



新世纪电气及自动化类规划系列教材

工程电路分析

GONGCHENGDIANLU
FENXI

主 编 / 孙宪君

参 编 / 孙正风 焦玉成 王欣

主 审 / 黄锦安

东南大学出版社

TM133/78

2007

新世纪电气及自动化类规划系列教材

工程电路分析

主 编 孙宪君
参 编 孙正风 焦玉成 王 欣
主 审 黄锦安

东南大学出版社

内 容 提 要

本书根据国家工科电工课程教学指导委员会制定的高等工业学校电路课程教学的基本要求编写,全书执行了国家关于量与单位的最新标准。

全书共分 10 章,内容有电路与电路定律、电阻电路的等效变换分析、电路的分析、电路定理、运算放大器、动态电路的时域分析、正弦电流电路基础、正弦稳态电路、含耦合电感电路、三相电路。每章前有基本要求,便于读者了解该章主要内容与理论重点;在大部分节后配有习题,有助于读者掌握该节基本理论;每章后有归纳小结,有助于读者掌握该章基本理论;同时在每章后配有综合型习题,有助于读者掌握该章基本理论,提高综合能力。

本书可以作为普通高等学校、民办大学、职业技术学院电气工程与自动化方向专业电路、电路基础、电路分析基础等课程的教材,也可以作为采用国家教育部高等教育司推荐的英文原版教材——(美)William H. Hayt, Jr. 等著“Engineering Circuit Analysis”(工程电路分析)的电路双语教学的辅助教材,也可供有关科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程电路分析/孙宪君主编. —南京:东南大学出版社,2007. 10

(新世纪电气及自动化类规划系列教材)

ISBN 978 - 7 - 5641 - 0944 - 8

I. 工… II. 孙… III. 工程电路分析—高等学校—教材 IV. TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 142784 号

工程电路分析

出版发行 东南大学出版社

出 版 人 江汉

社 址 南京市四牌楼 2 号

邮 编 210096

电 话 025—83792954

电 邮 zhu_min_seu@163.com

经 销 江苏省新华书店

印 刷 兴化市印刷有限责任公司

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 19.5

字 数 480 千字

书 号 ISBN 978 - 7 - 5641 - 0944 - 8/TM·8

印 次 2007 年 11 月第 1 次印刷

版 次 2007 年 11 月第 1 版

印 数 1—4000

定 价 34.00 元

(凡因印装质量问题,请与我社读者服务部联系。电话:025—83792328)

前 言

根据国家教育部电工课程教学指导委员会制定的高等工业学校电路课程教学的基本要求,编写了《工程电路分析》。本教材的特色简明、扼要,仅包括三大部分理论内容:电阻电路的分析、动态电路的时域分析、正弦稳态电路分析。这是考虑电路、信号与系统、自动控制原理等专业基础课程内容的整合与优化的需要,也是满足理论教学时数减少与提高实践教学时数的需要。同时本教材内容突出电路基本理论,力求少而精、由浅入深、循序渐进、紧密联系专业知识、夯实专业基础。每章的习题在每节内容后给出一些应用本节教学理论就能完成的比较简单的习题及其答案,目的是使学生熟练掌握与正确应用本节电路基本理论进行电路分析与计算。每章内容教学后给出本章内容的归纳与小结,突出基本理论与分析方法;后又给出一些综合应用本章教学理论才能完成的一些综合性习题,目的是使学生熟练掌握与巩固本章电路基本理论、进行综合性电路分析与计算、提高综合应用的能力。本教材从应用型本科教学的特点出发,可以作为电路教学用书,也可以作为电路双语教学(采用国家教育部高等教育司推荐的英文原版教材——(美)William H. Hayt, Jr. 等著“Engineering Circuit Analysis”(工程电路分析))的辅助用书。

在编写本教材的过程中,编者总结了多年电路教学实践经验,参考了国内相关院校出版的有关电路方面的教材,注意对传统内容、基本内容与新内容的协调,力图突出简明与重点、力争培养学生的自学能力,以提高学生的综合能力。

参加本书编写工作的有:三江学院电气工程系孙宪君(第1~第3章);泰州科技学院孙正风(第8~第10章),三江学院电气工程系王欣(第4~第6章)和焦玉成(第7章、第11章、第12章)。

全书由孙宪君教授统稿。南京理工大学自动化学院1009教研室黄锦安教授仔细审阅了全书,并提出许多宝贵意见,在此表示深切谢意。

限于编者水平,本教材肯定存在许多不足与错误之处,希望读者给予批评指正。(南京三江学院电气与自动化工程学院孙宪君。邮编:210012)

编 者

2007年6月

新世纪电气及自动化类规划 系列教材编委会

主 任	三江学院	周泽存
副 主 任	苏州大学	张茂青
	江苏大学	赵德安
	扬州大学	陈 虹
	南京工业大学	马小军
	常州大学	张立臣
	盐城工学院	陈 荣
	徐州师范大学	张彩荣
	泰州科技学院	陆汉栋
	成贤学院	计有为
	三江学院	王 尧

执行编委 施 恩 朱 珉

编 委(按姓氏笔画排列)

马小军	王 尧	王其生	计有为	许必熙
孙宇新	孙宪君	杜逸鸣	杨建宁	杨 栋
束长宝	张立臣	张茂青	张俊芳	张家海
张彩荣	张植保	陆汉栋	陈劲操	陈 荣
陈 虹	罗慧芳	周泽存	周淑阁	赵德安
胡国文	都洪基	钱显毅	郭建江	谢秉正

目 录

1	电路与电路定律	(1)
1.1	电路与电路模型	(1)
1.2	电路分析的基本物理量	(2)
1.2.1	电荷	(2)
1.2.2	电流	(2)
1.2.3	电流参考方向	(3)
1.2.4	电压	(3)
1.2.5	电压参考极性	(3)
1.2.6	关联参考方向	(3)
1.2.7	功率	(4)
1.2.8	能量	(5)
1.3	独立源	(6)
1.3.1	独立电压源	(6)
1.3.2	实际电压源	(6)
1.3.3	独立电流源	(7)
1.3.4	实际电流源	(8)
1.4	受控源	(8)
1.4.1	电压控制电压源	(8)
1.4.2	电流控制电压源	(9)
1.4.3	电压控制电流源	(9)
1.4.4	电流控制电流源	(9)
1.5	电阻与欧姆定律	(10)
1.5.1	线性电阻与非线性电阻	(10)
1.5.2	欧姆定律	(11)
1.6	基尔霍夫电流定律与电压定律	(12)
1.6.1	几个术语	(12)
1.6.2	基尔霍夫电流定律	(13)
1.6.3	基尔霍夫电压定律	(14)
1.7	小结	(16)
	习题 1	(17)

2	电阻电路等效变换分析	(24)
2.1	等效与等效变换	(24)
2.2	电阻串联与并联	(25)
2.2.1	电阻串联	(25)
2.2.2	电阻并联	(25)
2.2.3	电阻混联	(26)
2.3	分压与分流	(28)
2.3.1	分压	(28)
2.3.2	分流	(28)
2.4	电阻 Y— Δ 等效变换	(29)
2.5	独立源串联与并联	(31)
2.5.1	电压源串联	(31)
2.5.2	电压源并联	(31)
2.5.3	电流源并联	(32)
2.5.4	电流源串联	(32)
2.5.5	电压源与支路并联	(33)
2.5.6	电流源与支路串联	(33)
2.6	实际电压源与实际电流源等效变换	(34)
2.7	含受控源电路分析	(38)
2.7.1	应用欧姆定律、KCL 与 KVL 分析含受控源电路	(38)
2.7.2	应用等效变换方法分析含受控源电路	(39)
2.8	小结	(41)
	习题 2	(42)
3	线性电路一般分析	(49)
3.1	支路电流法	(49)
3.2	结点电压法	(51)
3.3	网孔电流法	(57)
3.4	结点法与网孔法比较	(62)
3.5	小结	(65)
	习题 3	(66)
4	线性电路定理	(71)
4.1	叠加定理	(71)
4.2	戴维南定理与诺顿定理	(75)
4.3	最大功率传输	(83)
4.4	小结	(84)
	习题 4	(85)

5	运算放大器	(89)
5.1	理想运算放大器	(89)
5.2	级联	(93)
5.3	实际考虑	(94)
5.3.1	实际运算放大器的电路模型	(94)
5.3.2	理想运算放大器法则的推导	(94)
5.3.3	共模抑制与负反馈	(94)
5.3.4	饱和	(95)
5.4	小结	(96)
	习题 5	(96)
6	一阶电路时域分析	(99)
6.1	电容与电感元件	(99)
6.1.1	电容元件	(99)
6.1.2	电感元件	(100)
6.2	含电容的运算放大器电路	(102)
6.3	一阶电路零输入响应	(103)
6.3.1	换路定则与初始条件	(103)
6.3.2	RC 电路零输入响应	(106)
6.3.3	RL 电路零输入响应	(108)
6.4	一阶电路零状态响应	(112)
6.4.1	RC 电路零状态响应	(112)
6.4.2	RL 电路的零状态响应	(113)
6.5	一阶电路完全响应	(116)
6.6	一阶电路三要素法	(117)
6.7	阶跃函数与阶跃响应	(123)
6.7.1	单位阶跃函数	(123)
6.7.2	单位阶跃响应	(125)
6.8	小结	(128)
	习题 6	(129)
7	二阶电路时域分析	(134)
7.1	RLC 并联电路零输入响应	(134)
7.1.1	RLC 并联电路零输入响应	(134)
7.1.2	RLC 并联电路的过阻尼响应	(135)
7.1.3	LC 并联电路的临界阻尼响应	(137)
7.1.4	RLC 并联电路的欠阻尼响应	(138)
7.1.5	无损耗 LC 电路	(140)
7.2	RLC 串联电路零输入响应	(141)
7.3	二阶电路完全响应	(143)

7.4 小结	(144)
习题7	(144)
8 正弦电流电路分析基础	(148)
8.1 正弦量	(148)
8.2 正弦量的有效值	(151)
8.3 正弦量的相量表示	(152)
8.3.1 正弦稳态电路的时域分析	(152)
8.3.2 相量法	(153)
8.4 R 、 L 与 C 的相量形式伏安关系	(155)
8.4.1 电阻元件	(156)
8.4.2 电感元件	(156)
8.4.3 电容元件	(157)
8.5 KCL 与 KVL 相量形式	(159)
8.5.1 KCL 相量形式	(159)
8.5.2 KVL 相量形式	(159)
8.6 小结	(160)
习题8	(161)
9 正弦稳态电路分析	(164)
9.1 阻抗与导纳	(164)
9.1.1 阻抗	(164)
9.1.2 导纳	(167)
9.2 简单正弦稳态电路分析	(168)
9.3 正弦稳态电路一般分析	(171)
9.3.1 结点和网孔分析法	(171)
9.3.2 叠加定理和戴维南定理	(173)
9.4 相量图	(176)
9.5 正弦稳态电路功率	(178)
9.5.1 瞬时功率	(178)
9.5.2 平均功率	(180)
9.5.3 无功功率	(183)
9.5.4 视在功率与功率因数	(183)
9.5.5 复功率	(185)
9.6 频率响应	(186)
9.6.1 串联谐振	(187)
9.6.2 并联谐振	(190)
9.6.3 其他谐振	(193)
9.7 小结	(199)
习题9	(200)

10	磁耦合电路	(206)
10.1	自感与互感	(206)
10.1.1	自感	(206)
10.1.2	互感	(206)
10.2	含耦合电感电路分析	(208)
10.2.1	含耦合电感电路的一般分析	(208)
10.2.2	去耦等效变换	(210)
10.3	线性变压器	(215)
10.4	理想变压器	(219)
10.5	小结	(221)
	习题 10	(223)
11	三相电路	(228)
11.1	三相电源	(228)
11.1.1	Y 接三相电源	(228)
11.1.2	Δ 接三相电源	(231)
11.2	Y 接负载三相电路	(232)
11.2.1	Y 接对称负载三相电路	(232)
11.2.2	Y 接不对称负载三相电路	(234)
11.3	Δ 接负载三相电路	(235)
11.3.1	Δ 接对称负载三相电路	(235)
11.3.2	Δ 接不对称负载三相电路	(236)
11.4	三相电路的功率及其测量	(238)
11.4.1	三相电路功率	(238)
11.4.2	瓦特表及其应用	(240)
11.5	小结	(242)
	习题 11	(244)
12	二端口网络	(248)
12.1	一端口与二端口	(248)
12.1.1	一端口	(248)
12.1.2	二端口	(249)
12.2	二端口的导纳参数	(250)
12.2.1	导纳参数方程	(250)
12.2.2	实验法确定 y 参数	(250)
12.2.3	列写端口方程确定 y 参数	(252)
12.2.4	y 参数等效电路	(252)
12.2.5	二端口并联	(254)
12.3	二端口的阻抗参数	(255)
12.3.1	阻抗参数方程	(255)

12.3.2	开路实验法确定 z 参数	(256)
12.3.3	列写端口方程确定 z 参数	(257)
12.3.4	z 参数等效电路	(258)
12.3.5	二端口串联	(259)
12.4	二端口的混合参数	(260)
12.4.1	混合参数方程	(260)
12.4.2	h 参数的确定	(261)
12.4.3	h 参数等效电路	(264)
12.5	二端口的传输参数	(265)
12.5.1	传输参数方程	(265)
12.5.2	传输参数的确定	(265)
12.5.3	二端口级联	(267)
12.6	端接二端口	(269)
12.6.1	二端口的输入阻抗	(269)
12.6.2	二端口的输出阻抗	(269)
12.6.3	二端口的特性阻抗	(270)
12.7	二端口参数之间换算	(274)
12.8	小结	(276)
习题 12		(278)
附录		(283)
附录 A	美《Engineering Circuit Analysis, Sixth Edition》(工程电路分析, 第六版) 目录	(283)
附录 B	国际制基本单位表与部分国际制词冠	(289)
习题答案		(290)
参考文献		(299)

基本要求:

- (1) 了解电路的组成与作用。
- (2) 掌握电压与电流参考方向的概念。
- (3) 掌握理想电路元件(电阻、独立源与受控源)的伏安方程及其功率计算。
- (4) 熟练掌握与应用 KCL 与 KVL。

1.1 电路与电路模型

电路(Circuit)是电气工程类专业大学的第一门专业技术基础课。电路课程主要研究线性电路分析(包含电阻性电路分析、动态电路时域分析与正弦稳态电路分析)的基本理论、基本定律与定理、计算方法,是研究分析与解决实际工程问题的有力工具。通过本课程的学习,将为学习后续课程(例如信号与系统、电磁场、电机及其控制、电力电子学等)建立必要的理论基础。而且大学生毕业后走向社会,将致力于解决社会经济与工程问题,为此,必须具有多种技能,其中一种技能就是电路分析知识。

实际电路由具体的元器件组成,以实现电能的传输与转换、信号的传递与处理等。电路中提供电能的元器件称为电源(Source),用电的元器件称为负载(Load),还有起控制或连接作用的其他元器件。实际电路一般都不是线性的,但是在有限范围内,大多数电路的性状呈现近似线性。线性电路分析问题比非线性电路分析问题容易得多,因此,我们经常寻找适宜的精确的方法去近似解决实际问题。这样做,一方面是提高分析速度,另一方面是提供决定实际电路性能的关键基础,本教材的电路均为对实际电路的线性近似,在广泛的实际应用中,还是比较适宜与精确的。当然,实际问题精确度的要求越高,非线性模型越适宜,求解的复杂度就越高。

线性电路分析分为三大类:电阻性电路分析、时域分析、频域分析。电阻性电路分析是学习电路分析的基础。当电路中包含电容和电感元件时,由于这些元件的伏安关系是微分或积分关系,因此,动态电路的分析一般要通过求解电路的微分方程得到时域分析解。尽管电阻性电路分析方法可以应用于动态电路的分析,但是动态电路的时域分析还是比较麻烦的。频域分析是解决上述问题的简捷、有效的方法,把微分方程转换为容易处理的代数方程。

为了简化工程电路分析与计算,在一定的条件下,把实际电路器件视为理想电路元件处理。电阻 R (电导 G) 元件表征消耗电能的电阻器、灯泡等实际电路器件。电感元件 L 表征存储磁场能量的电感线圈等。电容元件 C 表征存储电场能量的电容器等。有源元件分为独立电源(包括电压源与电流源)与非独立电源(又称为受控源)。由理想电路元件组成的电路

称为电路模型(Model)。本教材介绍的电路及其分析就是电路模型及其分析与计算。

电路理论是研究电路分析与电路设计的一门基础工程学科,包括电路分析与电路设计。电路分析一般是已知电路结构与元件参量,求解由输入(或激励)产生的输出(或响应),或者求解网络特性参数或网络函数输出(或响应)。电路设计一般是已知电路的激励和响应,设计电路结构和选择电路元件参量,满足指定的要求条件。电路设计方法分为传统的电路设计方法与计算机辅助电路设计方法。根据应用计算工具的不同,可以把电路分析分为手算电路分析与计算机辅助电路分析两大类。手算电路分析就是人们利用笔与纸,根据条件,应用电路分析基本理论与方法对电路进行分析与计算。因此,只能对简单的、支路数目不大的电路进行手算。计算机辅助电路分析(Computer-Aided Circuit Analysis, CAA)就是借助计算机完成有关电路的分析与计算任务。由于计算机具有计算速度快、内存容量大、处理能力强等优点,可以担任对大规模电路分析的智能工具。传统的电路设计方法一般是电路设计者根据掌握的相关资料和自身设计经验,利用相关的图表、公式和计算尺、计算器之类计算工具完成电路设计,因此,只能对一些比较简单的电路进行分析与设计,不适宜大规模电路的分析与设计。随着社会主义经济建设的飞跃发展、科学与技术的突飞猛进,大规模集成电路和计算机的日新月异地发展,必须应用计算机辅助电路分析与设计,才能高质量、周期较短地完成大规模集成电路、超大规模集成电路的分析与设计。计算机辅助电路设计(Computer-Aided Circuit Design, CAD)就是借助计算机完成有关电路的设计任务。

本教材目标在集中研究电路分析,以提高学生对电路分析的能力。

1.2 电路分析的基本物理量

电路分析的基本物理量是电荷、电流、电压、功率与能量,当这些物理量为恒定量(不随时间变化)时,分别用大写字母 Q 、 I 、 U 、 P 、 W 表示;当这些物理量随时间变化时,分别用小写字母 q 、 i 、 u 、 p 、 w 表示。

1.2.1 电荷

电荷(Charge)守恒是电路分析的基本概念,我们既不能创造电荷,也不能消灭电荷。电荷分为正电荷与负电荷两大类,原子中的电子是负电荷,而质子带正电荷。由国际单位制得到电荷的单位是库仑(C)。

1.2.2 电流

电流(Current)是电路分析的重要的基本物理量。电荷的定向运动形成电流,电流与电荷之间的关系是

$$i = dq/dt \quad (1.2.1)$$

习惯上,规定正电荷移动的方向是电流的正方向。其实,我们知道导线中电流是电子运动形成的,电流方向是负电荷移动的方向。

如果电流的大小与方向均不随时间变化,称为恒定电流,简称直流(Direct Current, dc 或 DC),用符号 I 表示。如果电流的大小与方向均随时间变化,称为交变电流,简称交流(Alternating Current, ac 或 AC),用符号 i 表示。

电流的单位是安(A),较大的单位是千安($1\text{ kA}=10^3\text{ A}$);较小的单位有毫安($1\text{ mA}=10^{-3}\text{ A}$)与微安($1\text{ }\mu\text{A}=10^{-6}\text{ A}$)。

1.2.3 电流参考方向

为了判断复杂电路中电流的正方向,引入电流参考方向(Reference Direction)概念。电流的参考方向是任意选定的方向,用箭头方向表示,如图 1.2.1 所示。

指定电流的参考方向是把电流看成代数量,规定:当 $i>0$ 时,电流参考方向与其正方向一致;当 $i<0$ 时,电流参考方向与其正方向相反。



图 1.2.1 电流的参考方向

虽然电流参考方向不一定就是电流的正方向,但是,可以应用电流参考方向与电流的正负数值相结合来表示电流的正方向。例如在图 1.2.1 所示电流参考方向向右,如果 $i=5\text{ A}$,说明电流大小为 5 A ,电流的正方向与电流参考方向一致;如果 $i=-5\text{ A}$,说明电流大小为 5 A ,电流的正方向与电流参考方向相反。

1.2.4 电压

电路元件端点之间的电压(Voltage)是电荷(电流)流过该元件时吸收或释放能量的体现。当电流由元件的 A 端流入,从 B 端流出时,如果该元件吸收(释放)能量,我们称元件 A 端(B 端)为高电位(正极),元件 B 端(A 端)为低电位(负极)。

电压单位是伏(V),较大的单位是千伏($1\text{ kV}=10^3\text{ V}$);较小的单位是毫伏($1\text{ mV}=10^{-3}\text{ V}$)与微伏($1\text{ }\mu\text{V}=10^{-6}\text{ V}$)。

1.2.5 电压参考极性

为了判断复杂电路中电压的极性(正方向),引入电压参考极性(方向)概念。电压的参考极性是任意选定的,标定方式用“+”号表示高电位,用“-”号表示低电位;或用箭头方向表示电压降低方向,如图 1.2.2 所示。规定:当 $u>0$ 时,电压参考极性与实际极性一致;当 $u<0$ 时,电压参考极性与实际极性相反。有时电压的参考极性也用双下标字母表示电压降低方向,例如,图 1.2.2 中电压 u_{AB} 的电压参考极性是由 A 端指向 B 端。

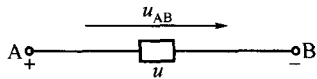


图 1.2.2 电压的参考极性

虽然电压参考极性不一定就是电压的真实极性,但是,我们可以应用电压参考极性与电压的正负数值相结合来表示电压的真实极性。例如在图 1.2.2 所示电压参考极性下,如果 $u_{AB}=10\text{ V}$,说明电压的大小为 10 V ,电压的真实极性与参考极性一致,即元件 A 端电压高于 B 端电压 10 V ;如果 $u_{AB}=-10\text{ V}$,说明电压的大小为 10 V ,电压的真实极性与电压参考极性相反,元件 B 端电压高于 A 端电压 10 V 。

1.2.6 关联参考方向

如果元件电流与电压的参考方向一致,称为关联参考方向(Associated Reference),如图 1.2.3 所示;如果元件的电流与电压的参考方向相反,则称为非关联参考方向。

在电路分析与计算时,首先必须标出电流与电压的参考方向(如果采用关联参考方向,

则可以只标出电流参考方向或电压的参考极性);然后进行分析与计算。根据电流(电压)的参考方向与电流(电压)数值的正与负就能确定电流(电压)的大小及其正方向。不标出电流(电压)的参考方向,电流(电压)数值的正与负就没有什么意义。

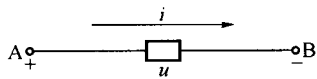


图 1.2.3 关联参考方向

1.2.7 功率

在图 1.2.3 中,若 u 与 i 为关联参考方向,功率

$$p = +ui \quad (1.2.2)$$

表示元件吸收功率。若 $p > 0$, 该元件是负载(Load);若 $p < 0$, 该元件转借功率 $|p|$, 是电源(Source)。

若 u 与 i 为非关联参考方向,功率

$$p = -ui \quad (1.2.3)$$

表示元件输出功率。若 $p > 0$, 该元件是负载;若 $p < 0$, 该元件是电源。

在应用式(1.2.2)或式(1.2.3)计算元件功率时,要注意两套正负号:第一套正负号是应用式(1.2.2)还是应用式(1.2.3),即元件电压 u 与电流 i 乘积“ ui ”前面是加“+”号还是加“-”号,取决于元件电压与电流的参考方向是否为关联参考方向,如果是关联参考方向,则元件电压 u 与电流 i 乘积“ ui ”前面加“+”号;否则在“ ui ”前面加“-”号。第二套正负号是元件自身的电压 u 与电流 i 数值的正或负。这两套正负号不要混淆。

功率的单位是瓦(W),功率较大的单位是 1 kW (千瓦) $= 10^3 \text{ W}$ 、 1 MW (兆瓦) $= 10^6 \text{ W}$,功率较小的单位是 1 mW (毫瓦) $= 10^{-3} \text{ W}$ 、 $1 \mu\text{W}$ (微瓦) $= 10^{-6} \text{ W}$ 。

【例 1.2.1】 电路如图 1.2.4 所示,已知 $u_1 = 1 \text{ V}$, $i_1 = 2 \text{ A}$; $u_2 = -3 \text{ V}$, $i_2 = 1 \text{ A}$; $u_3 = 8 \text{ V}$, $i_3 = -1 \text{ A}$; $u_4 = -4 \text{ V}$, $u_5 = 7 \text{ V}$, $u_6 = -3 \text{ V}$ 。求各电路元件的功率,并指明是吸收还是发出功率。

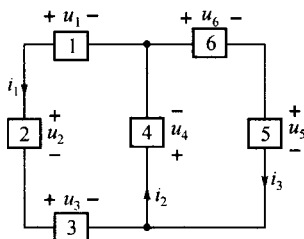


图 1.2.4 例 1.2.1 电路

解:对于 1 号元件,电压与电流为非关联参考方向,因此 1 号元件表现功率为:

$$p_1 = -u_1 i_1 = (-1) \times 2 = -2 \text{ W}$$

(说明 1 号元件产生(输出)功率 2 W)

对于 2 号元件,电压与电流为关联参考方向,因此 2 号元件的表现功率为:

$$p_2 = u_2 i_1 = (-3) \times 2 = -6 \text{ W} \quad (\text{说明 2 号元件输出功率 } 6 \text{ W})$$

对于 3 号元件,电压与电流为关联参考方向,因此 3 号元件吸收功率为:

$$p_3 = u_3 i_1 = (-8) \times (-2) = 16 \text{ W} \quad (\text{说明 3 号元件吸收功率 } 16 \text{ W})$$

对于 4 号元件,电压与电流为关联参考方向,因此 4 号元件吸收功率为:

$$p_4 = u_4 i_2 = (-4) \times 1 = -4 \text{ W} \quad (\text{说明 4 号元件输出功率 } 4 \text{ W})$$

对于 5 号元件,电压与电流为非关联参考方向,因此 5 号元件吸收功率为:

$$p_5 = u_5 i_3 = +7 \times (-1) = -7 \text{ W} \quad (\text{说明 5 号元件表现功率 } 7 \text{ W})$$

对于 6 号元件,电压与电流为关联参考方向,因此 6 号元件吸收功率为:

$$p_6 = u_6 i_3 = (-3) \times (-1) = 3 \text{ W} \quad (\text{说明 6 号元件吸收功率 } 3 \text{ W})$$

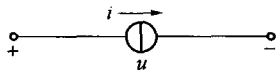
根据能量守恒,电路元件产生的功率之和等于元件吸收的功率之和。本例中元件 1、元件 2、元件 4 与元件 5 产生的功率之和为 19 W,而元件 3 与元件 6 吸收的功率之和为 19 W,说明计算结果正确。今后,我们可以应用此法检查计算结果是否正确。

元件功率计算的另外一种方法是:在关联参考方向下,电压与电流的乘积“ ui ”为元件吸收的功率;在非关联参考方向下,电压与电流的乘积“ ui ”为元件产生的功率。例如,在图 1.2.4 所示的例 1.2.1 电路中,1 号元件的电压与电流为非关联参考方向,其电压与电流的乘积“ ui ”为: $u_1 i_1 = (1) \times (2) = 2 \text{ W}$,即 1 号元件产生功率为 2 W。

【例 1.2.2】 计算如图 1.2.5 所示电流源在下述两种情况下的功率。

第一种情况: $u=5 \text{ V}$, $i=2 \text{ A}$;第二种情况: $u=-5 \text{ V}$, $i=2 \text{ A}$ 。

解:图 1.2.5 所示电流源为电压与电流关联参考方向,因此
电流源吸收功率为 $p = +ui$



第一种情况下,电流源吸收功率为

$$p = +ui = (+5) \times (2) = 10 \text{ W}$$

图 1.2.5 例 1.2.2 电路

说明此 2 A 电流源吸收功率 10 W,在此电路中,该电流源是负载,不是电源。

第二种情况下,电流源吸收功率为 $p = +ui = +(-5) \times (2) = -10 \text{ W}$

此 2 A 电流源吸收功率 -10 W,说明它向外提供功率 10 W,在此电路中,该电流源是电源,不是负载。

通过本例可以看出:电路中具有电源符号的元件不一定是起电源作用,也可能是负载。

在电气工程中,电压、电流与功率的基本单位是伏(V)、安(A)与瓦(W),但是,在实际应用时,会遇到比较大或比较小的单位,常用于电路分析的单位之间换算系数如表 1.1.1 所示:

表 1.1.1 单位换算系数

所表示的因数	名 称	符 号
10^9	吉	G
10^6	兆	M
10^3	千	k
10^{-3}	毫	m
10^{-6}	微	μ
10^{-9}	纳	n
10^{-12}	皮	p

1.2.8 能量

能量(Energy)也是电路分析中一个重要的物理量。在关联参考方向下,电路元件从 0 到 t 的时间间隔,吸收的电能为

$$W = \int_0^t p(t) dt \quad (1.2.4)$$

当功率的单位是瓦(W),时间的单位是秒(s),电能的单位是焦耳(J),简称焦。

即

$$1 \text{ J} = 1 \text{ W} \cdot \text{s}$$

电能的较大的单位是千瓦时($\text{kW} \cdot \text{h}$),又称为度。

与之相关的单位还有: $1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 36 \times 10^5 \text{ J} (= 3.6 \times 10^6 \text{ J}) = 3.6 \text{ MJ}$

1.3 独立源

独立源分为(理想)电压源与(理想)电流源,我们可以应用元件的电压—电流关系来描述独立源的特性。电压源的电压与流过它的电流无关,而电流源的电流与其端电压无关,故称它们为独立电源。还有另外一类电源,它们的电压或电流与电路其他部分的电压或电流有关,因此,把这类电源称为非独立电源,又称为受控源。一般把独立源与受控源称为有源元件,而把电阻、电容、电感称为无源元件。本节讨论独立源,下节讨论受控源。

1.3.1 独立电压源

独立电压源(Independent Voltage Sources)又称为理想电压源(Ideal Voltage Sources),其电路符号如图 1.3.1 所示。

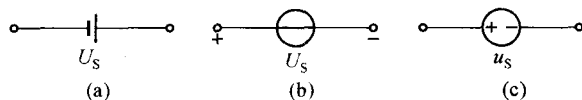


图 1.3.1 理想电压源的电路符号

图 1.3.1(a)电路符号专门用来表示诸如干电池与蓄电池之类的直流电压源;图 1.3.1(b)是国内一般用来表示直流电压源(标记 U_S)或其他电压源(标记 $u_S(t)$)的电路符号;图 1.3.1(c)是英文原版教材采用的表示电压源的电路符号。独立电压源具有下述三个特点:

(1)输出电压恒定,和外电路无关。

例如在图 1.3.2 所示电路中,不论电流 I 大与小,正与负,电压源电压 $U=U_S$ 固定不变,与电流 I 无关。

(2)流过独立电压源的电流由外电路决定。

例如在图 1.3.2 所示电路中,电流 $I=u_S/R$, u_S 固定不变,当改变电压源所连接的电阻 R 的电阻值时,电流随之改变;即独立电压源的电流由其连接的外电路决定。

(3)独立电压源可以开路,但是不允许短路。

当独立电压源开路时,电流 $I=0$,电压 $U=U_S$ 不变;当独立电压源短路时, $U=0$,而 U_S 不变,于是 $U \neq U_S$,与第一个特性相矛盾,因此,独立电压源不允许短路。

直流电压源的伏安特性曲线如图 1.3.3 所示。

1.3.2 实际电压源

实际电压源(Practice Voltage Sources)存在内阻,一般其阻值很小,其电路模型用理想电压源串联电阻 R_S 表示,(见图 1.3.4(a));实际电压源的伏安特性曲线如图 1.3.4(b)所示。

实际电压源的电压与电流关系为

$$u = u_S - R_S i \quad (1.3.1)$$

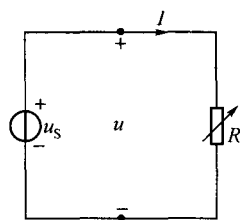


图 1.3.2 含理想电压源的电路

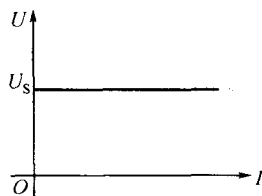


图 1.3.3 直流电压源的伏安特性曲线