

# 电路理论基础

〔苏〕В. П. 波波夫 编著

ОСНОВЫ  
ТЕОРИИ ЦЕПЕЙ

机械工业出版社

# 电路理论基础

〔苏〕 B.П.波波夫 编著

王炳启 译 刘继舜 校



机械工业出版社

本书阐述了集中参数与分布参数线性电路在稳态和过渡状态中的理论。对于非线性电阻电路的分析原理、矩阵-拓扑概念、图论、编制电平衡方程的机器方法，以及受控源电路分析等方面也都作了应有的论述。

本书可作为大专院校《无线电工程》专业的教科书，对于从事电子技术的科技人员也有一定的参考价值。

## ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЦЕПЕЙ

В. П. ПОПОВ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ВЫСШАЯ ШКОЛА», 1985

\* \* \*

### 电路理论基础

[苏] В. П.波波夫 著

王炳启 译 刘继舜 校

\*

责任编辑：蔡耀辉 版式设计：霍永明  
封面设计：郭景云 责任校对：王惠英

\*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南里一号楼)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

北京通县建新印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

\*

开本 787×1092<sup>1</sup>/<sub>16</sub>·印张 23<sup>1</sup>/<sub>2</sub>·字数 574·千字  
1989年12月北京第一版·1989年12月北京第一次印刷

印数 0,001—2,330·定价：17.00 元

\*

ISBN 7-111-01854-0/TM·244

## 译者的话

本书是B. II. 波波夫根据苏联《电路理论》教学大纲专为无线电工程专业的大学生编写的一本教科书。在教材内容取舍上，著者充分考虑了无线电技术电路的特点，对矩阵-拓扑概念、受控源和多端元件电路分析问题、复杂电路电平衡方程编写系统化方法等都作了一定的阐述，而在结构安排上，著者充分考虑到了无线电工程专业教学计划的特点，故采用本教材的结构来组织教学时，可使本门课程的开设提前到第一学期，这对于扭转目前电类专业学生一年级课松、二年级课紧的局面十分有益。本书所阐述的物理概念清楚；教授方法新颖并且重点突出。采用本书所讲授的方法进行教学，容易收到形象生动、明白易懂的效果。

参与本书翻译和校对的还有张锡亭、江铭池。译文中如有错误，敬请读者批评指正，不胜感谢。

译者

1988年2月于抚顺石油学院

## 前 言

本书与已知的电路理论方面的教科书的不同之处是，它是专为《无线电工程》专业的大学生编写的。在编写过程中，较全面地考虑了该专业教学计划的特点。

众所周知，在根据标准教学计划进行教学的高等学校里，《电路理论基础》课与《物理》、《高等数学》以及《工程计算技术》等课程是同时学习的。为了使《电路理论基础》课程的教学能够顺利进行，本书内容在结构安排上都作了全面考虑。例如，内容的讲解是从简谐激励下处于稳态电路分析开始的，尽管这种状态对于无线电技术电路不具有什么代表性。如果内容的阐述从时域分析开始，则整个电路理论教程可以安排得十分紧凑，而且前后没有矛盾。但是，根据标准教学计划进行训练的高等学校大学生，对于电路理论基础的这种阐述方法没有必要的准备，因为学生在开始学习本课程时，在微分方程和复变函数理论方面，还没有具备必要的知识。如果按照本书所安排的顺序进行教学，为了学习前五章，学生只要具备中学教程范围所规定的物理和数学知识（例如，能一般地了解直流电路的计算方法、积分、导数和复数的概念等）就足够了。

为了学习其余各章的内容，学生必须知道常系数常微分方程的求解方法和运算计算的原理（第六章），数值法和程序设计原理（第七章），复变函数理论基础（第九章）。

对于《无线电工程》专业的大学生，有关电路理论的学习，还将在《无线电技术电路和信号》、《放大设备》与《电工技术设备》等课程中继续进行，为了避免不必要的重复，周期非简谐激励下的电路分析问题和三相电路的分析方法等内容未编入本书。关于频谱法，在本书中只给出了最基本的概念，因为这种方法将在《无线电技术电路和信号》课程中详细地学习到。

考虑到无线电技术电路的特点，本书对矩阵-拓扑概念、含受控源和多端元件电路分析问题、复杂电路电平衡方程编写过程系统化方法等，都作了一定的阐述。例如，本书专门编写了《应用电子计算机的电路分析方法》一章。该章与《非线性电阻电路》一章一起，作为在《工程计算中的计算技术和自动设计控制系统原理》课程中，学习电路自动分析方法的必要基础。

本书使用的术语和文字符号，完全符合ГОСТ 19880—74和ГОСТ 1494—77的规定。物理量的单位引自СТ СЭВ 1052—78。但是，它对现行标准并未能考虑到，即在现代电路理论中所使用的全部概念和物理量。例如，在设计资料的单位制标准中，给出了在绘制电路原理图时所采用的图形符号，而在ГОСТ 1494—77中虽给出了规定的文字符号，但是，却没有给出相应电路等效电路图的图形符号和文字符号，而在电路理论中所必须涉及到的，却又主要是等效电路图。因此，在本书中除了给出的标准图形符号和文字符号外，还使用了规定的、但不是标准的符号或引入了新的符号。

根据ГОСТ 1494—77的规定，非时间函数表达式的复数，在其下面画上一条短横线，例如  $\underline{A}$ 、 $\underline{Z}$  等。表示简谐时间函数的复数，例如复振幅和复有效值等可用在其上加点的方

加以强调 ( $\dot{U}_m, \dot{I}$ )。虚数单位 $j$ 、复频率 $p$ 和某些复数特点可以从其书写形式直接看出的, 例如 $Z_{11}(j\omega)$ 、 $Y_{12}(p)$ 等则不用任何方法强调。

为了加深理解和消化电路理论基础课程, 必须演算大量的习题。为此, 可以参考 B. H. 比留科夫、B. П. 波波夫以及B. И. 谢麦佐夫合编的《电路理论习题集》。

# 目 录

译者的话

前言

绪论

## 第一章 电路理论基本概念

- 1-1 基本定义 ..... 2
- 1-2 理想无源元件 ..... 6
- 1-3 理想有源元件 ..... 14
- 1-4 电路拓扑结构 ..... 18
- 1-5 电路电平衡方程 ..... 34

## 第二章 简谐激励下的简单线性电路

- 2-1 含简谐电流源和电压源电路分析的任务 ..... 41
- 2-2 复振幅法 ..... 46
- 2-3 简谐激励下的理想无源元件 ..... 58
- 2-4 简谐激励下简单线性电路分析 ..... 64
- 2-5 简谐激励下简单电路的能量过程 ..... 71
- 2-6 电路变换 ..... 78
- 2-7 互感电路 ..... 92

## 第三章 简单电路频率特性

- 3-1 线性电路的频率特性 ..... 107
- 3-2 串联振荡回路 ..... 116
- 3-3 并联振荡回路 ..... 129
- 3-4 耦合振荡回路 ..... 138

## 第四章 在简谐激励下, 线性恒定参数电路分析

- 4-1 电路电平衡方程形成方法 ..... 148
- 4-2 电路理论的基本定理 ..... 161
- 4-3 信号流图法 ..... 171

## 第五章 非线性电阻电路

- 5-1 非线性电阻电路的分析任务 ..... 181
- 5-2 非线性电阻电路的图解法 ..... 185
- 5-3 非线性电阻元件伏安特性的近似算法 ..... 191
- 5-4 简谐激励下的非线性电阻元件 ..... 197

## 第六章 线性集中参数电路过渡过程分析方法

- 6-1 过渡过程的分析任务 ..... 200

- 6-2 过渡过程经典分析法 ..... 204
- 6-3 过渡过程的运算分析法 ..... 216
- 6-4 线性电路的运算特性 ..... 223
- 6-5 线性电路的时间特性 ..... 228
- 6-6 应用叠加原理分析线性电路中的过渡过程 ..... 235

## 第七章 应用电子计算机的电路分析方法

- 7-1 电路机器分析的任务 ..... 241
- 7-2 适用于电路机器分析程序而采用的电平衡方程的编写方法 ..... 243
- 7-3 电路电平衡方程编写和求解方法的选择 ..... 250

## 第八章 四端网络和多端网络的理论基础

- 8-1 多端网络和含多端元件电路 ..... 252
- 8-2 传输四端网络的基本方程和一次参数组 ..... 273
- 8-3 非自治传输四端网络的特性参数和复频率特性 ..... 288
- 8-4 特殊形式的四端网络 ..... 296

## 第九章 电路综合

- 9-1 线性电路综合的任务 ..... 303
- 9-2 线性无源电路运算输入特性的基本性质和物理实现的准则 ..... 304
- 9-3 电抗二端网络的实现方法 ..... 309
- 9-4 线性无源四端网络的综合原理 ..... 315

## 第十章 分布参数电路

- 10-1 分布参数电路分析的任务 ..... 321
- 10-2 简谐激励下的均匀长线 ..... 323
- 10-3 均匀长线的运算特性和复频率特性 ..... 334
- 10-4 分布参数电路的过渡过程 ..... 341
- 10-5 特殊类型的分布参数电路 ..... 348

结束语

附录 ..... 355

参考文献 ..... 359

名词对照表

## 绪 论

电路理论是在科学和技术两个相邻领域——电工技术和无线电技术中被广泛利用的重要工具。在这两个相邻的领域中，彼此间有许多共同点，它们建立在共同的物理基础上，但用来解决不同的技术任务。电工技术的主要任务是研究电能的产生、传输和转化（例如，将电能转换为机械能、热能和光能等）；而无线电技术则主要是解决与信息传输和处理的电现象的有关问题。例如，通信、无线电定位、无线电导航、远距离控制、远距离测量、各种生产过程的自动化以及许多其它的任务都属于这类问题。可以毫不夸大地说：无线电技术和电工技术，对于进一步提高劳动生产率和广大群众的物质利益，改善产品质量和建立共产主义的物质技术基础都具有十分重大的意义。

与电工技术设备和无线电技术设备的工作原理无关，在它们之中都会产生服从于同一物理规律的同一电磁过程。

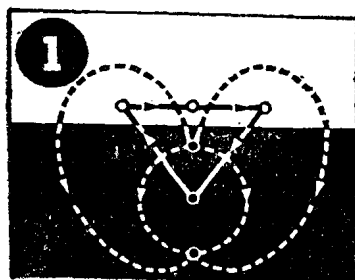
电磁现象和基于电磁现象的设备，可以借助于运用矢量（例如，电流密度、电场强度和磁场强度）的电磁场理论即可严格地加以描述。利用电磁场理论，借助于偏微分方程（麦克斯韦尔方程），即可描述电磁场中每一点的过程。这种场论的方法，提供了以统一的形式来研究发生于任何电工技术设备和无线电技术设备（包括天线、波导、电真空仪器和半导体仪器在内）中的各种电现象的可能性，但是由于这种方法十分复杂、费力，因而在实践中只能用来解决有限的问题。

为了研究更多的设备，可以采用简化的方法，即采用电路理论的方法。这种方法的基础是立足于实际设备用简化模型加以代替，而模型中的过程，则可以借助于标量（电流和电压）来进行描述。在这种条件下，设备的各独立组成部分（元件），用能近似反映其基本性质（在所要解决的问题范围内）的模型代替。

探讨在基于电工技术设备和无线电技术设备采用简化模型代替并研究在该设备中出现的过程的工程方法，是电路理论的课题。

但是，由于电路理论的方法采用了许多假设，所以和场论的方法相比较，其适用面要窄些，特别是这种方法不能用于高频。在高频的情况下，电磁振荡的波长已经可以同所研究设备的尺寸相比较。但这种方法也不能用于研究无线电波的发射、传播和接收。在高压工程中，在确定电路各种元件的参数和建立简化模型时，电路理论方法的应用会受到限制。因此在这种情况下，为了研究电路中的某些过程，以及估计借助电路理论所得结果的适用范围，必须利用电磁场理论的方法。





## 第一章 电路理论基本概念

### 1-1 基本定义

#### 电路

构成电流通路的元件的总和，称为电路。在电路中发生的电磁过程，可以借助于电动势、电流和电压的概念加以描述。电路的组成部分（元件）可以分为两大类：电源和负载。

将化学能、热能、机械能和其它形式的能转换为电能的各种设备属于电源（一次电源），例如，化学电池，蓄电池、太阳能电池和水力发电机等。

将电能转化为其它形式的能量以及储存电能的各种电路元件属于负载，例如，电动机、电子管、电容器、电感线圈、电阻器、发射天线和无线电扩音机等。

有一种特殊类型的设备为二次电源，例如，各种供电设备、整流器、稳压器和接收天线等。在这种类型的设备中，其目的在于实现电流和电压的各种转化，例如将直流电转换为交流电，交流电转化为直流电以及变压等。由于二次电源要从一次电源处获得电能，所以对一次电源来说，二次电源应视为一次电源的负载，而对于从二次电源取得电能的其它电路部分，则二次电源应视为电源。

电路的基本元件——电源和负载，彼此之间借助于辅助元件如联接导线、电键、插头和按钮等相连接。电路的各元件为了同电路其它部分相连接，必须安装有称为端钮或极的外部接头。根据外部接头的数量，可将电路元件分为二端元件（如电阻器、电容器和电感器等）和多端元件（如晶体管、变压器和电子管等）。

在电路理论中，假设电路的每个元件均用其端钮处电流与电压间的关系来说明其特性，而元件内部发生的过程则不属于电路理论研究的范围。

根据电路理论的研究方法，实际电路的元件应该用由理想元件组成的简化模型代替。在电路理论中，使用了五种理想的二端元件：电阻、电容、电感、理想电压源和理想电流源。在最简单的情况下，一个实际元件的模型仅由一个理想元件构成。在一般情况下，一个实际元件的模型可由若干个理想元件连接而成。在某些特殊情况下，还使用了理想多端元件，如受控电流源、受控电压源和理想变压器等。

将原始实际电路中的每个实际元件，用由其理想元件所构成的简化模型代替而得到的电

路，称为**模型电路**或**理想电路**。在电路理论中所研究的，也恰好是发生在这种电路中的过程。

## 电流

传导电流（为简便起见，以后将简称其为电流）是自由载流子的有秩序的运动。众所周知，在金属中，带负电的自由电子是自由载流子，而在液体和气体中，不仅负离子，而且正离子也都是自由载流子。

在任何导体中，载流子的有秩序运动将沿着两个可能方向之一进行。据此，电流的方向也为该两个可能方向中的一个。人们规定带正电载流子的移动方向作为电流方向（与载流子的种类无关）。所以在应用最广的导电材料——金属中，电流的方向与载流子——自由电子的实际移动方向相反。但是在实际电路中，电流的实际方向往往难以在电路图中标出。例如，交流电路的电流，其方向随时间而变化，很难用一个固定的箭头来表示其真实方向。即使在直流电路中，在求解较复杂的电路时，也往往难于事先判断电流的真实方向。为了解决这一困难，我们引入参考方向这一概念。在分析电路时，电流的参考方向可以任意选定，并用箭头在电路图上示出。如果根据选定的参考方向进行计算，所得电流带正号，则意味着电流的实际方向与所选定的参考方向一致；反之，若所得结果带负号，则表明电流的实际方向与所选定的参考方向相反。电流的参考方向又称为正方向。

人们用单位时间内通过导体横截面的电荷的多少来定量评定电流的强弱。我们假设  $q = q(t)$  是在瞬间  $t$  时通过导体任一横截面的电荷（图1-1a）。现在来研究两个瞬间  $t_1$  和  $t_1 + \Delta t$ ，与这两个瞬间相应的电荷分别为  $q(t_1)$  和  $q(t_1 + \Delta t)$ 。根据定义，瞬间  $t_1$  的电流等于在时间间隔  $\Delta t$  内通过导体横截面的载流子所携带的电荷量与该时间间隔  $\Delta t$  之比，在  $\Delta t \rightarrow 0$  时的极限。

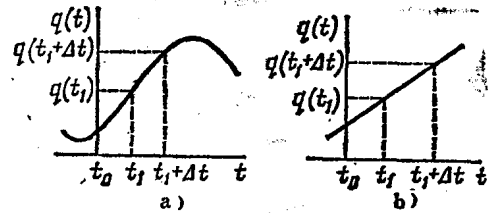


图1-1 电荷量与时间的关系  
a) 非线性关系 b) 线性关系

$$i(t_1) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{q(t_1 + \Delta t) - q(t_1)}{\Delta t} = \left. \frac{dq}{dt} \right|_{t=t_1} \quad (1-1)$$

因此，在任一瞬间  $t_1$  时的电流是一个标量，其值等于通过所研究导体横截面的载流子所携带电荷量对时间的导数。换句话说，即电流等于电荷量随时间的变化率。

在一般情况下，电流在任一瞬间  $t$  的数值（电流的瞬时值）是时间  $t$  的函数， $i = i(t)$ 。在特殊情况下，如果电荷量  $q$  是时间  $t$  的线性函数（图1-1b），则电荷量随时间的变化率  $I_-$  是一个常数，其值等于在时间  $t$  内通过导体截面的电荷量  $q(t)$  与时间  $t$  的比值

$$i(t) = \frac{dq}{dt} = \frac{q}{t} = I_- = \text{const}$$

因此，电流可以是直流（不随时间变化的电流）或交流。

在国际单位制中，电荷量的单位是库仑（C），时间的单位是秒（s），电流的单位是安培（A）。当直流电流为1A时，则意味着在1s的时间间隔内，通过导体横截面移动的电荷量

为1C。

### 电压

大家知道，电场中的任何电荷都要受到力的作用，而该力的大小和方向则与电场强度、电荷多少和符号有关。如果载流子是可以自由移动的（即不被束缚于某一固定点），那么在电场力的作用下将产生移动。这种电荷的移动依靠电场能进行。在电场任意两点A和B间移动单位正电荷，电场力所作的功在数值上等于这两点的电位差。提醒一句，电场中任何一点A的电位 $\varphi_A$ 等于电场力将单位正电荷由该点移到无穷远处所作的功。点A和点B之间的电位差，称为这两点间的**电压**，即

$$u = \varphi_A - \varphi_B$$

电路中的点A和点B之间的电压，也可以定义为将正电荷 $q$ 由点A移动至点B所消耗的电场能 $w$ 与该电荷 $q$ 的比值在 $q \rightarrow 0$ 时的极限

$$u = \frac{dw}{dq} \quad (1-2)$$

在国际单位制中，电压的单位为伏特（V），功的单位为焦耳（J）。在电路中电位差为1V的两点间移动1C的电荷时，做功为1J。

可以认为电压是具有确定方向的标量。通常是将自由正电荷在电场力作用下所移动的方向（即将从高电位指向低电位的方向）理解为电压的方向。显然，在不含电源而载流子移动依靠电场能进行的部分电路上，电压和电流的实际方向一致。

在电源内部，载流子是依靠外力移动的，即由非电磁过程，如化学反应、热过程和机械力作用所产生的力而移动的。载流子通过电源时，沿着与电场作用力相反的方向移动，例如正电荷从电源的低电位端向高电位端移动。所以，在电源内部，电流与电压的方向相反。

在计算电路时，经常需要将电压的实际方向同任意选定的作为电压正方向的方向进行比较。如果计算的结果是电路某一支路电压带正号，则意味着电压的实际方向与所选定的正方向一致，反之，如果所得电压带负号，则表示实际方向与正方向相反。

### 电动势

在电源内部，由于依靠外力移动载流子而将非电能转化为电能，因此人们引用电动势这一术语来表示电源的特性。电动势可以定义为：在电源内部，将单位正电荷由低电位端移至高电位端时外力所作的功。电源的电动势与外力的种类无关，在数值上它等于在电源内部电流为零时该电源两端的电压。电动势是一个标量，其方向同电源内部正电荷的移动方向一致，即与电流的方向一致。电压和电动势可以是时间的函数，也可以是一个常数，不随时间的变化而变化。直流电压和电动势分别用 $U$ 和 $E$ 表示，交变电压和电动势用瞬时值说明，分别用 $u = u(t)$ 和 $e = e(t)$ 来表示。

### 功率和能量

设在电路A点和B点之间的电位差为 $u$ ，通过这两点间的电路移动电荷 $dq$ ，这时电场力做功为 $dw$ ，根据式（1-2）和式（1-1）可知该值为

$$dw = u dq = u i dt \quad (1-3)$$

$dw$ 说明了电场能的变化，在数值上它等于在时间间隔 $dt$ 内进入所研究的这部分电路中的能量。对式（1-3）进行积分，就可以确定在时间 $t = t_1$ 时，输入该电路的能量

$$w = w(t_1) = \int_{-\infty}^{t_1} u i dt \quad (1-4)$$

此时选取积分下限  $t = -\infty$ ，目的是计算输入电路的全部能量。如果对于任一瞬间  $t$  来说， $w(t) \geq 0$ ，则说明所研究的这部分电路是耗能的，称之为无源电路。如果尽管仅某一瞬间  $w(t) < 0$ ，那么这部分电路便是含有电源的，称为有源电路。

能量对时间的导数（即能量在瞬间  $t$  的输入速度），称为这部分电路的瞬时功率

$$p = \frac{dw}{dt} = ui \quad (1-5)$$

由式 (1-5) 可知，瞬时功率等于电流与电压瞬时值的乘积。如果在所研究的瞬间，电流和电压的方向一致，则瞬时功率为正值，表明在该瞬间所研究的这部分电路从电路的其余部分获得能量。反之，如果电压与电流的方向不一致，则瞬时功率  $p$  为负值，即在该瞬间，所研究的这部分电路不是从外电路获得能量，而是向外输出能量。

将式 (1-5) 代入式 (1-4) 中，则在时间  $t = t_1$  时输入电路的能量，可以通过瞬时功率  $p$  表示为

$$w(t_1) = \int_{-\infty}^{t_1} p dt \quad (1-6)$$

显然，在时间间隔  $\Delta t = t_2 - t_1$  内，输入电路的能量  $W$ ，也可以通过瞬时功率  $p$  来表示

$$W = w(t_2) - w(t_1) = \int_{t_1}^{t_2} p dt$$

在国际单位制中，功和能量的单位都是焦耳 (J)，而功率的单位是瓦特 (W)。

### 电路图

电路图是电路的图示。在电工技术和无线电技术中，要遇到各种类型的电路图，如结构图、原理图和等效（计算）图等。

结构图是仅反映电路最重要的功能部分及其相互间基本联系的一种实际电路图示。

原理电路图是借助于图示符号来表示电路中的所有元件及其相互间的全部连接关系的实际电路图示。在 ECK II 标准中，规定了电路中的各种实际元件（晶体管、电阻器、电容器和变压器等）的图形符号和文字符号。

模型电路即在所要解决问题的范围内用以代替实际电路的，由理想元件组成的电路图示，亦称为等效电路图或计算电路图。该电路的每一个理想元件，都有一定的图形符号和文字符号（这些符号是非标准的）。等效电路图可从原理电路图得到，只要将原理电路图中的每个实际元件，用其等效电路图或替代电路图代替即可。

实际元件的替代电路图，是在所要解决的问题范围内模拟该元件的理想电路的图形。

应该考虑到，由于情况不同（如要求的计算精度、所研究的频率范围、所利用的计算方法等），相应于电路中的每个元件及整个电路，可能得到不同的模型电路和不同的等效电路图。例如，对直流和交流的等效电路图、对高频和低频的等效电路图、对电流和电压瞬时值

的等效电路图与对变换电流和电压的等效电路图等。

这里要指出的是，为了叙述紧凑，在文献中，电路的模型电路（仅是头脑中想象的）和等效电路图（替代电路图）之间常常是不加区分的，因而在这种情况下，替代电路图可以直接视为电路的计算模型。

## 1-2 理想无源元件

### 电阻

电路理论中所利用的二端元件电阻、电容和电感是无源元件，因为在任何一个瞬间，这些元件从电路其余部分所取得的电能总是正的或等于零。

电阻是一种将电能不可逆地转化为其它形式能量（例如热能、机械能和光能）的理想无源元件。在电阻中，不发生电场能和磁场能的储存。“电阻”这一术语一方面表示一种电阻元件，另一方面也表示这一元件的参数。

电路实际元件——高质量的电阻器（主要将电能转化为热能），就其性能而言，十分接近理想无源元件——电阻。电阻器的电阻是其最重要的特性，它决定了电能转化为热能的程度。在电阻器中，除了主要过程——电能转化为热能外，还伴有其它的过程，例如，电场能和磁场能的储存。理想电路元件——电阻，可以视为电阻器的仅概括其主要特性——电阻的简化模型。

总之，有三种情况可利用“电阻”这一术语：作为电路实际元件——电阻器的主要特性；作为理想电路元件的名称和这个元件的唯一特性。⊖

电阻的图形符号示于图1-2上。电压和电流的正方向用箭头标在图上，并在电阻图形符号旁边标上其文字符号 $R$ 。

电阻器的伏安特性，即电阻器端钮电流和电压之间的关系，可用下式表示

$$u = u(i) \text{ 或 } i = i(u)$$

该关系式在一般情况下呈非线性。对于直流电流和电压，或更准确地说，对于变化无穷缓慢的电流和电压所得到的相应关系，称为静态伏安特性（图1-3）。电阻器端钮上电流和电压瞬时值间的关系，称为动态伏安特性。

利用电阻器端钮上电流和电压瞬时值间的关系，可以确定它的静态电阻和动态电阻。静

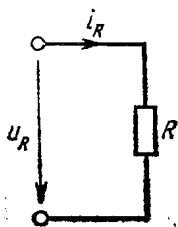


图1-2 电阻图形符号

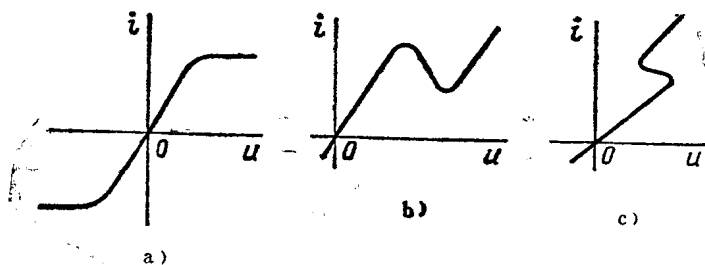


图1-3 电阻静态伏安特性

⊖ 利用“电阻”这一术语以及后面即将用到的“电容”和“电感”的术语，不仅作为实际元件和理想元件的特性，而且作为理想元件的名称是不完全合适的，这样做只是为了叙述的紧凑。更准确地说，当然也就更繁琐。相应的理想元件名称如下：“理想电阻器”、“理想电容器”和“理想电感器”或“理想电阻元件”、“理想电容元件”和“理想电感元件”。

态电阻是电阻器端钮上电压和电流瞬时值之比

$$R_{CT} = u_R / i_R \quad (1-7)$$

电阻器的动态电阻等于其端钮上电压瞬时值对电流瞬时值的导数

$$R_{ДИН} = du_R / di \quad (1-8)$$

在电流和电压无穷缓慢变化时的动态电阻,称为微分电阻 $R_{ДИФ}$ 。在一般情况下,电阻器的动态电阻不等于静态电阻,而且它们数值的大小均与工作点的位置有关,例如,在特性曲线 $u=u(i)$ 或 $i=i(u)$ 上,假设在 $i=i_1, u=u_1$ (图1-4a)处可以求得一个 $R_{CT}$ 和一个 $R_{ДИН}$ ,

如果改变 $i, u$ 的值,则此时静态电阻和动态电阻都会发生改变。 $R_{CT}$ 的大小正比于 $\operatorname{tg}\alpha$ ,即正比于从坐标原点向工作点所引直线倾角的正切,而 $R_{ДИН}$ 正比于 $\operatorname{tg}\beta$ ,即正比于在 $i=i_1$ 和

$u=u_1=u(i_1)$ 处曲线 $u=u(i)$ 切线倾角的正切。显然,对于所讨论的情况而言, $R_{CT} > R_{ДИН}$ 。分析图1-3不难发现,由于工作点选择的不同, $R_{ДИН}$ 的值既可以大于零,也可以小于零,在特殊情况下,还可以等于零。此时 $R_{CT}$ 总是大于零。

当电阻器端钮上的电流和电压之间的关系呈线性时(图1-4b), $R_{CT}$ 和 $R_{ДИН}$ 的大小与工作点的选择无关,并且彼此相等

$$R_{CT} = R_{ДИН} = R$$

此处 $R$ 为电阻器的电阻。

将电压和电流之间的关系呈线性,使得静态电阻与动态电阻彼此相等,且与工作点的选择无关的电阻器,称为线性电阻器。将 $u=u(i)$ 或 $i=i(u)$ 关系呈非线性的电阻器,称为非线性电阻器。应该指出,对于大多数的电阻器而言, $u=u(i)$ 或 $i=i(u)$ 的关系,总是与线性电阻有差别的,但是,在电压的有限变化范围内,这种非线性关系可以忽略,而将这种电阻器的电阻视为线性电阻。

理想电路元件——电阻,也可以用其端钮上电压与电流的关系及由该关系决定的静态电阻和动态电阻的数值来说明其特性。对于线性电阻来说,电流和电压之间的关系呈线性,而对于非线性电阻来说,这个关系则呈非线性。今后,若不作特殊说明,我们将局限于研究线性电阻电路。

在线性电阻端钮上,电流和电压之间的关系服从欧姆定律

$$u_R = Ri_R \quad (1-9)$$

$$i_R = Gu_R \quad (1-10)$$

式中  $G=1/R$ 为电导。

在研究电路时,在多数情况下,若将电导视为与电阻具有相同性质、图形符号相同而文字符号为 $G$ 的独立理想二端元件比较方便。理想电路元件——电阻和电导,它是属于电阻性或耗能性元件。电路中存在电阻和电导将导致电能的耗损,更确切地说,即将导致电能不可逆地转化为其它形式的能量。

电阻 $R$ 和电导 $G$ 的数值与工作点的选择无关,而且 $R > 0, G > 0$ 。在国际单位制中,电

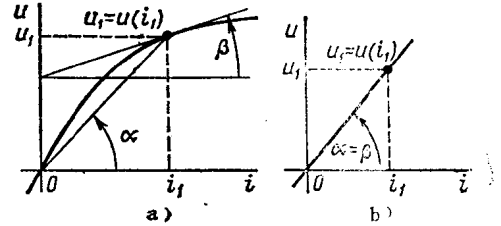


图1-4 电阻器的伏安特性

- a) 非线性电阻器的伏安特性  
b) 线性电阻器的伏安特性

阻的单位是欧姆 ( $\Omega$ )，电导的单位是西门子 (S)。

电阻的瞬时功率，也可以通过电阻  $R$  或电导  $G$  的值来表示

$$p_R = u_R i_R = R i_R^2 = G u_R^2 \quad (1-11)$$

在选定的电流和电压的正方向的情况下 (见图1-2)，电阻的瞬时功率是正值而输入电阻并在其中转化为其它形式能量的电能也总是正的 ( $u_R=0, i_R=0$  的情况除外)。

$$w_R(t) = \int_{-\infty}^t p_R dt = R \int_{-\infty}^t i_R^2 dt = G \int_{-\infty}^t u_R^2 dt > 0 \quad (1-12)$$

应该指出， $w(t)$  是随时间增长的函数，因为实际上它是在曲线  $p = p(t) > 0$  的情况下所围的面积。因此，在任何瞬间电阻只能从电源取用电能，而不可能向电路的其它任何元件提供电能。

### 电容

具有储存电场能性质，而在其中既不发生磁场能储存，又不会发生将电能转化为其它形式能量的理想电路元件，称为**电容**。实际电路元件——电容器，就其性质而言，十分接近于理想电路元件——电容。电容器储存电场能的能力是其主要的特性，但又与理想元件——电容不同，在电容器的介质和涂层中有能量损耗 (即将电能转化为其它形式的能量) 和磁场能的储存。

因此，可以利用“电容”这一术语作为理想电路元件的名称；作为该元件的特性以及作为决定电容器储存电场能能力的主要特性。

电容的图形符号示于图1-5上。

在电容中储存的电荷量  $q$  与电压  $u_c$  的关系——所谓库伏特性，在一般情况下具有非线性特点 (图1-6，曲线1)。

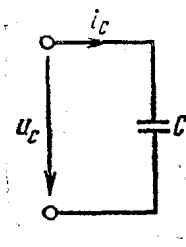


图1-5 电容图形符号

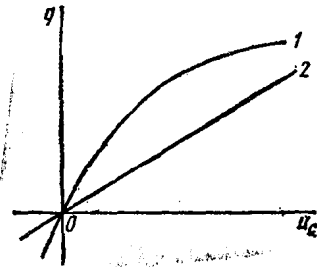


图1-6 电容库伏特性  
1—非线性 2—线性

电容储存的电荷量与其电压的数量关系，用静态电容和动态电容表示为

$$C_{CT} = q/u$$

$$C_{ДИН} = dq/du$$

在一般情况下，动态电容不等于静态电容，同时，这两个值与在库伏特性曲线  $q = q(u)$  上的工作点的选择有关。如果电容储存电量与电压关系呈线性 (图1-6，曲线2)，则动态电容与静态电容相等

$$C_{ДИН} = C_{CT} = C$$

并且与电压无关。

在国际单位制中，电容 $C$ 、 $C_{CT}$ 和 $C_{ДНН}$ 的单位都是法拉（F）。

电容值与电压无关的电容，称为线性电容；电容值与电压有关的电容则称为非线性电容。今后，若不作特殊说明，将仅限于研究含线性电容的电路。

现在来研究线性电容端钮上电流和电压瞬时值间的关系。显然，电容端钮上电压 $u_c$ 的任何变化，根据 $q=q(u)$ 可知，将导致电荷量 $q$ 的变化。电荷对时间的导数为电容的电流

$$i_c = dq/dt = (dq/du_c)(du_c/dt)$$

考虑到对于线性电容来说，其电荷量对电压的导数等于电容 $C$ ，并且与电压 $u_c$ 无关

$$C = dq/du_c = q/u_c$$

从而可以得到

$$i = C \frac{du_c}{dt} \quad (1-13)$$

从式(1-13)可以看出，电容电流正比于电容电压的变化率。如果电容端钮上的电压不随时间变化，则电容电流等于零。因此，电容对于直流的电阻为无穷大。

利用式(1-13)可以得到电容电压与电流的关系式

$$u_c = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i_c dt \quad (1-14)$$

积分从 $t=-\infty$ 瞬间开始，目的是考虑了电容的电荷量和电压 $u_c$ 全部的可能变化，同时假设在 $t=-\infty$ 瞬间时，电容端钮上的电压等于零。

假设对电容过程的观察从 $t=t_0$ 瞬间开始，并且电容初始瞬间的电压为

$$u_c(t_0) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^{t_0} i_c dt \quad (1-15)$$

将式(1-14)积分分为两部分

$$u_c = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^{t_0} i_c dt + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i_c dt$$

并利用式(1-15)得到电容在任一瞬间的电压

$$u_c(t) = u_c(t_0) + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i_c dt \quad (1-16)$$

电容的瞬时功率

$$p_c = u_c i_c = C u_c \frac{du_c}{dt} \quad (1-17)$$

如果电容上的电压（见图1-5）是正的（即其实际方向同箭头标示的正方向一致），且继续增加，那么根据式(1-17)可知，电容的功率亦将是正的，在这种情况下，电容将吸收能量而被充电。



如果  $u_c > 0$  且不断下降, 即  $du_c/dt < 0$ , 那么电容的瞬时功率是负的, 此时, 电容将放电, 即将原储存的能量供给外电路。

电容在任一瞬间  $t$  所储存的电场能, 取决于电容电压或它的电荷量

$$\begin{aligned} w_c = w_c(t) &= \int_{-\infty}^t p_c dt = C \int_0^{u_c} u du \\ &= C \frac{u_c^2}{2} = \frac{q^2}{2C} \end{aligned} \quad (1-18)$$

显然, 电容在任一瞬间  $t$  所储存的能量都不会是负值。

因此, 电容是电路中的一种理想无源元件, 由其工作状态决定, 它或者储存从电容外电路获得的电能, 或者将储存的电场能供给外电路。

### 电感

储存磁场能的理想电路元件, 称为电感。在电感中, 不发生电场能的储存, 也不发生将电能转化为其它形式的能量。实际的电路元件——电感线圈, 很接近于理想电路元件——电感。但是电感线圈又与电感不同, 在其中还将发生电场能的储存以及将电能转化为其它形式能量的过程, 例如热能。实际电路元件和理想电路元件储存磁场能的能力, 用称为电感的参数来表征。

因此, “电感”这一术语被用于作为理想元件的名称, 作为定量说明该元件性质参数的名称, 以及作为电感线圈基本参数的名称。

电感的图形符号示于图1-7上。

电感线圈的电压和电流的关系用电磁感应定律来确定。从该定律可知, 当穿过电感线圈的磁通发生变化时, 在电感线圈中将产生感应电动势  $e$ ,  $e$  的大小正比于线圈磁链  $\Psi$  的变化率, 而  $e$  的方向的决定则视为由  $e$  所引起的电流总是力图阻碍磁链的变化

$$e = -d\Psi/dt \quad (1-19)$$

线圈的磁链等于穿过线圈各匝磁通  $\Phi_i$  的代数和

$$\Psi = \sum_{i=1}^N \Phi_i \quad (1-20)$$

式中  $N$ ——线圈的匝数。

如果穿过线圈各匝的磁通相同 ( $\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi_3 \dots = \Phi_N = \Phi$ ), 则式 (1-20) 可变为

$$\psi = N\phi$$

在国际单位制中, 磁通和磁链的单位是韦伯 (Wb)。

在一般情况下, 穿过线圈每匝的磁通  $\phi$  中包含有两个分量: 自感磁通  $\Phi_{CH}$  和外磁场磁通  $\Phi_{BH}$

$$\Phi = \Phi_{CH} + \Phi_{BH}$$

第一个分量是由流过线圈本身的电流产生的磁通; 第二个分量取决于与线圈本身电流无

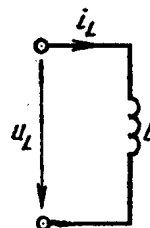


图1-7 电感的图形符号