

高等学校教材

电路与电机

主 编 韩大同
副主编 宋国荣



DL

DL

等学心

电路与电机

中

TM13

电 路 与 电 机

特邀审稿 肖达川教授

主编 韩大同 副主编 宋国荣

中国劳动出版社

内 容 提 要

本书根据现行高等学校工科电工学教学大纲编写,可作为工科非电专业本科教材,经适当删节也可用于大专。

本书由电路和电机两部分组成。第一至第六章为电路部分,包括:电路基本知识、电阻电路分析、动态电路时域分析、正弦稳态分析、三相电路、非正弦周期电流电路等。第七章以三相异步电动机为主,同时介绍了变压器、单相异步电动机、直流电动机等。第八章介绍实用电工知识,这部分内容看来有些简单,但对学生的全面发展却具有一定启蒙作用。

2538/35

电 路 与 电 机

责任编辑:吕 元

中国劳动出版社出版发行
(北京地安门西大街教场胡同4号)
北京振华印刷厂印刷

新华书店北京发行所经销

787×1092毫米 16开本 13.25印张 318千字
1990年10月第一版 1990年10月第一次印刷
印数 9300册

ISBN/-5054-0545-5/G·094 定价:6.50元

序

韩大同、宋国荣等同志编写的《电路与电机》一书脱稿后，要我写一序言。我对电工学不甚熟悉，感到写序困难，但盛情难却，只好勉力为之。

解放后的工科大学教育，从1952年院系调整算起，至今快四十年了。在这么长的时间里，积累了不少经验。目前许多人认为专业面宜宽，基础宜广。以电工学为例，不少非电专业已在课程中扩充了电子技术的内容，就是明证。本书的姊妹篇《电子技术基础》也将出版，说明在某些非电专业里电子技术已单独设课。

电工学作为非电专业的一门技术基础课，只能介绍一些基础知识，为学生毕业后的工作需要或发展打下基础。电路理论是电工程的基础理论之一，而线性定常电路的分析又是电路理论的基础。本书以三分之二的篇幅介绍这一部分内容，由电路元件入手，依次介绍电阻电路、一阶电路、正弦稳态直到非正弦周期稳态，由浅入深，秩序井然。掌握好这一部分，学习电子技术就不会有大困难；并为读者以后在电路理论方面进一步学习，提供了良好的基础。

电动机在工业上得到广泛的应用。本书以四分之一篇幅介绍了变压器、电动机及其控制等内容，而以异步电动机为主。非电专业的毕业生作为电机的使用者，不必详细理解电机内部的电磁过程，只需了解它的主要运行性能。以异步机为例，书中除了简单介绍旋转磁场原理以外，抓住了电机的转矩公式这一核心内容，运用正弦稳态分析的知识，分析了电动机的各种特性。循此线索，读者可以理解电动机的起动、调速、制动等技术措施。

最后一章是“实用电工”，这可能是电工学教材的一个新的尝试。着眼于“实用”，这一章只介绍电器的使用、维护等方面的知识以及安全用电。选材既针对国防工业的需要例如介绍了发电机和蓄电池，又针对了日常生活中的常用电器例如电风扇用电机的调速方法。可以预期，这一章的内容会在此书出版后的教学实践中得到完善。

本书的作者多是军事院校的老师，书中多处提到所述知识在军事方面的应用，这可以提高军事院校学生学习本书的积极性。

本书的出版，使电工学教材百花园中添了一朵新花。谨祝它在读者群中盛开，以不负本书作者付出的艰巨努力。

肖达川

1990·8 91

前 言

《电路与电机》是由几所兄弟院校的同行们合作编写的一本教材，它包括“电路”、“电机”两大部分。

教材电路部分采用现代电路理论进行分析，强调模型化的研究方法；电机部分以较小的篇幅覆盖了较宽的知识范围，全书内容安排努力做到科学合理。教材突出实用性，适量减少数学推导，努力达到物理概念清晰以便于学生理解，叙述深入浅出以方便学生阅读。教材中增加了实用电工的内容（第八章），配合实验将有利于丰富学生的实际知识，培养学生关心实际问题的兴趣。

清华大学肖达川老师在百忙之中抽出时间为本书撰写了序言并审阅了书稿，肖老师的热心指导对我们教益非浅，全体编辑对此深表感谢。

本书主编韩大同，副主编宋国荣。编辑分工为：第一章南昌陆院韩大同、第二章南京海医王洁莹、第三章华东交大王冰蓉、第四章南昌陆院谢九如、第五、六章西安陆院章勇、第七章大连陆院宋国荣、第八章西安陆院章勇。韩大同负责统稿。

本书特邀审稿肖达川教授，审稿谢九如副教授，在本书编写过程中西安陆院宋芝俊主任也曾审阅过书稿，提出了不少宝贵意见。

定稿前，书稿曾经过全体编辑的认真研究讨论，本书是全体编辑共同劳动的成果。

本书的编写、出版自始至终都得到了南昌陆院、大连陆院、西安陆院、南京海医、华东交大各院校院、部首长及教研室领导的支持和关怀。

饶民强同志组织了出版前整理书稿、描制插图等技术性工作，参加这项工作的还有熊燕鸣、胡来沫、梁红等，张吉民、梅金妹、章中和等参加了其它编辑辅助工作，他们都为本书出版做出了可贵的贡献。值此本书正式出版之际，谨向为本书出版付出了辛勤劳动的全体同志一并表示深忱的谢意。

编者

1990 · 6 ·

目 录

第一章 电路、电路元件和电路定律.....	(1)
1—1 电路和电路模型.....	(1)
1—2 电阻元件.....	(3)
1—3 电感元件.....	(5)
1—4 电容元件.....	(7)
1—5 电压源与电流源.....	(10)
1—6 基尔霍夫电流定律.....	(12)
1—7 基尔霍夫电压定律.....	(14)
习题.....	(15)
第二章 电阻电路分析.....	(18)
2—1 简单电阻电路.....	(18)
2—2 实际电源的电路模型及含源支路的等效变换.....	(23)
2—3 星形和三角形联接电阻电路的等效变换.....	(26)
2—4 支路电流法.....	(30)
2—5 节点电压法.....	(33)
2—6 叠加定理.....	(34)
2—7 戴维南定理和诺顿定理.....	(37)
习题.....	(41)
第三章 动态电路的时域分析.....	(44)
3—1 电路的暂态过程及初始条件.....	(44)
3—2 一阶电路的零输入响应.....	(49)
3—3 一阶电路的零状态响应.....	(54)
3—4 一阶电路的全响应和三要素法.....	(62)
3—5 R C 电路的应用.....	(70)
习题.....	(74)
第四章 正弦稳态分析.....	(78)
4—1 正弦电压与电流.....	(78)
4—2 正弦量的相量表示法与相量图.....	(81)
4—3 电阻、电感、电容元件上电压与电流的相量关系.....	(86)
4—4 基尔霍夫定律的相量形式.....	(92)
4—5 电阻、电感与电容的串联电路、复阻抗.....	(93)
4—6 电阻、电感与电容的并联电路、复导纳.....	(96)
4—7 简单正弦电流电路的分析与计算.....	(98)
* 4—8 复杂正弦电流电路的分析与计算.....	(101)
4—9 电路中的谐振.....	(103)
4—10 正弦电流电路中的功率及功率因数.....	(109)

习题.....	(113)
第五章 三相电路.....	(119)
5—1 三相电路.....	(119)
5—2 对称三相电路的计算.....	(123)
5—3 不对称三相电路的概念.....	(126)
5—4 三相电路中的功率.....	(128)
习题.....	(130)
第六章 非正弦周期电流电路.....	(132)
6—1 非正弦周期量的分解.....	(132)
6—2 非正弦周期量的有效值.....	(134)
6—3 非正弦周期电流电路的计算.....	(135)
习题.....	(137)
第七章 电动机及其控制.....	(138)
7—1 磁场与磁路.....	(138)
7—2 交流铁心线圈电路.....	(141)
7—3 变压器.....	(143)
7—4 三相异步电动机的结构.....	(148)
7—5 三相异步电动机的工作原理.....	(150)
7—6 三相异步电动机的机械特性.....	(154)
7—7 三相异步电动机的起动.....	(159)
7—8 三相异步电动机的调速.....	(162)
7—9 三相异步电动机的制动与反转.....	(163)
7—10 三相异步电动机的技术数据.....	(164)
7—11 单相异步电动机.....	(167)
7—12 直流电动机.....	(171)
7—13 控制电器和控制系統.....	(177)
习题.....	(187)
第八章 实用电工.....	(190)
8—1 常用电源.....	(190)
8—2 常用低压电器.....	(193)
8—3 安全用电.....	(199)
习题参考答案	

第一章 电路、电路元件和电路定律

本章讨论什么是电路；“电路”学科研究什么内容；“电路”学科的研究方法；介绍电路的基本元件：电阻、电感、电容、电压源、电流源、受控源；研究电路的基本定律——基尔霍夫电流定律和电压定律。

1—1 电路和电路模型

现代世界是一个高度电气化的世界，电同人们的关系十分密切，它已深入到生产和生活的每个角落。电气化的水平乃是生产力发展水平的一个重要标志。这里的电气泛指电力和电子两大范畴。城市的夜晚被各种灯光照耀得如同白昼，工厂里靠电力运转各种机器，坦克炮塔的旋转、雷达天线的跟踪、飞机、舰艇以及各类自动化武器的正常工作都离不开电机、电器，以上事例属于电力范畴；公司经理与远在异国他乡的销售人员用电话联系沟通信息，太空探测器将月球、金星的表面状况用清晰的图象信号发回地球，制成照片供人们研究，上级指挥员用电话或无线电台向下级部队下达战斗命令，这些是有线或无线通信的事例，属于电子范畴。随着现代化的发展，我军自动化指挥网日趋完善，它是计算机与通信网相结合的电子智能系统。家用电器给人们生活带来不少欢乐和方便，增加了人们生活的情趣。机器人能演奏各种世界名曲，回答客人们提出的各种问题。以上种种从各个侧面说明现代社会电气化的普及，而构成这些电气设备、电气系统的基础是**电路**。

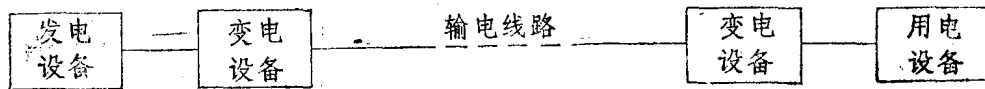


图 1-1 供电系统示意框图

图1-1是一个供电系统的示意框图。该系统由发电设备、变电设备、输电线路和用电设备组成，发电设备主要是发电机，变电设备主要是电力变压器，用电设备则包括照明、电热、电机及各种工业或民用电器。这些电器设备的电气部分又是由各种不同形式的电路组成的。

图1-2是一个有线通信系统的示意框图。在北京可以经过它与南京通话。如果我们

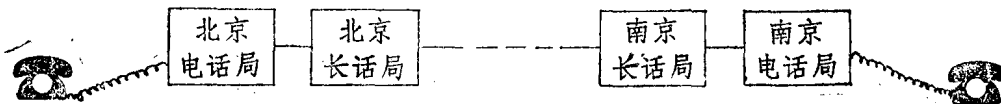


图 1-2 有线通信系统示意框图

深入一步地考察,这个大系统可以分解为许多不同层次的子系统。通信系统中包括用户设备、地区交换设备、长途交换设备、多路设备、发送设备、接收设备等等。这些设备又是由放大器、振荡器、调制器、解调器、取样器、限幅器、编码器、译码器等小单元所构成的,放大器、振荡器等构成电子设备的这些小单元通称**电子电路**。

在各种电子系统(如通信系统、控制系统)和电力系统(如供电系统、拖动系统)中存在着功能不同形态各异的各种电路。

以电路(Circuit)为研究对象的“电路理论”是一个专门的学科,在这个学科里并不研究各种实际电路如放大器、振荡器等,实际电路的有关问题将在后续课程中讨论。

“电路理论”作为一门基础学科,它研究实际电路的模型——电路的科学抽象。按组成电路的元件种类来分,电路可分为电阻电路和动态电路两类。这也就是本书电路部分将要讨论的两部分内容。从1845年著名的基尔霍夫定律发表至今已有140多年的历史,电路理论这一学科已经发展到相当严密完整的程度,它是现代电气工程的重要理论基础之一。

电路是由各种电路元件通过不同方式联接而成的。实际电路常常很复杂,在电路理论研究中,为了研究的方便,以模型代替实物是完全必要的。将电路元件抽象化为理想元件(ideal element),将实际电路抽象化为电路模型(circuit model)是我们的基本研究方法。模型化的研究方法是一种具有普遍意义的科学方法,这种方法不仅用于电路理论,它还被广泛地应用于从自然科学到社会科学许许多多的领域之中。

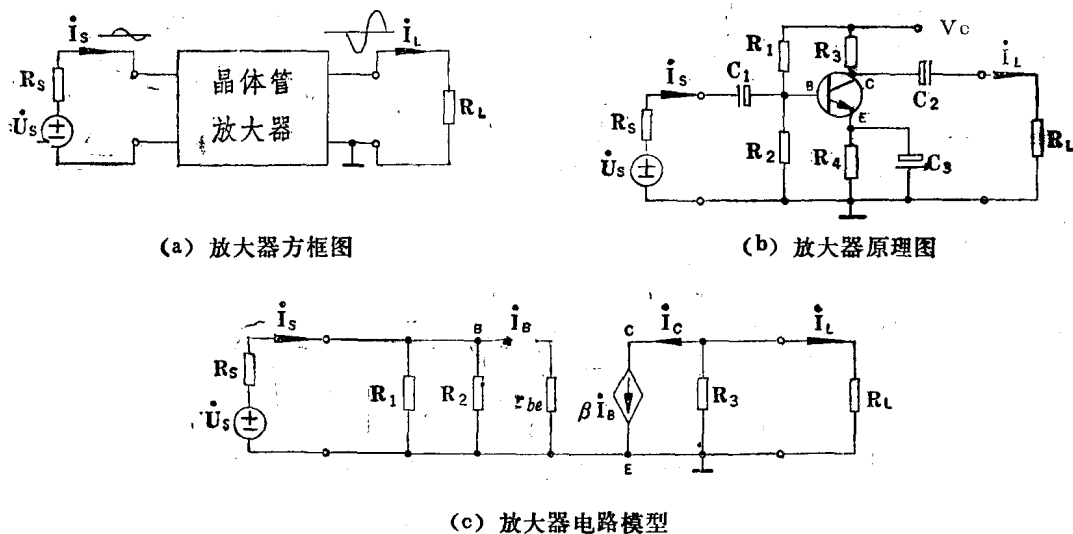


图 1-3 放大器电路及其模型

图1-3表示一个晶体管放大器和它的电路模型,这个模型是一个含受控源的电阻电路,这里是个一般的介绍,至于模型中各元件的含义以及如何将实际电路抽象化为一个合理的电路模型,下面的章节中将逐一讨论,目前还只能建立一个从实际电路到电路模型的初步印象。

用模型来代替实际电路进行分析,不可避免地要引入误差。我们的目标是抓住主要性质,略去细支末节。模型越简单分析自然就越容易,精确程度也就越差。反之,要使精确程度改善,模型就要复杂一些,带来的后果是分析难度加大。其中合理的取舍要依具体问

题酌定。

以上讨论的是电路的物理模型。有了物理模型，就不难形成数学模型。就电阻电路来说，其数学表达是一组代数方程。而就动态电路来说，其数学表达是一组微分方程。数学模型是电路分析的重要工具。

“电路”所研究的问题很多，限于时间，本书只研究其中的一些基本内容。我们的讨论将限制于线性、集总、定常电路的范围之内。描述线性电路的数学模型是线性方程组，集总电路的电路元件由集总参数元件组成，定常电路中元件的参数是不随时间变化的。

1—2 电 阻 元 件

电路由电路元件组成。从本节开始，我们要介绍几种主要电路元件。其中，无源元件有：电阻元件、电感元件和电容元件。有源元件有：电压源、电流源和受控源。这里所讨论的元件都是理想元件，至于实际元件与理想元件的差别以及如何合理地将一个实际元件抽象化为理想元件，将在稍后讨论。

一、电阻元件及其特性方程

电阻元件 (resistor) 是一种两端元件，它是电路的基本元件之一。在电路图中它的表示方法如图 1-4 所示，其图形符号是一个长方形方框，其文字代号是字母 R 。电阻元件可简称为电阻。

分析元件特征时，常常应用元件的特性方程，元件的特性方程表明了元件两端所加的电压 u 和通过元件的电流 i 之间的函数关系。

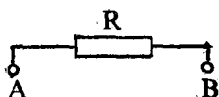


图 1-4 电阻元件

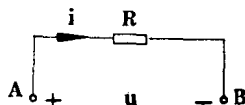


图 1-5 电阻元件的电路图

图 1-5 中电阻 R 的特性方程可表示为

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

或
$$i = i(u) \quad (1-2)$$

对于线性电阻，电阻值是一常数，与所加的电压 u 和通过的电流 i 无关，所以，上式可表示为

$$u = R \cdot i \quad (1-3)$$

或
$$i = G \cdot u \quad (1-4)$$

线性电阻的特性方程就是大家已熟知的欧姆定律，该定律表明通过线性电阻的电流 i 与电阻两端所加的电压 u 成正比。式 (1-3) 里的参数 R 称为电阻参数 (resistance)。请读者注意区分电阻元件和电阻参数，在中文里它们都可以简称为电阻。在国际单位制中 (注：本书电路部分将全部采用国际单位制，以后不另加说明。) 电阻 R 的基本单位是欧姆 (Ω)，辅助单位还有千欧 ($K\Omega$) 和兆欧 ($M\Omega$)。

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

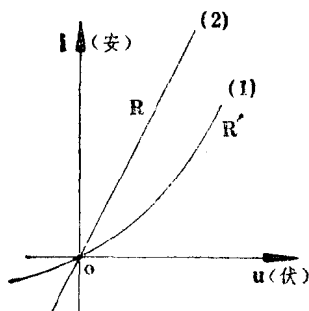


图 1-6 电阻的伏安特性

式(1-4)里的参数 G 叫做**电导参数 (conductance)**，它与电阻互为倒数关系。电导的基本单位是西门子(S)。

将电阻元件的特性方程描绘在伏(V)——安(A)平面上就得到了电阻元件的伏安特性曲线。电阻的伏安特性可以通过实验方法取得。在图 1-6 中给出了两个电阻的伏安曲线，曲线(1)是非线性电阻的特性曲线，直线(2)是线性电阻的特性曲线。伏安特性曲线和特性方程一样都是分析电阻特性的重要依据，对于非线性电阻，特性曲线具有更加重要的意义。

二、电阻元件的特点

从电阻的特性方程 $u = R \cdot i$ 中可知，当端电压 u 不变时，电流 i 随着参数 R 的增大而变小，它意味着电阻元件在电路中具有阻碍电流通过的性质，这也正是电阻名称的由来。我们把公式(1-3)写成 $u(t) = R \cdot i(t)$ 的形式，表示电压 u 、电流 i 随时间变化。由上式可知，任何瞬时 t' 的电流 $i(t')$ 与此时的电压 $u(t')$ 一一对应，与 t' 以前电压的历史情况无关，这种元件叫做**无记忆元件 (memoryless element)**。

从物理学中我们已经知道了电功率可表示为

$$p = u \cdot i \quad (1-5)$$

功率的单位是瓦特(W)。对于线性电阻，式(1-5)可写成

$$p = u \cdot i = R \cdot i^2 \quad (1-6)$$

因为电阻 R 一般不出现负值，所以电阻元件消耗的电功率 p 也不会出现负值，这表示电阻是一种耗能元件。由焦耳——楞次定律可知，电流流过电阻时产生的热能为： $Q = R \cdot i^2 \cdot t$ 。将该式与式(1-6)比较后可知，电阻元件上消耗的电能将全部转化为热能。由于电阻只消耗能量，不能提供能量，不能成为能源，所以它属于无源元件。

综上所述，**电阻是一种无记忆、无源耗能元件，在电路中它可将电能转化为热能。**

下面讨论电流及电压的参考方向 and 选择参考方向时的一般习惯。

电路分析中，我们将经常遇到给电流、电压等物理量标定方向的问题。在物理学中，对电流、电压的方向都已给出了明确的规定，电流的方向是指正电荷运动的方向，电压的方向为自高电位点指向低电位点，电动势则反之，其方向自低电位点指向高电位点。这些都是它们的实际方向。然而在电路分析中，我们经常遇到的情况是事先不知道电流、电压的实际方向，有时候电流、电压的方向是随时间交替变化的，为了计算方便，此时人为地约定一个方向为电流或电压的方向，这个方向叫做**参考方向 (reference direction)**。根据参考方向进行计算，如果算出来的电流 i 或电压 u 为正值($i > 0$, $u > 0$)则表示实际方向与参考方向一致，如果计算结果为负值($i < 0$, $u < 0$)则表示实际方向与参考方向相反。

图1-5中给出了电流、电压参考方向的标示方法，电流 i 用画在导线上的箭头标示其参考方向，电压 u 用“+”“-”符号标示其参考极性，“+”画在电位高端，“-”画在电位低端，表明电压 u 的参考方向是从A(+)指向B(-)的。有时也可以用箭头标示电

压的参考方向。电流和电压的参考方向还可以用双下标表示为 i_{ab} 、 u_{ab} 的形式。

电流、电压的参考方向本来是可以分别任意选择的，但通常在负载上选择参考方向时，电流、电压的参考方向应使其保持一致，即电流从高电位端流向低电位端，这样选出的参考方向叫做关联参考方向。对于电源，人们习惯上往往选择电流从电源的正端流出，电动势应取与电压相反的参考方向。如图1-7所示。

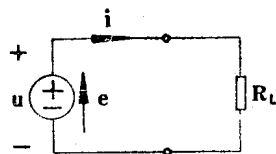


图 1-7 电流、电压的参考方向

1—3 电 感 元 件

一、电感元件及其特性方程

电感元件 (inductor) 也是一种两端元件，它和电阻元件一样，是电路的基本元件之一。在电路图中它的表示方法示于图 1-8，其图形符号是螺旋线，其文字代号是字母 L 。电感元件可简称为电感。

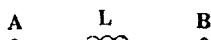


图 1-8 电感元件

电感元件的物理原形是线圈 (coil)，在导出电感元件的特性方程之前，我们首先复习一下物理学中有关线圈的知识。

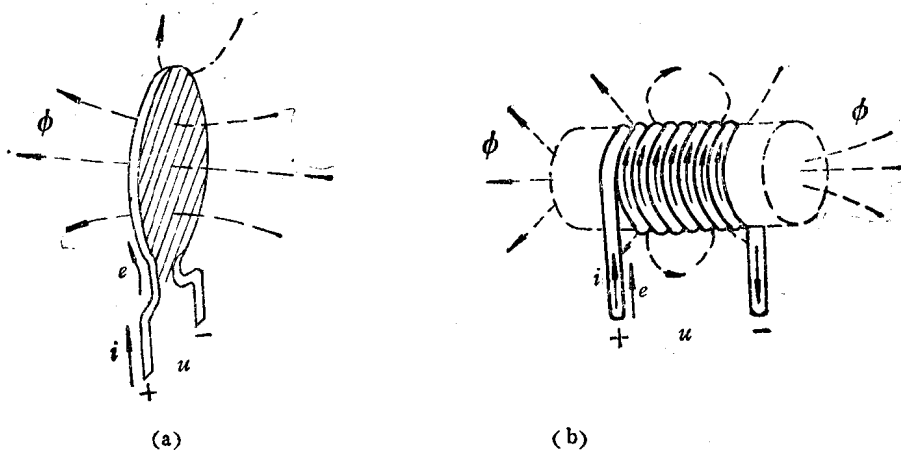


图 1-9 线圈中电流、磁链和电压的关系

物理学告诉我们，电流的周围有磁场存在。当在图1-9(a)所表示的空心线圈中通以电流 i 时，线圈周围就出现了磁场，其磁通量 (flux) ϕ 的大小与电流 i 的大小成正比，其方向与电流方向之间遵循右螺旋定则。磁通的单位是韦伯 (Wb)。如果通电线圈不只一匝，而是一个 N 匝密绕的螺线管，如图1-9(b)所示，那么通过该 N 匝螺线管的总磁通叫磁链 (flux linkage)，用 ψ 表示： $\psi = N\phi$ 。磁链与电流的关系表示为： $\psi = \psi(i)$ ，对于线性电感（如空心线圈或未饱和铁心线圈）来说，它表现为一个简单的直线关系，

$$\text{即} \quad \psi = L \cdot i \quad (1-7)$$

式中系数 L 叫做电感参数 (inductance)，简称电感，是个正值。和电阻一样，读者应注意它与电感元件的区别。电感 L 的基本单位是亨利 (H)，电感的辅助单位还有毫亨 (mH)

和微亨(μH)。

$$1\text{H} = 10^3\text{mH} = 10^6\mu\text{H}$$

当流经电感线圈的电流 i 随时间变化时, 电流 i 周围的磁通也随时间变化, 此时 $\frac{d\phi}{dt} \neq 0$ 。根据电磁感应原理, 变化的磁通将在线圈里诱发一个自感电动势 e , 我们取 e 的参考方向与电流 i 的参考方向相同, 如图1-9(b)所示。根据法拉第电磁感应定律可知, 此时

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} = - \frac{d\psi}{dt} \quad (1-8)$$

式中的负号表明, 自感电动势 e 总是力图阻止磁通的变化, 表现为一种保守势力。证明这一点并不困难, 首先让我们假定一个电流方向, (设图1-9中 $i > 0$) 然后分别考察电流增大时和减小时自感电动势 e 的方向, 就可以发现, 电流增大时 ($\because i > 0$, 增大, $\therefore \frac{di}{dt} > 0$,

$$\frac{d\psi}{dt} > 0, e < 0), e \text{ 与 } i \text{ 反向, 而电流减小时 } (\because i > 0, \text{减小}, \therefore \frac{di}{dt} < 0, \frac{d\psi}{dt} < 0,$$

$e > 0$), e 与 i 同向。它总是力图阻止线圈中原有电流的大小产生变化。

下面我们建立电感元件的特性方程。当图1-10中电感 L 上加有交变电流 i 时, 变化的磁

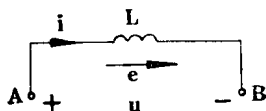


图 1-10 电感元件的
电路图

通将在 AB 间感生一个电动势 e , 其参考方向如图中标示。此时我们再定义 AB 两端电压 u 的参考方向为自 A 指向 B。大家知道电动势是自电位低端指向电位高端的, 它表示了电位升的方向; 而电压是自电位高端指向电位低端的, 它表示了电位降的方向。在图1-10中, 我们给 AB 间的电动势 e 和电压 u 选定了相同的参考方向, 十分明显, 它们之间的关系应该是 $u = -e$ 。

由式 (1-8) 可知
$$u = -e = \frac{d\psi}{dt} \quad (1-9)$$

将式 (1-7) 代入得到
$$u = \frac{d\psi}{dt} = \frac{d(Li)}{dt} = L \cdot \frac{di}{dt} \quad (1-10)$$

式 (1-10) 就是电感元件的特性方程, 它表明在电感元件上端电压 u 与流经电感的电流 i 的时间变化率 $\frac{di}{dt}$ 成正比。用电流 i 表示电压 u 时, u 、 i 之间为微分关系。

将式 (1-10) 积分有
$$i = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u(\tau) d\tau \quad (1-11)$$

或
$$i = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^0 u(\tau) d\tau + \frac{1}{L} \int_0^t u(\tau) d\tau = i_0 + \frac{1}{L} \int_0^t u(\tau) d\tau \quad (1-12)$$

式中 $i_0 = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^0 u(\tau) d\tau$, 它代表电感中 $t = 0$ 瞬间的电流, 叫做初始电流。当 $i_0 = 0$ 时有

$$i = \frac{1}{L} \int_0^t u(\tau) d\tau \quad (1-12)'$$

式(1-12)是电感元件特性方程的另一种表达形式,当用电压 u 表示电流 i 时, i 、 u 之间呈积分关系。

二、电感元件的特点

从公式(1-11) $i = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u(\tau) d\tau$ 中可以看到,在电感元件里某一瞬间 t 流经元件的电流 $i(t)$ 与元件两端所加电压 $u(t)$ 从 $-\infty$ 到观察时刻 t 的全部历史情况有关,这种元件叫做**记忆元件** (memory element)。

下面讨论电感中的能量。假定 $i_0 = 0$ (初始电流为零),我们考察从零瞬时到 t 瞬时输入电感元件的能量 $W(t)$,

$$\begin{aligned} W(t) &= \int_0^t p(\tau) d\tau = \int_0^t u(\tau) \cdot i(\tau) d\tau = \int_0^t L \frac{di(\tau)}{d\tau} i(\tau) d\tau \\ &= \int_0^{i(t)} L \cdot i(\tau) di(\tau) = \frac{1}{2} L \cdot i^2(t) \end{aligned} \quad (1-13)$$

因为电感 L 是个正值,从(1-13)式可知输入电感的能量 $W(t)$ 也是正值,因此从全过程看电感元件本身不能提供任何能量,它也是一种无源元件。上一节我们讨论的电阻元件是一种耗能元件,在这点上电感与电阻有本质的差别,送入电感的能量并不耗散,而是被它以磁能的形式储存于磁场之中,所以电感是一种**储能元件** (energy storing element),

$W(t) = \frac{1}{2} L \cdot i^2(t)$ 就表示了 t 瞬间电感 L 中所储存的磁场能量。

综上所述,电感是一种有记忆的无源储能元件,在电路中它可将电能转换为磁能而储存起来。

1—4 电 容 元 件

一、电容元件及其特性方程

电容元件 (capacitor) 也是一种两端元件,它和电阻、电感一样同是电路的基本元件之一。在电路图中它的表示方法示于图1-11,其图形符号是一

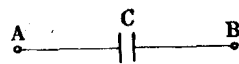


图 1-11 电容元件

对平行线,其文字代号是字母 C 。电容元件可简称为**电容**。

对应于理想电容元件的实际元件是电容器,我们首先复习一下物理学中有关电容器的知识。

在图1-12中给出某平板电容器 C ,其 AB 两端上加有电压 u ,此时电容 C 被充电,充电电流为 i ,上下极板上将分别储有电量 $+q$ 和 $-q$ 。根据电流的定义,电流 i 与电量 q 之间有微分关系

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-14)$$

$$\text{极板上的电量} q \text{ 可表示为 } q = \int_{-\infty}^t i(\tau) d\tau \quad (1-15)$$

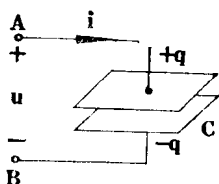


图 1-12 平板电容器

物理学还告诉我们, 电容器极板上所储存的电量 q 是与电容的两个端子上所加的电压 u 有关的, 电压愈高则储存的电量就愈多, 它们之间由确定的函数关系制约, 这个函数可表示为: $q = q(u)$ 。对于线性电容 (如空气介质金属片电容器) 来说, 该函数为一简单直线关系, 即

$$q = C \cdot u \quad (1-16)$$

式中系数 C 叫做电容参数 (capacitance), 简称电容, 它为一正值。读者也应注意它与电容元件的区分。电容 C 的基本单位是法拉 (F), 电容的辅助单位还有微法 (μF) 和微微法 (pF)。

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

下面我们建立电容元件的特性方程。

假定图1-13中电容 C 上加有交变电压 u , 根据式 (1-14) 及式 (1-16) 有

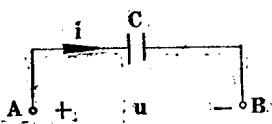


图 1-13 电容元件的电路图

$$i = \frac{dq}{dt} = C \cdot \frac{du}{dt} \quad (1-17)$$

式 (1-17) 就是电容元件的特性方程, 该式表明, 通过电容元件的电流 i 是与加在电容元件两端的电压 u 的时间变化率成正比的。用电压 u 表示电流 i 时, i 、 u 间呈微分关系, 这恰好与电感元件的情况相反。

将式 (1-17) 积分得到
$$u = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(\tau) d\tau \quad (1-18)$$

或
$$u = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^0 i(\tau) d\tau + \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau = u_0 + \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau \quad (1-19)$$

其中 $u_0 = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^0 i(\tau) d\tau$, 为电容上 $t = 0$ 时刻的电压, 叫做初始电压。当 $u_0 = 0$ 时

$$u = \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau \quad (1-19)'$$

式 (1-19) 是电容元件特性方程的另一种表达形式, 当用电流 i 表示电压 u 时, u 、 i 之间为积分关系。

二、电容元件的特点

从公式 (1-18) $u = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(\tau) d\tau$ 中可以看出, 某一瞬间加在电容元件两端的电压

$u(t)$ 与流经电容的电流 $i(t)$ 从 $-\infty$ 到观察时刻 t 的全部历史情况有关, 因此电容元件也是一种记忆元件。

下面讨论电容中的能量。我们研究当 $t = 0$ 时 $u_0 = 0$ 的情况，此时输入电容的能量 $W(t)$ 可表示为

$$\begin{aligned} W(t) &= \int_0^t p(\tau) d\tau = \int_0^t u(\tau) \cdot i(\tau) d\tau = \int_0^t u(\tau) \cdot C \frac{du(\tau)}{d\tau} \cdot d\tau \\ &= C \cdot \int_0^{u(t)} u(\tau) du(\tau) = \frac{1}{2} \cdot C \cdot u^2(t) \end{aligned} \quad (1-20)$$

因为 C 为正值，所以输入电容的能量 $W(t)$ 在任何瞬间都不会出现负值。这说明，从全过程看，电容元件本身不能提供任何能量，因此可以判定电容元件也是一种无源元件。在讨论电感元件的特点时曾经指出，电感将所获得的电能以磁场能量的形式储存起来，是一种储能元件。电容也是一种储能元件，它可将所获得的电能以电场能量的形式储存起来，

$W(t) = \frac{1}{2} C \cdot u^2(t)$ 就表示了电容在 t 瞬间所具有的电场能量。

综上所述，电容也是一种有记忆的无源储能元件，在电路中它可将电能以电场能的形式储存起来。

在这一节的最后，我们要简单地提一下有关实际元件的情况。理想元件是经过人为抽象化了的元件，每种元件只对应一个电路参数。然而实际元件并非如此简单，它们的主要特征可以用一个电路参数表示，但不可避免地会带有微量其它参数，叫做寄生参数。

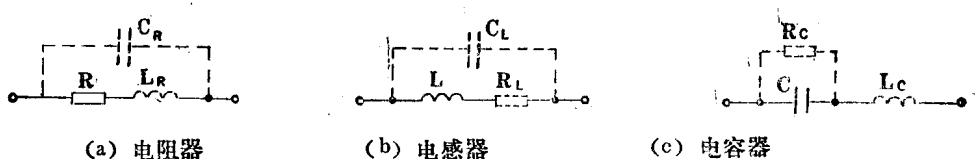


图 1-14 实际电路元件

图1-14中 (a)、(b)、(c) 分别表示电阻器、电感器、电容器的实际情况，其中 L_R 、 C_R 、 C_L 、 R_L 、 R_C 、 L_C 都是寄生参数。一般情况下，寄生参数在电路中的影响远小于基本参数，因此可以忽略不计。但在有些情况下，比如电阻器上电流突变时， $L_R \cdot \frac{di}{dt}$ 会很大，有时能达到与 $R \cdot i$ 相比甚至更大的量级，这时就应考虑 L_R 的影响。当电路的工作频率升高时，元件的寄生参数影响常常会变得明显起来，电路设计中应当注意这个问题。

在电路设计中，选用实际元件时，另一个必须考虑的问题是元件的额定值，如额定电压、额定电流、额定功率等等，额定值是元件正常使用时的限额值。 $10K\Omega$ 电阻 $\frac{1}{4}W$ 表示在正常使用中电阻的功率限制为 $1/4W$ ，超过了就有可能因过热而损坏。 $1\mu F$ 电容 $400V$ 表示在正常使用时电容的耐压限制为 $400V$ ，超过了就有可能因过压而被击穿。

1-5 电压源与电流源

前面三节介绍了电阻、电感、电容三个无源元件，本节要介绍有源元件：电压源、电流源和受控源。

一、电压源 (voltage source)

能提供一个不随输出电流 i 的变动而改变的确定的端电压 $u = u_s$ 的理想电源叫做电压源。

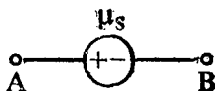


图 1-15 电压源

图1-15表示一个电压源，圆圈中的正负号表示电源的极性， u_s 为源电压。根据惯例，源电压的参考方向是从正极指向负极的。有时也可用电动势 e 表示一个电压源，如果选择 e 的参考方向为由负极指向正极，则很自然地 e 应等于 u_s ，即 $e = u_s$ 。

外特性 (external characteristic) 是电源的一项重要性能，所谓外特性是指电源的端电压 u 与输出电流 i 之间的函数关系： $u = f(i)$ 。

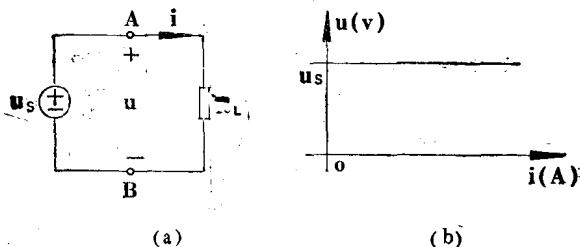


图 1-16 电压源的外特性

在图1-16 (a) 中给电压源 u_s 联接了一个负载 R_L ，此时有电流 i 从电源正端流出，电流 i 的大小随负载 R_L 的变化而变化，但根据定义电压源的端电压 u 将恒等于源电压 u_s 并不变动，因而在伏安平面上电压源的外特性是一条平行于横轴的直线，如图1-16 (b) 所示。这里要说明一下，所谓端电压 $u = u_s$ 确定不变，是指电压 u 不随电流 i 的变动而变动，在前面给出的电压源的定义中已明确了这一点，但对于时间 t 来说， u_s 可以是一个常量，也可以是某个确定的时间函数 $u_s = u_s(t)$ 。

下面我们讨论一下电压源的工作状态。在图1-16 (a) 中，当电压源加有负载并有电流流出时，电源就对负载做功，电源的输出功率

$$p_s = u_s \cdot i \quad (1-21)$$

大家一定已经注意到了，输出电流 i 的大小随着负载 R_L 的变小可以无限地增大下去，以至趋于无穷大，这样一来输出功率 p_s 也会随之趋于无穷大，而无穷大功率源在实际中是不存在的，因此电压源只是一种理想电源，是从实际中抽象出来的理想元件。

在电路分析中，电压源一般是一个提供能量的元件，在图1-16 (a) 中，当 $i > 0$ 时 $p_s = u_s \cdot i > 0$ 表示电压源向负载供电。如果负载 R_L 用另一个电源代替，并出现 $i < 0$ 的情况，即 $p_s = u_s \cdot i < 0$ ，这时的电压源 u_s 被另一个电源充电，因此它已经转化成一个负