

21世纪高等学校规划教材 | 电子信息

电路分析基础 学习指导与题解

刘景夏 胡冰新 张兆东 张静 于战科 编著



清华大学出版社

· 014030564

TM133
82

21世纪高等学校规划教材 | 电



电路分析基础 学习指导与题解

刘景夏 胡冰新 张兆东 张静 于战科 编著



清华大学出版社
北京



北航

C1717257

TM133
82

内 容 简 介

本书是为配合 21 世纪高等学校规划教材《电路分析基础》(清华大学出版社, ISBN: 978-7-302-29066-7) 实施教学而编写的参考书。全书共分 7 章, 电路的基本概念与定律、电阻电路分析、动态电路、时域分析、正弦稳态分析、电路的频率响应和谐振现象、二端口网络、非线性电路。每章均由知识提要、知识结构、教学要求、解题指导、典型题解和习题解答 6 部分组成。

本书可作为通信、电子、计算机、自控、测控与仪器、信息类专业学生学习“电路分析基础”课程的辅助教材, 也可作为研究生入学考试的复习资料。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签, 无标签者不得销售。

版权所有, 侵权必究。侵权举报电话: 010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

电路分析基础学习指导与题解/刘景夏等编著. --北京: 清华大学出版社, 2014

21 世纪高等学校规划教材·电子信息

ISBN 978-7-302-35300-3

I. ①电… II. ①刘… III. ①电路分析—高等学校—教学参考资料 IV. ①TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 018864 号

责任编辑: 魏江江 薛 阳

封面设计: 傅瑞学

责任校对: 焦丽丽

责任印制: 沈 露

出版发行: 清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址: 北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编: 100084

社 总 机: 010-62770175 邮 购: 010-62786544

投稿与读者服务: 010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈: 010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者: 北京密云胶印厂

经 销: 全国新华书店

开 本: 185mm×260mm

印 张: 17.25

字 数: 419 千字

版 次: 2014 年 3 月第 1 版

印 次: 2014 年 3 月第 1 次印刷

印 数: 1~2000

定 价: 29.00 元

产品编号: 055431-01

出版说明

随着我国改革开放的进一步深化,高等教育也得到了快速发展,各地高校紧密结合地方经济建设发展需要,科学运用市场调节机制,加大了使用信息科学等现代科学技术提升、改造传统学科专业的投入力度,通过教育改革合理调整和配置了教育资源,优化了传统学科专业,积极为地方经济建设输送人才,为我国经济社会的快速、健康和可持续发展以及高等教育自身的改革发展做出了巨大贡献。但是,高等教育质量还需要进一步提高以适应经济社会发展的需要,不少高校的专业设置和结构不尽合理,教师队伍整体素质亟待提高,人才培养模式、教学内容和方法需要进一步转变,学生的实践能力和创新精神亟待加强。

教育部一直十分重视高等教育质量工作。2007年1月,教育部下发了《关于实施高等学校本科教学质量与教学改革工程的意见》,计划实施“高等学校本科教学质量与教学改革工程”(简称“质量工程”),通过专业结构调整、课程教材建设、实践教学改革、教学团队建设等多项内容,进一步深化高等学校教学改革,提高人才培养的能力和水平,更好地满足经济社会发展对高素质人才的需要。在贯彻和落实教育部“质量工程”的过程中,各地高校发挥师资力量强、办学经验丰富、教学资源充裕等优势,对其特色专业及特色课程(群)加以规划、整理和总结,更新教学内容、改革课程体系,建设了一大批内容新、体系新、方法新、手段新的特色课程。在此基础上,经教育部相关教学指导委员会专家的指导和建议,清华大学出版社在多个领域精选各高校的特色课程,分别规划出版系列教材,以配合“质量工程”的实施,满足各高校教学质量和教学改革的需要。

为了深入贯彻落实教育部《关于加强高等学校本科教学工作,提高教学质量的若干意见》精神,紧密配合教育部已经启动的“高等学校教学质量与教学改革工程精品课程建设工作”,在有关专家、教授的倡议和有关部门的大力支持下,我们组织并成立了“清华大学出版社教材编审委员会”(以下简称“编委会”),旨在配合教育部制定精品课程教材的出版规划,讨论并实施精品课程教材的编写与出版工作。“编委会”成员皆来自全国各类高等学校教学与科研第一线的骨干教师,其中许多教师为各校相关院、系主管教学的院长或系主任。

按照教育部的要求,“编委会”一致认为,精品课程的建设工作从开始就要坚持高标准、严要求,处于一个比较高的起点上。精品课程教材应该能够反映各高校教学改革与课程建设的需要,要有特色风格、有创新性(新体系、新内容、新手段、新思路,教材的内容体系有较高的科学创新、技术创新和理念创新的含量)、先进性(对原有的学科体系有实质性的改革和发展,顺应并符合21世纪教学发展的规律,代表并引领课程发展的趋势和方向)、示范性(教材所体现的课程体系具有较广泛的辐射性和示范性)和一定的前瞻性。教材由个人申报或各校推荐(通过所在高校的“编委会”成员推荐),经“编委会”认真评审,最后由清华大学出版

社审定出版。

目前,针对计算机类和电子信息类相关专业成立了两个“编委会”,即“清华大学出版社计算机教材编审委员会”和“清华大学出版社电子信息教材编审委员会”。推出的特色精品教材包括:

(1) 21 世纪高等学校规划教材·计算机应用——高等学校各类专业,特别是非计算机专业的计算机应用类教材。

(2) 21 世纪高等学校规划教材·计算机科学与技术——高等学校计算机相关专业的教材。

(3) 21 世纪高等学校规划教材·电子信息——高等学校电子信息相关专业的教材。

(4) 21 世纪高等学校规划教材·软件工程——高等学校软件工程相关专业的教材。

(5) 21 世纪高等学校规划教材·信息管理与信息系统。

(6) 21 世纪高等学校规划教材·财经管理与应用。

(7) 21 世纪高等学校规划教材·电子商务。

(8) 21 世纪高等学校规划教材·物联网。

清华大学出版社经过三十多年的努力,在教材尤其是计算机和电子信息类专业教材出版方面树立了权威品牌,为我国的高等教育事业做出了重要贡献。清华版教材形成了技术准确、内容严谨的独特风格,这种风格将延续并反映在特色精品教材的建设中。

清华大学出版社教材编审委员会

联系人:魏江江

E-mail: weijj@tup.tsinghua.edu.cn

前言

“电路分析基础”课程是通信、电子信息类专业一门重要的技术基础课。课程特点是理论严密、逻辑性强,学习时既要把握课程体系的基本脉络,又要做一定数量的习题或测试题,才能对课堂教学内容达到理解、消化和掌握的程度。根据电类课程教学改革的形式和21世纪高等学校规划教材《电路分析基础》(清华大学出版社,ISBN: 978-7-302-29066-7)的编写思路,结合“电路分析基础”课程建设和教学实际的需要,我们编写了这本《电路分析基础学习指导与题解》教材。

本书着力于“电路分析基础”课程知识体系的梳理、学习方法的启迪和解题方法的指导,强调基本概念、基本理论和基本方法的准确理解和灵活运用,力图使读者在学习该课程的过程中建立科学的思维方法,培养分析问题和解决问题的能力、科学总结与归纳的能力、综合运用知识的能力,以达到本课程的教学目的,乃至适应研究生入学考试的需求。

本书共分7章,电路的基本概念与定律、电阻电路分析、动态电路、正弦稳态分析、电路的频率响应和谐振现象、二端口网络、非线性电路。每章均由6部分组成。

第一部分为“知识提要”,对各章的主要概念、基本理论和分析方法进行综述,归纳总结等。

第二部分为“知识结构”,概括本章知识点的脉络。

第三部分为“教学要求”,明确对各章内容的掌握程度。

第四部分为“解题指导”,对常见的多类电路问题提供分析思路。

第五部分为“典型题解”,列举一些典型电路问题进行剖析。

第六部分的“习题解答”,对配置的全部习题进行分析、计算和求解,给出了详细的解题过程。力求做到概念清晰,步骤完整,数据准确,附图齐全。

另外,本书最后还附有“‘电路分析基础’期中测试和综合测试”试卷4套及参考答案。

限于作者的水平和经验,书中难免有疏漏不妥之处,恳请专家、读者不吝指教。

编者

2013年12月

| | |
|-------------------------------|----|
| 第 1 章 电路的基本概念与定律 | 1 |
| 1.1 知识提要 | 1 |
| 1.1.1 实际电路与电路模型 | 1 |
| 1.1.2 电路变量 | 2 |
| 1.1.3 基尔霍夫定律 | 3 |
| 1.1.4 电路元件 | 4 |
| 1.1.5 等效概念和方法 | 6 |
| 1.1.6 一些简单的等效规律和公式 | 7 |
| 1.1.7 运算放大器 | 10 |
| 1.2 知识结构 | 11 |
| 1.3 教学要求 | 12 |
| 1.4 解题指导 | 12 |
| 1.5 典型题解 | 13 |
| 1.6 习题解答 | 15 |
| 第 2 章 电阻电路分析 | 36 |
| 2.1 知识提要 | 36 |
| 2.1.1 电路的图 | 36 |
| 2.1.2 电路方程 | 37 |
| 2.1.3 $2b$ 法和支路法 | 38 |
| 2.1.4 回路法 | 38 |
| 2.1.5 网孔法 | 38 |
| 2.1.6 节点法 | 40 |
| 2.1.7 齐次定理和叠加定理 | 41 |
| 2.1.8 替代定理 | 41 |
| 2.1.9 等效电源定理 | 42 |
| 2.1.10 最大功率传输条件 | 44 |
| 2.1.11 互易定理 | 44 |
| 2.2 知识结构 | 46 |
| 2.3 教学要求 | 46 |
| 2.4 解题指导 | 46 |
| 2.5 典型题解 | 47 |

| | | |
|------------|---------------------------|------------|
| 2.6 | 习题解答 | 53 |
| 第3章 | 动态电路时域分析 | 77 |
| 3.1 | 知识提要 | 77 |
| 3.1.1 | 动态元件 | 77 |
| 3.1.2 | 动态电路方程的建立及其解 | 80 |
| 3.1.3 | 电路的初始值 | 82 |
| 3.1.4 | 动态电路的响应 | 83 |
| 3.1.5 | 直流一阶电路的三要素法 | 84 |
| 3.1.6 | 一阶电路的阶跃响应 | 85 |
| 3.1.7 | 正弦激励下一阶电路响应 | 86 |
| 3.2 | 知识结构 | 86 |
| 3.3 | 教学要求 | 87 |
| 3.4 | 解题指导 | 87 |
| 3.5 | 典型题解 | 88 |
| 3.6 | 习题解答 | 94 |
| 第4章 | 正弦稳态分析 | 115 |
| 4.1 | 知识提要 | 115 |
| 4.1.1 | 正弦量 | 115 |
| 4.1.2 | 正弦量的相量表示法 | 116 |
| 4.1.3 | 两类约束的相量形式 | 117 |
| 4.1.4 | 阻抗和导纳 | 117 |
| 4.1.5 | 正弦稳态电路的分析与计算 | 119 |
| 4.1.6 | 正弦稳态电路的功率 | 120 |
| 4.1.7 | 互感耦合电路 | 122 |
| 4.1.8 | 变压器 | 127 |
| 4.1.9 | 三相电路 | 129 |
| 4.2 | 知识结构 | 130 |
| 4.3 | 教学要求 | 131 |
| 4.4 | 解题指导 | 132 |
| 4.5 | 典型题解 | 133 |
| 4.6 | 习题解答 | 141 |
| 第5章 | 电路的频率响应和谐振现象 | 177 |
| 5.1 | 知识提要 | 177 |
| 5.1.1 | 网络函数与频率响应 | 177 |
| 5.1.2 | RC 电路的频率特性 | 179 |
| 5.1.3 | RLC 串谐振电路 | 181 |

| | | |
|--------------|----------------------------|------------|
| 5.1.4 | GLC 并联谐振电路 | 183 |
| 5.1.5 | 实用的简单并联谐振电路 | 185 |
| 5.1.6 | 复杂谐振电路 | 186 |
| 5.2 | 知识结构 | 187 |
| 5.3 | 教学要求 | 188 |
| 5.4 | 解题指导 | 188 |
| 5.5 | 典型题解 | 188 |
| 5.6 | 习题解答 | 192 |
| 第 6 章 | 二端口网络 | 205 |
| 6.1 | 知识提要 | 205 |
| 6.1.1 | 二端口网络的方程和参数 | 205 |
| 6.1.2 | 二端口网络的等效电路 | 208 |
| 6.1.3 | 二端口网络的连接 | 209 |
| 6.1.4 | 具有端接的二端口网络分析 | 210 |
| 6.2 | 知识结构 | 211 |
| 6.3 | 教学要求 | 212 |
| 6.4 | 解题指导 | 212 |
| 6.5 | 典型题解 | 212 |
| 6.6 | 习题解答 | 215 |
| 第 7 章 | 非线性电路 | 234 |
| 7.1 | 知识提要 | 234 |
| 7.1.1 | 非线性元件 | 234 |
| 7.1.2 | 非线性电阻的串联和并联 | 235 |
| 7.1.3 | 非线性电阻电路的分析 | 235 |
| 7.1.4 | 小信号分析法 | 236 |
| 7.2 | 知识结构 | 236 |
| 7.3 | 教学要求 | 237 |
| 7.4 | 解题指导 | 237 |
| 7.5 | 典型题解 | 237 |
| 7.6 | 习题解答 | 239 |
| 附录 A | 期中测试及综合测试模拟试题 | 249 |
| 附录 B | 模拟试题参考答案 | 262 |
| 参考文献 | | 265 |

第 1 章

电路的基本概念与定律

1.1 知识提要

1.1.1 实际电路与电路模型

1. 实际电路的组成

实际电路是由各种电气、电子元器件(如电阻器、电容器、线圈、开关、晶体管、电池等)按一定的方式相互连接组成的。通常包括三个部分,一是提供能量或信号的电源,二是用电装置,称为负载,三是连接电源与负载的导线、开关等中间环节。

2. 实际电路的功能

实际电路的功能可概括为两个方面。其一,进行电能的产生、传输、分配与转换,如电力系统中的发电、输配电线路等。其二,实现信号的产生、传递、变换、处理与控制,如电话、收音机、电视机电路等。

3. 电路模型

实际电路中使用的电路部件一般都和电能的消耗现象及电磁能的储存现象有关,这些现象交织在一起并发生在整个部件中。如果把这些现象或特性全部加以考虑,就给分析电路带来了困难。因此,必须在一定条件下,忽略它的次要性质,用一个足以表征其主要电磁性能模型来表示,以便进行定量分析。

当实际电路尺寸远小于其使用时最高工作频率所对应的波长时,可以定义出几种“集中参数元件”(又称理想元件)用来构成实际部件的模型。在这个条件下,每一种集中参数元件只反映一种基本电磁现象,且可由数学方法精确定义。例如,电阻元件表征消耗电能的特性,电容元件表征储存电场能量的特性,电感元件表征储存磁场能量的特性。这三种理想元件模型如图 1-1 所示。

不同的实际部件,只要具有相同的主要电磁性能,在一定条件下就可用同一个模型表示。同一个实际部件在不同的条件下,它的模型也可以有不同

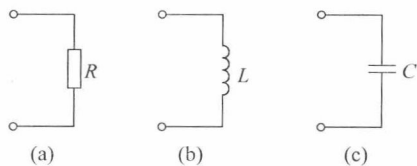


图 1-1

的形式。将实际电路中各个部件用其模型表示,这样画出的图即为实际电路的电路模型,亦称电路原理图。

4. 电路分析的对象和方法

本课程涉及电路分析的对象主要是电路模型。其基本分析方法是:对从实际电路抽象出来的电路模型,选择电路变量,建立电路方程,求得电路响应,分析电路性能。

1.1.2 电路变量

1. 电流

定义:单位时间内通过导体横截面的电荷量称为电流强度,简称电流。用 $i(t)$ 可表示为:

$$i(t) = \frac{dq}{dt}$$

单位有 A, mA, μ A, kA 等。

实际方向:习惯上把正电荷的运动方向规定为电流的实际方向(又称真实方向)。

参考方向:假设的正电荷运动方向。在实际问题中,电流的真实极性往往在电路图中难以判断。因此,可以像其他代数量问题一样任意假设正电荷的运动方向,用箭头标在电路图上(如图 1-2 所示),或用双下标表示(如 i_{ab} 表示电流从 a 点流向 b 点)。并以此为准去分析计算。

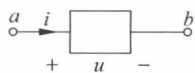


图 1-2

实际方向的判定:经计算后根据电流的正负可判断其实际方向。

规定计算所得电流为正值,说明实际方向与所设参考方向一致;计算所得电流为负值,说明实际方向与所设参考方向相反。

注意点:电流值的正负,在设定参考方向的前提下才有意义!因此,如果选用电流变量时一定要标出其参考方向,也正因为从参考方向可以判定其实际方向,故今后在电路图中标出的电流方向箭头都可以认为是参考方向,而不一定是电流的真实方向。

2. 电压

定义:单位正电荷由 a 点移到 b 点时电场力所做的功称 ab 两点间的电压(如图 1-2 所示),又称电位差。用 $u(t)$ 可表示为:

$$u(t) = \frac{d\omega}{dq}$$

单位有 V, mV, μ V, kV 等。

实际方向:习惯上把电位降落的方向规定为电压的实际方向(又称实际极性)。

电压参考方向的引入、实际方向的判定、注意点:同“电流”变量。

电位的概念及计算:在电路中,某点的电位是将单位正电荷沿一路径移至参考点(选定电路中的某点,用符号“ \perp ”表示)电场力做的功。将参考点的电位定为零,则所求点的电位就是该点到参考点的电压。所以,计算电位的方法与计算电压的方法完全相同。

关联的电压电流参考方向:在电路分析中,电流与电压的参考方向是任意选定的,两者之间独立无关。但为了方便起见,常采用关联参考方向。电流参考方向与电压参考“+”到

“—”极的方向一致,即电流与电压参考方向一致,如图 1-2 所示,图中电流 i 和电压 u 是关联的,否则称非关联的。

3. 功率

定义: 单位时间内电场力所做的功或电路所吸收的能量。用 p 表示,即有:

$$p(t) = \frac{dw}{dt}$$

单位有 W, kW, mW 等。

功率的计算: 某一元件或局部电路如图 1-2 所示,采用关联的电压电流参考方向。则该元件或局部电路吸收的功率为

$$p(t) = \frac{dw}{dt} = \frac{udq}{dt} = ui$$

结论: 在电压 u 、电流 i 参考方向关联的条件下,一段电路所吸收的功率为该段电路两端电压、电流的乘积。显然,若 u 、 i 参考方向非关联,则计算吸收功率的公式中应冠以负号,即 $p(t) = -ui$ 。

据此,代入 u 、 i 数值,若计算得 p 为正值,该段电路实际就是吸收功率(或消耗功率);若 p 为负值,该段电路实际向外提供功率(或产生功率)。

能量的计算: 在电压电流参考方向关联时,从 t_0 到 t 时刻内该部分电路吸收的能量为:

$$w(t_0, t) = \int_{t_0}^t p(\xi) d\xi = \int_{t_0}^t u(\xi) i(\xi) d\xi$$

1.1.3 基尔霍夫定律

1. 基尔霍夫电流定律(KCL)

内容: 对于集总参数电路中的任意节点,任一时刻流入或流出该节点电流的代数和为零。有

$$\sum_{k=1}^m i_k(t) = 0$$

该式称为节点电流方程,简称 KCL 方程。建立 KCL 方程时,首先要设出每一支路电流的参考方向,然后依据参考方向取号,电流流入或流出节点可取正或取负,但列写的同一个 KCL 方程中取号规则一致。

KCL 的另一种叙述方式: 对于集总参数电路中的任意节点,任一时刻流入该节点的电流之和等于流出该节点的电流之和。即有

$$\sum i_{\text{流出}} = \sum i_{\text{流入}}$$

电流定律的推广: 适用于电路中任意假设的封闭面(广义节点)。

2. 基尔霍夫电压定律(KVL)

内容: 在集总参数电路中,任一时刻沿任一回路绕行一周的所有支路电压的代数和等于零。其数学表示式为:

$$\sum_{k=1}^m u_k(t) = 0$$

该式称为回路电压方程,简称 KVL 方程。建立 KVL 方程时需规定顺绕行方向的电压(电压降)取正号,逆绕行方向的电压(电压升)取负号。

KVL 的另一种叙述方式: 在集总参数电路中,任一时刻沿任一回路的支路电压降之和等于电压升之和。即有

$$\sum u_{\text{降}} = \sum u_{\text{升}}$$

电压定律的推广: 适用于电路中任意假想的回路(广义回路或虚回路)。

重要结论: 求任意 ab 两点间的电压,等于自 a 点出发沿任何一条路径绕行至 b 点所有电压降的代数和。

1.1.4 电路元件

元件特性的表征: 电路元件是组成电路模型的最小单元,电路元件的特性由端口电压、电流关系来表征,简称伏安特性,简记为 VAR 或 VCR。可用数学关系式表示,也可描绘成曲线($u \sim i$ 平面曲线),即伏安特性曲线。

1. 电阻元件

(1) **定义:** 一个二端元件在任意时刻,若其伏安特性能用 $u \sim i$ 平面上的一条曲线描述,则称之为电阻元件。

若该曲线是过原点直线且不随时间变化的,则称为线性时不变电阻元件。

单位有 $\Omega, \text{k}\Omega, \text{M}\Omega$ 等。

(2) 电路模型及其伏安特性如图 1-3 所示。

(3) **欧姆定律:** 欧姆定律说明流过线性电阻的电流与该两端电压之间的关系,反映了电阻元件的特性。若电阻上的电压、电流参考方向关联,则有:

$$u = R i$$

(4) **电阻与电导:** 电阻的倒数称电导,用符号 G 表示,单位为西门子(S)等。

$$G = \frac{1}{R}$$

应用电导参数来表示电压和电流之间关系时,欧姆定律形式可写为 $i = Gu$ 。

(5) **电阻元件与开路、短路情况:**

当电阻元件 $R \rightarrow \infty$ 或 $G = 0$ 时,称为“开路”;

当电阻元件 $R = 0$ 或 $G \rightarrow \infty$ 时,称为“短路”。

(6) **电阻元件的功率与能量:**

若电压 u 、电流 i 参考方向关联,则电阻元件吸收功率为 $p = ui = i^2 R = \frac{u^2}{R}$ 。

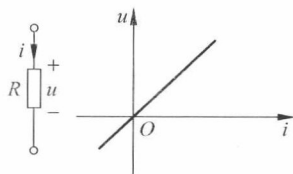


图 1-3

若电压 u 、电流 i 参考方向非关联, 则电阻元件吸收功率为 $p = -ui = i^2 R = \frac{u^2}{R}$ 。

设从 t_0 到 t 时刻电阻元件所吸收的能量为 $w(t)$, 则

$$w(t) = \int_{t_0}^t p(\xi) d\xi = \int_{t_0}^t Ri^2(\xi) d\xi = \int_{t_0}^t \frac{u^2(\xi)}{R} d\xi$$

2. 电压源

定义: 当一个二端元件接入任一电路时, 如果其两端电压始终保持规定的值或一定的时间函数, 而与其端电流无关, 则称该二端元件为理想电压源(又称为独立电压源)。

电路模型如图 1-4 所示。

伏安特性: 电压源的电压由元件本身确定, 它可以是定值或一定时间函数, 而与流经元件的电流无关; 流经电压源的电流由与电压源相连接的外电路确定。即有

$$\begin{cases} u \equiv u_s \\ i = \text{任意值} \end{cases}$$

其伏安特性图如图 1-5 所示。

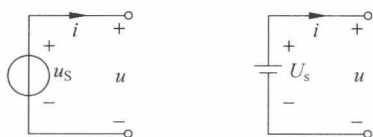


图 1-4

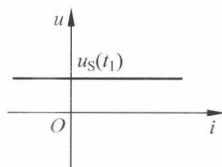


图 1-5

3. 电流源

定义: 当一个二端元件接入任一电路时, 如果其端电流始终保持规定的值或一定的函数, 而与其端电压无关, 则称该二端元件为理想电流源(又称为独立电流源)。

电路模型如图 1-6 所示。

伏安特性: 电流源的电流由元件本身确定, 它可以是定值或一定的时间函数, 而与元件的端电压无关; 电流源的两端电压由与电流源相连接的外电路确定。即有

$$\begin{cases} i \equiv i_s \\ u = \text{任意值} \end{cases}$$

其伏安特性图如图 1-7 所示。

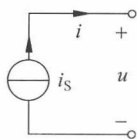


图 1-6

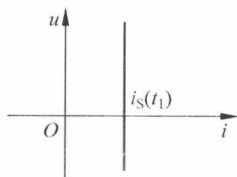


图 1-7

4. 受控源

定义：输出电压或电流受到电路中某部分的电压或电流控制的电源。

电路模型及其伏安特性：受控源有输入和输出两对端钮。输出端的电压或电流受输入端电压或电流的控制，按照控制量和被控制量的组合情况，理想受控源(线性)有以下 4 种(如图 1-8 所示)。

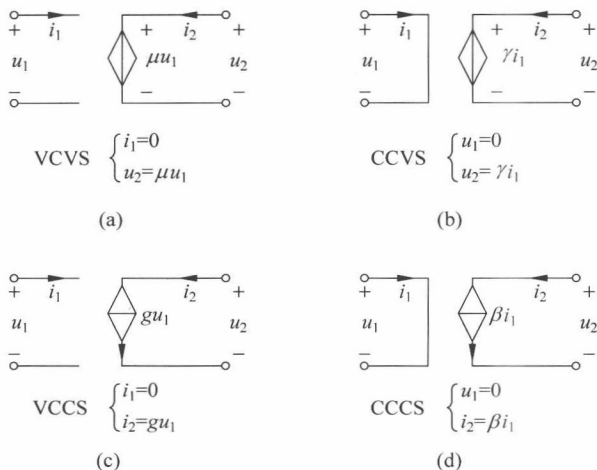


图 1-8

受控源与独立源对比：受控源与独立源(电压源和电流源)虽然同为电源，但却有本质的不同。独立源在电路中可起激励作用，因为有了它才能在电路中产生响应；而受控源则不能直接起激励作用，它的电压或电流受电路中其他电压或电流的控制。控制量存在，则受控源就存在，当控制量为零时，则受控源数值也为零。因此，它仅表示这种“控制”与“被控制”的关系，是电路内部一种物理现象而已。事实上，受控源是为了描述一些电子器件实际性能的需要而引入的，如晶体管、运算放大器等。

1.1.5 等效概念和方法

1. 等效的定义

两个二端网络 N_1 和 N_2 ，如果它们的端口伏安关系完全相同，则 N_1 和 N_2 是等效的。或称 N_1 和 N_2 互为等效电路，如图 1-9 所示，其两个端口电压电流参考方向应相同。

注意：这两个网络(N_1 和 N_2)的内部结构和元件参数可能完全不同，但对其外部电路 M 而言，无论接入的是 N_1 还是 N_2 ，它们的作用完全相同，因而外部电路各处的电流、电压将不会改变，故等效又为“对外

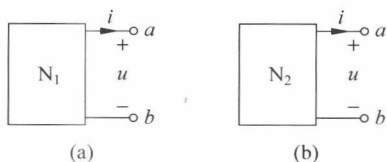


图 1-9

等效”。

等效的另一定义：两个二端网络 N_1 和 N_2 ，若能分别连接到同一个任意的二端网络 M 而不致影响到 M 内的电压和电流值，则 N_1 和 N_2 是等效的。

2. 端口伏安关系法

一个二端网络的端口伏安关系完全由它本身确定，与外电路无关。就像一个电阻元件的伏安关系为 $u= Ri$ 一样，不会因为这个电阻所接的外电路不同而有所不同。

根据等效的定义，只要求出一个二端网络的端口伏安关系，即可根据这一伏安关系得到该二端网络的化简等效电路。这种方法称为端口伏安关系法，该方法适用于任何二端电路的等效化简。例如，当求得图 1-9 中 N_1 二端网络的端口伏安关系是 $u=2-8i$ 时，即可画出对应的一种等效电路如图 1-10 所示。

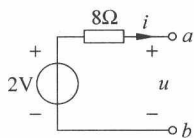


图 1-10

3. 模型互换法

根据等效的定义，可以证明如图 1-11 所示两个电路是互为等效的，这种电压源与电阻的串联或电流源与电阻并联的模型又可以被证明是实际电源的两种模型，两种模型的互换为有伴电源的电路等效提供了另一种等效方法，即模型互换法。

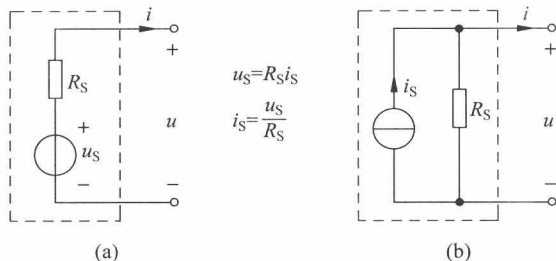


图 1-11

4. 重要结论

(1) 一个不含独立源的电阻性二端网络(可以含受控源,但必须是明确的网络)可以等效为一个电阻。因为可列出其端口伏安关系为 $u=R_{eq} i$ 的形式。

(2) 一个含独立源的电阻性二端网络(可以含受控源)可以等效为一个电压源和一个电阻的串联组合,或一个电流源和一个电阻的并联组合。

1.1.6 一些简单的等效规律和公式

以下电路(如图 1-12~图 1-18 所示)是从定义出发,导出的一些等效规律和公式,各图中左右两网络互为等效,在等效化简分析电路中可直接引用。

1. 电阻的串联

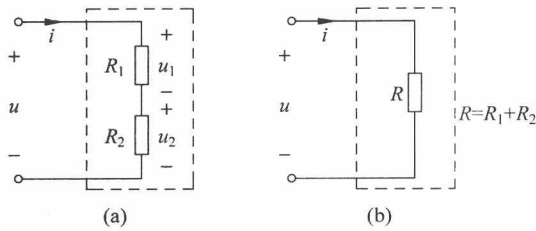


图 1-12

分压公式

$$u_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} u, \quad u_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} u$$

2. 电阻的并联

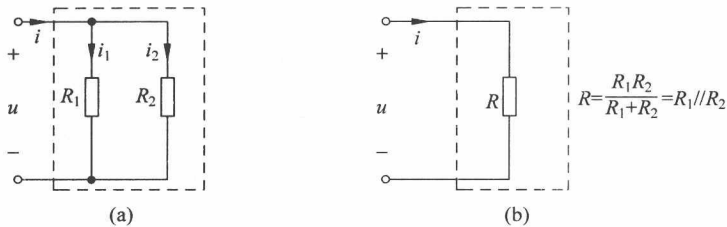


图 1-13

分流公式

$$i_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} i, \quad i_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} i$$

3. 电阻Y形连接和△形连接的等效变换

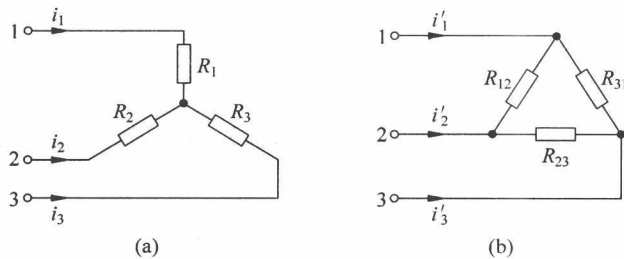


图 1-14

其中,

$$R_{12} = \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}{R_3}, \quad R_{23} = \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}{R_1}, \quad R_{31} = \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}{R_2}$$

$$R_1 = \frac{R_{12} R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}, \quad R_2 = \frac{R_{23} R_{12}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}, \quad R_3 = \frac{R_{31} R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}$$