

电工技术基础

电工学 I

肖广润 周惠领 主编



华中工学院出版社

内 容 简 介

本书是参考1980年修订的高等工业学校《电工学教学大纲(草案)》(150学时),并经过三年来的教学实践而编写的。

《电工技术基础》(电工学Ⅰ)内容包括电路分析、模拟电子技术、电机与自动控制等。本书的特点是,提高了教学的起点,加强了系统的分析方法和注重理论的实际应用。每章均有例题和习题。

《数字电路与微型计算机》(电工学Ⅱ)内容包括数字电路基础、数字逻辑部件、计算机基础知识、Z-80指令系统、输入与输出、Z-80汇编语言程序设计等。该书将数字电路的基本内容与微型计算机的基本原理紧密地联系在一起,改革了课程的内容和体系,并通过实例、例题来说明微型计算机的应用。

本书可以作为高等工科院校电工学(或电工技术)和微型计算机的原理及其应用课程的教材或参考书,也可供工程技术人员参考。

电工技术基础

——电工学Ⅰ——

肖广润 周惠领 主编

责任编辑 叶翠华

华中工学院出版社出版

(武昌喻家山)

新华书店湖北发行所发行

武汉大学出版社印刷总厂印刷

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 23 字数: 535,000

1985年10月第1版 1985年10月第1次印刷

印数: 1—13,000册

统一书号: 15255—048 定价: 4.60元

序 言

《电工技术基础》(电工学Ⅰ)及《数字电路与微型计算机》(电工学Ⅱ)可作为高等工科院校电工学(或电工技术)和微型计算机的原理及其应用课程的教材或参考书。

电工学是一门重要的技术基础课。随着科学技术的迅速发展,该学科的新理论、新技术层出不穷,特别是微型计算机的广泛应用,将对各工程技术领域和生产管理部门产生深远的影响。因此,电工学的体系和内容也要作相应的调整。我们建议,或者把电工学分为电工技术基础(约100~110学时)和数字电路与微型计算机(约60~70学时)两门课程,或者增设微型计算机原理及其应用课程。

《电工技术基础》包括电路分析、模拟电子技术、电机与自动控制三部分内容,并按此顺序排列。在内容上,适当地提高了教材的起点,删简了与物理学重复的内容,精简了电磁器件的内部结构和一些传统的内容;加强了系统的分析方法和新技术的内容。

电路分析包括电路与系统的概念及分析方法、线性网络的暂态响应、电路的正弦稳态响应和电路的频率响应等。模拟电子技术包括二极管整流电路、三极管放大电路、多级放大与负反馈放大电路、振荡电路、运算放大电路、实用电路读图和可控硅整流电路等。电机与自动控制包括三相电路、磁路与电器、交流电动机、直流电机、控制电机和自动控制等。

《数字电路与微型计算机》的内容,请看该书的目录。

本书是在自编教材试用三年多的基础上经反复修改完成的。实践表明:这样改革,教学目的更加明确,教材体系更为严谨;有利于激发学生的学习自觉性和提高教学质量;有利于促进教师业务水平的提高;有利于各类专业根据教学计划的要求选用教材。

《电工技术基础》是按110学时的教学内容编写的。考虑到各专业对课程的要求和教学时数的差异,在教材中安排了若干选用的章节,用星号“*”作标志。各部分学时(包括实验)的分配,大致如下,以供参考:

电路分析 约32~34小时;

模拟电子技术 约46~50小时;

电机与自动控制 约22~26小时。

本书由肖广润、周惠领同志担任主编。参加编写的有肖广润(第一、二、三、四、五、六、十二章)、李昇浩(第二、四、六章)、刘明亮(第七、八、十五章)、曾育星(第七章)、李锡雄(第九章)、周惠领(第十章)、周鑫霞(第十一章)、钟声淦(第十三、十四章)、吴松鄂(第十六章)等同志。本书在编写和试用的过程中得到本教研室的同志和武汉电工理论学会的支持和帮助,在此表示感谢。

由于我们的水平有限,书中必然存在不少缺点,殷切希望使用本书的教师和读者提出批评意见。

编 者

一九八五年元月于华中工学院

目 录

第一部分 电 路 分 析

第一章 电路与系统的概念、分析方法

1-1 电路	(1)
1-1-1 电路的组成与功能	(1)
1-1-2 电路变量——电流、电压	(2)
1-1-3 电路元件——电阻、电容、电感	(4)
1-2 系统的定义·等效网络	(8)
1-3 电压源与电流源	(10)
1-3-1 电压源	(11)
1-3-2 电流源	(11)
1-3-3 电压源与电流源的等效变换	(12)
1-4 线性系统的基本性质——比例性与叠加性	(14)
1-5 网络的基本定律·支路电流法	(16)
1-5-1 克希荷夫电流定律	(16)
1-5-2 克希荷夫电压定律	(17)
1-5-3 支路电流法	(17)
1-6 回路电流法	(19)
1-7 节点电压法	(20)
1-8 有源二端网络的等效变换	(22)
1-8-1 戴维宁定理	(23)
1-8-2 诺顿定理	(24)
1-9 电压、电流和功率的传递	(26)
1-10 受控电源	(28)
习题	(31)

第二章 线性网络的暂态响应

2-1 线性网络的暂态过程与换路定则	(37)
2-2 线性网络的暂态响应(经典法)	(38)
2-2-1 零输入响应	(39)
2-2-2 零状态响应	(42)
2-2-3 电路的全响应	(44)
2-3 求一阶电路全响应的简捷法(三要素法)	(46)
2-4 电路的时间常数对信号波形的影响	(47)
2-4-1 微分电路	(47)
2-4-2 积分电路	(48)
2-5 拉普拉斯变换在暂态电路中的应用(运算法)	(49)
2-5-1 拉普拉斯变换的定义和基本性质	(49)
2-5-2 电路基本定律的运算形式	(52)

*2-5-3 RLC电路的自然响应	(57)
习题	(61)
第三章 电路的正弦稳态响应	
3-1 正弦电量的表示方法	(64)
3-1-1 正弦交流电的基本概念	(64)
3-1-2 正弦电量的矢量表示法	(66)
3-1-3 正弦电量的相量表示法	(67)
3-2 理想元件的正弦稳态电路	(70)
3-2-1 电阻电路	(70)
3-2-2 电容电路	(71)
3-2-3 电感电路	(73)
3-3 正弦稳态电路的分析计算	(77)
3-3-1 RLC串联电路·复阻抗	(77)
3-3-2 RLC并联电路·复导纳	(81)
3-3-3 复阻抗混联电路	(84)
3-4 正弦稳态电路的功率	(86)
3-4-1 瞬时功率	(86)
3-4-2 有功功率、无功功率和视在功率	(87)
3-4-3 功率因数的提高	(89)
3-5 理想变压器	(91)
习题	(95)
第四章 电路的频率响应	
4-1 非正弦周期信号的谐波分解	(99)
4-2 低通电路	(102)
4-2-1 RC串联低通电路	(104)
4-2-2 RC并联低通电路	(106)
4-3 高通电路	(108)
4-4 谐振与带通电路	(109)
4-4-1 RLC 串联电路的频率响应	(109)
4-4-2 LC 并联电路的频率响应	(113)
习题	(115)

第二部分 模拟电子技术

第五章 二极管整流电路

5-1 半导体二极管	(117)
5-1-1 PN结及其单向导电性	(117)
5-1-2 二极管的结构及型号	(119)
5-1-3 二极管的伏安特性及主要参数	(119)
5-2 整流电路	(121)
5-2-1 单相半波整流电路	(121)
5-2-2 单相桥式整流电路	(122)

5-2-3 单相全波整流电路·····	(124)
5-2-4 倍压整流电路·····	(126)
5-3 滤波电路·····	(127)
5-4 硅稳压管及其稳压电路·····	(129)
5-5 二极管电路的图解分析·····	(133)
习题·····	(135)
第六章 晶体三极管放大电路	
6-1 晶体三极管的物理特性·····	(137)
6-1-1 三极管的结构·····	(137)
6-1-2 三极管的电流分配与放大作用·····	(138)
6-1-3 三极管的特性曲线与主要参数·····	(140)
6-2 基本放大电路的静态分析·····	(144)
6-2-1 基本放大电路的组成·····	(144)
6-2-2 静态工作点的确定·····	(145)
6-3 放大电路的动态分析——图解法·····	(147)
6-3-1 放大电路空载时的动态分析·····	(147)
6-3-2 放大电路接负载时的动态分析·····	(149)
6-3-3 静态工作点对波形失真的影响·····	(151)
6-4 放大电路的微变等效电路分析法·····	(152)
6-4-1 基本放大电路的微变等效电路·····	(152)
6-4-2 基本放大电路的电压放大倍数·····	(153)
6-4-3 输入电阻与输出电阻·····	(155)
6-5 分压式射极偏置放大电路·····	(157)
6-5-1 静态工作点的稳定问题·····	(157)
6-5-2 静态工作点的计算·····	(158)
6-5-3 电压放大倍数的计算·····	(159)
6-6 放大电路的频率响应·····	(162)
习题·····	(163)
第七章 多级放大及负反馈放大电路	
7-1 多级放大电路·····	(167)
7-1-1 电压放大倍数·····	(168)
7-1-2 频率响应特性·····	(169)
7-2 负反馈放大电路·····	(169)
7-2-1 负反馈放大电路的类型·····	(169)
7-2-2 典型的负反馈放大电路·····	(170)
7-3 负反馈对放大电路性能的影响·····	(177)
7-4 功率放大电路·····	(181)
7-4-1 变压器耦合的功率放大电路·····	(182)
7-4-2 互补对称的功率放大电路·····	(185)
习题·····	(186)
第八章 振荡电路	
8-1 正弦波振荡电路的基本原理·····	(189)
8-2 LC振荡电路·····	(191)

8-2-1 变压器反馈式振荡电路	(191)
8-2-2 电感三点式振荡电路	(193)
8-2-3 电容三点式振荡电路	(193)
*8-2-4 LC振荡电路的应用举例——接近开关	(195)
8-3 RC振荡电路	(196)
8-3-1 RC串、并联选频网络的特性	(197)
8-3-2 RC桥式振荡电路的工作原理	(198)
8-3-3 RC桥式振荡电路的稳幅环节	(200)
*8-4 调制的基本概念	(200)
习题	(202)

第九章 运算放大电路

9-1 直接耦合放大电路	(203)
9-1-1 级间耦合	(203)
9-1-2 零点漂移	(205)
9-2 差动放大电路	(206)
9-2-1 差动放大电路的基本工作原理	(206)
9-2-2 实用差动放大电路	(208)
9-2-3 单端输入-单端输出 差动放大电路	(211)
9-3 集成运算放大电路	(214)
9-3-1 集成运算放大器的组成	(214)
9-3-2 集成运算放大器的基本电路	(215)
9-3-3 集成运算放大器的基本运算功能	(218)
9-4 集成运算放大器应用举例	(220)
9-4-1 PID放大器	(220)
9-4-2 参考电压源	(221)
习题	(222)

第十章 实用电路读图

10-1 串联型晶体管稳压电路	(226)
10-1-1 基本稳压电路	(226)
10-1-2 30V/100mA全硅管化的稳压电源	(228)
10-2 电子电位差计电路	(230)
10-2-1 电子电位差计的基本工作原理	(230)
10-2-2 JF-12型放大器的组成及其作用	(230)
*10-3 涡流测厚仪电路	(234)
10-3-1 涡流测厚仪的基本原理	(234)
10-3-2 测量电路的组成及其作用	(234)
*10-4 晶体管扩音机电路	(237)

*第十一章 可控硅整流电路

11-1 可控硅元件	(241)
11-1-1 可控硅的结构及工作原理	(241)
11-1-2 可控硅的伏安特性及主要参数	(243)
11-2 可控整流电路	(244)

11-2-1 单相半波可控整流电路	(244)
11-2-2 单相桥式半控整流电路	(246)
11-2-3 感性负载与续流二极管	(247)
11-3 可控硅的触发电路	(248)
11-3-1 双基极二极管的结构和特性	(249)
11-3-2 简单的双基极二极管触发电路	(250)
11-3-3 带有放大作用的双基极二极管触发电路	(252)
11-4 可控硅的保护	(252)
习题	(253)

第三部分 电机与自动控制

第十二章 三相电路

12-1 三相电源	(255)
12-2 三相负载的联接	(256)
12-2-1 星形联接 (Y)	(256)
12-2-2 三角形联接 (Δ)	(259)
12-3 三相电路功率的计算及其测量	(262)
12-4 保护接地与保护接零	(264)
习题	(266)

第十三章 磁路与电器

13-1 磁路的基本概念	(267)
13-2 直流电磁铁	(269)
13-3 交流铁芯线圈电路与交流电磁铁	(271)
13-4 变压器	(275)
13-5 常用控制电器	(279)
13-5-1 手动控制电器与行程开关	(279)
13-5-2 交流接触器	(281)
13-5-3 继电器	(282)
习题	(285)

第十四章 常用交流电机及其基本控制

14-1 三相异步电动机的基本结构与铭牌数据	(287)
14-2 三相异步电动机的工作原理	(290)
14-3 三相异步电动机的负载运行	(293)
14-4 三相鼠笼式电动机直接起动的控制	(298)
14-4-1 单方向旋转的控制	(298)
14-4-2 鼠笼式电动机的正反转控制	(300)
14-4-3 点动控制	(301)
14-5 三相鼠笼式电动机降压起动的控制	(301)
14-5-1 Y- Δ (星形-三角形) 降压起动的控制	(301)
14-5-2 自耦变压器降压起动的控制	(304)
14-6 三相鼠笼式电动机的制动及其控制	(304)

14-6-1 能耗制动及其控制	(305)
14-6-2 反接制动及其控制	(305)
*14-7 单相异步电动机	(306)
14-7-1 单相异步电动机的工作原理	(306)
14-7-2 单相异步电动机的类型与起动方法	(307)
*14-8 同步电机	(309)
14-8-1 同步电机的构造	(309)
14-8-2 同步电机的运行原理	(310)
14-8-3 同步电动机的起动	(311)
习题	(312)

*第十五章 直流电机

15-1 直流电机的基本结构	(314)
15-2 直流电机的工作原理	(315)
15-2-1 直流发电机的工作原理	(315)
15-2-2 直流电动机的工作原理	(316)
15-3 直流电机的电枢电势与电磁转矩	(317)
15-4 直流发电机	(318)
15-4-1 他励发电机	(318)
15-4-2 并励发电机	(320)
15-5 并励直流电动机的运行	(322)
习题	(328)

第十六章 自动控制

16-1 自动控制的基本概念	(330)
16-2 变换器	(331)
16-2-1 无源变换器	(332)
16-2-2 有源变换器	(335)
16-3 控制电机	(337)
16-3-1 直流测速发电机	(337)
16-3-2 伺服电动机	(338)
16-3-3 自整角机	(340)
16-3-4 步进电动机	(342)
16-4 自动调节系统	(343)
16-4-1 直流电动机转速的自动调节	(343)
16-4-2 电阻加热炉的温度控制	(344)
16-5 随动系统	(345)
16-5-1 直流电动机的位置控制	(345)
16-5-2 采用自整角机的位置随动系统	(346)
16-6 控制系统的稳定精度与动态性能	(346)

附录

附录一 半导体器件型号命名方法	(349)
附录二 常用半导体器件的参数	(351)
附录三 集成电路型号命名	(354)

文字符号

第一部分 电 路 分 析

第一章 电路与系统的概念、分析方法

电路分析为《电工技术基础》的基本内容。它研究各种电信号作用于电路时的电磁现象以及电路的一般规律和分析计算方法。

本章首先在物理学的基础上介绍电路与系统的基本概念、线性系统的基本性质。接着重点讨论线性电阻网络的几种普遍的计算方法，以及有源网络的等效变换和功率传递问题。最后简单地介绍受控源电路。

本章以直流电阻网络为研究的主要对象，它所涉及到的基本理论和方法具有普遍意义。

1-1 电 路

本节内容是为读者自学提供方便而编写的。这些内容虽在物理学中讲过，但所叙述的重要概念和公式，将在今后的讨论中经常用到，因此有重温的必要。

1-1-1 电路的组成与功能

电路是由一些物理器件按一定方式连接的组合。它一般由电源、负载和中间环节三部分组成。电源是产生电能和电信号的装置，如各种发电机、稳压电源以及信号发生器等装置。负载是取用电能，并转换成其它能量形式的装置或器件，例如电灯、电动机等用电设备。电源与负载之间的中间环节是传送、控制电能或电信号的部分，它包括有连接导线、控制电器（如刀开关）和保护电器（如熔断器）等等。

电路正常工作时，电源与负载联接成闭合的回路。若电源与负载断开则称为开路；若电源两端被导线直接连通，则称为短路。短路时，电流很大（称为短路电流），可能造成电源或其它设备的损坏，所以必须注意提防短路事故的发生。

在现代技术中，电路用来完成控制、计算、通讯、测量以及发配电等方面的任务。各种形式的组合电路，具有各式各样的功能。如最常见的照明电路和动力电路是把电能转换成光能、热能和机械能；计算机电路是将数字的输入信息加以运算，产生数据输出形式的新信息等等。总而言之，电路的功能就是实现能量的输送、转换和控制；或者实现信息的传递、处理和贮存。

电路分析的直接对象并不是那些实用的电磁器件所构成的具体电路，而是从大量实用电路中抽象出来的电路模型。模型是由表征一些简单的物理性质的理想元件所组成，并受一定条件约束的。例如理想电阻元件(R)是表示电能转换成热能的器件；理想电压源(U_S)是表示产生恒定电压的装置；实际电压源是理想电压源 U_S 和内电阻 R_S 串联的组合模型。图 1-1-1

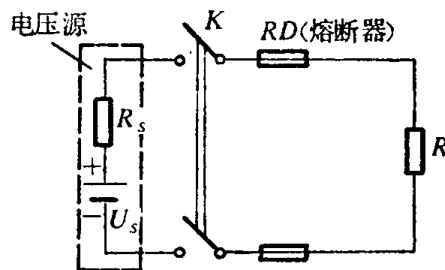


图1-1-1 电路图

是一个简单电路模型。对电路模型（简称电路）的分析就可以知道实际电路的功能。

1-1-2 电路变量——电流、电压

电流和电压是衡量电路性能的两个最基本的物理量，也是分析计算电路的两个基本变量。

在电场力或其它外力（电磁力、化学力等）作用下，带电质点（电子或离子）作有规则的定向运动便形成电流。习惯上规定正电荷运动的方向为电流的方向。电流的大小是以单位时间内通过导体截面的电荷量来衡量的，即

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

其中 dq 是在时间 dt 内通过导体横截面的电量。

如果电流的大小和方向都不随时间变化，则称为恒定电流，简称直流，用大写字母 I 表示。如果电流的大小和方向都随时间变化，则称为交流电流，用小写字母 i 表示。电流的单位是安培，简称安(A)；还可用毫安(mA)、微安(μ A)作单位，视计量大小而定。

在电场力作用下电荷移动形成电流的过程，也就是电场对电荷做功的过程。衡量电场做功的能力的物理量是电压，用字母 U 或 u 表示（一般用 U 表示直流电压， u 表示交流电压）。电场力把单位正电荷从 a 点移到 b 点所作的功，定义为该两点间的电压 U_{ab} ，双下标字母的次序表示电压的方向，也常用箭头标在电路图中，如图1-1-2所示。

电路中任意两点间的电压也就是此两点电位之差。若 a 点的电位用 U_a 表示， b 点的电位用 U_b 表示，则 a 、 b 两点间的电压可表示为：

$$U_{ab} = U_a - U_b. \quad (1-1-2)$$

如果 a 点为高电位端（用“+”号表示）， b 点为低电位端（用“-”号表示），则电压 U_{ab} 为正值，即规定从高电位端到低电位端为电压的正方向。

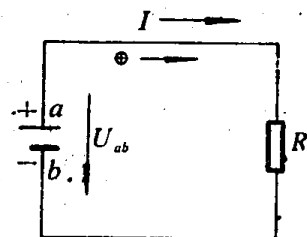


图1-1-2 电流与电压

我们分析和计算电路时，必须事先规定电流或电压的参考方向，用箭头标在电路图上（电压的参考方向常在元件或电路两端标出“+”、“-”极性），以最后答案的正、负值来确定它们的实际方向（或极性）。若为正值，其实际方向（或极性）与参考方向（或极性）一致；若为负值，则其实际方向（或极性）与参考方向（或极性）相反。由于在直流电路中电流和电压的方向总是相同的，因此，采用所谓相关联的参考方向（即电流和电压的参考方向相同），如图1-1-3所示。

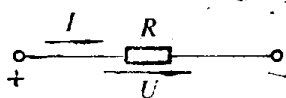


图1-1-3 电流和电压相关联的参考方向

电压和电位的单位都是伏特，简称伏(V)。还可用千伏(kV)、毫伏(mV)、微伏(μ V)作单位，也视计量大小而定。

因为电路中某一点的电位是相对于参考点而言的，因此，计算电位时要事先在电路中任选一点作为参考点，并规定参考点的电位为零，在电路图中用接地符号“ $\perp$ ”表示。在工程上，有些机器的机壳接地，就是把机壳作为电位的参考点。但有些电子设备并不与大地相接，而是将许多元件接到一个公共线上，把这个公共线作为参考点，称之为“地线”。

在图 1-1-4 所示的电路中，如果我们选 d 为参考点（即 $U_d = 0$ ），则 a 、 b 点的电位为：

$$U_a = U_a - U_d = U_{ad} = U_{s1},$$

$$U_b = U_b - U_d = U_{bd} = -R_1 I + U_{s1}$$

$$\text{而电压 } U_{ab} = U_a - U_b = U_{s1} - (-R_1 I + U_{s1}) = R_1 I.$$

如果选 a 为参考点（即 $U_a = 0$ ），则 b 点的电位为

$$U_b = U_b - U_a = -R_1 I,$$

$$\text{而电压 } U_{ob} = U_a - U_b = 0 - (-R_1 I) = R_1 I.$$

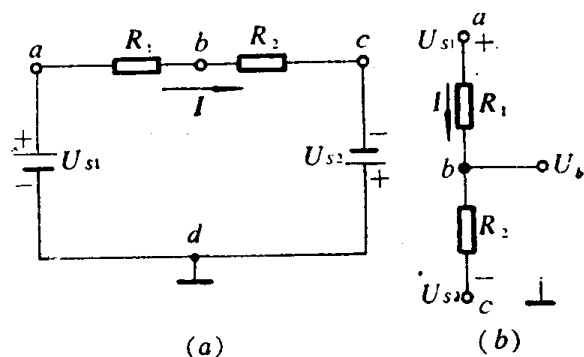


图1-1-4 电位与电路的简化画法

由上面分析可知，电路中某一点的电位等于该点与参考点之间的电压。电路中任意两点间的电压是一定的，它与参考点的选择无关。但是各点的电位则是相对的，视参考点而定。只有在参考点选定之后，电路中各点的电位才有确定的数值。

考虑到电子电路中一般都将电源、信号输入和输出的公共端联在一起接地，而且电源也不再用电池的符号来表示，而改为标出其电位的极性与数值，且与“地”相联的电源的一极不再标出，如图1-1-5(b)所示。按这种画法，图面更清晰，作图更简便，是电子电路中一种常用的绘图方法。

若电路中的电压和电流为已知，则功率可以计算出来。功率用字母 P 表示，有

$$P = UI. \quad (1-1-3)$$

功率是一个标量。但是，考虑到电流和电压相关联的参考方向，功率可能出现正值或负值。如电路图1-1-6，其中方框代表电路元件，电路中电流和各元件端电压的参考方向（或极性）如图示。若计算结果，当 I 、 U_2 和 U_3 为正值（即实际方向与参考方向相同），而 U_1 为

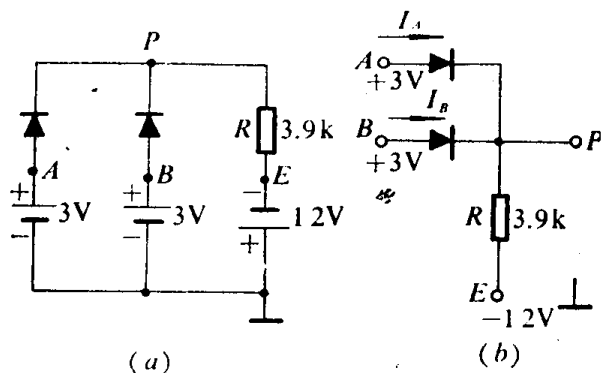


图1-1-5 电路的简化画法
(a) 原电路图: (b) 简化图

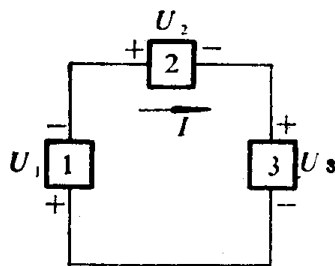


图1-1-6

负值（即实际方向与参考方向相反）时，则对元件 2 和元件 3 算出的功率为正值（因电流与电压为相关联的方向），说明是电场力对电荷做功，它们是消耗电功率的负载；对元件 1 算出的功率为负值（因电流与电压为非关联的方向），说明是外力对电荷做功，则元件 1 是产生电功率的电源。

若电压的单位为伏，电流的单位为安，则功率的单位为瓦特，简称瓦（W）。还有千瓦（kW）、毫瓦（mW）单位。

功率 P 是能量的平均转换率。对发电设备来说，功率是单位时间内所产生的电能；对用

电设备来说, 功率是单位时间内所消耗的电能。如果用电设备的功率为 P , 使用的时间为 t , 则该用电设备消耗的电能

$$W = Pt = UI t. \quad (1-1-4)$$

若功率的单位为瓦, 时间的单位为秒, 则电能的单位为焦耳(J)。若功率的单位为千瓦, 时间的单位为小时, 则电能的单位为“千瓦·小时”(kW·h), 或称为“度”。一度电是一千瓦小时的电能。

电气设备的铭牌上都标出电流、电压和功率的限额, 以表示其正常工作条件和工作能力, 称为电气设备的额定值。额定值是制造厂对设备的使用规定, 使用者务必注意。尤其重要的是额定电流的概念, 它是指电气设备在一定的环境温度下长期连续工作时或在规定的时间内, 所容许通过的最大电流。当电气设备在额定值运行时, 称为额定运行状态, 简称满载; 若超额定值运行时, 称为过载。电气设备在额定状态运行时, 效率高、寿命长、安全可靠。否则, 会降低设备的使用寿命, 甚至会损坏设备。

〔例1-1〕 图1-1-7是一个含有电压源和负载的闭合电路。电压源电压 $U_s=24\text{V}$, 内阻 $R_s=1\Omega$, 负载电阻 $R=11\Omega$ 。

- 求: (1) 电路中的工作电流;
(2) 负载端电压;
(3) 负载吸收的功率和电源产生的功率;
(4) 当负载端发生短路时的电流。

解:

- (1) 电路中的工作电流

$$I = \frac{U_s}{R_s + R} = \frac{24}{1 + 11} = 2\text{A};$$

- (2) 负载端电压

$$U = IR = 2 \times 11 = 22\text{V};$$

- (3) 负载吸收的功率

$$P = UI = 22 \times 2 = 44\text{W},$$

而电源产生的总功率

$$P_s = U_s I = 24 \times 2 = 48\text{W},$$

内阻消耗的功率

$$P_0 = I^2 R_s = 2^2 \times 1 = 4\text{W};$$

- (4) 当负载端发生短路时, 短路电流

$$I_{sc} = \frac{U_s}{R_s} = \frac{24}{1} = 24\text{A}.$$

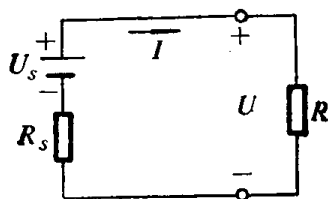


图1-1-7 例1-1图

1-1-3 电路元件——电阻、电容、电感

一般而言, 电路中除了产生电能的过程以外, 还普遍存在着三种基本的能量转换过程, 即电能的消耗, 电场和磁场能量的储存过程。用来表征电路中上述三种物理特性的参数称为电路参数(或元件), 并分别称为 R 、 C 及 L 参数(或元件)。电阻(R)是表征电路中消耗电能特性的电路参数; 电容(C)是表征电路中储存电场能量特性的电路参数; 电感(L)是表征电路中储存磁场能量特性的电路参数。因此, 我们把电阻、电容和电感看成各代表一种

参数的电路元件，即所谓单一参数元件（或理想元件）。若元件的值是恒定不变的常数，即不随电流、电压和频率变化而变化，则称为线性元件。

任何一个实际的电路都可以抽象成由理想元件组合的电路模型。为了深入研究电路的功能，必须对组成电路的基本元件作进一步的分析。

（一）电阻元件

如前所述，电阻（ R ）是一种将电能转换成热能的耗能元件。在图1-1-8所示的相关联参考方向下，电阻两端的电压和通过电阻的电流之间的关系：

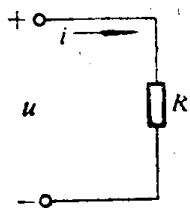


图1-1-8 电阻元件

$$i = \frac{u}{R}, \quad (1-1-5)$$

称为电阻元件的特性方程式，即欧姆定律。其中 R 为电阻元件的参数。电阻的倒数称为电导，用字母 G （或 g ）表示，即

$$G = \frac{1}{R}, \quad (1-1-6)$$

电阻的单位是欧姆，简称欧（ Ω ）；电导的单位是西门子，简称西（ S ）。

有了电导这个概念后，式（1-1-5）就可写成如下形式：

$$i = Gu. \quad (1-1-7)$$

若电阻值不随电压、电流和频率变化而变化，则称此电阻为线性电阻。一般的电阻器可

视为线性电阻元件。反之为非线性电阻元件。电路元件的特征常用元件两端的电压与电流的关系曲线 $u = f(i)$ 或 $i = f(u)$ 来表示，这种曲线称为伏安特性，它可通过实验作出。线性电阻的伏安特性是通过坐标原点的一条直线；而非线性电阻的伏安特性是一条曲线，如图1-1-9和图1-1-10所示。

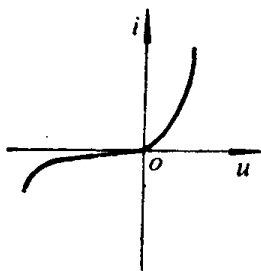
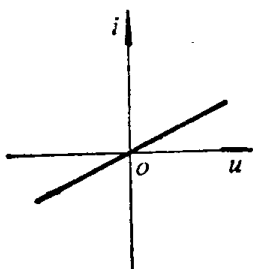


图1-1-9 线性电阻的伏安特性 图1-1-10 非线性电阻的伏安特性

由于电阻元件的特性方程是一个代数方程，所以当电压 u 发生突然变化时，电流 i 也会立即随之变化，反之亦然。就是说，某一时刻 t 电阻两端的电压 $u(t)$ 的值与同一时刻的电流 $i(t)$ 的值有关，而与它过去的工作状态（或初始条件）无关，因此电阻元件是一种瞬态元件。

如果加在电阻两端的电压和产生的电流是随时间变化的，那么它们两者的乘积，即电功率也是随时间变化的，称为瞬时功率，用小写的字母 p 表示，即

$$p = ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R}. \quad (1-1-8)$$

由于 p 与 i^2 或 u^2 成正比，故总是大于零的。这说明电阻是消耗电能的，是一种耗能元件。

（二）电容元件

电容器是一种聚集电荷的元件，其聚集的电荷量与所加的电压成正比，即

$$q = CU, \quad (1-1-9)$$

式中的比例常数 C 称为电容量, 简称电容。单位是法拉, 简称法(F)。还以微法(μF)或皮法(pF)作单位。 $1\mu\text{F} = 10^{-6}\text{F}$, $1\text{pF} = 10^{-12}\text{F}$ 。

电容器的电容量是反映其容电能力的物理量, 它与电容器本身的几何尺寸及其极板间的电介质的性质有关。一个介质绝缘性能良好的电容器, 可以忽略漏电现象, 而把它看成理想的电容元件, 简称电容元件或电容。

当电容器(见图1-1-11)极板上的电荷 q 或两极板间的电压 u_c 发生变化时, 电路中就会产生电流 i_c , 在图中所规定的参考方向下, 其数学表达式为

$$i_c = \frac{dq}{dt} = C \frac{du_c}{dt}, \quad (1-1-10)$$

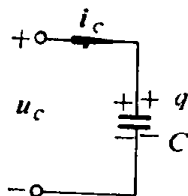


图1-1-11 电容器接通电源

即在某一时刻电容电路中的电流 i_c 与该时刻电容电压 u_c 的变化率成正比, 而与此时刻电容电压 u_c 的数值无关。这一特性称为电容的动态特性, 电容元件也称为动态元件。

式(1-1-10)还表明了电容元件的一个重要特性, 如果电容的电流为有限值, 则电容两端的电压只能连续变化而不能跃变, 否则, 就会导致 $du_c/dt \rightarrow \infty$, $i_c = C(du_c/dt) \rightarrow \infty$ 。这与保持电流为有限值相违背, 所以电容电压一般不可能发生跃变。

如果把电容电压 u_c 表示为电流 i_c 的函数时, 对式(1-1-10)积分可得:

$$u_c = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^{t_0} i_c dt + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i_c dt = u_c(t_0) + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i_c dt. \quad (1-1-11)$$

式(1-1-11)表明: 在某一时刻(t)电容电压的数值取决于其初始值 $u_c(t_0)$ 以及从初始时刻 t_0 到 t 所有时刻的电流值。就是说, 某一时刻(t)电容电压的值并不取决于同一时刻的电流值, 而与电流的全部历史状态有关。所以, 电容是一种有“记忆”功能的元件。

若将式(1-1-10)两边乘以 $u_c dt$, 再积分, 便得

$$\int_0^t u_c i_c dt = \int_0^{u_c} C u_c du_c = \frac{1}{2} C u_c^2,$$

即

$$W_C = \frac{1}{2} C u_c^2. \quad (1-1-12)$$

这说明电容器在时间由0到 t , 电压由0变到 u_c 的过程中, 从电源吸收能量储存于两极板间的电场中; 而电容器在某一时刻所储能量只与此时刻的电容电压的平方成正比。电容器是一种储能元件。式(1-1-12)是计算电容器极板间电场能量的公式。

例1-2 有一个电容元件, $C = 2\text{F}$, 接入一个三角波形的电压源, 如图1-1-12(b)所示。(1)求电路中的电流 $i(t)$ 及功率 $p(t)$, 并画出波形图; (2)计算 $t = 1.5$ 秒时, 电容是吸收功率还是放出功率? 此时电容储能是多少?

解: 为求 $i(t)$, 先由图1-1-12(b)列出 $u(t)$ 的函数关系式为:

$$u(t) = 0.5t, \quad 0 < t < 2;$$

$$u(t) = -0.5t + 2, \quad 2 < t < 4.$$

(1) 根据式(1-1-10)可求得 $i(t)$ 为:

$$i(t) = C \frac{du}{dt} = 2 \frac{d(0.5t)}{dt} = 1 \text{ A},$$

$$0 < t < 2;$$

$$i(t) = C \frac{du}{dt} = 2 \frac{d(-0.5t + 2)}{dt}$$

$$= -1 \text{ A}, \quad 2 < t < 4.$$

所求得的电流波形如图1-1-12(c)所示。

电路的瞬时功率表示为:

$$p(t) = u(t)i(t) = 0.5t, \quad 0 < t < 2;$$

$$p(t) = 0.5t - 2, \quad 2 < t < 4.$$

$p(t)$ 的波形如图1-1-12(d)所示。

(2) 在 $t=1.5$ 秒时, 电容器是吸收功率, 其值为

$$p(t) = 0.5t = 0.5 \times 1.5 = 0.75 \text{ W}.$$

此时电容器的储能为

$$W_c(t) = \frac{1}{2} Cu^2$$

$$= \frac{1}{2} \times 2 \times (0.5 \times 1.5)^2 = 0.56 \text{ J}.$$

(三) 电感元件

在电工技术中, 通常把导线绕成线圈的形状以增强线圈内部的磁场, 称为电感线圈或电感器。

当电感线圈通以电流时, 便产生磁场, 若穿过一匝线圈的磁通为 Φ , 则与匝数为 N 的线圈交链的总磁通为 $N\Phi$, 总磁通 $N\Phi$ 常称为磁链 Ψ , 即 $\Psi = N\Phi$, 磁链是电流 i 的函数, 因此, 电感器是一种使磁链 Ψ 与电流 i 相约束的元件。当元件周围的介质为非铁磁物质 (如空气、木料、铜等) 时磁链 Ψ 与电流 i 成正比关系, 这个约束关系为一常量。故对空心线圈来说, Ψ 与 i 呈线性关系:

$$\Psi = Li, \quad (1-1-13)$$

式中 L 是一个常数, 称为电感, 单位为亨利, 简称亨 (H)。还有用毫亨 (mH)、微亨 (μH) 作单位的, 视计量大小而定。

电感 L 的大小与线圈的尺寸、匝数以及附近介质的导磁性能有关。实际电感线圈除电感外还有一定的电阻, 但电阻值较小, 可以略去不计, 而把它看成理想电感元件 (或电感), 其表示符号如图1-1-13(b)所示。

当通过线圈的电流发生变化时, 由于穿过线圈的磁通也相应地发生变化, 则在线圈两端产生感应电压, 以 u_L 表示, 根据电磁感应定律, 则有

$$u_L = \frac{d\Psi}{dt} = L \frac{di}{dt}. \quad (1-1-14)$$

这就是电感元件的特性方程式。它表明: 在某一时刻电感两端的电压只取决于该时刻的电流

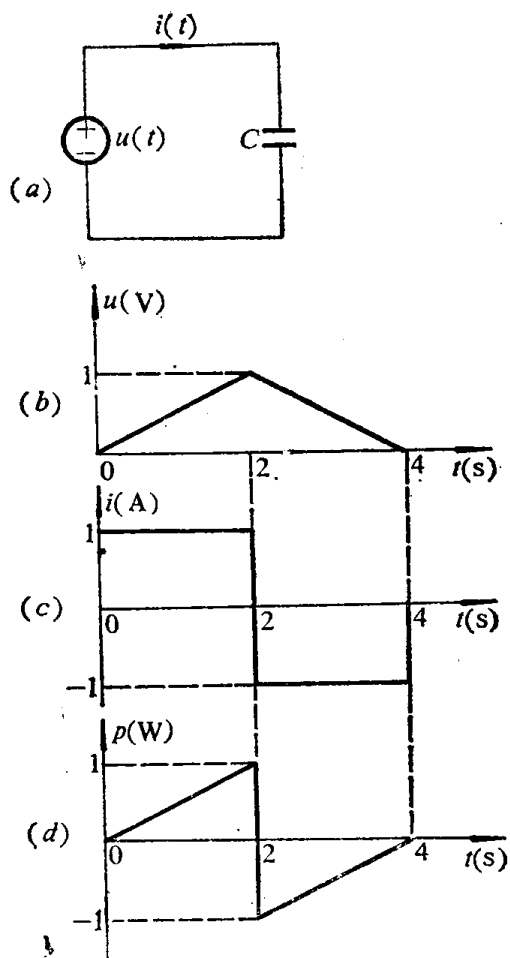


图1-1-12 例1-2图

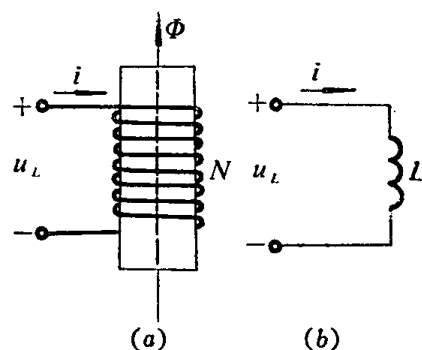


图1-1-13 电感元件及其表示符号

变化率，而与该时刻电流的大小无关。这一特性称为电感的动态特性。故电感元件也称为动态元件。

式(1-1-14)是在 u_L 和 i 的参考方向一致的前提下建立的，在这一前提下，该式才能正确地反映感应电压 u_L 的实际极性，才能符合楞次定律的要求。如图1-1-13所示，当电流增大时， $\frac{di}{dt} > 0$ ，根据式(1-1-14)得 $u_L > 0$ ，它意味着电流的流入端为高电位，电流的流出端

为低电位，这时感应电压的方向与参考方向一致。当电流减小时， $\frac{di}{dt} < 0$ ， $u_L < 0$ ，这时感应电压的方向（电流的流出端为高电位，电流的流入端为低电位）与参考方向相反。

式(1-1-14)还表明了电感元件的一个重要特性，如果电感两端的电压保持为有限值，则流过电感的电流只能连续变化而不能跃变，这和电容电压不能跃变的道理是类似的。

若把电感电流 i 表示为电压 u_L 的函数，可对式(1-1-14)积分，便得

$$i = i(t_0) + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t u_L dt, \quad (1-1-15)$$

即在某一时刻 t 的电感电流值取决于初始值 $i(t_0)$ 以及从 t_0 到 t 时间内的电压值。所以电感也是一种有“记忆”功能的元件。

若将式(1-1-14)两边乘以 $i dt$ ，并积分，得：

$$\int_0^t u_L i dt = \int_0^i Li di = \frac{1}{2} Li^2,$$

即
$$W_L = \frac{1}{2} Li^2. \quad (1-1-16)$$

这说明电感元件，在时间由0到 t ，电流由0变到 i 的过程中，从电源吸收的电 能转换为磁场能量；而电感元件在某一时刻的储能只与此时刻所载电流的平方成正比。电感也是一种储能元件。（式1-1-16）是计算磁场能量的公式。

1-2 系统的定义·等效网络

我们经常用到电路、网络 and 系统这三个词，到底它们三者之间有什么异同呢？

系统是由若干个相互作用的电路和器件组合而成的具有特定功能的整体。显然，这里是指电系统，不涉及更广义的系统概念，如各种物理系统和非物理系统等等。

网络与电路二词没有本质上的差异，完全可以通用。当研究一般性的抽象规律时多用网络一词，而讨论一些指定的具体问题多用电路一词。

系统与网络（或电路）二词的差异不仅是在结构形式的复杂程度方面，其主要还体现在观察事物的着眼点或处理问题的角度方面。

电路着眼于网络内部或局部的电流和电压的计算。系统则着眼于网络的端点特性、整体的功能以及对系统的状态作统一的描述。在分析方法上，系统注重输入（激励）与输出（响应）的因果关系，等效变换法，框图表示法和系统模型等等。本书也将采用这些方法。在这一节里只介绍等效网络的一般概念。