



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电路分析原理

上册

第2版

姚维 姚仲兴 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电路分析原理

上册

第2版

姚维 姚仲兴 编著



机械工业出版社

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

作者积五十年电路分析课程之教学经验与研究成果，吸收了师生们对第1版教材的反馈信息，参照《高等学校工科本科电路课程教学基本要求》而完成本次修订。

本次修订对第1版的内容作了较大改动。

第2版仍分上、下两册。上册共10章，内容是：电路的基本概念和基本定律，电阻电路及其一般分析法，线性网络的几个定理及等效网络，动态电路元件及其强制响应，正弦稳态电路（含互感及三相）与傅里叶分析。下册共7章，内容是：一阶、二阶电路的时域分析， s 域与状态变量分析，矩阵分析，双口网络及非线性电阻电路分析。

本次修订保持了第1版的风格与特色，内容新颖，风格独特，条理清晰，说理透彻，言简意赅，通俗易懂。教师便于组织教学与习题批改，学生容易自学。

本书可作为高等理、工、农、医院校及各类成人高校电类相关专业的本科教材，也可供有关科技人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

电路分析原理. 上册/姚维等编著. —2版. —北京：机械工业出版社，2011.2
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-111-32858-2

I. 电… II. ①姚… III. ①电路分析-高等学校-教材 IV. ①TM133

中国版本图书馆CIP数据核字（2010）第254208号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号 邮政编码100037）
策划编辑：于苏华 责任编辑：于苏华
责任校对：陈秀丽 程俊巧
封面设计：陈沛 责任印制：杨曦
北京京丰印刷厂印刷
2011年11月第2版·第1次印刷
169mm×239mm·32.25印张·630千字
标准书号：ISBN 978-7-111-32858-2
定价：55.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
电话服务 网络服务

社服务中心：(010) 88361066

门户网：<http://www.cmpbook.com>

销售一部：(010) 68326294

教材网：<http://www.cmpedu.com>

销售二部：(010) 88379649

读者购书热线：(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

第2版前言

《电路分析原理》(简称《原理》)、配套教材《电路解析与精品题集》(简称《精品》)两书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

《原理》前身《电路分析导论》历经八年写成,1988年由浙江大学出版社出版,1990年作为浙江大学优秀教材参加了香港国际图书展。1997年出修订版。

《原理》第1版于2005年出版。经五年教学实践,听取了师生们的反馈信息,结合自身从事电路分析课程五十年之教学经验与研究成果,参照《高等学校工科本科电路课程教学基本要求》,完成本次修订。

本次修订对第1版的内容作了较大改动。其中,第三章线性电路分析的一般方法,第七章正弦稳态电路的功率,第十一章一阶电路的时域分析,作了重新改写。第四章提出了互易定理四;第五章提出了单位阶跃函数 $\varepsilon(t)$,与单位冲激函数 $\delta(t)$ 性质的新证明法;第八章改写了耦合电感器的串联,增加了耦合电感器的并联;第十三章改写了 s 域中的网络函数;第十四章增加了矩阵及其运算;第十五章改写了割集分析与回路分析;第十六章改写了双口网络的 H 、 G 、 T 与 T' 参数等。

此外,对第1版的其余内容也作了相应修改。全书更换了大量例题与习题(例题点明了设置之意,并给出了解题思路;例题、习题的难易程度更为适中)。

书中,打有“*”号的正文可作为加深、加宽的参考内容,打有“*”号的例题与习题,难度较大,分析的技巧性较高。

在教学过程中,如能在适当阶段安排一次课堂练习,将打有“*”号的例题、习题让学生练习,并作讲评,将能收到良好的效果。

修订版仍然保持了第1版的风格与特色,内容新颖,风格独特,条理清晰,说理透彻,言简意赅,通俗易懂。教师便于组织教学与习题批改,学生很容易自学。

相信本教材能受到师生们的欢迎。

《原理》的配套教材《精品》主要介绍电路的分析方法与解题技巧,并提供大量的、概念综合的、形式多样的、难度相当高的、数据极其简单的、分析方法巧妙的例题与习题。

在本书中,作者提出了许多电路分析的新方法与巧妙的解题技巧。

阅读本书,能使读者学到的电路理论概念清晰,融会贯通,解题思路敏捷,视野开阔。本书将能有效地帮助读者提高电路分析问题与解决问题的能力,及电

IV

路课程的应试成绩（读者反映，无论是本科、还是研究生入学考试的电路试题，在《精品》书中大多似曾相识）。相信本书会成为你的良友。

参加本书资料收集与整理工作的还有章玮博士，黄小柳高工，以及章生根、赵梅芳、陶敏恩、陆渭琴。

感谢使用本教材的师生们为本书作出的贡献，感谢所有帮助过作者的老师们。

作者尽力想把本教材写得更好，一遍一遍，改了又改，实因水平有限，谬误与不妥之处一定还是存在，敬请广大读者提出宝贵的意见。

编著者
于求是园

第 1 版前言

作者参阅了国内外的同类教材，结合自身 40 余年来从事电路分析课程的教学经验，参照《高等学校工科本科电路课程教学基本要求》编著成本书。

本教材主要介绍在电类相关专业中有关电路分析方面的基本概念、基本原理与基本分析计算方法，为学习电类专业课打下一定的电路理论与实验基础。

本教材有如下特点：①既介绍经典的电路原理，又介绍近代的电路理论，并渗透了作者的研究成果。②以讲稿形式成书，条理清晰，层次分明，教师便于组织教学，学生容易自学。③内容编排由浅入深，难点分散，循序渐进。④凡遇抽象概念，先举实例，后作一般论述（即先建立感性认识，后作理性飞跃）。⑤凡易出差错及尚需深入理解之处，安插思考题，以免差错再现，并予以启发。⑥在算式推导省略部位加注，便于阅读。⑦理论联系实际。⑧例题、习题都经精心设计 [概念综合，难易搭配（基本题占 1/2，中等难度题占 1/3，难题占 1/6）；既介绍基本分析法，还介绍多种解题技巧；数据简单（作者以支路号赋予元件参数值，如设 $u_{s1} = 1\text{V}$ ， $i_{s2} = 2\text{A}$ ， $R_3 = 3\Omega$ ， $L_4 = 4\text{H}$ ， $C_5 = 5\text{F}$ ，…，并使计算结果也是一组良好的数字。如此设计，一是便于教师举例与习题批改，二是免去了学生繁琐的数据运算，可提升学习兴趣)]。⑨每章后的小结给出了本章重点，便于复习。⑩书末附有习题答案供参考。

考虑到阅读的连贯性，有些可属附录性质的内容，如复数及其运算，三角函数组的正交性质，线性函数等，作者将它们安排在正文中。

打有“*”号的正文作为加深、加宽的参考内容，打有“*”号的例题与习题，难度较大，分析的技巧性较高。

在使用本教材时，如能在每章结束后安排一次课堂练习，将打有“*”号的习题在课堂上练习，并进行讲评，将会收到良好的效果。

本教材系统性与逻辑性强，内容新颖，风格独特，言简意赅，通俗易懂，很适宜于自学。

本书有配套参考书《电路解析与精品题集》，姚维，姚仲兴编著。北京：机械工业出版社，2005。该书着重介绍电路的分析方法与解题技巧，并提供大量的、内容覆盖全部大纲的、概念综合的、形式多样的、难度相当高的、分析方法灵活巧妙的例题与习题（全书有 179 个典型例题，1001 个习题）。通过例题的演示与对习题的分析、求解，能使读者学到的电路理论概念清晰，融会贯通，解题思路敏捷，视野开阔。该书特别适宜于要报考研究生的学生与有关教师参考。

参加本书资料收集、整理等工作的还有章玮博士、黄小柳高工，以及章生根、赵梅芳、陶敏恩、陆涓琴。

由于编著者水平有限，谬误与不妥之处实难避免，敬请广大读者批评指正。

编著者
于浙江大学

目 录

第 2 版前言

第 1 版前言

第一章 电路的基本概念和基本定律	1
第一节 电路及电路模型	1
第二节 电路分析中的几个主要物理量	3
第三节 电阻元件、欧姆定律及一段含源电路的特性方程	15
第四节 基尔霍夫定律	19
第五节 独立电压源及实际电源的电压源模型	24
习题	32
第二章 简单电阻电路分析	37
第一节 电阻串联电路	37
第二节 电阻并联电路	39
第三节 电阻混联电路	41
第四节 电路中各点电位的计算	46
第五节 独立电流源及实际电源的电流源模型	48
第六节 电源模型的等效转换	52
第七节 简单含源单口网络的等效电路	55
第八节 受控电源	56
习题	67
第三章 线性电路分析的一般方法	76
*第一节 网络图论的概念	76
第二节 支路电流法	83
第三节 网孔分析	88
第四节 回路分析	95
第五节 节点分析	101
*第六节 割集分析	110
习题	118
第四章 线性网络的几个定理及等效网络	123
第一节 叠加定理	123

VIII

第二节	互易定理	131
第三节	替代定理	139
第四节	戴维宁定理	142
第五节	诺顿定理	151
第六节	最大功率传输定理	154
第七节	Y形网络与 Δ 形网络的等效变换	157
*第八节	理想电源的转移	160
习题	164
第五章	动态电路元件及其强制响应	171
第一节	激励源常用的几个典型函数(波形)	171
第二节	电容器	187
第三节	线性定常电容器的特性方程	189
第四节	电容器储存的能量	197
第五节	电容器的串联与并联	203
第六节	电感器	208
第七节	线性定常电感器的特性方程	210
第八节	电感器储存的能量	216
第九节	电感器的串联与并联	217
*第十节	奇异电路	222
第十一节	实际的电容器与电感器	229
习题	231
第六章	正弦稳态电路分析	237
第一节	周期函数的平均值与有效值	237
第二节	复数及其运算	240
第三节	正弦时间函数的相量表示	243
第四节	正弦稳态电路中的电阻器	248
第五节	正弦稳态电路中的电感器	251
第六节	正弦稳态电路中的电容器	257
第七节	基尔霍夫定律的相量形式	261
第八节	RLC 串联电路—阻抗	262
第九节	GCL 并联电路—导纳	269
第十节	简单导抗电路分析	276
第十一节	串联谐振电路	281
第十二节	并联谐振电路	295
*第十三节	串并联电路的谐振	304
第十四节	复杂线性电路分析	306

*第十五节 电路的对偶性质	311
习题	315
第七章 正弦稳态电路的功率	325
第一节 平均功率、视在功率、功率因数、无功功率与复数功率	325
*第二节 复功率守恒	337
第三节 功率因数的提高	341
第四节 最大功率传输定理	343
第五节 平均功率的测量	346
习题	352
第八章 互感耦合电路分析	358
第一节 耦合电感器与互感电压	358
第二节 去耦合等效电路	370
第三节 耦合电感器的串联	373
第四节 耦合电感器的并联	376
第五节 线性变压器电路分析	379
第六节 含有耦合电感器的复杂电路分析	386
第七节 理想变压器	388
习题	396
第九章 三相电路的正弦稳态分析	404
第一节 三相电路概述	404
第二节 几种对称三相电路的分析	409
第三节 不对称三相电路	420
第四节 三相电路的功率	422
第五节 三相电路的功率测量	428
习题	434
第十章 傅里叶分析	441
第一节 周期函数的傅里叶级数与频谱	441
*第二节 几种对称波形	444
第三节 周期电流、电压的最大值、有效值与平均值	454
第四节 非正弦稳态电路的功率	458
第五节 频域中的网络函数	461
第六节 非正弦稳态电路的分析	465
*第七节 对称三相非正弦稳态电路分析	470

X

习题	484
部分习题答案	493
参考文献	506

第一章 电路的基本概念和基本定律

内 容 提 要

本章介绍电路模型，电流、电位、电压、电动势、电能量、电功率等基本概念，并介绍电阻元件及电路的基本定律，即欧姆定律、KCL、KVL，最后介绍一个理想的电源元件，即电压源。

本教材主要介绍在电类相关专业中，有关电路分析方面的基本概念、基本原理与基本分析计算方法。

电路分析的主要任务，在于对一给定电路如何分析计算其中的电流、电压以及它们之间的关系等。电路分析依靠理想电路元件的数学定义及电路基本定律。所谓电路基本定律，就是电路中的电流、电压以及它们之间的关系等所遵循的客观规律。

电路基本定律分两大类（即两类约束）：一类属于电路元件。这类基本定律给出电路元件上电压与电流之间的约束关系（即元件约束）；另一类属于电路。这类基本定律给出电路中电流、电压之间的约束关系〔即拓扑约束（亦即结构约束）〕。

为了避免难点过于集中，本书将随着课程的进展，逐个介绍这些理想电路元件及电路基本定律，以及相应电路的分析计算。

第一节 电路及电路模型

什么是电路，本书分析的是什么样的电路？本节介绍电路与电路模型的概念。

一、电路

什么是电路？一个电池、一个灯泡、一个开关、三根连接导线，按照图 1-1 的方式连接起来，这就组成了一个简单的实际的照明电路。由此我们对电路作如下的定义：人们为了实现某种目的，将若干个电气设备或器件，按照一定的方式连接起来，构成电流的通路，这个通路称为**电路**，或称为**网络**。

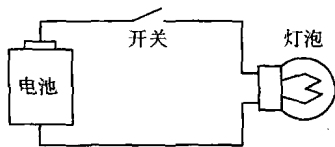


图 1-1 一个简单的实际照明电路

电路理论中，“电路”与“网络”这两个术语并无严格的区别，可以混用。

二、电路的形式与功能

电路有哪些形式与功能？电路的形式与功能是多种多样的，它有长达数百公里的输电线路，也有只集中在几平方毫米内的集成电路；它可以用来实现电能的传输和分配（例如输电线路）；或是用来传输和处理各种电信号（例如控制信号、图像信号、语言信号等等）。

三、实际电路元件

构成电路的设备或器件，称为**实际电路元件**。其中提供电能的设备称为**电源**，例如电池、发电机、信号发生器等；吸收电能的设备称为**负载**，例如各种电阻器、电感器、电容器、晶体管及电动机等等。

在通有电流的电路中，每一个实际电路元件都会出现多种电磁现象。例如，当通过电池的电流增大时，电池的端电压会降低，电池会发热；电阻器通电后会发热，同时还有磁场产生；电流通过电感器时会产生磁场，电感器也要发热，匝间还有电场；当电容器极板间的电压变化时，电容器中有变化的电场和变化的磁场，介质中还有热损耗等等。上述这些现象对于每一个实际电路元件来说，都是交织在一起的，因此，直接分析由实际电路元件所组成的电路，通常是比较困难的。为此，我们要设法从实际电路元件中抽象出一些理想化的电路元件来，并用这些理想元件去构成实际元件的模型，然后，再分析模型中出现的电磁现象。

四、理想电路元件（集中参数元件）

只显示单一电磁现象，且不计元件几何尺寸，并视其参数集中于一点（无几何大小的点）的电路元件，称为**理想电路元件**，或叫做**集中参数元件**（有两个端钮的二端集中参数元件的特征是，流入一端的电流等于从另一端流出的电流）。理想电路元件分为：

1. 理想的电源元件

独立电压源与独立电流源是理想的电源元件。

2. 理想的负载元件

用来表征电磁能量转换为其他形式能量的**电阻器**，表征电场现象的**电容器**，以及表征磁场现象的**电感器**是理想的负载元件。

3. 理想的耦合元件

受控电源、耦合电感器、理想变压器、回转器等是理想的耦合元件。

上述这些理想电路元件都有精确的数学定义，关于它们的定义，将在后面章

节中陆续地给出。

五、电路模型（集中参数电路）

用一个或几个理想电路元件构成的模型去模拟一个实际电路，使得模型中出现的电磁现象与实际电路中反映出来的现象十分近似，这个由理想电路元件组成的电路称为**电路模型**。由于理想电路元件也叫做**集中参数元件**，所以，由集中参数元件构成的电路模型也叫做**集中参数电路**。又因为理想电路元件都有精确的数学定义，所以，电路模型也叫做**数学模型**。

今后，我们分析的电路都是电路模型，模型中的元件都是理想的（如无说明，测量表计也是理想的）。这样，在电路模型中就能建立电路方程（数学方程）了。

需要指出，在时变电路中，当实际电路尺寸远小于电路中电流的波长时，该电路可用集中参数模型模拟；当电路尺寸与波长有相同数量级时，该电路就要用分布参数模型模拟了。本书只讨论集中参数模型。

本书任务在于，对一给定电路模型，如何分析其中出现的电磁现象，以及计算模型中的物理量（如电流、电压、功率等）。至于如何构成实际电路的模型，这不是本书要讨论的主要内容。

注意，在模型中所得结果只是实际电路中的一种近似。

第二节 电路分析中的几个主要物理量

如前所述，本书主要任务是分析计算电路中的电流、电压等。为适应全书的需要，本节先复习电路分析中几个主要物理量的基本概念、定义，以及有关规定。

一、电流

1. 定义与实际方向

电荷定向移动形成**电流**。

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**），以 $i(t)$ 表示。

在图 1-2 中，设在时刻 t 自左向右已通过导体横截面 S 的电荷量为 $q(t)$ [注意，别把 $q(t)$ 写成 Q]，而在 t 的近旁，在 dt 时间内通过的电荷量为 $dq(t)$ ，当取 $i(t)$ 的方向与 $q(t)$ 一致时，则在该时刻的电流定义为

$$i(t) \triangleq \frac{dq(t)}{dt} \quad (1-1a)$$



图 1-2 电流 $i(t)$ 定义示意图

若 $i(t)$ 的方向与 $q(t)$ 相反, 则有

$$i(t) \triangleq -\frac{dq(t)}{dt} \quad (1-1b)$$

$i(t)$ 表示电流是 t 的函数。式中符号“ \triangleq ”表示定义为相等, 其中“ Δ ”为定义之意。

式 (1-1) 表明, 时刻 t 的电流 $i(t)$ 值, 决定于同一时刻电荷 $q(t)$ 的变化率。人们规定正电荷移动的方向作为电流的实际方向。

2. 时变电流与时变电流电路

如果电流的大小和 (或) 流向是随着时间 t 改变的, 这样的电流称为**时变电流**, 以 $i(t)$ 或 i [在无需强调时刻 t 时, 就常将 $i(t)$ 写作 i] 表示 (在本书中, 用小写斜体字母表示相应的时变量)。

通有时变电流的电路, 称为**时变电流电路**。

3. 直流电流与直流电路

如果电流的大小为恒值, 方向不变, 这样的电流称为**直流电流** (direct current, 简写 dc, 或 DC), 或**恒定电流**, 用 I 表示 [在本书中, 用大写斜体字母表示相应的恒定量 (需要指出的是, 由于直流电流仅是时变电流的特例, 因此有时直流电流 I 也可用 i 表示)]。

通有直流电流的电路, 称为**直流电路**, 或**恒定电流电路**。

4. 电流的单位

在 SI (国际单位制) 基本单位中, 电量的单位名称为库 [仑] (coulomb, 符号为 C), 时间的单位名称为秒 (second, 符号为 s), 电流的单位名称为安 [培] (ampere, 符号为 A), 且有

$$1 \text{ 安(A)} = \frac{1 \text{ 库}}{1 \text{ 秒}} \left(\frac{\text{C}}{\text{s}} \right)$$

此外, 电流常用的单位还有千安、毫安、微安及纳安等, 且有

$$\begin{aligned} 1 \text{ 千安(kA)} &= 10^3 \text{ 安(A)} & 1 \text{ 毫安(mA)} &= 10^{-3} \text{ 安(A)} \\ 1 \text{ 微安}(\mu\text{A}) &= 10^{-6} \text{ 安(A)} & 1 \text{ 纳安(nA)} &= 10^{-9} \text{ 安(A)} \end{aligned}$$

5. 电流的参考方向

分析电路中的电流, 依靠电路基本定律, 其中在应用电流基本定律建立电路方程时, 必须知道电流的流向。但是, 电路中的电流方向通常事先是不知道的, 这个矛盾如何解决? 对此, 可在每段电路中先任意地指定一个电流方向, 这个任意指定的电流方向, 称为**电流的参考方向**, 以箭头符号表示, 如图 1-3 所示 [注意, 时变电流 $i(t)$ 的参考方向, 指的是在时刻 t 这一瞬间的电流方向 (在本书中, 电路端接点以 “ \circ ” 表示, 如图中的 a 、 b 点)]。

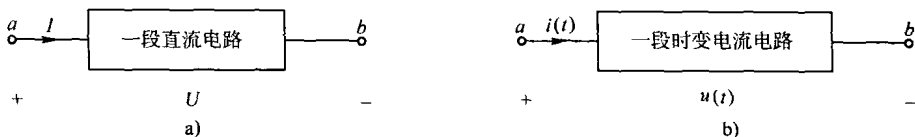


图 1-3 标有电流、电压参考方向的一段电路

a) 直流电路 b) 时变电流电路

有了电流参考方向及计算值的正负，电流的实际方向就能确定了。例如，在图 1-3a 中，根据图示参考方向，经过计算若有 $I > 0$ ，表明电流实际方向与参考方向一致；若是 $I < 0$ ，则电流实际方向与参考方向相反（电路中电流参考方向的不同选取，只影响电流值的正负，而不会改变电流的实际流向与大小）。

必须强调指出，在电路分析中，离开了电流的参考方向谈论电流的正与负是没有意义的。

分析计算电路中电流与电荷间的关系，常有两种情况，一是给定电荷（或电流）的函数式，另一是给出它们的波形。下面请看例题分析。

例 1-1 在一段时变电流电路中，电流 $i(t)$ 与电荷 $q(t)$ 有相同方向，对所有 t ，已知通过电路的电荷量与 t 的关系为 $q(t) = 2\sin 3t$ C [$q(t) > 0$ 为正电荷量， $q(t) < 0$ 为负电荷量]，试计算电流 $i(t)$ 。

解 $i(t)$ 与 $q(t)$ 同向，任一时刻 t 的电流 $i(t)$ 与电荷 $q(t)$ 间的关系由式 (1-1a) 给出为

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} = \frac{d}{dt}(2\sin 3t) = 6\cos 3t \text{ A}$$

例 1-2 在图 1-4a 中，对所有 t ，已知通过电路的电荷量 $q(t)$ 与 t 的关系如图 b [为了便于观看波形，图中 $q^{(1)} = 0$ 这段波形线与 t 轴间略空间隙——全书同]，试计算对所有 t 的电流 $i(t)$ ，画出其波形，并分析 $q(t)$ 、 $i(t)$ 的实际流向。

解 采用分段计算

在时变电流电路中， $q(t)$ 、 $i(t)$ 是 t 的函数，对此需要规定一个时间的起算点。图 b 中的 $t=0$ ，即坐标原点就是指定的时间起点。

图 b 波形对所有 t 不是同一函数，采用分段计算是合适的。现将 $q(t)$ 波形分作四段，相应电流也分为四段，并以上标 (1) ~ (4) 加以区别。图 a 中 $i(t)$ 与 $q(t)$ 有相同方向，电流、电荷关系由式 (1-1a) 给出。

对 $t < 0$

$$q^{(1)}(t) = 0 \quad i^{(1)}(t) = \frac{dq^{(1)}(t)}{dt} = 0 \quad (1)$$

对 $0 < t < 2s$

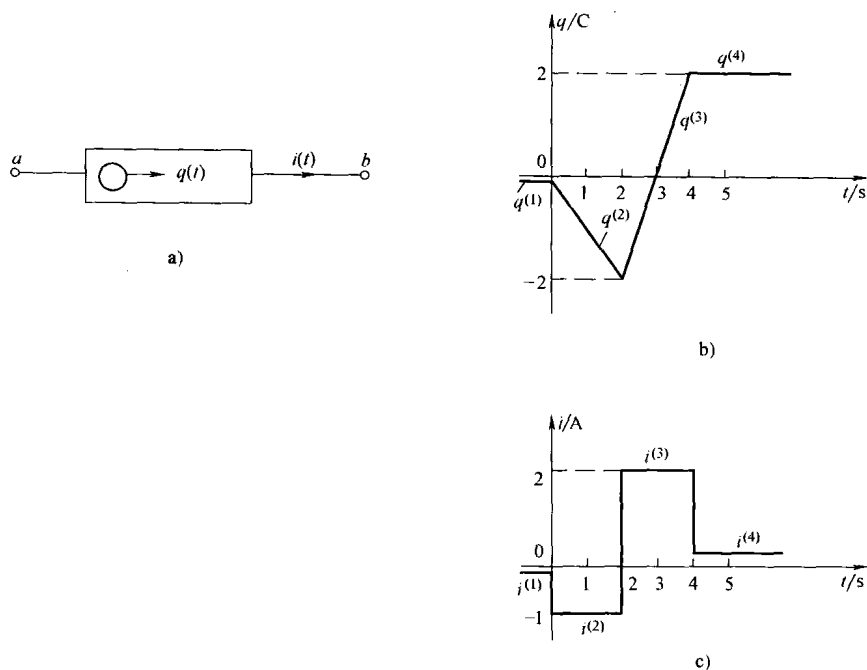


图 1-4 电流 $i(t)$ 与电荷 $q(t)$ 的关系 [$i(t)$ 与 $q(t)$ 同向]

a) 一段时变电流电路 b) $q(t)$ 波形 c) $i(t)$ 波形

$$q^{(2)}(t) = -t^{\ominus} \text{C}$$

$$i^{(2)}(t) = \frac{dq^{(2)}(t)}{dt} = \frac{d}{dt}(-t) = -1 \text{ A} \quad (2)$$

$q^{(2)}(t) < 0$, 且有 $t \uparrow$, 负电荷量 $q^{(2)}(t) \uparrow$, 负电荷自 $a \rightarrow b$ 移动。 $i^{(2)}(t) < 0$, 实际电流 $b \rightarrow a$ 。

对 $2\text{s} < t < 4\text{s}$

$$q^{(3)}(t) = 2(t-3) \text{ C}$$

$$i^{(3)}(t) = \frac{dq^{(3)}(t)}{dt} = \frac{d}{dt}[2(t-3)] = 2 \text{ A} \quad (3)$$

在 $(2\text{s}, 3\text{s})$ 内, $q^{(3)}(t) < 0$, $t \uparrow$, 负电荷量 \downarrow , 表明有正电荷自 $a \rightarrow b$ 移动, 使已通过 $a \rightarrow b$ 的净负电荷量 \downarrow ; 在 $t = 3\text{s}$, 自 $a \rightarrow b$ 的净电荷量为零; 在 $(3\text{s},$

⊙ 本书述及的方程 (不论是量方程还是数值方程) 及计算式中, 如无特殊说明, 时间 t 均以 s 为单位。