



21st CENTURY
规划教材

高等院校信息与电子技术类规划教材

University Textbooks of Information Technology

电路分析

Circuit Analysis

王震宇 主 编
王 骥 林 菁 徐国保 副主编



21st CENTURY



科学出版社

www.sciencep.com

高等院校信息与电子技术类规划教材

电 路 分 析

王震宇 主 编
王 骥 林 菁 徐国保 副主编

科 学 出 版 社
北 京

内 容 简 介

本书内容符合教育部颁发的《电路课程教学基本要求》。本书较为系统地解释了电路的基本概念、基本理论和分析方法。全书共分为 15 章, 内容涵盖了基础知识、电阻电路分析及其分析方法、交流稳态电路分析、三相电路、耦合与谐振、动态电路的瞬态分析、双口网络、应用拉普拉斯变换和矩阵运算对电路进行分析和解决的方法。配合正文, 在适当的章节引入 PSpice 和 Matlab 两种软件进行分析和仿真, 每章都有理论应用于实践的介绍, 以及丰富的例题和习题。

本书适用于普通高等院校电气、电子、通信、自动控制等强、弱电类专业本科教学使用, 也可供相关科技人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电路分析/王震宇主编. —北京: 科学出版社, 2006. 4

高等院校信息与电子技术类规划教材

ISBN 7-03-017009-1

I. 电… II. 王… III. 电路分析-高等学校-教材 IV. TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 019492 号

责任编辑: 李 伟/责任校对: 刘彦妮

责任印制: 吕春珉/封面设计: 飞天创意

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

铭浩彩色印装有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006 年 4 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2006 年 4 月第一次印刷 印张: 19 1/4

印数: 1—3 000 字数: 434 000

定价: 28.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈环伟〉)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62138978-8001 (H101)

高等院校信息与电子技术类规划教材

编 委 会

主 任 吴黎明 (广东工业大学信息工程学院副院长、教授)

副主任 贺前华 (华南理工大学电子与信息学院副院长、教授)

委 员 (按姓氏笔画排序)

马文华 (广东外语外贸大学信息科学与技术学院副教授)

汤 庸 (中山大学信息科学与技术学院副院长、教授)

杨振野 (广东技术师范学院电子系教授)

吴正光 (广州大学实验中心副主任、高级工程师)

周美娟 (广东海洋大学信息学院院长、教授)

洪添胜 (华南农业大学信息学院院长、教授)

徐 杜 (广东工业大学信息工程学院院长、教授)

颜国正 (上海交通大学电子信息与电气工程学院测控系主任、
教授)

前 言

“电路分析”是普通高等院校电类及相关专业开设的一门重要的专业技术基础课程之一。随着近代电路理论不断发展,加之为其辅助的计算和仿真工具的不断更新,以及当今新的学科领域和分支的相继涌现,使得相关专业的知识结构和相应学时产生了变化。因此,有必要调整传统教材内容,以适应新的教学大纲和教学要求。

本书内容尽力兼顾强、弱电专业,力图紧密联系信息技术,并体现信息学科的特色。本书以线性电路为基础,首先从电阻电路分析开始,提供直流作用下电阻电路的一些分析方法,如节点电压法、回路电流法、叠加原理、戴维南定理等,其共同特点是任意时间相关性不影响分析过程,易于读者对电路理论中的分析方法进行理解和掌握,以便于后续章节应用。交流稳态电路分析包含相量分析法、三相电路、耦合电路和谐振等内容,其宗旨是掌握相量分析法,把时域变量转换为频域变量,再应用电阻电路的分析方法解决问题。动态电路的瞬态分析是对含有电容和电感的动态电路瞬态过程建立微分方程进行分析和求解。另外,在本书第14章和第15章中分别讲述了应用拉普拉斯变换和矩阵运算对电路进行分析和解决的方法。

本书以掌握电路理论分析方法为宗旨,在正文部分全面讲述电路理论知识,并根据需要适当地引入PSpice和Matlab两种计算机软件进行仿真。对于本书将要用到较为系统的数学知识,如傅里叶级数和傅里叶变换、拉普拉斯变换以及网络拓扑基础等,一并放置在本书的附录部分,这样不仅可以使正文部分完整统一,更可以使一些已经具备该部分数学基础的读者在学习时内容连贯。同时,本书还强调所学理论应用于实践,在每一章后面都有“实际应用”部分,以便了解实际电路中的理论,从而激发读者对电路理论应用的兴趣,并能够在今后设计出更有实用价值的电路来。另外,根据不同专业的要求,教学内容和教学学时也是不同的,本书带有“*”标识的章节,在讲授和学习过程中可以视情况进行取舍。

学习本书要求具备必要的数学基础和电磁学知识。电路理论是根据实际工程问题建立电路模型,研究其中电压、电流和功率之间的联系规律,为分析、综合和设计实际电路提供基本电路理论,并作为后续课程的理论基础。

本书经过集体讨论,分工执笔。王震宇编写第1、2、9~11、15章和附录A、C;王骥编写第3、4、12、13章;林菁编写第5~8章;徐国保编写第14章和附录B;张世龙和刘明编制了本书的电子教案;王震宇副教授任主编,并负责对全书和电子教案的修改、统稿和定稿工作。本书的电子教案和全部仿真程序可到www.sciencep.com下载,力图共享。宿延吉教授担任本书主审,并提出许多宝贵意见,尤其他严谨细致、一丝不苟的工作作风,给我们以深刻的教益。

在本书编写过程中，曹嘉毅副教授的热心参与和对书稿的审阅，为本书的增色付出了辛勤劳动。值此公开出版之际，对众多同事、同行以及参考文献中的前辈们，谨表谢忱，普铭高谊。但限于编者水平，一定还会有不少缺点和不当之处，诚望读者和专家指正。

编 者

2005年8月10日

目 录

第 1 章 电路基本概念	1
1.1 电路理论与电气工程.....	1
1.1.1 电路理论与电气工程的关系	1
1.1.2 电路的分类及模型	1
1.1.3 计算机仿真	2
1.1.4 解决问题的关键	2
1.2 电流的参考方向和电压的参考极性	3
1.2.1 电流	3
1.2.2 电压	3
1.3 功率和能量	4
实际应用.....	5
小结.....	7
习题.....	7
第 2 章 电路基本元件	11
2.1 电阻.....	11
2.1.1 定义	11
2.1.2 电阻元件的分类	11
2.2 电感.....	13
2.3 电容.....	15
2.4 电源.....	18
2.4.1 理想的独立电源	18
2.4.2 实际电源	21
2.4.3 受控电源	23
实际应用	24
小结	26
习题	27
第 3 章 电路基本定律与定理	30
3.1 引言.....	30
3.2 基尔霍夫定律.....	31
3.2.1 基尔霍夫电流定律	32
3.2.2 基尔霍夫电压定律	33

3.3 叠加定理	35
3.3.1 引言	35
3.3.2 叠加定理	36
3.4 替代定理	38
3.4.1 电路的分解	38
3.4.2 分解基本步骤	39
3.4.3 替代定理	39
实际应用	40
小结	42
习题	42
第4章 电路基本分析方法	45
4.1 二端网络的等效变换	45
4.1.1 无源简单电阻网络的变换	46
4.1.2 电阻的Y连接和 Δ 连接	48
4.2 2b法	50
4.3 回路法	51
4.4 节点法	54
4.5 戴维南定理与诺顿定理	58
4.6 最大功率传输定理	61
实际应用	62
小结	64
习题	65
第5章 正弦稳态电路的相量分析法	69
5.1 相量	69
5.1.1 正弦函数	69
5.1.2 相量	71
5.1.3 相量的实质	72
5.2 电路元件和基本定律的相量形式	73
5.2.1 R 、 L 、 C 的相量模型	73
5.2.2 基尔霍夫定律的相量形式	75
5.3 阻抗和导纳	76
5.4 正弦稳态电路的相量分析法	78
5.5 平均功率	82
5.5.1 瞬时功率	82
5.5.2 平均功率和无功率	83
5.5.3 电路元件的功率	84
5.6 复功率	85
5.7 最大功率传输	88



实际应用	89
小结	90
习题	91
第 6 章 三相电路	96
6.1 三相电压源的产生	96
6.2 三相电路的接法	97
6.2.1 三相电源及其连接	97
6.2.2 三相负载及其连接	98
6.3 对称三相电路的分析	99
6.3.1 Y-Y 连接	99
6.3.2 其他类型连接	101
6.4 不对称三相电路的概念	103
6.5 三相电路的功率	104
实际应用	106
小结	108
习题	108
第 7 章 含磁耦合电感电路的分析	111
7.1 互感	111
7.1.1 互感	111
7.1.2 互感系数	112
7.1.3 自感电压与互感电压	112
7.1.4 同名端及其物理意义	114
7.2 互感的连接方式和去耦等效电路	114
7.2.1 耦合电感的串联和并联	114
7.2.2 耦合电感的去耦等效电路	115
7.3 含有耦合电感电路的计算	116
7.4 空心变压器	118
7.5 理想变压器	120
实际应用	121
小结	123
习题	123
第 8 章 谐振和滤波	126
8.1 串联谐振	126
8.1.1 谐振与谐振条件	126
8.1.2 特性阻抗与品质因数	127
8.1.3 筛选性与通频带	128
8.2 并联谐振	130
8.3 滤波	131



8.3.1 低通滤波器	131
8.3.2 高通滤波器	132
8.3.3 带通滤波器	133
8.3.4 带阻滤波器	134
实际应用	134
小结	135
习题	136
第9章 傅里叶级数在电路分析中的应用	137
9.1 非正弦周期电压与电流	137
9.2 非正弦周期电量的有效值和平均功率	138
9.3 傅里叶级数在电路分析中的应用	139
9.4 非正弦周期信号的频谱	141
9.5 傅里叶变换在电路分析中的应用	143
实际应用	146
小结	147
习题	147
第10章 含运算放大器电路的分析	149
10.1 运算放大器及其理想模型	149
10.2 含有理想运放的电阻电路分析	151
10.2.1 反比例运算电路	151
10.2.2 同比例运算电路	151
10.2.3 加法电路	152
10.2.4 含多运放的电路分析	153
10.3 含有理想运算放大器的电容电路的分析	154
10.3.1 积分电路	154
10.3.2 微分电路	154
10.3.3 RC有源滤波器	155
实际应用	158
小结	159
习题	159
第11章 一阶电路的动态过程	162
11.1 动态元件的两个边界条件和换路定理	162
11.1.1 换路的概念和初始值	162
11.1.2 终了值	163
11.1.3 换路定理	163
11.2 一阶电路的零输入响应	164
11.2.1 RC串联零输入电路	164
11.2.2 RL并联零输入电路	167

11.3 一阶电路的零状态响应	170
11.3.1 RC 串联零状态电路	170
11.3.2 RL 并联零状态电路	171
11.4 一阶电路的全响应	172
11.4.1 全响应的解	172
11.4.2 全响应的分解形式	173
11.4.3 三要素法	173
11.5 一阶电路对阶跃激励的零状态响应	176
* 11.6 一阶电路对冲激激励的零状态响应	179
* 11.7 一阶电路对正弦激励的零状态响应	181
实际应用	183
小结	185
习题	186
第 12 章 二阶电路的动态过程	190
12.1 引言	190
12.2 RLC 电路的零输入响应	190
12.2.1 $\delta > \omega_0$ (即 $R > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$) 的情况	191
12.2.2 $\delta < \omega_0$ (即 $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$) 的情况	192
12.2.3 $\delta = \omega_0$ (即 $R = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$) 的情况	194
12.3 RLC 电路的零状态响应	196
* 12.4 RLC 电路的全响应	198
* 12.5 RLC 电路的冲激响应	199
实际应用	200
小结	200
习题	201
第 13 章 双口网络	203
13.1 双口网络概述	203
13.2 双口网络的方程和参数	204
13.2.1 双口网络的阻抗矩阵	204
13.2.2 双口网络的导纳矩阵	206
13.2.3 双口网络的混和参数矩阵	207
13.2.4 双口网络的传输参数矩阵	208
13.3 双口网络的等效电路	209
13.4 具有端接的双口网络	211
13.5 双口网络的连接	213
13.5.1 双口网络的串联	213

13.5.2 双口网络的并联	214
13.5.3 双口网络的串-并联	214
13.5.4 双口网络的并-串联	215
13.5.5 双口网络的级联	215
实际应用	216
小结	218
习题	219
第 14 章 拉普拉斯变换在电路中的应用	223
14.1 电路元件和基本定律的复频域形式	223
14.1.1 R 、 L 、 C 的复频域模型	223
14.1.2 基尔霍夫定律的复频域形式	225
14.1.3 复阻抗和复导纳	226
14.2 动态电路的复频域分析法	227
14.3 网络函数	231
14.3.1 网络函数的定义及其性质	231
14.3.2 零极点与电路的响应	233
实际应用	234
小结	236
习题	237
第 15 章 矩阵运算在电路分析中的应用	239
15.1 关联矩阵和基尔霍夫定律的矩阵形式	239
15.2 标准支路及其矩阵形式	241
15.2.1 简单的标准支路及其矩阵形式	241
* 15.2.2 含受控源的标准支路及其矩阵形式	242
* 15.2.3 含互感耦合的标准支路及其矩阵形式	243
15.3 节点法的矩阵形式	243
* 15.4 改进的节点法及其矩阵形式	248
* 15.5 割集矩阵与节点法	249
15.5.1 割集与基本割集矩阵	249
15.5.2 基本割集矩阵与广义的节点法	252
* 15.6 回路矩阵与回路法	253
15.6.1 回路与基本回路矩阵	254
15.6.2 基本回路矩阵与广义的节点法	255
* 15.7 状态方程	257
实际应用	259
小结	261
习题	261

附录 A 傅里叶级数和傅里叶变换	264
A.1 傅里叶级数的三角函数形式	264
A.2 波形特征及其与级数分解的关系	265
A.3 傅里叶级数的指数形式	267
A.4 傅里叶积分和傅里叶变换	268
附录 B 拉普拉斯变换	270
B.1 拉普拉斯变换的定义	270
B.2 拉普拉斯变换的基本性质	271
B.3 拉普拉斯反变换的部分分式展开法	274
附录 C 网络拓扑学简介	278
C.1 网络的拓扑图	278
C.2 树	279
C.3 树与割集	280
C.4 树与回路	281
附录 D 部分习题答案	283
主要参考文献	293

第 1 章 电路基本概念

本章要点

- 电路理论的学习方法
- 电流的参考方向和电压的参考极性
- 功率的吸收和释放

1.1 电路理论与电气工程

1.1.1 电路理论与电气工程的关系

当今世代,瞬息万变。可以说,人们的生活和工作方式每天都在发生质的飞跃。而电气工程师在这一发展过程中扮演着重要的角色,因此电气工程是一门令人兴奋而且富于挑战性的专业。

电气工程是与信号的获取、传输和处理相关的专业。目前对电系统,比较流行地划分为:电力系统、控制系统、计算机系统、通信系统和信号处理系统。实际上,这 5 种系统有独立的,但更多的是相互联系、相互渗透的。在信息处理方面,以一个简单的障碍机械人为例。它的“眼睛”是一个视觉传感器(如 CCD 等),可以将光信号转换为电信号,然后经过转换器变为数字量,由微处理器进行处理、识别,用以判断前方是否有障碍物;若证实有障碍物,由微处理器发出信号给控制电路,由控制电路启动转向电机。这样,机械人就绕开障碍物了。如果组建一个机械人足球队,还要涉及队员之间的相互通信、敌我识别等更为复杂和尖端的领域,而这些,就已经涵盖了上述的 5 种系统了。这些系统中,都有一个共性,那就是显而易见的电路和器件了。因此,为了构建这样的大系统,电气工程师必须掌握包括电路理论在内的许多理论和技术。

电路理论是根据实际工程问题建立电路模型,研究其中电压、电流和功率之间的联系规律,并为分析、综合和设计实际电路提供基本电路理论。它是一门学习怎样分析问题的课程,通过学习,要掌握如何对问题进行抽象、建立电路模型、应用已知信息制定解决方案、并且得出结论,而且还要证明结论的正确。所以,虽然该课程好像是面向电气工程专业的读者的,实际上它还培养一名工程师提供必要的理论、方法和技巧。即使对于那些完成本书后不想继续做电路分析的人来说,下面将要学习的方法和技巧也是非常有价值的。

1.1.2 电路的分类及模型

电,已经渗透到人们生活和工作的点点滴滴,只要有电的地方,就有电的通路存在,即电路。构成电路的一般还有电路元件,实际的电路元件和设备的种类是很多的,如各种电源、电阻器、电感器、变压器、电子管、晶体管、固体组件等,它们中发生的物理过程是很复

杂的。电路按照功能可以划分为两类：一类是用来实现电能的转换、传输和分配的，一般将供给电能的设备称为电源、用电设备称为负载。另一类是将信号进行采集、传输、处理、存储的，将输入电路的信号称为激励，而把经过电路传输或处理后的信号称为响应。为了研究电路的特性和功能，必须进行科学的抽象，用一些模型来代替实际电路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电路元件。

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气元件和设备的主要特性和外部功能，如受控源等。今后研究的电路均是指电路模型。

对于电路元件，把其特性由其端点上的电压和电流之间的关系（有时还涉及电荷或磁通）来明确表达的，称为集中元件。由集中元件构成的电路，称为集中参数电路。在实际电路中，只要电路的几何尺寸远远小于电路工作频率所对应的电磁波波长，就可以采用集中参数电路模型进行电路等效。而对于远距离的电力传输电缆和通信线路，因其不满足上述条件，就不能用集中参数电路进行等效和分析了。

本书中将以集中参数电路为研究对象进行讨论。集中参数模型是电路理论中的重要条件，今后所论述的基本定律和以其为基础的各种分析方法都必须满足这一条件。

相对于集中参数电路的还有另一类被称为分布参数电路，其电路参数是分布在电路中的，讨论和研究电路中电压和电流的分布关系。另外，电路参数按照其是否随时间改变可分为时变和时不变两类。这些内容本书将不予讨论。

1.1.3 计算机仿真

应用计算机对电路理论中的问题进行仿真，已经日趋流行，各种仿真软件成为非常重要的工具，它不仅是分析，而且是设计工作中的一个组成部分。本书将根据需要，适当地引入 PSpice 和 Matlab 两种计算机软件进行仿真。这里采用的 PSpice 是学生版 9.1，Matlab 是学生版 5.0，都可以从各自所属公司的网站内下载。

但应该指出的是，计算机仿真软件决不能代替传统的手工计算方法，更不能代替以实物为基础的实践教学环节。

1.1.4 解决问题的关键

解决电路问题可以粗略地划分为提出问题、分析问题和解决问题 3 个部分。为详细说明，如图 1.1 所示可以起到引导作用。当然在实际应用中也可进行改进，或进一步细化。可以看出，在这一系列步骤中，确定“解决问题的方法”和“建立数学模型”直接关系到结果，而“结果的校验”又给上述过程一个反馈。

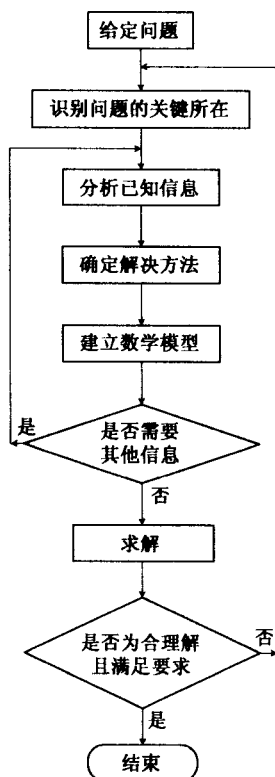


图 1.1 解决电路问题的步骤

成功地解决电路理论问题的关键仍然是实践,因为实践是检验真理的唯一标准。一个好的电气工程师,其成长过程是离不开实践的,而且要善于在失败后进行总结,吸取教训、积累经验、增长才智。

1.2 电流的参考方向和电压的参考极性

1.2.1 电流

将单位时间内通过某导体横截面积的电量为电流强度,简称为电流,用 i 表示,即

$$i(t) = \frac{dq}{dt} \quad (1.1)$$

其中: q 为电量,是所带电荷的多少,在国际单位制中用库仑(C)表示,且 1 库仑为 6.24×10^{18} 个电子所带的电量; t 为时间,在国际单位制中用秒(s)表示; i 为电流,在国际单位制中用安培(A)表示。

一般地,将正电荷的运动方向规定为电流方向,但是在电路理论中,很多时候是很难明确判断电流方向的。为了方便,可以预先规定一个电流方向,按照这个方向进行分析和计算,当得到的电流为正值时,说明先前规定的电流方向与真实的电流方向一致;若得到的电流为负值时,说明先前规定的电流方向与真实的电流方向相反。这样,将先前规定的那个电流方向叫做电流的参考方向,也就将电流这一实际的物理量转换为一个代数量。

电流的参考方向是任意规定的,可用箭头直接指明,也可以用双下标表示。

例如,在图 1.2(a)中,正电荷是从 A 点经过某元件向 B 点流动的,若按图 1.2(a)规定电流的参考方向为 i ,则 $i > 0$ 、 $i_{AB} > 0$ 、 $i_{BA} < 0$,且有 $i = i_{AB} = -i_{BA}$ 成立。

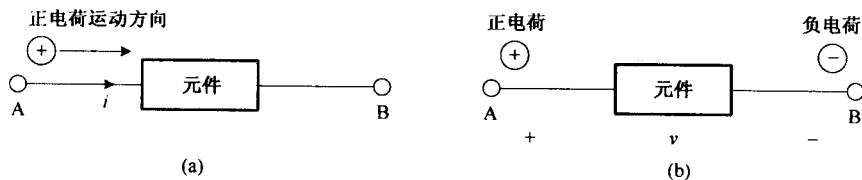


图 1.2 电流的参考方向

1.2.2 电压

在电路中,单位电荷由 A 点移动到 B 点时所获得或失去的能量,就称为电压,用 v 表示,即

$$v(t) = \frac{dw}{dq} \quad (1.2)$$

其中: w 为电荷获得或失去的能量,在国际单位制中用焦耳(J)表示; q 为电量; v 为电压,在国际单位制中用伏特(V)表示。

若正电荷由 A 点移动到 B 点时获得能量,则 B 点为高电位,即正极,用“+”表示;若正电荷由 A 点移动到 B 点时失去能量,则 B 点为低电位,即负极,用“-”表示。

与电流方向同理,在电压的极性上引入参考极性,先期规定一个电压极性,按照这个

极性进行分析和计算,当得到的电压为正值时,说明先前规定的电压极性与真实的电压极性一致;若得到的电压为负值时,说明先前规定的电压极性与真实的电压极性相反。这样,将先前规定的那个电压极性叫做电压的参考极性,也就将电压这一实际的物理量转换为一个代数量。

例如,在图 1.2(b)中,正电荷在某元件的左端,负电荷在右端,若按图 1.2(b)规定电压的参考极性为 v ,则 $v > 0$ 、 $v_{AB} > 0$ 、 $v_{BA} < 0$,且有 $v = v_{AB} = -v_{BA}$ 成立。

在本书的后续章节中,将电流的参考方向和电压的参考极性分别简称为电流方向和电压极性,而不再提及实际方向和实际极性。

另外,若电流方向是从电压的正极指向负极的话,则称二者为关联的;若电流方向是从电压的负极指向正极的话,则称二者为非关联的;

例 1.1 在图 1.3(a)的电路中,电压源的波形如图 1.3(b)所示。若按图 1.3(a)规定电流 i 的方向和电压 v 的极性,可以得到 $i(t) = v_s / (R_1 + R_2) = 10\sin(314t)$ A,则 $v(t) = iR_2 = 40\sin(314t)$ V,由于 i 是从 v 的正极指向 v 的负极,则对于 R_2 来说, i 与 v 是关联的。

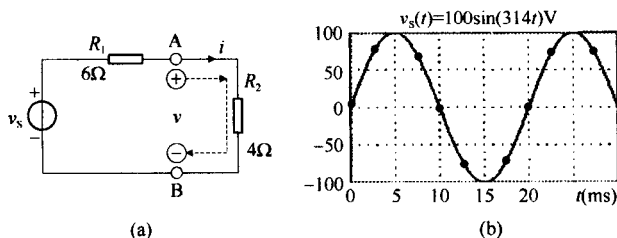


图 1.3 例 1.1 的电路图和电压源的波形图

另外,虽然 i 、 v 和 v_s 都是随时间变化而变化的,但是只是参考方向与实际方向变化而已。比如在 $t \in (10\text{ms}, 20\text{ms})$ 区间内, $v < 0$,说明参考极性与实际极性相反,即 A 点为负极、B 点为正极;但是此时 $i < 0$,也就是说参考方向与实际方向相反,即由 B 点经过 R_2 指向 A 点。不论从参考方向还是从实际方向来说, i 和 v 都是保持关联的。同理, i 和 v_{BA} 就是非关联的。

1.3 功率和能量

在电路中,某一元件或某部分支路在单位时间内所吸收或释放的能量被称为功率。即

$$p(t) = \frac{dw}{dt} \quad (1.3)$$

应用电流和电压的定义,有

$$p(t) = \frac{dw}{dt} = \frac{(vdq)}{dt} = v\left(\frac{dq}{dt}\right) = vi \quad (1.4)$$

功率的单位是瓦特(W)。