点来看，若一个函数 $U=f(I)$ 是线性的，它应满足齐次性和可加性。

齐次性的定义是：对任意常数 a ，当自变量乘以 a ，则其函数也乘以 a ，即

$$f(aI)=af(I) \quad (1-1-2)$$

显然，式（1-1-1）中 $U=RI$ 满足齐次性，因为 $R(aI)=a(RI)$ 。

可加性的定义是：两个自变量相加的函数等于两个自变量的函数相加，即

$$f(I_1+I_2)=f(I_1)+f(I_2) \quad (1-1-3)$$

显然式（1-1-1）中 $U=RI$ 满足可加性，因为 $R(I_1+I_2)=RI_1+RI_2$ 。

齐次性、可加性可合并写成一个线性公式。设 a_1 、 a_2 为任意常数，则线性函数满足

$$f(a_1I_1+a_2I_2)=f(a_1I_1)+f(a_2I_2)=a_1f(I_1)+a_2f(I_2) \quad (1-1-4)$$

显然，在线性电阻上，满足欧姆定律，式（1-1-1）表示 U 是 I 的线性函数，因

为

$$R(a_1 I_1 + a_2 I_2) = a_1 (R I_1) + a_2 (R I_2) \quad (1-1-5)$$

所有的实际电阻器，如灯泡、电炉丝、滑线电阻、甚至包括炭膜电阻、金属膜电阻、线绕电阻等，其上的电压和电流关系（伏安特性）并不是严格的直线关系，但在一定的电压、电流范围内，实用上作为线性电阻处理，不致造成显著的误差。

从能量的观点来说，电阻反映了电能的消耗，转化为热能。电阻中消耗的功率根据焦耳-楞次定律为

$$P = UI = RI^2 = GU^2 \quad (1-1-6)$$

功率的单位是瓦特，简称为 W。

直流电路中电阻消耗的能量为（在时间间隔 t 内）

$$W = Pt = RI^2 t \quad (1-1-7)$$

能量的单位是焦耳 (J)，也用千瓦时 ($\text{kW} \cdot \text{h}$) 表示，就是通常电度表的计量单位。

$$1 \text{ 度} = 1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 1000 \times 3600 \text{ J} = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$$

三、独立电源元件

这是表征电源的理想化的二端（也称一端口）电路元件，它们有两种：独立电压源和独立电流源。

（一）独立电压源

又称定压源。图 1-1-2a、b、c 示出了独立电压源的三种符号，图 a 为我国教材常用的符号，图 b 为英美教材常用的符号，图 c 为电池组的符号。本书采用图 a 的符号， U_s 代表电压源从正极到负极有 U_s 伏的电压降落；也可用 E_s 代替 U_s ，表示从负极到正极有 E_s 伏的电位升高。

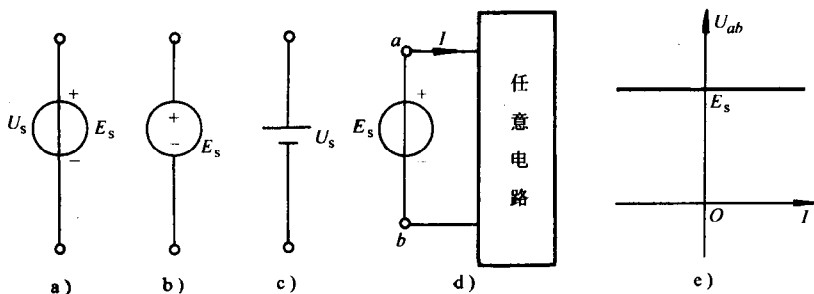


图 1-1-2

独立电压源 U_s 提供确定的电压。如图 1-1-2d 所示，设 $E_s = 2\text{V}$ ，则电压 U_{ab} 始终是 2V，与右方任意电路的状况无关， E_s 中的电流 I 随右方的电路状况改变而改变，如果后者是一个电阻 R ，则 $I = E_s / R$ 。

E_s 的伏安特性如图 1-1-2e 所示, 是一条平行于 I 轴、截距为 E_s 的直线。从图 e 中看到, 不管电流是正值或负值, U_{ab} 始终是 E_s 。

注意非零值的电压源不可短路, 因为如果图 d 的右方短路了, 要求 $U_{ab}=0$, 但从左方看 U_{ab} 又必须等于 E_s , 造成了矛盾, 故应排除这种情况, 就是说 E_s 这一模型的适用范围是有限的。其实, 任何物理 (或数学) 模型的适用范围都不是无限的。

当 $E_s=0$ 时, 电压 $U_{ab}=0$, 相当于 ab 的左方短路, 其在 $U-I$ 平面上的伏安特性与 I 轴重合。

必需指出, 这里的 E_s 是理想电压源, 实际电源 (如发电机、电池等) 的特性将在本章第四节讨论。

(二) 独立电流源

又称定流源。图 1-1-3a、b 示出了独立电流源的两种符号, 图 a 为我国教材中常用符号, 图 b 为英美教材中常用符号。

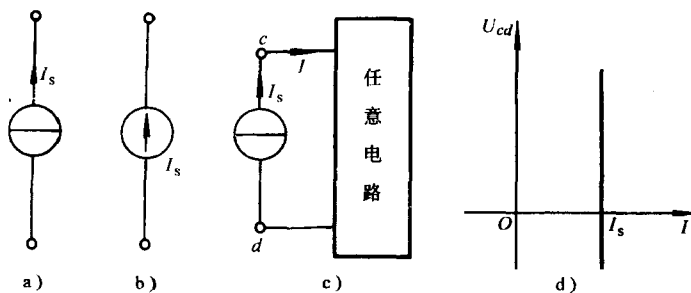


图 1-1-3

独立电流源 I_s 提供确定的电流。如图 1-1-3c 所示, 设 $I_s=3\text{A}$, 则流经 I_s 中的电流始终是 3A , 与右方任意电路的情况无关, 其上的电压 U_{cd} 随右方的电路情况改变而改变, 如果后者是一个电阻 R , 则 $U_{cd}=RI_s$ 。

I_s 的伏安特性如图 1-1-3d 所示, 是一条平行于 U 轴、与 I 轴交于 I_s 的直线。从图 d 中看出, 不管电压是正值或负值, I_s 始终不变。

注意非零值的电流源不可开路。当 $I_s=0$ 时, 无电流流经电流源, 相当于 cd 的左方开路, 其在 $U-I$ 平面上的伏安特性与 U 轴重合。

I_s 是理想电流源。当一个实际电源的内阻远比外阻大的场合, 就可看成 I_s , 这将在本章第四节讨论, 电子管、晶体管的输出特性和由运算放大器组成的电流反馈电路, 在一定条件下都可近似地用理想电流源表示。

例 1-1-1 图 1-1-4 所示电路, 电压源 $U_s=3\text{V}$, 电流源 $I_s=4\text{A}$, $R_1=1\Omega$, $R_2=2\Omega$, 试求 U_s 中的电流和 I_s 上的电压?

$$\text{解 } I_1 = \frac{U_s}{R_1} = \frac{3}{1} \text{ A} = 3 \text{ A}, I_2 = I_1 - I_s = (3 - 4) \text{ A} = -1 \text{ A}$$

$$U_{ab} = U_{ac} + U_{cb} = R_2 I_s + U_s = (2 \times 4 + 3) \text{ V} = 11 \text{ V}$$

讨论：(1) 此题中 $I_2 = -1 \text{ A}$ ，说明 U_s 的实际电流是从正极流向负极，这是因为右边有 4 A 电流源，其作用超过了 U_s 的作用，结果使 I_2 成为负值；

(2) 此题中 R_1 与 U_s 并联，如果将 R_1 断开，并不影响 $U_{cb} = 3 \text{ V}$ ，故也不影响 U_s 右方的电路，例如 U_{ab} 仍为 11 V 。其实此 R_1 可改为任意值（但不可为 0Ω ），不会影响右方电路，它只影响 U_s 中的电流。

同理， R_2 与 I_s 串联，如果将 R_2 短接，并不影响 $I_{ac} = 4 \text{ A}$ ，故也不影响 cb 左方的电路，例如 I_2 仍是一 1 A 。其实，此 2Ω 可改为任意值（但不可为 ∞ ），不会影响左方电路，它只影响 R_2 上的电压。

(3) 推广讨论 (2)：在图 1-1-5a 中， R_1 与电压源 U_s 并联，为求右方电路中的电压、电流，可将 R_1 断开；同理，在图 1-1-5b 中， R_2 与电流源 I_s 串联，为求右方电路中的电压、电流，可将 R_2 短接。

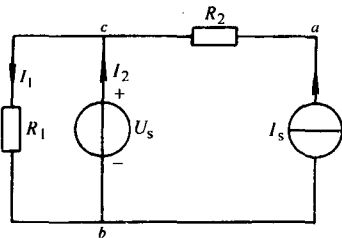


图 1-1-4

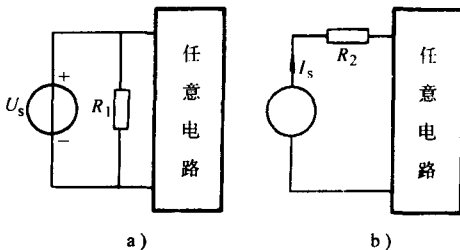


图 1-1-5

四、受控电源元件

晶体管、运算放大器等实际元器件的等效电路中含有受控源。这类元件与独立电源不同，它有两个端口（四个端子），如图 1-1-6 所示。受控源有四种，即电

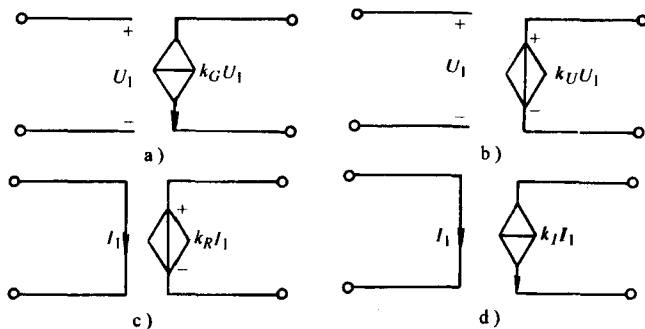


图 1-1-6

压控制电流源 (VCCS)、电压控制电压源 (VCVS)、电流控制电压源 (CCVS) 和电流控制电流源 (CCCS)。例如图 a 中, $k_G U_1$ 是压控电流源, 控制变量是电压 U_1 , k_G 是控制系数, 其量纲是 S, 因为它是电流对电压的比值; 图 c 中的 $k_R I_1$ 是电流控制电压源, 控制变量是 I_1 , k_R 是控制系数, 其量纲是 Ω ; 图 b 和图 d 中的控制系数 k_U 和 k_I , 无量纲。

本章只讨论控制系数都是常值的受控源, 称为线性受控源。

直流线性电阻电路就是由线性电阻、直流独立电源和线性受控源组成的电路。

例 1-1-2 图 1-1-7 电路中含有一个受控源 CCCS, 其控制系数为 k_I , 试求当 $k_I=0, 1, -2, -1$ 时, 输入端的等效电阻 $R_i=U_s/I_1$ 。

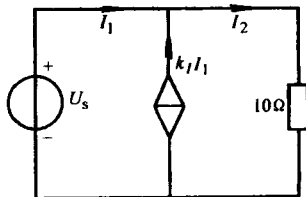


图 1-1-7

解 (1) 当 $k_I=0$ 时, 相当于 CCCS 开路, 显然 $I_1=I_2$, 故 $R_i=U_s/I_1=U_s/I_2=10\Omega$;

(2) 当 $k_I \neq 0$ 时, $I_2=U_s/10\Omega$, $I_1+k_I I_1=I_2$,

$$\text{故 } I_1 = \frac{I_2}{1+k_I} = \frac{U_s}{(1+k_I) \times 10\Omega} \quad (1-1-8)$$

$$\text{输入电阻 } R_i = \frac{U_s}{I_1} = (1+k_I) \times 10\Omega$$

当 $k_I=1$ 时, 从上式得 $R_i=20\Omega$;

当 $k_I=-2$ 时 (实际上就是 CCCS 的实际流向从上向下), $R_i=-10\Omega$ 。就是说, 此时的输入电阻成为负电阻。

由此可见, 改变控制系数 k_I 的值, 就可改变输入电阻 R_i 的值, 甚至可使其成为负值。正值电阻消耗功率, 而负值电阻发出功率。

当 $k_I=-1$ 时, 式 (1-1-8) 不再成立, 即本例的电路模型不适用于这种情况。在 $k_I=-1$ 时, 需要更复杂一些的电路模型。

例 1-1-3 图 1-1-8 所示电路, 电流源 $I_s=1A$, $R_1=2\Omega$, $k_G U_1$ 是 VCCS, $k_G=3S$, $R_2=4\Omega$, $k_U U_2$ 是 VCVS, $k_U=5$, $R_3=6\Omega$, 求 U_1 、 U_2 、 I_3 。

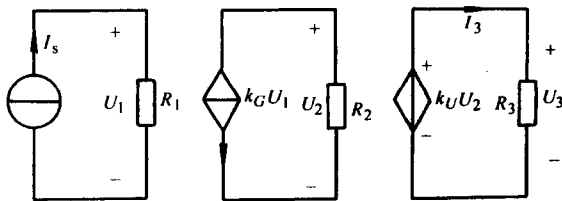


图 1-1-8

解 $U_1 = R_1 I_s = 2\text{V}$, $k_C U_1 = 3 \times 2\text{A} = 6\text{A}$, $U_2 = R_2 (k_C U_1) = 24\text{V}$, $U_3 = k_U U_2 = 5 \times 24\text{V} = 120\text{V}$, $I_3 = (120/6)\text{A} = 20\text{A}$ 。

在本例中, 电流源 $I_s = 1\text{A}$, 而负载 R_3 中的电流 $I_3 = 20\text{A}$, 电流比 $I_3/I_s = 20$, 可见电流放大了 20 倍; 再看电压: 电流源的电压 $U_1 = 2\text{V}$, 负载 R_3 的电压 $U_3 = 120\text{V}$, 电压比 $U_3/U_1 = 60$, 可见电压放大了 60 倍。放大的原因是由于受控源的存在。电子管、晶体管、运算放大器能起到电压、电流的放大作用, 就是因为其等效电路中含有受控源。至于这种放大作用的能量来源, 已超出本书讨论的范围, 请参阅电子学有关书籍。

第二节 电流、电压的参考方向、功率

一、电流、电压的参考方向

某段电流的参考方向 (也称正方向) 是任意规定的正电荷运动的方向。如图 1-2-1 所示, 假定 I 的正方向从 A 至 B , 用箭头表示, 或写成 I_{AB} , 如 $I = +2\text{A}$, 表示实际电流 2A 从 A 流至 B ; 又如 $I = -2\text{A}$, 则表示实际电流 2A 从 B 流至 A 。

在电路分析、计算中, 通常不能预知各段电流的实际方向, 故首先需假定各段电流的参考方向, 才能列写与各处电流有关的方程式, 当计算完毕后, 知道了某处电流的代数值 (含正、负号), 依据其参考方向, 就能判断其实际电流的方向和大小了。

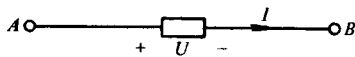


图 1-2-1

同样, 某段电压的参考方向 (正方向) 也是任意规定的电压降落的方向, 用正负号注明 (有时也用箭头表示电压降落)。图 1-2-1 中, 假定 U 的正方向是从 A 到 B , 也可写成 $U_{AB} = U_A - U_B$,



图 1-2-2

即 A 、 B 两点之间的电压是 A 点电位与 B 点电位之差。如 $U = 3\text{V}$, 表示 A 点电位比 B 点高 3V ; 如 $U = -3\text{V}$, 表示 A 点电位比 B 点电位低 3V 。同理, 两点之间的电压也是代数量, 只有知道了它的参考方向和正负号, 才能确定实际上两点电位的高低。

电流、电压的参考方向的重要性可从下例看出。

例 1-2-1 对于一个电阻 R , 如果不给出电流、电压的参考方向, 就写欧姆定律的式子 $U = RI$, 是不够准确的。当图 1-2-2 中电流 I 和电压 U 的参考方向不一致时, 欧姆定律的式子应为 $U = -RI$ 。

例 1-2-2 列写图 1-2-3 电路中 U 、 I 的关系式。

解 图 a: 注意到 U 的正负号 (即它的参考方向), $U = U_{13} = U_{12} + U_{23}$ 。按规定 U 从点 1 降到点 3 为正, 现从点 1 到点 2, 电位升高了, 故 $U_{12} = -E$; 又由欧

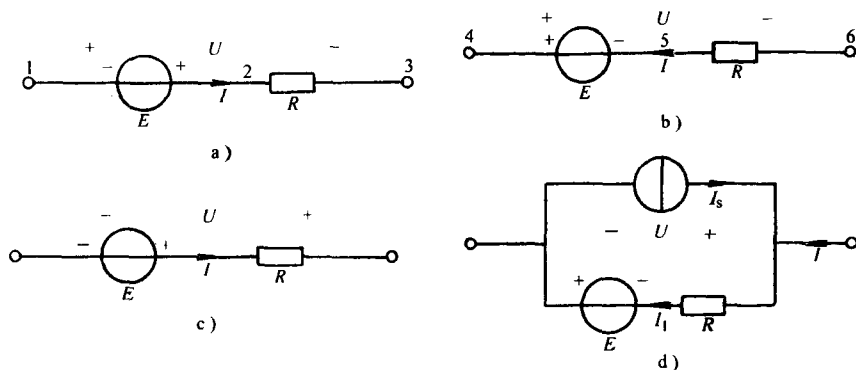


图 1-2-3

姆定律 $U_{23}=RI$ ，注意 I 的参考方向是从点 2 到点 3，故点 2 的电位比点 3 高。最后得 $U=-E+RI$ 。

图 b: $U=U_{46}=U_{45}+U_{56}$ ，从点 4 到点 5，电位降落了，故 $U_{45}=E$ ，从点 5 到点 6，电位升高了，故 $U_{56}=-RI$ 。最后得 $U=E-RI$ 。

同理得

图 c: $U=-RI+E$

图 d: $U=RI_1-E=R(I+I_s)-E$

二、功率

直流电路中某元件的功率 P 是该元件的电压和电流的乘积，即

$$P=UI$$

前已述及，对于 U 、 I ，都要规定其参考方向，不同的 U 、 I 的参考方向，就有不同的 U 、 I 正负号，其乘积（即 P ）的正负号就不同。那么怎样根据 U 、 I 的参考方向和其乘积的正负号，来判断一个元件在实际上是发出功率还是吸收功率呢？

先从一个最简单的电路入手，如图 1-2-4 所示。对于电阻元件 R （图中右方），通常规定其电压 U_2 和电流 I 的参考方向一致，此时，功率 $P_2=U_2I>0$ ，显然它吸收功率。

对于电源元件 E （图中左方），通常规定其电压 U_1 和电流 I 的参考方向不一致，此时功率 $P_1=U_1I>0$ ，显然它发出功率。

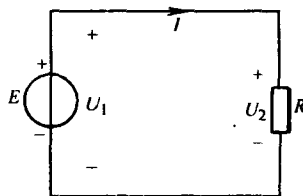


图 1-2-4

将此特例推广到一般情形：当某元件的 U 、 I 参考方向一致，且 $UI>0$ 时，它吸收功率；当其 U 、 I 参考方向相反，且 $UI>0$ 时，它发出功率。

例 1-2-3 判断图 1-2-5 中的网络，是吸收功率还是发出功率。

解 图 1-2-5a 中, N_1 的电压的正方向由 a 至 b , 电流正方向也是由 a 至 b , 参考方向一致, 且 $UI > 0$, 故 N_1 吸收功率;

图 1-2-5b 中, N_2 的 U 、 I 参考方向不一致, 且 $UI < 0$, 故 N_2 吸收功率。

例 1-2-4 利用例 1-1-1 的数据, 求电压源和电流源的功率, 是发出还是吸收功率, 验证功率平衡。

解 已知 $U_{cb} = 3V$, $I_2 = -1A$, 故 $U_{cb}I_2 = -3W$, 电压、电流的参考方向不一致, 乘积为负, 可知电压源吸收功率;

又 $U_{ab} = 11V$, $I_{ba} = 4A$, $U_{ab}I_{ba} = 44W$, 电压、电流的参考方向不一致, 乘积为正, 可知电流源发出功率;

电阻 1Ω 、 2Ω 吸收功率, 吸收的功率分别为 $9W$ 和 $32W$;

验证功率平衡 $44W = 3W + 9W + 32W$

例 1-2-5 图 1-2-6 电路中, 电压源 E_0 和电阻 R_0 恒定, 负载电阻 R 可变, 问 R 为何值时, 它吸收的功率 P 最大, 最大值 $P_{\max} = ?$

解 $I = \frac{E_0}{R_0 + R}$, R 中吸收功率 $P = I^2 R = \frac{E_0^2}{(R_0 + R)^2} R$,

R 改变时, 为求 P 的极值, 令 $\frac{dP}{dR} = 0$, 可得 $R = R_0$, 此时

$\frac{d^2 P}{dR^2} < 0$, 故 P 取极大值, $P_{\max} = \frac{E_0^2}{4R_0}$, 这种情况称为最大功率传输, 此时传输效率 η 为

$$\eta = \frac{\text{负载 } R \text{ 吸收功率}}{\text{电源 } E_0 \text{ 发出功率}} = \frac{P_{\max}}{P_{E_0}} = \frac{E_0^2/4R_0}{E_0 E_0/2R_0} = 50\%$$

在电力系统中, 主要的问题是要提高效率。50% 的效率说明电能损失太大, 是不允许的。

在电信系统中, 常希望获得最大传输功率, 此时称为匹配。而效率往往不是主要矛盾, 因本身的功率就不大, 损失 50% 也不可惜。

大多数电路问题中, 都是已知电源、电阻求各电压、电流和功率, 这是属于正面的问题, 较易求解; 但也有反面的问题, 电路中某些电阻未知, 就不易求解, 请见下例。

例 1-2-6 图 1-2-7 电路中, 已知 $U_s = 10V$, $R_1 = 2\Omega$, R_2 消耗功率 $P_2 = 12W$, 求电流 I 和 R_2 。

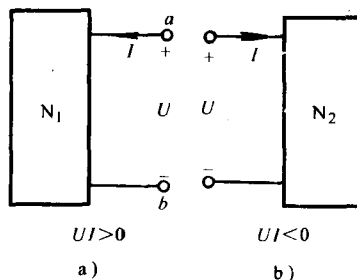


图 1-2-5

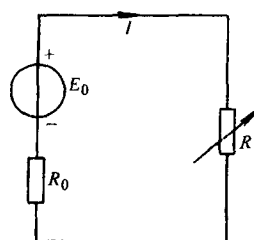


图 1-2-6

解 电路方程 $U_s = (R_1 + R_2) I$, 即

$$10 = (2 + R_2) I \quad (1-2-1)$$

功率 $P_2 = R_2 I^2$, 即

$$12 = R_2 I^2, R_2 = \frac{12}{I^2} \quad (1-2-2)$$

将式 (1-2-2) 代入式 (1-2-1), 得

$$10 = \left(2 + \frac{12}{I^2} \right) I \rightarrow 2I^2 - 10I + 12 = 0$$

解出 $I = 2\text{A}$ 或 3A , 代入式 (1-2-2) 得 $R_2 = 3\Omega$ 或 $(4/3)\Omega$ 。

此题有两组解, 读者可验证其正确性。

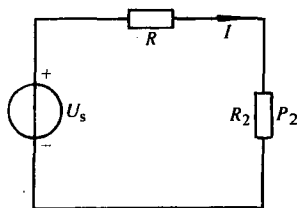


图 1-2-7

第三节 基尔霍夫定律和支路电流法

本节讨论两条基尔霍夫定律, 它们概括了电网络中电压、电流遵循的基本规律。

首先介绍三个名词, 以图 1-3-1 为例。

1. 节点 三根接线 (或以上) 的交点, 如 a 、 b 、 c 点 (有时也将 d 、 e 点作为节点, 即也可规定两根或以上接线的交点作为节点)。本电路有三个节点。

2. 支路 两节点间的串联电路, 如 R_2 ; R_3 ; R_5 ; E_1 , R_1 ; E_4 , R_4 。本电路共有五条支路。

3. 回路 若干支路组成的闭合路径, 如 l_1 、 l_2 、 l_3 。图 1-3-2 中的 l_4 、 l_5 、 l_6 也是回路。

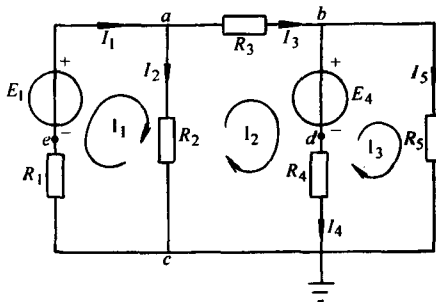


图 1-3-1

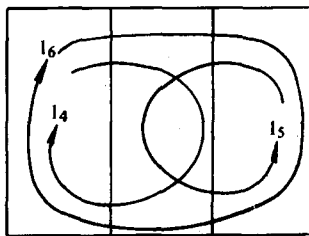


图 1-3-2

熟悉了这三个名词, 就可介绍基尔霍夫定律了。

⊙ 本书后面述及的方程, 在计算过程中如无特殊说明, 均为数值方程。电压、电流、电阻、功率的单位分别是 V、A、 Ω 、W。