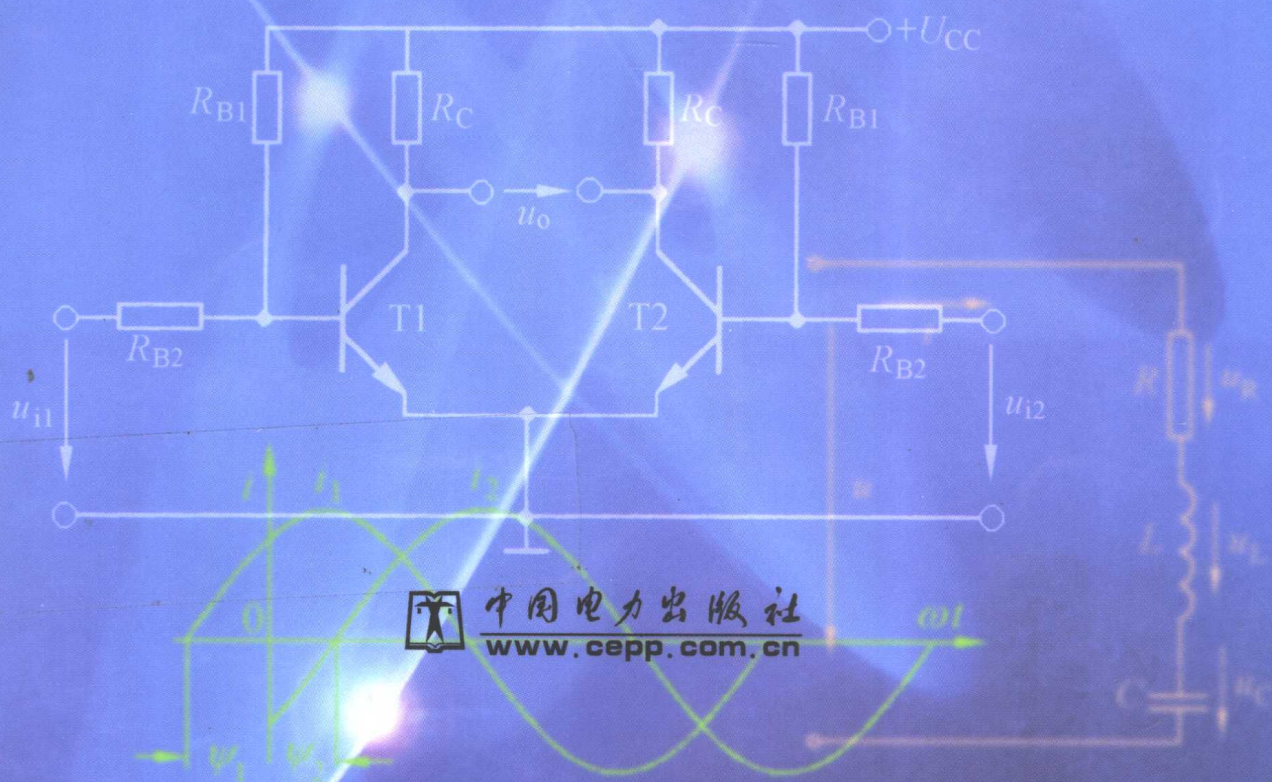


高等学校教材

电工与电子技术

李力 王硕禾 主编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

高等学校教材

电工与电子技术

主编 李 力 王硕禾

参编 魏英静 石彦丛

王小平 杜立强



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书全面系统的论述了电工与电子技术的理论。全书分为八章,第一章到第六章为电工技术部分,内容包括直流电路和交流电路的分析方法、变压器和电动机的工作原理分析及应用、低压电器及继电器触控制系统、建筑电气及安全用电。第七章和第八章为电子技术部分,内容包括模拟电子技术和数字电子技术两部分。其中模拟电子技术包括基本放大电路、集成放大电路和直流稳压电源等部分,数字电子技术包括逻辑门电路分析、组合逻辑电路分析与设计、双稳态触发器的组成、时序逻辑电路分析及555集成定时器的工作原理。每章都配有一定数量的习题。

本书可以作为土木等非电类专业的本专科学学生的教材或教学参考书,也可供有关专业师生和科技人员自学参考。

图书在版编目(CIP)数据

电工与电子技术/李力,王硕禾主编.-北京:中国电力出版社,2001

ISBN 7-5083-0675-9

I. 电… II. ①李…②王… III. ①电工技术②电子技术
IV. ①TM②TN

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第039389号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京地矿印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2001年8月第一版 2001年8月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 14.75印张 359千字

印数0001—5000册 定价34.00元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)



序

电工学是非电专业的一门技术基础课,该课程所涉及的内容对学生毕业后从事的技术工作和科研工作有重要意义。近年来电学领域发展很快,新技术和新器件层出不穷,其应用领域的不断扩大,对各行各业都产生了深远影响。为贯彻教育部倡导的加强学生素质教育的精神,为适应教育部对各门课程大幅度压缩学时的要求,目前很有必要针对土木工程专业学生编写一门少学时的电工学教材。本书就是针对土木工程专业的特点和学生毕业后的实际需要编写的。

本着加强基础、突出重点、适应土木工程专业需要的原则,为及时体现近年来电学领域出现的新技术,本书对传统的电工学内容进行了一定程度的增删。本书不得不对基础内容作适当精简以压缩学时,电路部分以基尔霍夫定律开始,介绍直流电路分析的主要方法和基本定理,强调正弦交流电路分析和三相电路分析,并介绍暂态过程,强调异步电机和继电接触控制,将电工测量内容安排在实验内容中,增加了可编程控制器和交流变频调速内容,为突出土木工程专业特色,还增加了建筑应用电器、建筑电气设计、施工图绘制和现场应用等内容。电子部分进行了一定程度的精简,介绍了分立元件放大电路基本设计方法和运算放大器、直流电源及数字电路基本知识,并要求学生学会组合数字逻辑电路的简单设计方法,以应付后续课程,并为学生在电学领域的继续深造打下基础。

本书力求利用尽可能少的学时阐述清楚电工学的基本内容,并突出土木工程专业的特色,本书虽然从选题、大纲、组织编写都经过了认真调查论证和细致讨论,但本书毕竟仅仅是压缩学时和加强学生素质教育的一种尝试,还需广泛听取广大教师和学生的意见,以便不断改进和完善。

高蒙

2001.2.



前言

本书内容符合国家教育部电工课程指导小组关于“面向 21 世纪电工课程内容要求”，是编者总结多年的教学与实践经验，结合现场要求，为非电类各专业学生编写的《电工与电子技术》教材。内容与学时设置较为合理，适用于不同教学要求的各类学生学习。为配合同学们的学习，本书将多媒体技术引入教材中，专门制作了与教材相配套的多媒体辅助教学光盘，是国内电工类教材中唯一配套有辅助学习光盘的。特别是针对大土木各专业全国结构工程师考试中的电工学部分，给予了相应的教学要求和练习，不仅有利于学生的在校学习，而且适合于学生毕业后职称考试的要求。在保证基础的基础上，增加了可编程控制器、变频器等新技术、新器件的介绍。在结合现场施工技术方面对建筑电气、安全用电等技术进行了重点介绍，以满足现场施工的要求。

本书建议授课学时 70~90 学时，其中实验学时不少于 25%。

本书第一章内容为直流电路和暂态电路分析；第二章为正弦交流电路分析；第三章为变压器和交流异步电动机的工作原理介绍；第四章为低压电器和继电接触控制电路以及 PLC 介绍；第五章为建筑电气知识；第六章为安全用电技术；第七章为模拟电子技术；第八章为数字电子技术。其中，由李力编写第一章，魏英静编写第二章和第三章，王硕禾编写第四章和第六章，杜立强编写第五章，王小平编写第七章，石彦丛编写第八章；最后由李力和王硕禾对全书内容进行了统编；马月辉和王延忠负责全书插图的绘制工作。

高蒙教授对全书进行了严格的审阅，提出了许多宝贵的意见。同时，西安电子科技大学樊来耀教授、中国人民解放军军械工程学院孙履师教授等也认真审阅了书稿并提出了具体意见。在编写过程中本书还得到了石家庄铁道学院教务处、成教学院、电气系领导的大力支持和帮助，在此一并表示衷心的感谢。由于编者水平有限，书中难免有许多错误和疏漏，恳请各位读者批评指正。

编者

2001 年 6 月 12 日

目 录

序

前言

第一章 电路分析方法	1
第一节 电路模型	1
第二节 基尔霍夫定律与支路电流法	12
第三节 结点电压法与电位的计算	17
第四节 叠加原理	19
第五节 戴维宁定理	21
第六节 一阶电路暂态过程	24
习题	34
第二章 正弦交流电路	39
第一节 正弦交流电的基本概念	39
第二节 正弦量的表示方法	42
第三节 单一参数电路元件的交流电路	45
第四节 电阻、电感与电容元件串联的正弦交流电路	51
第五节 阻抗的串联与并联	57
第六节 并联谐振及功率因数的提高	59
第七节 三相交流电路	63
习题	72
第三章 变压器与三相异步电动机	76
第一节 变压器	76
第二节 三相异步电动机的构造	85
第三节 三相异步电动机的工作原理	87
第四节 三相异步电动机的电路分析及工作特性	91
第五节 三相异步电动机的起动	97
第六节 三相异步电动机的制动	101
第七节 三相异步电动机的调速	102

第八节 异步电动机的铭牌数据	103
习题	105
第四章 低压电器与继电接触控制	107
第一节 常用低压控制电器	107
第二节 异步电动机继电接触控制电路	115
第三节 鼠笼式异步电动机的正、反转控制线路	118
第四节 行程控制	120
第五节 可编程序控制器简介	121
习题	124
第五章 建筑电气	126
第一节 供电系统及建筑工程供电系统	126
第二节 电气识图	131
第三节 建筑施工现场供电	138
第四节 建筑电气线路施工技术	147
习题	150
第六章 安全用电技术	152
第一节 触电事故及其预防	152
第二节 安全用电技术	153
第三节 建筑工程防雷系统	156
第四节 漏电保护技术	160
习题	162
第七章 模拟电子技术	163
第一节 半导体二极管	163
第二节 半导体三极管	168
第三节 基本放大电路	172
第四节 集成运算放大器	188
第五节 直流电源	195
习题	199
第八章 数字电子技术	204
第一节 逻辑门电路	204



第二节 组合逻辑电路分析与设计	208
第三节 双稳态触发器	211
第四节 时序逻辑电路	214
第五节 555 集成定时器	217
习题	219
附录	223



第一章 电路分析方法

第一节 电路模型

在日常工作和生活中,人们经常会用到各种电器设备,这些电器设备具有各种不同的功能,而这些功能是通过由电器元件构成的实际电路来实现的。在分析和计算实际电路时,需要将实际的电器元件抽象为具有某种电磁特性的理想模型,进而将实际电路简化为由理想模型构成的电路,以便于分析和计算。

一、电路计算中的参考方向与实际方向

在电路的计算中,电压和电流的方向有实际方向和参考方向之分。在电场中,带正电的粒子(正电荷)在电场的作用下从高电位向低电位移动,而带负电的粒子(负电荷)在电场的作用下从低电位向高电位移动,这些带电粒子的定向移动就形成了电流。通常规定正电荷的移动方向为电流的方向(实际方向)。规定电压的方向为从高电位端指向低电位端,即电动势降低的方向。电源电动势的方向为在电源内部从低电位端指向高电位端,即电动势升高的方向。当已知电路中各点的电位时,就可以确定电流、电压和电源电动势的实际方向。但在实际计算中,除电源外往往无法预先确定电路中各点的电位,因此,也就无法预先确定电流和电压的实际方向。为此可以先假设一个电流的方向,这个方向是人为设定的方向,称为电流的参考方向。当电流的参考方向确定之后,就可以相应确定电压的参考方向了。

当电压与电流的参考方向一致时,称电压与电流为关联参考方向,如图 1-1 所示;当电压与电流的参考方向相反时,称电压与电流为非关联的参考方向。

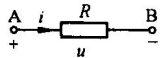


图 1-1 电阻的电路模型

当实际方向与参考方向一致时,电压与电流的值为正值,当实际方向与参考方向相反时,电压与电流的值为负值。在实际计算中,先标定电压与电流的参考方向,在此参考方向下计算电压与电流的值,当计算的结果为正值时,说明实际方向与参考方向一致;当计算的结果为负值时,说明实际方向与参考方向相反。这样,根据电压与电流的参考方向和正、负值,就可以确定电压与电流的实际方向。

二、电阻元件

实际电器元件的每一种电磁特性,都可以用一种理想电路元件模型模拟。例如,任何一种导体都有电阻,但当所考虑的电路中的电阻远大于导线电阻时,就可以把导线电阻忽略不计,认为导线电阻为零。这样就得到了“理想导线”的模型,即电阻为零的导线。在一定的条件下,可定义出几种元件的理想电路模型,以反映实际电器元件的某些电磁特性。由理想电路元件构成的电路模型简称为电路,在电路图中,理想电路元件用规定的电路符号表示。

实际用电设备中的电阻器、白炽灯、电炉等都具有一个共同特性,即可以将电能不可逆地转换为其他形式的能,这类用电设备的特性在电路中可以用电阻元件模型模拟。电阻元件



的电路符号如图 1-1 所示。在电阻元件两端加上电压后,电阻中有电流流过。电路元件两端的电压与流过元件的电流的关系式称为该元件的伏安特性。如图 1-1 所示,当电压 u 与电流 i 的方向为关联参考方向时,电阻满足欧姆定律

$$u = Ri \quad (1-1)$$

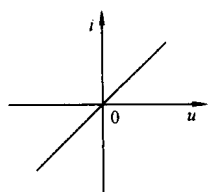


图 1-2 电阻的伏安特性曲线

若比例系数 R 为常数,则该电阻称为线性电阻。由式 (1-1) 得到电阻的伏安特性曲线如图 1-2 所示。由图可知,线性电阻元件的电压与电流成正比。

当电压 u 的单位为 1V,电流 i 的单位为 1A 时,电阻 R 的单位为 1Ω 。

$$1\text{k}\Omega = 10^3\Omega, 1\text{M}\Omega = 10^6\Omega$$

令电阻的倒数为电导,电导用 G 表示

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-2)$$

电导的单位为 S。

在关联参考方向下,电阻的功率为

$$p = ui = \frac{u^2}{R} = i^2 R \quad (1-3)$$

由上式可知,电阻的功率 $p \geq 0$,说明电阻恒消耗功率。

三、电容元件

实际电路中的电容器是一种能够储存电荷或电场能量的器件,反映电容器的这种电特性的电路模型即为电容元件。它的电路符号如图 1-3 所示。电容元件储存的电荷量 q 与电容元件两端所加电压 u 成正比

$$q = Cu \quad (1-4)$$

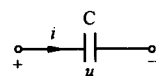


图 1-3 电容的电路符号

比例系数 C 称为电容。对于线性电容,比例系数 C 为常数。当电压的单位为 1V,电荷的单位为 1C 时,电容的单位为 1F。

$$1\text{F} = 10^6\mu\text{F} = 10^{12}\text{pF}$$

当电容的电压和电流为关联参考方向时,电压与电流的关系为

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (1-5)$$

此式说明,只有当电容两端的电压随时间变化时,与电容相联的电路中才有电流通过;当电容两端的电压不变时(如直流时),电流为零,此时,电容相当于开路。由式 (1-5) 得到电容上的电压为

$$u(t) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i d\xi = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^{t_0} i d\xi + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i d\xi \quad (1-6)$$

式中, t_0 为计时起点。令 $u(t_0) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^{t_0} i d\xi$ 为计时起点上电容的电压,称为电压的初始值。若在计时起点之前电容上存有电荷,即电容已被充电,则电压的初始值不为零;若在计时起点之前电容未被充电,则电压的初始值为零。在 t 时刻电容的电压为

$$u(t) = u(t_0) + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i d\xi \quad (1-7)$$

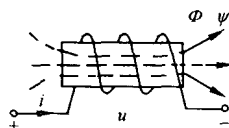
如设计时起点 $t_0 = 0$, 则在 t 时刻电容电压为

$$u(t) = u(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i d\xi \quad (1-8)$$

由此可见, 电容上的电压不仅与计时起点之后电容储存的电荷有关, 而且与计时起点之前电容储存的电荷有关, 因此, 电容具有“记忆”的特性。

四、电感元件

在实际电路中广泛应用着用导线绕制的线圈, 如图 1-4 所示, 当一个线圈中流过随时间变化的电流时, 就会在这个线圈中产生一个随时间变化的磁场, 由这个磁场产生的磁通为 Φ , 当线圈匝数为 N 时, 定义与该线圈相交链的磁链为



$$\Psi = N\Phi \quad (1-9) \quad \text{图 1-4 电流的磁场}$$

磁链是由流过线圈本身的电流产生的, 与产生它的电流的大小成正比

$$\Psi = Li \quad (1-10)$$

比例系数 L 称为电感, 线性电感元件的比例系数 L 为常数。电感的单位为 H。

$$1\text{H} = 10^3 \text{mH}$$



图 1-5 电感的
电路符号

电感元件的电路符号如图 1-5 所示。由电磁感应定律, 在关联参考方向下, 电感电压与电流的关系为

$$u = \frac{d\Psi}{dt} = L \frac{di}{dt} \quad (1-11)$$

由上式可知, 电感电压与电感电流的变化量成正比。只有当流过电感的电流变化时, 才能在电感的两端感应出电压, 当电流不变时 (如直流时), 电感两端的电压为零, 此时, 电感相当于短路。电感电流与电压的关系式为

$$i(t) = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u(\xi) d\xi = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^{t_0} u(\xi) d\xi + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t u(\xi) d\xi \quad (1-12)$$

式中的 t_0 为计时起点, 令 $i(t_0) = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^{t_0} u(\xi) d\xi$ 为计时起点之前电感中流过的电流, 称为电流 $i(t)$ 的初始值。电流的初始值 $i(t_0)$ 的大小是由计时起点之前电感储存的磁场能量的大小决定的, 如果在计时起点之前电感已储有磁场能量, 则电流的初始值不为零。这样, 电感电流也同样由两部分组成:

$$i(t) = i(t_0) + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t u(\xi) d\xi \quad (1-13)$$

由于电感电流具有“记忆”计时起点之前状态的性质, 电感元件也被称为“记忆”元件。

在以上介绍的三种元件中, 电阻元件恒消耗能量, 称为耗能元件。电容和电感元件能够储存和释放能量, 称为储能元件, 这三种元件都称为无源元件。

五、电压源和电流源

实际电源有发电机、电池、信号源等, 它们的特点是能够不断地给电路提供能量。这些电源的电路模型有电压源和电流源两种。

(一) 电压源

电压源是以电压形式表示电源的电路模型，电压源有理想电压源和实际电压源两种模型。

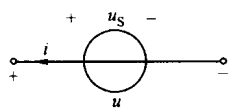


图 1-6 理想电压源的电路符号

1. 理想电压源

理想电压源是电压源的理想电路模型，如图 1-6 所示，电压源的电压与电流通常取非关联参考方向。电压源的输出电压称为端电压。理想电压源的端电压 $u(t)$ 为一个给定的时间函数，它不随流过电压源电流的大小而变化，即

$$u(t) = u_s(t) \quad (1-14)$$

当 $u(t) = u_s(t) = U_s$ ，且 U_s 为恒定值时，理想电压源为直流电压源，称为恒压源。恒压源的伏安特性曲线如图 1-7 所示。由图中可知，恒压源的端电压为恒定不变的值，而恒压源电流的大小和方向可以是任意变化的值。

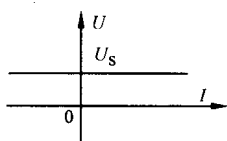


图 1-7 恒压源的伏安特性

2. 实际电压源

实际电压源是实际电源的电路模型，它由理想电压源和内电阻串联组成，如图 1-8 所示。实际电压源的伏安特性为

$$u(t) = u_s(t) - R_s i(t) \quad (1-15)$$

当 $u_s = U_s$ (U_s 为常数) 时，电路中只有直流量，实际电压源的伏安特性为

$$U = U_s - R_s I \quad (1-16)$$

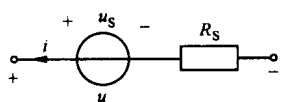


图 1-8 实际电压源的电路模型

式 (1-16) 的伏安特性曲线如图 1-9 所示。由图可见，实际电压源的内阻越小，输出电压受到电流的影响越小，输出电压越稳定，实际电压源越接近于理想电压源。

一般将实际电压源电路称为电源的内电路，而将与电压源相联的其余部分电路称为电源的外电路。

在非关联参考方向下，电压源的功率为

$$p(t) = u(t)i(t) \quad (1-17)$$

当 $i(t) > 0$ 时， $p(t) > 0$ ，电源向外电路提供能量；当 $i(t) < 0$ 时， $p(t) < 0$ ，电源作为负载从外电路中吸收能量，如蓄电池的充电过程。所以，任何一个电源，既可以作为电源为电路提供能量，又可以作为负载从电路中吸收能量，这是电源的一个特性。

当电路中的电压和电流都为直流量时，由式 (1-16) 可得功率平衡方程式

$$\begin{aligned} UI &= U_s I - R_s I^2 \\ P &= P_s - P_0 \end{aligned} \quad (1-18)$$

其中

$$\begin{aligned} P &= UI \\ P_s &= U_s I \\ P_0 &= R_s I^2 \end{aligned}$$

式中 P ——电压源的输出功率；

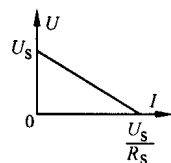


图 1-9 实际电压源的直流伏安特性

P_s ——电压源产生的功率；

P_0 ——电压源的内阻上消耗的功率。

3. 电压源的工作状态

电压源有开路、短路和有载三种状态。

(1) 电压源的开路状态。

电压源的开路状态又称为空载状态。电压源处于开路状态时其端电压又称为开路电压或空载电压 U_0 。如图 1-10 所示，开路电压等于理想电压源的端电压，开路时电压源的输出电流和输出功率为零。开路状态下电压源的电压 u 、电流 i 及输出功率 p 如下：

$$\left. \begin{aligned} u &= U_0 = u_s \\ i &= 0 \\ p_s &= R_s i = 0 \\ p &= ui = 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-19)$$

由于开路时电压源的产生功率和输出功率为零，所以当电压源不工作时应开路。

(2) 电压源的短路状态。

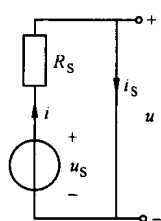


图 1-11 电压源的短路状态

在理想电压源电压不为零的情况下，理想电压源的短路是没有意义的。

当实际电压源处于短路状态时，如图 1-11 所示，电压源的电压全部加在内阻上，端电压为零。由于电压源的内阻较小，将产生很大的电流，此电流称为短路电流 i_s 。电压源发出的功率全部消耗在内阻上，可能对电压源造成损坏。短路状态下电压源的端电压 u 、短路电流 i_s 、产生功率 p_s 及输出功率 p 如下

$$\left. \begin{aligned} u &= 0 \\ i_s &= \frac{u_s}{R_s} \\ p_s &= u_s i_s \\ p &= ui = 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-20)$$

(3) 电压源的有载工作状态。

电压源接有负载时的状态称为有载工作状态，如图 1-12 所示。图中负载电阻 R 的大小直接影响到电压源输出电流 i 的大小。由欧姆定律

$$i = \frac{u_s}{R_s + R} \quad (1-21)$$

负载电阻与输出电流的大小近似成反比。

电压源的端电压为

$$u = u_s - R_s i = Ri \quad (1-22)$$

电压源的输出功率为

$$p = ui = Ri^2 = u_s i - R_s i^2 \quad (1-23)$$

由于电压源电压 u_s 几乎不变，所以输出电流 i 的大小就决定了输出功率的大小。当输出电流大时，电压源的输出功率也大，称电压源带负载较重；反之，当输出电流小时，电压

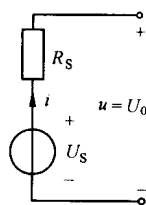


图 1-10 电压源的开路状态

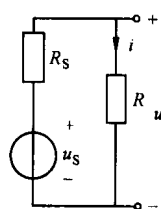


图 1-12 电压源的有载工作状态



源的输出功率也小,称带负载较轻。因此,负载的大小是指电源的输出电流和输出功率的大小而不是指负载电阻的大小。

不同的电气设备在正常工作时对电压、电流和功率的要求不同,这些要求反映在它的额定值上。额定值是电气设备长期正常运行时的容许值。如果电气设备在高于额定值的环境下运行,它的耐热和绝缘性能都要受到损坏,从而使电气设备的运行寿命缩短。如果电气设备在低于额定值的环境下运行,它的工作效率很低,有些设备将无法正常运行。

【例 1-1】将标有 40W、220V 和 100W、220V 的两个电灯并联接入 220V 的电源上,试求它们的电阻各为多少?电流各为多少?若将它们串联接入 220V 的电路中,哪个灯更亮?并分别计算并联和串联两种情况下电源的输出功率。

【解】并联时,由式 (1-18) 和欧姆定律,得

$$P = UI = \frac{U^2}{R}$$

$$R_1 = \frac{U^2}{P_1} = \frac{220^2}{40} = 1210 \text{ } (\Omega) \quad I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{P_1}{U} = \frac{40}{220} = 0.18 \text{ (A)}$$

$$R_2 = \frac{U^2}{P_2} = \frac{220^2}{100} = 484 \text{ } (\Omega) \quad I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{P_2}{U} = \frac{100}{220} = 0.45 \text{ (A)}$$

由于并联时电路中的电压满足电灯的额定电压,所以电灯消耗额定功率,100W 的灯亮于 40W 的灯。

并联时,电源的输出功率为

$$P = P_1 + P_2 = 140 \text{ (W)}$$

当 40W 和 100W 的灯串联时,总电阻为

$$R = R_1 + R_2 = 1210 + 484 = 1694 \text{ } (\Omega)$$

电路中的总电流为

$$I = \frac{U}{R} = \frac{220}{1694} = 0.13 \text{ (A)}$$

两个电灯上的电压分别为

$$U_1 = R_1 I = 1210 \times 0.13 = 157.3 \text{ (V)}$$

$$U_2 = R_2 I = 484 \times 0.13 = 62.92 \text{ (V)}$$

显然,40W 电灯上的电压大于 100W 电灯上的电压,它们的功率分别为

$$P_1 = R_1 I^2 = U_1 I = 20.5 \text{ (W)}$$

$$P_2 = R_2 I^2 = U_2 I = 8.2 \text{ (W)}$$

由于 40W 电灯上的电压大于 100W 电灯上的电压,使 40W 电灯消耗的功率大于 100W 电灯,所以 40W 电灯比 100W 电灯更亮。

串联时电源的输出功率为

$$P = P_1 + P_2 = 28.7 \text{ (W)}$$

由此可见,只有当用电设备的实际电压和实际电流达到额定值时,功率才能达到额定值。

某些电器设备如电动机、变压器等,其输出功率的大小取决于所带负载的大小,负载不同时其输出功率不同。

(二) 电流源

电流源是用电流形式表示电源的电路模型。电流源也分为理想电流源和实际电流源两种。

1. 理想电流源

理想电流源是这样一种电源，它的输出电流为一个给定的时间函数，不随其两端电压的变化而变化

$$i(t) = i_s(t) \quad (1-24)$$

理想电流源的电路模型如图 1-13 所示。电流源的电压和电流的参考方向通常取为非关联参考方向。

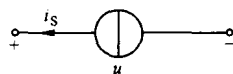


图 1-13 理想电流源的电路模型

当 $i_s(t) = I_s$ (I_s 为常数) 时，理想电流源称为恒流源。恒流源的伏安特性如图 1-14 所示。由伏安特性曲线可知，恒流源的输出电流与它两端的电压无关。

恒流源的输出功率为

$$P = UI_s \quad (1-25)$$

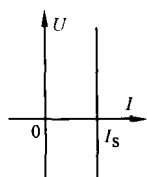


图 1-14 恒流源的伏安特性

2. 实际电流源

考虑到实际电流源的内阻，实际电流源的电路模型如图 1-15 所示。它是由理想电流源与实际电流源内阻并联而成。

实际电流源的伏安特性为

$$i(t) = i_s(t) - \frac{u(t)}{R_s} = i_s(t) - G_s u(t) \quad (1-26)$$

当 $i_s(t) = I_s$, I_s 为常数时，电路中的电压和电流都为直流量，实际电流源的直流伏安特性为

$$I = I_s - \frac{U}{R_s} = I_s - G_s U \quad (1-27)$$

实际电流源的伏安特性曲线如图 1-16 所示。由伏安特性曲线可知，实际电流源的内阻越大，输出电流受到电压的影响越小，输出电流越稳定。

在非关联参考方向下，电流源的功率为

$$p(t) = u(t)i(t) \quad (1-28)$$

当 $u(t) > 0$ 时， $p(t) > 0$ ，电流源向外电路提供功率，电流源起到电源的作用。当 $u(t) < 0$ 时， $p(t) < 0$ ，电流源作为负载从外电路吸收功率。

当电路中的电压和电流都为直流量时，由式(1-27)功率平衡方程式为

$$UI = UI_s - G_s U^2$$

$$P = P_s - P_0 \quad (1-29)$$

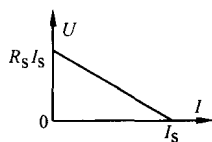


图 1-16 实际电流源的直流伏安特性

式中 P ——电流源输出的功率；
 P_s ——电流源产生的功率；
 P_0 ——电流源内阻消耗的功率。

3. 电流源的工作状态

电流源有三种工作状态：开路、短路和有载状态。

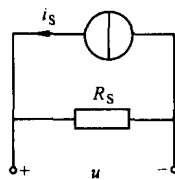


图 1-15 实际电流源的电路模型

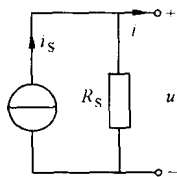


图 1-17 电流源的开路状态

(1) 电流源的开路状态。

由于理想电流源的输出电流不为零，所以理想电流源的开路状态是没有意义的。实际电流源的开路状态如图 1-17 所示，电流源开路时的电压 u 、电流 i 、产生功率 p_s 和输出功率 p 为

$$\left. \begin{aligned} i &= 0 \\ u &= R_s i_s \\ p_s &= R_s i_s^2 \\ p &= ui = 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-30)$$

由式 (1-30) 可见，当电流源开路时，电流源的电流全部流过电流源内阻，由于电流源的内阻较大，将在内阻上产生过高电压，而损坏电流源。所以，电流源应避免开路。

(2) 电流源的短路状态。

电流源的短路状态，如图 1-18 所示。短路状态时电流源的端电压 u 、短路电流 i 、产生功率 p_s 及输出功率 p 为

$$\left. \begin{aligned} i &= i_s \\ u &= 0 \\ p_s &= p = 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-31)$$

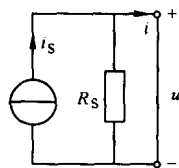


图 1-18 电流源的短路状态

由于短路时电流源的产生功率和输出功率为零，所以电流源不工作时应短路。

(3) 电流源的有载工作状态。

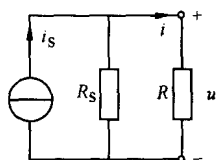


图 1-19 电流源的有载工作状态

电流源的有载工作状态如图 1-19 所示。此时，电流源的输出电流 i 、输出电压 u 、输出功率 p 为

$$\left. \begin{aligned} i &= \frac{i_s R_s}{R_s + R} \\ u &= Ri = \frac{R_s R}{R_s + R} i_s = (G_s + G) i_s \\ p &= ui = Ri^2 = ui_s - G_s i^2 \end{aligned} \right\} \quad (1-32)$$

相对于电阻、电感和电容这类无源元件，电压源和电流源称为有源元件。

【例 1-2】 图 1-20 中，已知： $u_s = 4V$ ， $i_s = 2A$ ，分别求当 $R = 1\Omega$ ， $R = 2\Omega$ ， $R = 4\Omega$ 时的输出电流 I ，并分析理想电压源和理想电流源的工作状态。

【解】 ① 当 $R = 1\Omega$ 时，由欧姆定律

$$i = \frac{u}{R} = \frac{u_s}{R} = 4 \text{ (A)}$$

电阻吸收的功率为： $P = ui = 16 \text{ (W)}$

理想电流源发出的功率为： $P = u_s i_s = 8 \text{ (W)}$

由 $i = i_1 + i_s$

理想电压源的电流为： $i_1 = 2 \text{ (A)}$

理想电压源发出的功率为： $P = u_s i_1 = 8 \text{ (W)}$

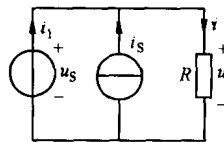


图 1-20 例 1-2

电流源和电压源都作为电源用, 电源发出的功率等于电阻吸收的功率, 电路中的功率平衡。

②当 $R = 2\Omega$ 时, $I = \frac{U_S}{R} = 2 \text{ (A)}$

电阻吸收的功率为: $P = U_S I = 8 \text{ (W)}$

电流源发出的功率为: $P = U_S I_S = 8 \text{ (W)}$

由于电压源的电流为: $I_1 = 0$, 所以电压源不发出功率。此时, 电流源作为电源用, 电压源相当于开路。总功率仍然平衡。

③当 $R = 4\Omega$ 时, $I = \frac{U_S}{R} = 1 \text{ (A)}$

电阻吸收的功率为: $P = U_S I = 4 \text{ (W)}$

电流源的电流 $I_S = 2\text{A}$, 电流源发出的功率 $P = U_S I_S = 8 \text{ (W)}$

电压源的电流 $I_1 = I - I_S = -1 \text{ (A)}$, 电压源吸收功率 $P = U_S I_1 = -4 \text{ (W)}$

此时, 电流源处于电源状态, 电压源处于负载状态。

如果将此题中的电压源与电流源串联, 当负载电阻变化时, 电压源与电流源的工作状态又如何?

(三) 电源的等效变换

1. 电压源的串联

如图 1-21 所示, 两个电压源串联后的等效电压源电压为

$$u_S = u_{S1} - u_{S2} \quad (1-33)$$

等效电压源的内阻为

$$R_S = R_{S1} + R_{S2} \quad (1-34)$$

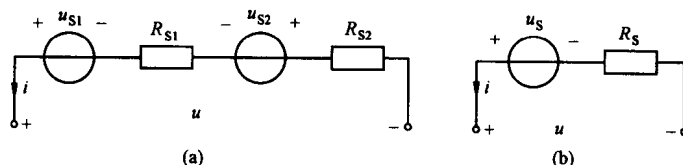


图 1-21 电压源的串联

(a) 串联电路; (b) 等效电路

以此类推, n 个实际电压源串联后的等效电压源的电压为

$$u_S = \sum_{k=1}^n u_{Sk} \quad (1-35)$$

在式 (1-35) 的代数和中, 若 u_{Sk} 的参考方向与 u_S 的参考方向一致时取 “+” 号, 相反时取 “-” 号。

等效电压源的内阻为

$$R = \sum_{k=1}^n R_k \quad (1-36)$$

注意:

(1) 只有电压值相同的理想电压源可以并联, 并联后对外电路的等效电压源仍为理想电

