

高等学校教材

# 电 路 基 础

范世贵 主编

西北工业大学出版社

TM13  
F13

高等学校教材

# 电 路 基 础

范世贵 主编

范世贵 孙传斌 王淑敏 编

西北工业大学出版社

1993年9月 西安

(陕)新登字 009 号

【内容简介】本书根据国家教委颁布的高等工业学校《电路分析基础课程教学基本要求》，按照西北工业大学拟订的《电路基础课程教学大纲》，在多年教学实践和集体讨论的基础上写成。

全书共 18 章：电路基本概念与定律，电阻电路等效变换，线性电路分析的基本方法，电路定理，非线性电阻电路，正弦稳态分析，耦合电感与理想变压器，网络图论与网络方程，谐振电路，非正弦周期电流电路与信号的频谱，二端口网络，含运算放大器的电路，一阶电路时域分析，二阶与高阶电路时域分析，复频域分析法，网络函数，状态变量法，非线性动态电路。每章后有习题及答案。

本书可作为电子、通信、自动化、自控、计算机、电力等专业本科生电路分析基础课程的教材，也可供其它专业选用和工程技术人员参考。

高等学校教材  
电 路 基 础

范世贵 主编

责任编辑 李 珂

责任校对 享 力

\*

©1993 西北工业大学出版社出版

(西安市友谊西路 127 号 邮编 710072)

陕西省新华书店发行

西北工业大学出版社印刷厂印装

ISBN 7-5612-0480-9/TN · 12(课)

\*

开本 787×1092 毫米 1/16 23.75 印张 576 千字

1993 年 9 月第 1 版 1993 年 9 月第 1 次印刷

印数：1—5 000 册 定价：12.20 元

# 前 言

电路基础(即电路分析基础或电路)课程是电子、自控、自动化、通信、计算机、电力等各类专业的一门技术基础课,主要研究电路的基本规律与分析计算方法,在教学计划中起着继往开来的作用。它一方面以高等数学、工程数学和物理学为基础;另一方面,它本身又是后续的技术基础课与专业课的基础,也是学生毕业后从事专业技术工作的重要理论基础。它是学生合理知识结构中的重要组成部分,在发展智力、培养能力和良好的非智力素质方面,均起着极为重要的作用。为适应提高教学质量的需要,我们根据国家教委颁布的《电路分析基础课程教学基本要求》和西北工业大学拟订的《电路基础课程教学大纲》编写出讲义,在多年教学实践的基础上,经过反复修改后编成了本书。

本书在编写中考虑了以下特点:

贯彻“打好基础,精选内容,逐步更新,利于教学”的原则,使本书能成为一本教师好教,学生好学,既有一定深度和新度,又有一定广度的基本教材,尽力克服烦琐哲学与形而上学。

提高起点。高等数学、工程数学与物理学中学过的内容原则上不再重复,像线性代数方程组的求解,复数理论与计算,傅立叶级数,常微分方程的解法,拉普拉斯变换,线性代数,电路基本物理量(电压、电流、电荷、磁通、功率、能量),电阻、电感、电容、电源的串并联等,必要时只简要提及或直接引用其结论。

在精选传统内容的前提下,适当反映新内容,如非线性电路、有源电路、网络图论与方程、频率特性、回转器、卷积法、网络函数、状态变量法等。

讲究教学法,循序渐近,遵循学生接受知识的规律。教材的体系是先静态后动态,先稳态后瞬态,先单频后多频,先基本分析法后系统分析法,先时域分析后变域分析,先输入输出法后状态变量法。对电路元件的介绍分散进行,使元件与电路紧密结合,以避免“开中药铺”和目的性不明确的缺点,同时体现知识增长的阶梯性。

为适应微电子技术的迅速发展与电子计算机的广泛应用,本书自始至终贯穿了现代电路理论的观点与方法。如端口特性、端口等效与端口线性的概念;将全响应分解为三种方式:零状态响应与零输入响应,自由响应与强迫响应,瞬态响应与稳态响应;网络响应的零极点分析与固有频率的概念;对于电路元件以物理原型为基础,但最终升华到严格从数学模型上进行定义;引用拓扑学的成果,把电路视作特定拓扑结构的支路集与节点集,把KCL、KVL严谨地建立在电荷守恒、能量守恒、电路参数集中化假设的基础上;把电路的基本变量定为四个:电流、电压、电荷、磁通和两个基本复合量:功率和能量;把电路的基本规律分成三个组成部分:电路元件的规律性,电路的拓扑(互连)规律性,信号规律性;强调了电路基本方程的列写与灵活运用,加强了支路法和特勒根定理等。

注意了坚持传授知识、发展智力与培养能力相统一的教学原则。在培养能力方面,着重培养学生的科学思维能力、分析与解决问题的能力,研究问题的方法论。另外还注意培养学生良好的非智力素质、严谨的科学作风与治学态度。

在内容上较全面地覆盖了电子、自控、自动化、通信、计算机、电力等各类专业所需要的内

容,因而以上各类专业可根据学时多少灵活选用。例如自控、自动化、电力等专业,可全部讲授;电子、通信专业,由于其教学计划中设置有 信号与系统 课程,所以第十五、十六、十七章可不讲授,而留在信号与系统课中讲授;计算机专业由于学时少,则可选取专业需要的部分章节讲授。教材中打有“\*”号的为选学内容,不计在总学时之内。

西北工业大学出版社出版的《电路基础计算机辅助教学》与《电路基础自学指导》,作为本教材的配套教材可供同时使用,对于提高本课程的教学质量会有裨益。

本书由范世贵主编并负责编写第一到第十四章。第十五、十六、十七章由孙传斌编写,第十八章由王淑敏编写。

本书的编写和出版得到了西北工业大学电子工程系和出版社领导的支持和指导;电工基础教研室黄正中、邓存贵教授以及吉玉琴、段哲民副教授都给予了热诚的帮助;还有其他 10 多位老师在多年的教学工作中使用了本教材,参与了讨论,提出过许多宝贵意见。编者对以上同志深表感谢。

本书承西安电子科技大学吴大正教授审阅,提出了不少宝贵意见,谨致谢意。

由于编者水平有限,书中不妥之处在所难免,敬请赐教。

编 者

1993 年 2 月

# 目 录

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 第一章 电路基本概念与定律             | 1  |
| § 1-1 电路与电路模型             | 1  |
| § 1-2 理想电源                | 2  |
| § 1-3 电阻元件                | 3  |
| § 1-4 基尔霍夫定律              | 6  |
| § 1-5 电功率                 | 8  |
| § 1-6 受控源                 | 9  |
| 习题一                       | 11 |
| 第二章 电阻电路等效变换              | 16 |
| § 2-1 电源模型及其等效变换          | 16 |
| § 2-2 理想电源的等效分裂与合并        | 18 |
| § 2-3 无源三端电路的等效变换         | 20 |
| § 2-4 无独立源单口电路的输入电阻及其等效电路 | 21 |
| § 2-5 含受控源的简单电路分析         | 24 |
| 习题二                       | 25 |
| 第三章 线性电路分析的基本方法           | 28 |
| § 3-1 引言                  | 28 |
| § 3-2 支路法                 | 29 |
| § 3-3 网孔法                 | 32 |
| § 3-4 含受控源电路的网孔分析         | 36 |
| § 3-5 节点法                 | 37 |
| § 3-6 含受控源电路的节点分析         | 42 |
| 习题三                       | 44 |
| 第四章 电路定理                  | 46 |
| § 4-1 叠加定理与齐次定理           | 46 |
| § 4-2 替代定理                | 48 |
| § 4-3 等效电源定理              | 49 |
| § 4-4 最大功率传输定理            | 53 |
| § 4-5 互易定理                | 55 |
| * § 4-6 参数变动定理            | 57 |

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| § 4-7 对偶原理 .....               | 59  |
| 习题四 .....                      | 61  |
| 第五章 非线性电阻电路 .....              | 66  |
| § 5-1 非线性电阻元件 .....            | 66  |
| § 5-2 电路静态工作点的图解 .....         | 68  |
| § 5-3 非线性电阻的串联与并联 .....        | 69  |
| § 5-4 牛顿-拉夫逊法 .....            | 70  |
| § 5-5 简单非线性电阻电路的牛顿-拉夫逊解法 ..... | 72  |
| § 5-6 友模型与友网络 .....            | 73  |
| * § 5-7 含多个非线性电阻的电路分析 .....    | 74  |
| § 5-8 小信号等效电路法 .....           | 76  |
| § 5-9 分段线性化法 .....             | 78  |
| 习题五 .....                      | 80  |
| 第六章 正弦稳态分析 .....               | 83  |
| § 6-1 正弦量及其描述 .....            | 83  |
| § 6-2 基尔霍夫定律的相量形式 .....        | 87  |
| § 6-3 电阻元件 .....               | 88  |
| § 6-4 电感元件 .....               | 90  |
| § 6-5 电容元件 .....               | 95  |
| § 6-6 复阻抗与复导纳及其等效变换 .....      | 98  |
| § 6-7 正弦稳态电路频域分析 .....         | 103 |
| § 6-8 正弦稳态功率 .....             | 109 |
| § 6-9 最大功率传输 .....             | 112 |
| § 6-10 三相电路 .....              | 114 |
| 习题六 .....                      | 119 |
| 第七章 耦合电感与理想变压器 .....           | 124 |
| § 7-1 耦合电感元件 .....             | 124 |
| § 7-2 耦合电感的伏安关系 .....          | 127 |
| § 7-3 耦合电感的串联与并联 .....         | 128 |
| § 7-4 耦合电感的去耦等效电路 .....        | 129 |
| § 7-5 空芯变压器电路 .....            | 130 |
| § 7-6 理想变压器 .....              | 131 |
| * § 7-7 全耦合变压器 .....           | 136 |
| * § 7-8 一般变压器 .....            | 139 |
| 习题七 .....                      | 140 |

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| <b>第八章 网络图论与网络方程</b> .....        | 143 |
| § 8-1 基本定义与概念.....                | 143 |
| § 8-2 节点-支路关联矩阵与基尔霍夫定律的矩阵形式 ..... | 146 |
| § 8-3 节点法.....                    | 148 |
| § 8-4 改进的节点法.....                 | 154 |
| § 8-5 回路法.....                    | 155 |
| § 8-6 割集法.....                    | 159 |
| § 8-7 特勒根定理.....                  | 163 |
| 习题八.....                          | 168 |
| <b>第九章 谐振电路</b> .....             | 169 |
| § 9-1 串联谐振电路.....                 | 169 |
| § 9-2 并联谐振电路.....                 | 175 |
| * § 9-3 耦合谐振电路.....               | 181 |
| * § 9-4 耦合谐振电路的频率特性与通频带.....      | 187 |
| 习题九.....                          | 191 |
| <b>第十章 非正弦周期电流电路与信号的频谱</b> .....  | 194 |
| § 10-1 非正弦周期电压与电流 .....           | 194 |
| § 10-2 非正弦周期函数展开成傅立叶级数 .....      | 194 |
| § 10-3 非正弦周期电量的有效值 .....          | 196 |
| § 10-4 非正弦周期电流电路的稳态分析 .....       | 198 |
| § 10-5 非正弦周期电流电路的平均功率 .....       | 201 |
| * § 10-6 非正弦周期信号的频谱 .....         | 203 |
| * § 10-7 非周期信号的频谱分析 .....         | 206 |
| 习题十.....                          | 208 |
| <b>第十一章 二端口网络</b> .....           | 212 |
| § 11-1 引 言 .....                  | 212 |
| § 11-2 二端口网络的方程与参数 .....          | 212 |
| § 11-3 二端口网络的网络函数 .....           | 217 |
| § 11-4 二端口网络的特性参数与无反射匹配 .....     | 222 |
| § 11-5 二端口网络的联接 .....             | 225 |
| 习题十一.....                         | 228 |
| <b>第十二章 含运算放大器的电路</b> .....       | 232 |
| § 12-1 运算放大器 .....                | 232 |
| § 12-2 含运算放大器电路的分析 .....          | 234 |
| § 12-3 简单运算电路 .....               | 235 |

|                        |                          |     |
|------------------------|--------------------------|-----|
| * § 12-4               | 用运算放大器实现受控源 .....        | 237 |
| § 12-5                 | 回转器 .....                | 238 |
| * § 12-6               | 负阻抗变换器 .....             | 243 |
| * § 12-7               | $RC$ 有源滤波器 .....         | 245 |
| 习题十二 .....             |                          | 247 |
| 第十三章 一阶电路时域分析 .....    |                          | 250 |
| § 13-1                 | 基本信号 .....               | 250 |
| § 13-2                 | 换路定律 .....               | 255 |
| § 13-3                 | 电荷守恒与磁链守恒 .....          | 257 |
| § 13-4                 | 电路初始值的求解 .....           | 258 |
| § 13-5                 | 线性定常电路的性质 .....          | 260 |
| § 13-6                 | $RC$ 一阶电路 .....          | 262 |
| § 13-7                 | $RL$ 一阶电路 .....          | 267 |
| § 13-8                 | 求一阶电路阶跃激励全响应的三要素公式 ..... | 269 |
| § 13-9                 | 一阶电路的冲激响应 .....          | 273 |
| § 13-10                | 一阶电路的正弦响应 .....          | 276 |
| § 13-11                | 卷积法 .....                | 279 |
| 习题十三 .....             |                          | 282 |
| 第十四章 二阶与高阶电路时域分析 ..... |                          | 289 |
| § 14-1                 | $RLC$ 串联电路的零输入响应 .....   | 289 |
| § 14-2                 | $RLC$ 串联电路的阶跃响应 .....    | 294 |
| § 14-3                 | $RLC$ 串联电路的冲激响应 .....    | 295 |
| § 14-4                 | $RLC$ 并联电路 .....         | 297 |
| * § 14-5               | 高阶电路 .....               | 298 |
| 习题十四 .....             |                          | 303 |
| 第十五章 复频域分析法 .....      |                          | 307 |
| § 15-1                 | 拉氏变换 .....               | 307 |
| § 15-2                 | 基尔霍夫定律的复频域形式 .....       | 312 |
| § 15-3                 | 电路元件伏安关系的复频域形式 .....     | 313 |
| § 15-4                 | 复频域阻抗与复频域导纳 .....        | 315 |
| § 15-5                 | 线性电路的复频域分析法 .....        | 316 |
| 习题十五 .....             |                          | 319 |
| 第十六章 网络函数 .....        |                          | 321 |
| § 16-1                 | 网络函数的定义与分类 .....         | 321 |
| § 16-2                 | 网络函数的一般表示式及其零、极点图 .....  | 322 |

|                              |            |
|------------------------------|------------|
| § 16-3 网络函数的应用 .....         | 325        |
| 习题十六 .....                   | 337        |
| <b>第十七章 状态变量法</b> .....      | <b>339</b> |
| § 17-1 基本概念与定义 .....         | 339        |
| § 17-2 状态方程的直观列写法 .....      | 341        |
| § 17-3 状态方程与输出方程的复频域解 .....  | 343        |
| § 17-4 状态方程与输出方程的时域解 .....   | 345        |
| * § 17-5 状态空间与状态轨迹 .....     | 347        |
| 习题十七 .....                   | 349        |
| <b>第十八章 非线性动态电路</b> .....    | <b>352</b> |
| § 18-1 非线性电容元件与电感元件 .....    | 352        |
| § 18-2 非线性动态电路状态方程的列写 .....  | 354        |
| § 18-3 分段线性化分析法 .....        | 356        |
| § 18-4 非线性动态电路中的一些特殊问题 ..... | 362        |
| 习题十八 .....                   | 366        |
| <b>参考书目</b> .....            | <b>369</b> |

# 第一章 电路基本概念与定律

## § 1-1 电路与电路模型

为了实现电能或电信号的产生、传输、加工及利用,人们将所需的电器元件或设备,按一定方式联接起来而构成的集合体称为电路,也称电网络。

实际的电器元件和设备的种类是很多的,如各种电源、电阻器、电感器、电容器、变压器、电子管、晶体管、固体组件等等,它们中发生的物理过程是很复杂的。因此,为了研究电路的特性和功能,我们必须进行科学的抽象,用一些模型来代替实际电器元件和设备的外部功能。这种模型即称为电路模型。构成电路模型的元件称为理想电路元件,也称模型元件。理想电路元件只是实际电器元件和设备的理想化,它能反映出实际元件和设备的主要电磁性能,又有能反映实际元件物理规律的数学模型(数学方程)。正因为如此,理想电路元件通常都是用数学模型来定义的,它也常被称为实际电路元件的数学模型。

理想电路元件分为两类:一类是有实际的元件与它对应,如电阻器、电感器、电容器、电压源、电流源等;另一类是没有直接与它相对应的实际电路元件,但是它们的某种组合却能反映出实际电器元件和设备的主要特性和外部功能,如受控电源等。

以理想电路元件及其组合作为电路理论的研究对象,即形成了电路模型理论。今后我们研究的电路均是指模型电路。

图 1-1-1(a) 所示为一个实际的简单电路。它由电源(干电池)、联接导线、负载(小灯泡)三部分组成。电源产生电能或电信号,联接导线传输电能或电信号,负载消耗电能或取得电信号。它的模型如图 1-1-1(b) 所示。其中电阻  $R$  代表负载(小灯泡),干电池则用电压源  $u_s$  和电阻  $R_s$  的串联组合表示,电阻  $R_l$  代表联接导线的总电阻。

将电路模型画在平面上所形成的图称为电路图。图 1-1-1(b) 即为图 1-1-1(a) 电路的电路图。电路图只反映各理想电路元件在电路中的作用及其相互联接方式,并不反映实际设备的内部结构、几何形状及相互位置。

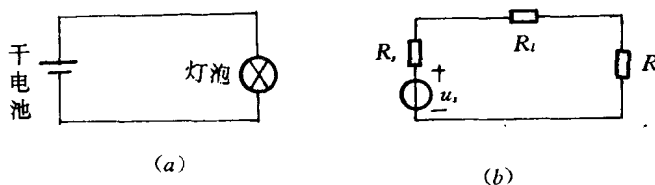


图 1-1-1 简单实际电路及其电路模型

## § 1-2 理想电源

理想电源包括理想电压源和理想电流源,它们都是具有两个引出端的理想二端有源电路元件。

### 一、理想电压源

一个二端电路元件,若其端电压在任何情况下都能保持为某给定的时间函数  $u_s(t)$ ,而与通过它的电流无关,则此二端电路元件称为理想电压源。其电路符号如图 1-2-1(a) 所示。图中  $u_s$  表示电压源所产生的电压数值,“+”、“-”表示  $u_s$  的极性,即“+”极端的电位高于“-”极端的电位,其端电压为  $u_s$ ;  $i$  代表流过电压源的电流(称为电压源的端电流),箭头表示电流  $i$  的参考方向。其意义是:  $i > 0$  时,电流  $i$  的实际方向与参考方向一致;  $i < 0$  时,电流  $i$  的实际方向与参考方向相反;  $u$  代表电压源的端电压,“+”、“-”表示  $u$  的参考极性。其意义是:  $u > 0$  时,“+”极端的实际电位高于“-”极端的实际电位;  $u < 0$  时,“+”极端的实际电位低于“-”极端的实际电位。 $i$  和  $u$  均为标量代数量。电压  $u$  的参考极性与电流  $i$  的参考方向均可以任意规定,这不会影响电压  $u$  的实际极性和电流  $i$  的实际方向。

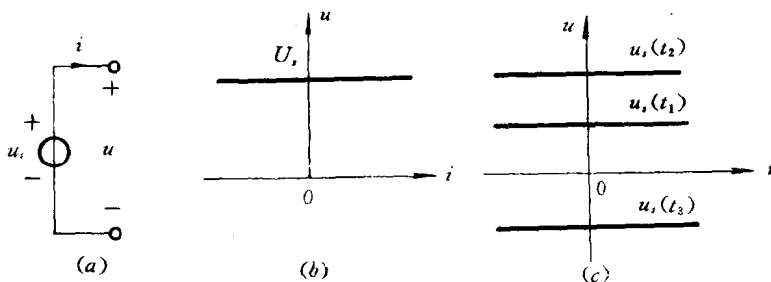


图 1-2-1 理想电压源及其外特性

电压源的特性是用它的端电压  $u$  与端电流  $i$  的关系来表征,这种关系称为电压源的伏安关系,也称外特性。若理想电压源的端电压  $u = u_s = U_s$  为一常量,则称为直流电压源或恒定电压源,其外特性(伏安关系)如图 1-2-1(b) 所示。若理想电压源的端电压  $u = u_s$  是时间变量  $t$  的函数(即随时间  $t$  而改变),则称为时变电压源,其外特性则如图 1-2-1(c) 所示,其中  $u_s(t_1)$ ,  $u_s(t_2)$ ,  $u_s(t_3)$ ,  $\dots$ , 分别表示在  $t_1, t_2, t_3, \dots$  时刻的值。可见理想电压源的端电压  $u$  只取决于  $u_s$ (即  $u = u_s$ ),而与其中电流  $i$  的大小和实际方向均无关,电流  $i$  的大小和实际方向在  $u_s$  为给定时,则完全由电压源以外的电路(称为外电路)的工作情况决定。若将理想电压源的伏安关系用数学方程表示即为

\* 本书中,凡小写字母均表示时间变量  $t$  的函数,例如  $u_s, i_s, u, i$  即相应为时间函数  $u_s(t), i_s(t), u(t), i(t)$ 。两种表示法通用,不予区分。

$$\begin{cases} u = u_s \\ i = \text{不定值(其值和实际方向由外电路约束)} \end{cases}$$

理想电压源也称无伴电压源,因无电阻与它串联。

## 二、理想电流源

一个二端电路元件,若其中通过的电流在任何情况下都能保持为某给定的时间函数  $i_s(t)$ ,而与它的端电压无关,则此二端电路元件称为理想电流源;其电路符号如图 1-2-2(a) 所示。图中  $i_s$  表示电流源所产生的电流数值,箭头表示  $i_s$  的方向; $u$  表示电流源的端电压,“+”、“-”表示  $u$  的参考极性; $i$  表示电流源的端电流,箭头表示  $i$  的参考方向。这里参考方向与参考极性的意义均同上。

电流源的特性是用它的端电流  $i$  与端电压  $u$  的关系来表征,这种关系称为电流源的外特性(伏安关系)。若理想电流源的端电流  $i = i_s = I_s$  为一常量,则称为直流电流源或恒定电流源,其外特性如图 1-2-2(b) 所示。若理想电流源的端电流  $i = i_s$  是时间变量  $t$  的函数(随时间  $t$  而改变),则称为时变电流源,其外特性则如图 1-2-2(c) 所示,其中  $i_s(t_1), i_s(t_2), i_s(t_3), \dots$ , 分别表示在  $t_1, t_2, t_3, \dots$  时刻的值。可见理想电流源的端电流  $i$  只取决于  $i_s$  (即  $i = i_s$ ), 而与其端电压  $u$  的大小和实际正负极性均无关,端电压  $u$  的大小和实际正负极性,在  $i_s$  为给定时,则完全由电流源以外的电路(外电路)的工作情况决定。若将理想电流源的伏安关系用数学方程表示即为

$$\begin{cases} i = i_s \\ u = \text{不定值(其值和实际极性由外电路约束)} \end{cases}$$

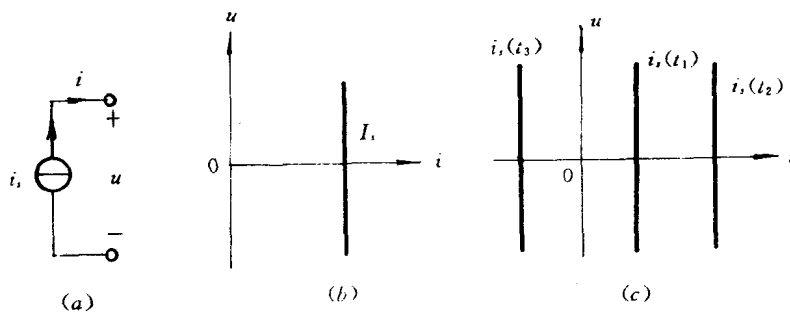


图 1-2-2 理想电流源及其外特性

理想电流源也称无伴电流源,因无电阻与它并联。

电压源与电流源统称为电源。在电路理论中,电源也称为激励,电源在电路中产生的电压和电流则称为响应。

## 1-3 电阻元件

### 一、定义

电阻元件是无源二端电路元件,如图 1-3-1 所示。

若二端元件的电压、电流关系是由  $u-i$  平面(或  $i-u$  平面)上通过坐标原点的曲线来描述,

则这种二端元件即称为理想电阻元件,简称电阻元件。这条曲线称为电阻元件的伏安关系,也称元件约束,通常用函数表示,即

$$i = f(u)$$

或

$$u = g(i)$$

元件约束与电路的连接方式无关。



图 1-3-1 二端元件

## 二、电阻元件的分类

电阻元件按其伏安关系曲线形状的不同,可分为两类四种:

### (一) 线性电阻元件

1. 线性定常电阻元件 若电阻元件的伏安关系曲线是通过  $u-i$  (或  $i-u$ ) 平面上坐标原点的直线,且此直线的位置(亦即直线的斜率)不随时间变动,如图 1-3-2(a) 所示,则称为线性定常电阻元件或线性时不变电阻元件。它有如下特点:

(1) 直线的斜率即为其电阻值  $R$ ,即  $\tan \alpha = R$ ,且  $R$  的值为定值(即不随时间而变)。这样即可用一个定常电阻  $R$  或定常电导  $G$  来构成线性定常电阻元件的电路模型,如图 1-3-2(b) 所示。 $R$  的单位为  $\Omega$ ,  $G$  的单位为西[S],且有  $G = \frac{1}{R}$  或  $R = \frac{1}{G}$ 。

(2) 伏安关系曲线对坐标原点对称,即为奇函数。这说明线性定常电阻元件对不同方向的电流或不同极性的电压,其伏安关系是完全相同的。这种性质称为双向性,也称可逆性。因此在使用线性定常电阻元件时,它的两个端钮是没有任何区别的,在电路中可以任意连接。

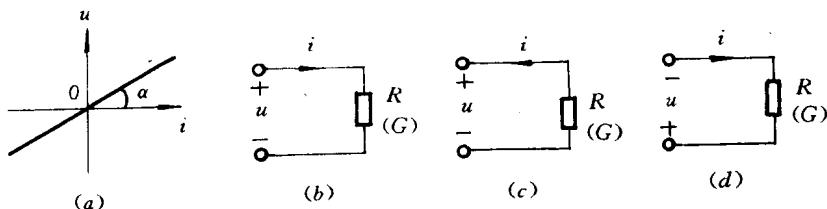


图 1-3-2 线性定常电阻元件

(3) 其伏安关系服从欧姆定律。若设电压  $u$  的参考极性与电流  $i$  的参考方向如图 1-3-2(b) 所示,则有

$$u = Ri \quad (1-3-1a)$$

或

$$i = \frac{1}{R}u = Gu \quad (1-3-1b)$$

上式即为欧姆定律。它描述了线性定常电阻元件电压  $u$  与电流  $i$  之间的约束关系,也称约束方程。上式说明,电阻元件的电流  $i$  (或电压  $u$ ),完全由同一时刻的电压(或电流)决定,而与该时刻以前的电压(或电流)值无关,即电阻元件是无记忆元件。

需要说明的是,式(1-3-1)是在图 1-3-2(b) 所示电压  $u$  的参考极性与电流  $i$  的参考方向下写出的, $u$  的参考极性与  $i$  的参考方向的这种制约规定称为关联参考方向。今若  $u$  与  $i$  为非关联参考方向,如图 1-3-2(c) 和 (d) 所示,则式(1-3-1)的等号右端即必须加上“-”号,即

$$u = -Ri \quad \text{或} \quad i = -Gu$$

可见,公式中的“+”、“-”号是与电压  $u$  的参考极性和电流  $i$  的参考方向的规定密切相关。我们

约定,以后如不加说明,则电阻元件电压 $u$ 的参考极性与电流 $i$ 的参考方向,均是指关联参考方向。在引入关联参考方向后,则在 $u$ 的参考极性与 $i$ 的参考方向两者中,只要设定其中的一个就行了。

2. 线性时变电阻元件 若电阻元件的伏安关系曲线是通过 $u-i$ 平面上坐标原点的直线,但此直线的斜率是时间 $t$ 的函数(即其电阻值随时间 $t$ 而变化),如图1-3-3(a)所示,则称为线性时变电阻元件,其电路模型如图1-3-3(b)所示,其伏安方程为

$$u = R(t)i \quad \text{或} \quad i = G(t)u$$

式中 $R(t)$ 和 $G(t)$ 分别为电阻元件在 $t$ 时刻的电阻值和电导值,且有 $R(t) = \frac{1}{G(t)}$ 或 $G(t) = \frac{1}{R(t)}$ ;  $R(t)$ 为 $t$ 时刻直线的斜率。

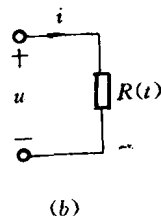
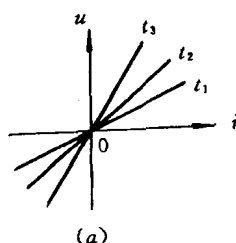


图 1-3-3 线性时变电阻元件

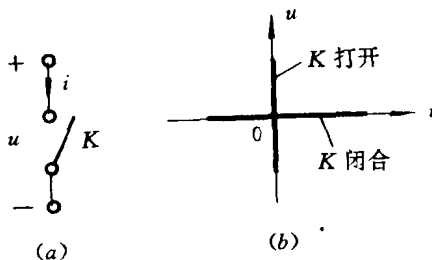


图 1-3-4 理想开关及其伏安特性

线性时变电阻的一个常见实例是理想开关 $K$ ,它的电路符号如图1-3-4(a)所示。当 $K$ 打开时,它的伏安关系为电流 $i$ 恒为0, $u$  = 不定值(其值由开关以外的电路工作状态决定),其伏安关系曲线为 $u-i$ 平面上的 $u$ 轴,如图1-3-4(b)所示,相应于电阻值 $R = \infty$ (电导值 $G = 0$ );当 $K$ 闭合时,其伏安关系为电压 $u$ 恒为0, $i$  = 不定值(其值由开关以外的电路工作状态决定),伏安关系曲线为 $u-i$ 平面上的 $i$ 轴,如图1-3-4(b)所示,相应于电阻值 $R = 0$ (电导值 $G = \infty$ )。由于理想开关的工作状态经常是开—关—开—关—开……,所以它是一个时而 $R = \infty$ ,时而 $R = 0$ 的线性时变电阻元件。数字电路中常用的MOS开关管,在精确度要求不高时即可用理想开关来模拟。但若要求的精确度高,则可用图1-3-5(a)所示的电路来模拟,其中 $R_1$ 的值很小,用来代表作为开关的半导体器件导通(即 $K$ 闭合)时所具有的电阻值, $R_2$ 的电阻值很大,用来代表作为开关的半导体器件截止(即 $K$ 打开)时所具有的电阻值。实际开关的电阻值随时间 $t$ 变化的曲线如图1-3-5(b)所示。

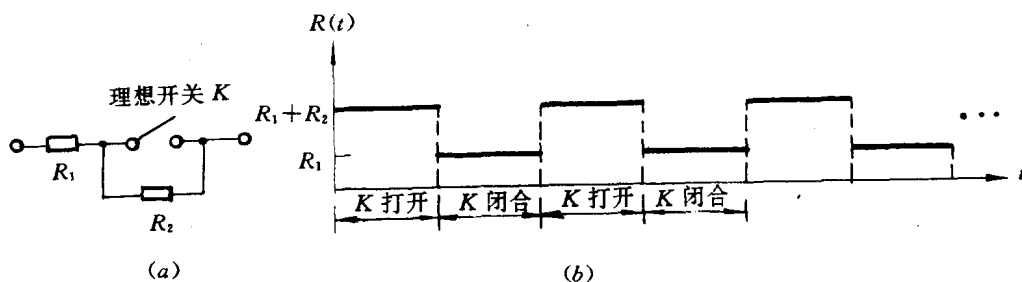


图 1-3-5 实际开关的电路模型及其时变电阻曲线

## (二) 非线性电阻元件

1. 非线性定常电阻元件 若电阻元件的伏安关系曲线不是通过  $u-i$  平面上坐标原点的直线而是曲线,且此曲线的位置不随时间  $t$  而变动,如图 1-3-6(a) 所示,则称为非线性定常电阻元件或非线性时不变电阻元件。它不服从欧姆定律,且一般不具有双向性。

2. 非线性时变电阻元件 若电阻元件的伏安关系曲线是通过  $u-i$  平面上坐标原点的曲线,且曲线的位置随时间  $t$  而变动,如图 1-3-6(b) 所示,则称为非线性时变电阻元件。

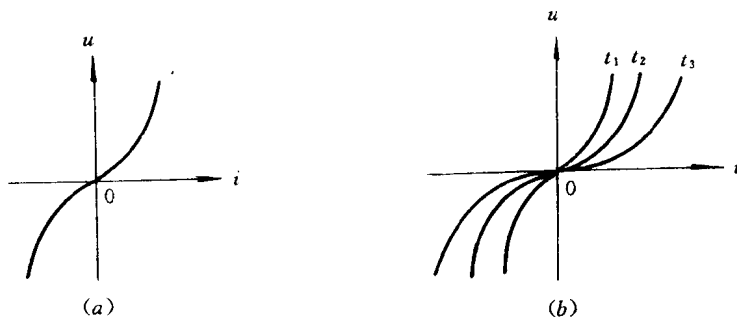


图 1-3-6 非线性电阻元件

## § 1-4 基尔霍夫定律

### 一、名词介绍

我们先以图 1-4-1 所示电路为例来介绍有关名词。

1. 支路\*:按狭义定义,我们把通过同一电流的电流路径称为支路。如图 1-4-1 所示电路共有三条支路,其中支路  $b1a$  和  $b2a$  中既有电阻又有电源,称为有源支路;支路  $a3b$  只有电阻而无电源,称为无源支路。

2. 节点\*:按狭义定义,三条和三条以上支路的联接点称为节点。如图 1-4-1 所示电路有两个节点  $a$  和  $b$ 。

3. 回路\*:由支路构成的闭合路径称为回路。如图 1-4-1 所示电路共有三个回路,即  $a2b1a$  回路,  $a3b2a$  回路,  $a3b1a$  回路。

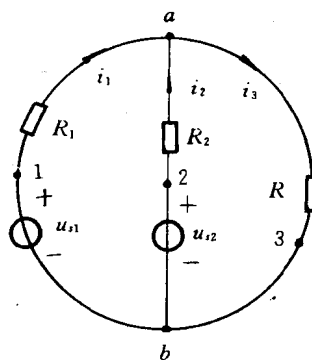


图 1-4-1 电路举例

### 二、基尔霍夫电流定律(KCL)\*\*

基尔霍夫电流定律是描述电路中各支路电流之间相互关系的定律。在任意时刻  $t$ , 流入某个节点的电流的总和等于流出该节点的电流的总和。此结论

\* 关于支路、节点、回路的一般定义,参看第八章 § 8-1。

\*\* KCL 为 Kirchhoff's Current Law 的缩写。

称为基尔霍夫电流定律(KCL)。例如对于图 1-4-1 所示电路,我们设定各支路电流的大小和参考方向如图中所示,则对节点  $a$  有

$$i_1(t) + i_2(t) = i_3(t)$$

将上式改写为

$$-i_1(t) - i_2(t) + i_3(t) = 0$$

上式的物理意义是,流出节点  $a$  的电流的代数和等于零。这里流出的电流规定取正号,则流入的电流即取负号。

若将上式再改写为

$$i_1(t) + i_2(t) - i_3(t) = 0$$

此式的物理意义是,流入节点  $a$  的电流的代数和等于零。这里流入的电流规定取正号,则流出的电流即取负号。

上两式是 KCL 的另一种叙述法。它们在本质上是一样的,只是在列写方程时是把流出节点的电流规定为正,还是把流入节点的电流规定为正而已。

把上两式写成一般形式即为

$$\sum i(t) = 0 \quad (1-4-1)$$

即集中在任一节点上的各支路电流的代数和恒等于零。在写此方程时,如把流出节点的电流视为正,则流入节点的电流即取为负;反之则反之。

KCL 原是运用于节点的,但把它加以推广,也可适用于包围几个节点的闭合面。如图 1-4-2 所示电路中,闭合面  $S$  内有三个节点 1、2、3,当设定各支路电流的大小和参考方向如图中所示时,则对此三个节点即可列出 KCL 方程为

$$i_1 = i_{12} - i_{31}$$

$$i_2 = i_{23} - i_{12}$$

$$i_3 = i_{31} - i_{23}$$

将以上三式相加得

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

或

$$\sum i(t) = 0$$

即流入(或流出)一个闭合面的支路电流的代数和恒等于零。此即广义的 KCL。在写此方程时,若把流出闭合面的电流视为正,则流入闭合面的电流即取为负;反之则反之。

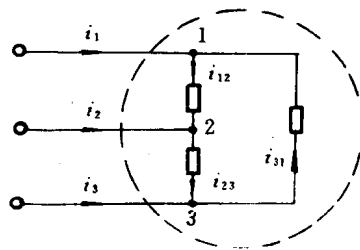


图 1-4-2 KCL 推广于闭合面

### 三、基尔霍夫电压定律(KVL)\*

基尔霍夫电压定律是描述回路中各支路电压之间相互关系的定律。在任意时刻  $t$ ,沿任一回路所有支路或元件上电压的代数和恒等于零,即

$$\sum u(t) = 0 \quad (1-4-2)$$

此结论称为基尔霍夫电压定律(KVL)。在写此方程时,应首先为回路设定一个绕行方向,凡电压的参考极性从“+”到“-”与回路绕行方向一致者,则该电压前取“+”号,否则取“-”号。例如对于图 1-4-3 所示电路,我们设定各元件电压的参考极性和回路的绕行方向如图中所

\* KVL 为 Kirchhoff's Voltage Law 的缩写。