

电气产品质量检验师职业资格培训系列教材

DIANQI JISHU JICHU ZHISHI

电气技术基础知识

中国质量检验协会/组编



中国计量出版社
CHINA METROLOGY PUBLISHING HOUSE



电气产品质量检验师职业资格培训系列教材

电气技术基础知识

中国质量检验协会 组编

中国计量出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

电气技术基础知识/中国质量检验协会组编. —北京: 中国计量出版社, 2006. 8

(电气产品质量检验师职业资格培训系列教材)

ISBN 7-5026-2458-9

I. 电… II. 中… III. 电气设备—技术培训—教材 IV. TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 076233 号

内 容 提 要

本书系《电气产品质量检验师职业资格培训系列教材》之一。

本书系统介绍了电气技术基础知识。内容包括: 电路的基本知识、电机与控制技术、模拟电子技术、数字电子技术、电子变流技术、检测技术和仪器设备等基础知识。

本书可作为各类电气产品质量检验师的通用培训教材, 也可作为质检机构和企业质检人员的参考书。

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲 2 号

邮政编码 100013

电话 (010) 64275360

<http://www.zgjl.com.cn>

北京市密东印刷有限公司印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

*

787 mm×1092 mm 16 开本 印张 19.25 字数 468 千字

2006 年 8 月第 1 版 2006 年 8 月第 1 次印刷

*

印数 1—3 100 定价: 54.00 元

《电气产品质量检验师职业资格培训系列教材》

编 委 会

主 编 张 军

副主编 吴国平 张理中 邴旭卫

主 审 吴国平 郭兴朴 周文成 邴旭卫

编 委 (按姓氏笔画排列)

马德军 毛嘉彤 左明芳 刘 挺 吴国平

李红旗 李伯宁 别正业 余贤杰 邴旭卫

林志力 邹国建 陈永强 陈伟升 周文成

周晓燕 杨淑芳 张 军 张理中 柳荣贵

高晓东 郑双名 郭兴朴 郭 蕾 霍胜华

《电气技术基础知识》编审人员

主 审 郭兴朴

编 者 (按姓氏笔画排列)

王 坚 王战果 孙晓荣 郭兴朴 梁 丽

黎 明

前 言

作为国家建设和人民日常生活中的重要产品，电气产品的质量与国民经济和人民生命财产的安全息息相关，从事电气产品质量检验的专业技术人员的业务技能和工作质量也将直接影响到国家和人民生命财产的安全。因此，在国家质量监督检验检疫总局（以下简称国家质检总局）《质量监督检验检疫专业人员职业资格制度总体规划》中，建立电气产品质量检验专业技术人员职业资格制度，实行对电气产品质量检验人员的岗位准入，被列入质量检验专业技术人员职业资格制度框架体系中急需建立的4个专业之一。

为贯彻落实国家质检总局质检专业人员职业资格制度总体规划，积极推进质量检验专业技术人员职业资格制度，经国家质检总局同意，中国质量检验协会组织有关单位和专家编写了《电气产品质量检验师职业资格培训系列教材》。

本系列教材首批共4个分册，即：

1. 《质量检验通用知识》
2. 《电气技术基础知识》
3. 《电气安全专业基础》
4. 《家用电器质量检验》

电气产品种类繁多，虽有共通的基础理论，却又涉及广泛的专业领域，对不同电气产品种类的专业检验人员，要求其掌握的检验标准、技术规则和操作技能也完全不同。本系列教材前三册为通用教材，之后是按产品类别编写的专业教材。《家用电器质量检验》为本系列教材的第一本专业教材，其他专业类产品检验的培训教材将陆续推出。通用教材中对某些专业知识只是做了初步介绍，各专业教材还将根据专业类产品检测的实际需要对相关专业知识做进一步补充。

《质量检验通用知识》，概述了作为质量检验人员所需了解和掌握的标准、计量、检验实验室通用要求、产品检验的实施、概率统计等方面的通用知识。

《电气技术基础知识》，主要汇集了电气产品各专业质检人员所需掌握的基础理论，包括电路、电机与控制、模拟电子技术、数字电子技术、电力电子变流技术、检测技术和仪器设备等内容。

《电气安全专业基础》，主要从电气产品质检人员所应掌握的电气产品基础知识、电器安全原理、电气安全检验中常用的工具、仪器和设备等方面给予系统介绍，该册书中还对电磁兼容技术做了初步介绍。

《家用电器质量检验》，选取了与人们生活关系密切、具有代表性的家用电器产品，从工作原理、典型结构及分类、特殊检验项目和检测仪器、检验操作注意事项等方面进行了较为全面的介绍，并附有实际检验案例。对于专业检验人员规范操作规程，提高专业技能具有实际指导意义。

本系列教材坚持实用原则，从质检工作的实际需要出发，注重提高专业质检人员的综合能力，力求使读者通过学习，提高业务水平和专业技能。本系列教材不但可以作为从事电气产品质量检验鉴定的职业技术人员的备考学习教材，也可用作实际检验工作中常备的参考工具书及大专院校质检专业师生的补充教材。特别是《家用电器质量检验》一书，作为家用电器专业检验人员培训教材出版在国内尚属首次。

国家质检总局人事司有关领导对本系列教材的编写工作多次给予指示和指导。中国质量检验协会组织有关专家就教材内容及结构等方面问题进行多次研讨，使教材与质检专业工作的实践结合得更加紧密，更加突出实际检验工作岗位要求所必备的专业知识与技能的内容。

本系列教材前四册由中国质量检验协会组织广州日用电器检测所、广州电气安全检验所、中国家用电器研究院及北京工商大学等单位共同编写。吴国平、郭兴朴、周文成、邵旭卫同志分别负责第一至四册教材的定稿。参加教材审定工作的还有：马德军、李红旗、别正业、郑双名、祁兵、鲁建国等同志。

中国纤维检验局原总工程师何永政和原国家质量技术监督局评审办主任、中国测试技术研究院院长陆志方对本丛书提出了宝贵意见，在此表示诚挚的感谢。

由于本书编写时间仓促，难免有不足或疏漏之处，希望读者批评指正。

编委会
2006年7月

目 录

第一章 电路	(1)
第一节 电路的基本概念和基本定律	(1)
第二节 线性电路分析的基本方法	(8)
第三节 单相正弦交流电路	(15)
第四节 三相交流电路	(24)
第五节 电路的瞬变过程	(29)
第二章 电机与控制	(34)
第一节 磁路	(34)
第二节 直流电动机	(36)
第三节 三相异步电动机	(46)
第四节 单相异步电动机	(65)
第五节 交流伺服电动机	(70)
第六节 微型同步电动机	(75)
第七节 无刷直流电动机	(78)
第八节 电气控制技术	(84)
第三章 模拟电子技术	(94)
第一节 电子元器件	(94)
第二节 放大电路	(109)
第三节 信号的运算和处理电路	(128)
第四节 振荡电路	(141)
第五节 直流电源	(152)
第四章 数字电子技术	(160)
第一节 数字逻辑基础	(160)
第二节 门电路	(165)
第三节 组合逻辑电路	(176)
第四节 触发器和时序逻辑电路	(188)
第五章 电子变流技术	(203)
第一节 电力电子器件	(203)

第二节	整流电路·····	(221)
第三节	逆变电路·····	(233)
第四节	直流斩波电路·····	(240)
第五节	PWM 控制技术 ·····	(246)
第六节	软开关技术·····	(253)
第七节	组合变流电路·····	(256)
第六章	检测技术和仪器设备基础 ·····	(261)
第一节	传感器·····	(261)
第二节	参数检测·····	(285)

第一章 电 路

本章的内容主要有：电路的基本概念和电路的基本定律；线性电路分析的基本方法，其中包括电路的等效变换、电路分析的基本方法和电路的主要定理；单相正弦交流电路，其中包括单相正弦交流电路的稳态分析、谐振电路及互感电路；三相交流电路，其中包括对称三相电路和不对称三相电路；电路的瞬变过程，其中包括初始条件和换路定律、一阶电路的响应、一阶电路的一般求解方法等。

第一节 电路的基本概念和基本定律

一、电路的基本概念

1. 电路与电路模型

(1) 电路：电流流通的路径称为电路。

(2) 实际电路：是指由电工设备和电气器件按预期目的连接构成的电流的通路。

(3) 理想电路（电路模型）：用理想的电路元件或它们的组合模拟实际器件，即可建立实际电路的电路模型。这种用理想的电路元件连接而成的电路称为理想电路。理想电路也称为电路模型。电路理论中研究的电路都是理想电路，即电路模型。

2. 电流和电压的参考方向

(1) 电流的参考方向：是指人们任意假定的电流方向。例如，对于图 1-1 所示的一段电路，其中方框泛指电路元件，其电流的参考方向既可以选定为由 A 至 B [图 (a)]，也可以选定为由 B 至 A [图 (b)]。

当电流 i 的实际方向与它的参考方向一致时，我们用正值表示，即 $i > 0$ ；反之用负值表示。例如在图 1-1 中，如果电流的实际方向为由 A 至 B，大小为 3 A，则在图 (a) 中 $i = 3$ A；而在图 (b) 中 $i = -3$ A。

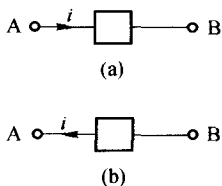


图 1-1 电流的参考方向

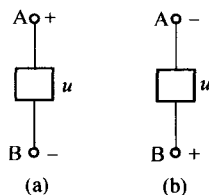


图 1-2 电压的参考方向

(2) 电压的参考方向：是指人们任意指定的电位降方向，用“+”、“-”极性来表示。例如，对于图 1-2 所示的一段电路，图 (a) 中选定电压的参考方向为由 A 至 B，而图 (b) 中选定电压的参考方向为由 B 至 A。

当电压 U 的实际方向与其参考方向一致时, 我们用正值表示, 即 $u > 0$; 反之用负值表示。例如在图 1-2 中, 如果电压的实际方向为由 B 至 A, 大小为 5 V, 则图 (a) 中 $u = -5$ V; 而在图 (b) 中 $u = 5$ V。电压的参考方向还可以用双下标表示, 如 u_{AB} 表示电压的参考方向选定为由 A 指向 B。

需要注意的是, 电路图中标注的电流和电压的方向均为参考方向。

(3) 电流和电压的关联参考方向: 如果指定流过元件的电流的参考方向是从标以电压的正极性的一端, 指向负极性的一端, 即电压和电流的参考方向一致, 则把电流和电压的这种参考方向称为关联参考方向, 如图 1-3 (a)。当两者不一致时, 称为非关联参考方向, 如图 1-3 (b)。

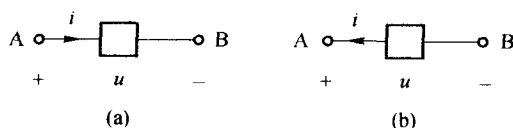


图 1-3 关联参考方向

(4) 电功率: 对于任意一条支路, 如果它的端电压与通过它的电流为关联参考方向时, 则该支路的功率为 $P = UI$; 若为非关联参考方向时, 则该支路的功率为 $P = -UI$ 。当 P 为正值 (即 $P > 0$) 时, 表示这条支路从外界吸收功率 (即消耗功率), 也就是说该支路为负载; 当 P 为负值 (即 $P < 0$) 时, 表示这条支路向外界输送功率 (即发出功率), 也就是说这条支路是电源。

3. 电路的基本元件

电路的基本元件 R , L , C 分别是实际电阻器、电感器和电容器的理想元件模型。通常所说的 R , L , C 是对应的各线性时不变元件的量值常数。

(1) 电阻元件: 线性电阻元件的符号如图 1-4 所示。当电压和电流取关联参考方向时, 满足欧姆定律

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

或 $i = \frac{1}{R}u$, 令 $G = \frac{1}{R}$, 则

$$i = Gu \quad (1-2)$$

式中, u 的单位是伏特 (V); i 的单位是安培 (A); R 的单位是欧姆 (Ω); G 称为电阻元件的电导, 单位是西门子 (S)。

(2) 电感元件: 电感元件是实际线圈的一种理想化模型, 其符号如图 1-5 所示。当规定线圈中磁通与电流的参考方向满足右手螺旋关系, 且电感电压 u 与电流 i 为关联参考方向时, 有

$$u = L \frac{di}{dt} \quad (1-3)$$

$$\text{或} \quad i = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u d\xi = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^{t_0} u d\xi + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t u d\xi = i(t_0) + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t u d\xi \quad (1-4)$$

式中, u 的单位是伏特 (V); i 的单位是安培 (A); L 的单位是亨利 (H)。

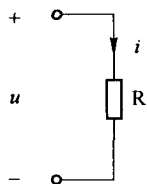


图 1-4 电阻元件

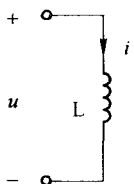


图 1-5 电感元件

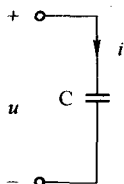


图 1-6 电容元件

(3) 电容元件: 线性电容元件的符号如图 1-6 所示。如果电容元件的电流 i 和电压 u 取关联参考方向, 则有

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{d(Cu)}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (1-5)$$

$$\text{或} \quad u(t) = u(t_0) + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i d\xi \quad (1-6)$$

式中, u 的单位是伏特 (V); i 的单位是安培 (A); C 的单位是法拉 (F)。

4. 电压源和电流源

实际电源有发电机、电池、信号源等。理想电压源和电流源是从实际电源抽象得到的电路模型, 电路中简称电压源和电流源。为区别于受控源, 又可称为独立电压源和独立电流源。

(1) 电压源: 电压源是指把实际电源的内部电阻看作零的理想电压源, 其符号见图 1-7 (a)。当 u_s 为恒定值时, 这种电压源称为恒定电压源或直流电压源, 有时用图 1-7 (b) 所示图形符号表示, 其中长划表示电源的“+”端, 电压值则用 U_s 表示。

电压源的主要特点是: ① 电压源的内部没有能量损耗; ② 电压源的端电压与通过它的电流无关, 是个常数或确定的时间函数; ③ 通过电压源的电流随外界所连接的电路的不同而不同。

实际电压源的内阻不为零, 根据其外特性可用电压源串联内阻形式表示, 如图 1-8 所示。

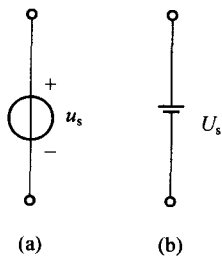


图 1-7 电压源

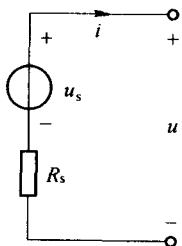


图 1-8 实际电压源模型

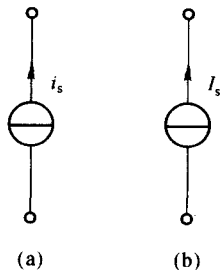


图 1-9 电流

(2) 电流源：电流源是一个理想电路元件。其特点是：① 电流源内部没有能量损耗；② 电流源输出的电流与它的端电压无关，是一常数或确定的时间函数；③ 电流源的端电压随外界所连接的电路的不同而不同。电流源的符号如图 1-9 (a) 所示。当电流源输出的电流 i_s 为恒定值时，称为直流电流源，可用图 1-9 (b) 所示图形符号表示。

(3) 电压源与电流源的等效变换：图 1-10 (a) 所示为电压源 u_s 和电阻 R_s 的串联组合，在端子 1-1' 处的电压 u 与 (输出) 电流 i 的关系为

$$u = u_s - R_s i \quad (1-7)$$

其外特性曲线如图 1-10 (b) 所示。

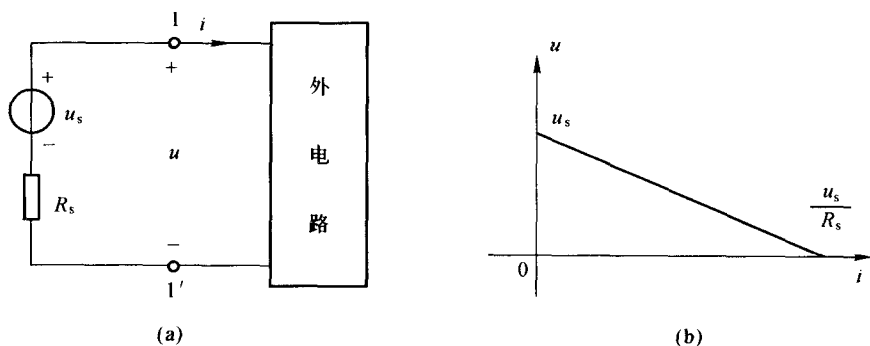


图 1-10 电压源电路模型

图 1-11 (a) 所示为电流源 i_s 和电阻 R_s 的并联组合，其外电路与图 1-10 (a) 中的外电路相同，电阻 R_s 也相同，在端子 1-1' 处的电压与 (输出) 电流 i 的关系为

$$u = R_s (i_s - i) = R_s i_s - R_s i \quad (1-8)$$

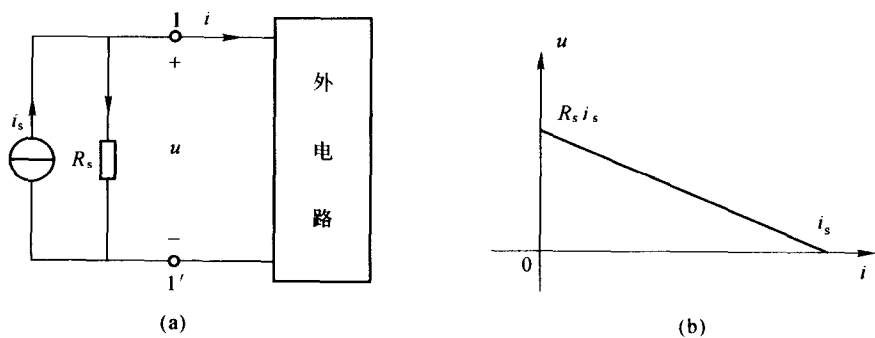


图 1-11 电流源电路模型

如果 $u_s = R_s i_s$ ，则式 (1-8) 和式 (1-7) 所示的两个方程完全相同，也就是电压源 u_s 串电阻 R_s 与电流源 i_s 并电阻 R_s 给同一外电路供电时，输出的电压 u 和电流 i 的关系完全相

同。于是，当电压源 u_s 串电阻 R_s 组合给某一外电路供电时，可用 $i = \frac{u_s}{R_s}$ 的电流源并电阻 R_s 组合等效替代电压源 u_s 串电阻 R_s 组合，输出的电压和电流关系完全相同。同理，当电流源 i_s 并电阻 R_s 组合给某一外电路供电时，可用 $u_s = R_s i_s$ 的电压源串电阻 R_s 组合等效替代原来的电流源 i_s 并电阻 R_s 组合，其输出效果完全相同。见图 1-12。

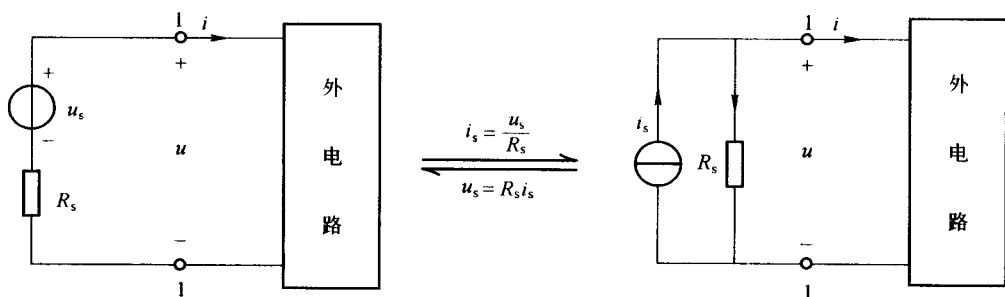


图 1-12 电源等效变换

(4) 受控源：受控源是受电路中其他支路电压或电流控制的电压源或电流源。为了和独立源区别，其电路符号用菱形表示，如图 1-13 所示。受控源可分为 4 种，即电压控制电压源 (VCVS)、电流控制电压源 (CCVS)、电压控制电流源 (VCCS)、电流控制电流源 (CCCS)。

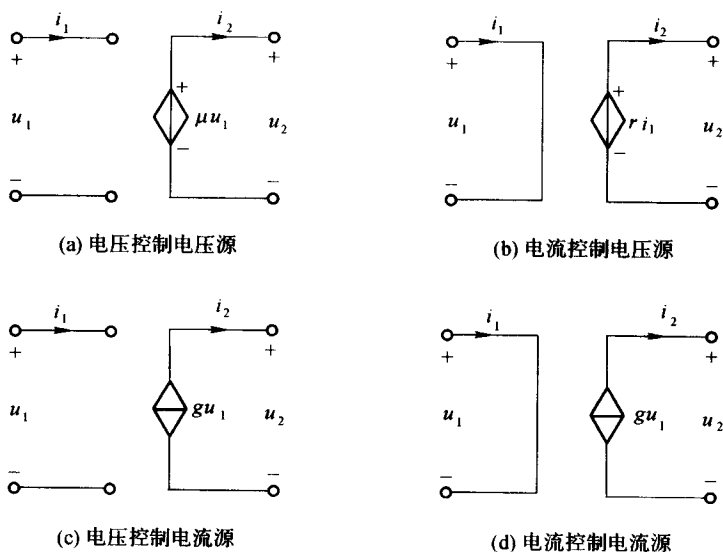


图 1-13 四种受控源模型

二、电路的基本定律

1. 基尔霍夫电流定律 (KCL)

基尔霍夫电流定律描述了电路中各支路电流之间的相互关系，它有两种数学表述：

第一，在任意时刻 t ，流入任一结点的支路电流的总和等于流出该结点的支路电流的总和，即

$$\sum i_{\text{入}} = \sum i_{\text{出}} \quad (1-9)$$

比如在图 1-14 电路中

$$i_1 + i_3 + i_4 = i_2 + i_5$$

第二，在任意时刻 t ，集中在任一结点上的所有支路电流的代数和为零，即

$$\sum i_k = 0 \quad (1-10)$$

此处，电流的“代数和”是根据电流是流出结点还是流入结点判断的。若流出结点的电流前面取“+”号，则流入结点的电流前面取“-”号。电流是流出结点还是流入结点，均根据电流的参考方向判断。比如在图 1-14 电路中

$$-i_1 + i_2 - i_3 - i_4 + i_5 = 0$$

式 (1-9) 和式 (1-10) 称为对应结点的 (KCL) 方程。

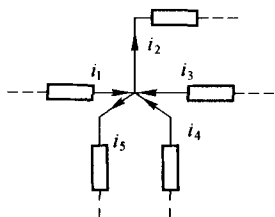


图 1-14 某电路中的一个结点

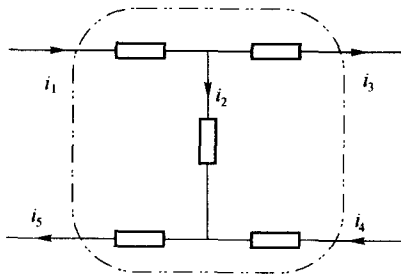


图 1-15 某闭合面电路

广义基尔霍夫电流定律定义为：在任意时刻 t ，流入（或流出）某个封闭曲面的所有支路电流的代数和为零。比如在图 1-15 电路中

$$-i_1 + i_3 - i_4 + i_5 = 0$$

2. 基尔霍夫电压定律 (KVL)

基尔霍夫电压定律描述了电路中各支路电压间的相互关系：在任意时刻 t ，按照一定的绕行方向，沿任一回路中所有支路或元件上电压的代数和为零，即

$$\sum u_k = 0 \quad (1-11)$$

此方程称为回路的 KVL 方程。写此方程时，凡电压的参考极性从“+”到“-”与回路的绕行方向一致者，则该电压前取“+”号，否则取“-”号。比如在图 1-16 所示电路中，沿回路按顺时针方向绕行一周，列写 KVL 方程为

$$u_1 + u_2 - u_3 - u_4 + u_5 = 0$$

如按逆时针方向绕行一周,列写 KVL 方程,则为

$$-u_5 + u_4 + u_3 - u_2 - u_1 = 0$$

$$\text{结点 2: } -i_2 + i_3 + i_4 = 0$$

$$\text{结点 3: } -i_4 - i_5 + i_6 = 0$$

$$\text{结点 4: } i_1 - i_3 + i_5 = 0$$

列 KCL 方程:

此电路共有 7 个回路,它们分别是:回路 1, 结点序列 (1, 2, 4, 1); 回路 2, 结点序列 (2, 3, 4, 2); 回路 3, 结点序列 (1, 2, 3, 1); 回路 4, 结点序列 (1, 2, 3, 4, 1); 回路 5, 结点序列 (1, 3, 4, 1); 回路 6, 结点序列 (1, 3, 2, 4, 1); 回路 7, 结点序列 (1, 3, 4, 2, 1)。

各回路的 KVL 方程是:

$$\text{回路 1: } R_2 i_2 + R_3 i_3 + R_1 i_1 - u_{s1} = 0$$

$$\text{回路 2: } R_4 i_4 + u_{s5} - R_5 i_5 - R_3 i_3 = 0$$

$$\text{回路 3: } R_2 i_2 + R_4 i_4 + R_6 i_6 - u_{s6} = 0$$

$$\text{回路 4: } R_2 i_2 + R_4 i_4 + u_{s5} - R_5 i_5 + R_1 i_1 - u_{s1} = 0$$

$$\text{回路 5: } u_{s6} - R_6 i_6 + u_{s5} - R_5 i_5 + R_1 i_1 - u_{s1} = 0$$

$$\text{回路 6: } u_{s6} - R_6 i_6 - R_4 i_4 + R_3 i_3 + R_1 i_1 - u_{s1} = 0$$

$$\text{回路 7: } u_{s6} - R_6 i_6 + u_{s5} - R_5 i_5 - R_3 i_3 - R_2 i_2 = 0$$

3. KCL 和 KVL 的独立方程数

(1) KCL 的独立方程数: 在图 1-17 所示电路中, 每个方框表示一个元件, 电路共有支路数为 $b=6$ 条, 结点数 $n=4$ 个, 电压、电流采用关联参考方向, 比如, 第六条支路中, 电流参考方向为从结点 1 流向结点 3, 与其相关联的电压参考方向为左“+”、右“-”。

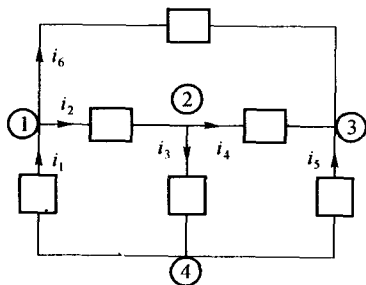


图 1-17 独立 KCL 方程示例

可以证明, 具有 n 个结点的电路, 只能列出 $(n-1)$ 个独立的 KCL 方程。相应的 $(n-1)$ 个结点称为独立结点。

比如在图 1-17 所示电路中, 结点数为 $n=4$ 个, 根据各结点 1, 2, 3, 4 分别可列写出 KCL 方程如下:

$$-i_1 + i_2 + i_6 = 0$$

$$-i_2 + i_3 + i_4 = 0$$

$$-i_4 - i_5 + i_6 = 0$$

$$i_1 - i_2 + i_3 = 0$$

4 个方程中每个电流都出现两次, 而且一正一负, 如果四个方程相加 $0=0$, 即 4 个方程线性相关, 不是独立方程。要想使方程组有惟一解, 必须是由独立方程组成的方程组, 这四个方程中只要去掉一个, 剩下的方程即为独立方程。所以对这 4 个结点的电路, 独立的 KCL 方程数为 $4-1=3$ 个。

(2) KVL 的独立方程数: 可以证明, 对于 b 条支路 n 个结点的电路, 可列写出 $L=b-(n-1)$ 个独立的 KVL 方程。比如在图 1-17 所示的电路中, $b=6$, $n=4$, 故可列写 $L=$

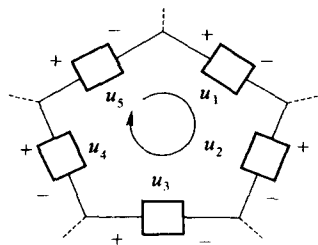


图 1-16 电路中某一回路

6 - (4 - 1) = 3 个独立的 KVL 方程。对于平面电路，独立的 KVL 方程数还等于其网孔数。所谓平面电路的网孔，是它的一个自然的“孔”，它所限定的区域内不再有支路。对于图 1-17 所示的平面电路，支路 (1, 2, 3), (3, 4, 5), (2, 4, 6) 都是网孔。此电路共有 3 个网孔，故独立的 KVL 方程数为 3。

第二节 线性电路分析的基本方法

一、电路的等效变换

1. 等效变换的概念

所谓电路的等效变换即把电路中某一部分用一个较为简单的电路或元件替代，从而使电路得到简化，而替代后电路中其他各部分的电压和电流均保持不变。

2. 电阻的串联和并联

图 1-18 (a) 所示的电路中，串联电阻部分可等效为一个电阻 R_{eq} ，如图 1-18 (b) 所示。应用 KVL，有

$$\begin{aligned} u &= R_1 i + R_2 i + \cdots + R_k i + \cdots + R_n i \\ &= (R_1 + R_2 + \cdots + R_k + \cdots + R_n) i = R_{eq} i \end{aligned}$$

$$\text{其中} \quad R_{eq} = \frac{u}{i} = R_1 + R_2 + \cdots + R_k + \cdots + R_n = \sum_{k=1}^n R_k \quad (1-12)$$

串联电阻一般用于“分压”，其分压公式为

$$u_k = R_k i = \frac{R_k}{R_{eq}} u, \quad k=1, 2, \cdots, n \quad (1-13)$$

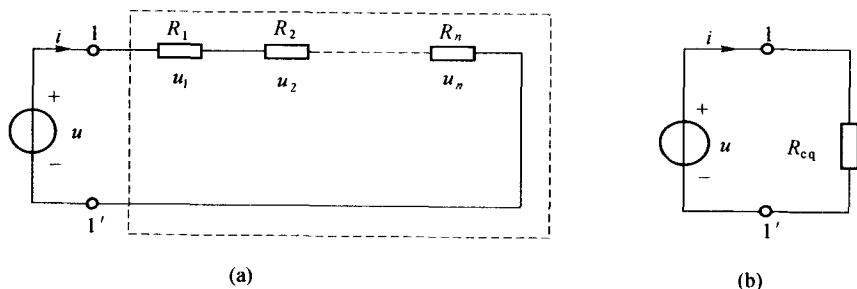


图 1-18 电阻的串联

图 1-19 (a) 所示的电路中，并联电阻部分可等效为一个电阻 R_{eq} (或用 G_{eq} 表示)，应用 KCL，有

$$\begin{aligned} i &= i_1 + i_2 + \cdots + i_k + \cdots + i_n \\ &= G_1 u + G_2 u + \cdots + G_k u + \cdots + G_n u \\ &= (G_1 + G_2 + \cdots + G_k + \cdots + G_n) u = G_{eq} u \end{aligned}$$

其中
$$G_{\text{eq}} = \frac{i}{u} = G_1 + G_2 + \cdots + G_k + \cdots + G_n = \sum_{k=1}^n G_k \quad (1-14)$$

或
$$\frac{1}{R_{\text{eq}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_k} + \cdots + \frac{1}{R_n} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k} \quad (1-15)$$

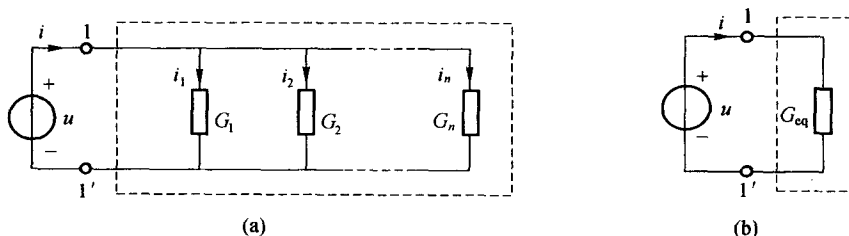


图 1-19 电阻的并联

并联电阻一般用于“分流”，其分流公式为

$$i_k = G_k u = \frac{G_k}{G_{\text{eq}}} i, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (1-16)$$

3. 电阻的 Y 形连接和 Δ 形连接的等效变换

电阻的星形 (Y) 连接和三角形 (Δ) 连接分别如图 1-20 (a)、(b) 所示。

已知 Y 形，求 Δ 形，即已知 R_1, R_2, R_3 ，求 R_{12}, R_{23}, R_{31} ，其公式为

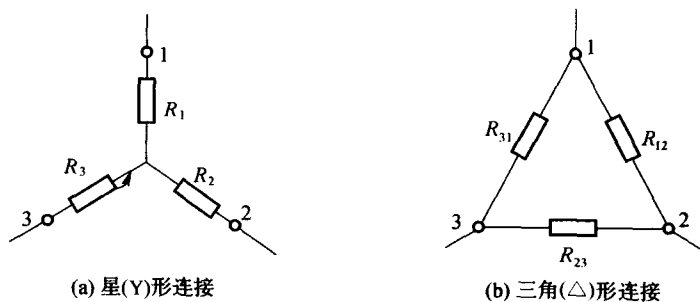


图 1-20 星形连接与三角形连接的等效变换

$$\left. \begin{aligned} R_{12} &= \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}{R_3} \\ R_{23} &= \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}{R_1} \\ R_{31} &= \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}{R_2} \end{aligned} \right\} \quad (1-17)$$

特例：当 $R_1 = R_2 = R_3 = R_Y$ 时，有

$$R_{12} = R_{23} = R_{31} = R_{\Delta} = 3R_Y \quad (1-18)$$