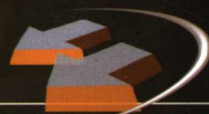


高等学校电子信息与电气学科基础教材



电路分析基础

张永瑞 陈生潭 编著

-43



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

第 2 版 电路分析基础课程教材



电路分析基础

第 2 版 电路分析基础课程教材



清华大学出版社

ISBN 7-302-11111-1

高等学校电子信息与电气学科基础教材

电路分析基础

张永瑞 陈生潭 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书根据国家教育部 1995 年修订颁布的《高等工业学校电路分析基础课程基本要求》，并充分考虑各院校新教学计划中该课程的学时数及现代电子科技发展的趋势、潮流编写而成。其主要内容包括：电路基本概念与定律、电阻电路的一般分析方法、常用的电路定理、动态电路的时域分析、正弦稳态电路分析、互感和理想变压器、电路频率响应、双口网络、非线性电阻电路共九章内容。基本概念讲述准确透彻，常用的基本分析方法讲述步骤明确，举例类型多，结合工程实际，便于读者仿效掌握。

本书可作为通信工程、电子信息工程、测控技术与仪器、计算机科学与技术等专业的本科生的教材；对从事弱电（电子类）专业的工程技术人员亦有重要的参考价值。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有，侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电路分析基础/张永瑞等编著. —北京：电子工业出版社，2003.4
高等学校电子信息与电气学科基础教材
ISBN 7-5053-8536-4

I.电… II.张… 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 (2003) 第 009828 号

责任编辑：王传臣

印 刷：北京天竺颖华印刷厂

出版发行：电子工业出版社 <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销：各地新华书店

开 本：787×980 1/16 印张：27.25 字数：562 千字

版 次：2003 年 4 月第 1 版 2003 年 4 月第 1 次印刷

印 数：5000 册 定价：30.00 元

凡购买电子工业出版社的图书，如有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系。联系电话：(010) 68279077

前 言

国家教育部 1998 年调整、公布了新的专业目录,将原来专业目录中相近的专业进行了合并并更改了专业名称。这一举措的主导思想是加强基础、拓宽专业口径,以利于培养适应性强的通用型人才。各院校为建设新专业的需要,都制订了新的教学计划。

根据 1995 年国家教育部(前国家教育委员会)修订颁布的《高等工业学校电路分析基础课程基本要求》及各院校新教学计划中对电路分析基础课程学时压缩、内容要求不变这一新的情况,并充分考虑现代电子科技日新月异的发展,面向 21 世纪,电工电子系列课程改革的趋势和潮流及取得的新成果,特为通信工程、电子信息工程、信息安全、信息对抗、探测制导与控制技术、计算机科学与技术等专业的本科生编写了《电路分析基础》这本教材。

本书的主要特点是:

(1) 设计好本书的框架、结构、体系:基本概念,电阻电路分析,动态电路时域分析,正弦稳态电路分析,电路频率特性,双口网络,非线性电阻电路——依据这种体系结构,先建立最基本的概念,再进入电路分析。而电路分析,也是本着先易后难、循序渐近逐步深入,“牵手下水学游泳”,符合人们的认识规律,便于教学实施。

(2) 对课程基本要求中的主干内容,讲深、讲透,本着削枝强干思想,突出重点。如,电压、电流参考方向,欧姆定律,基尔霍夫电流定律(KCL)、电压定律(KVL),网孔法,节点法,叠加定理,戴维南定理,诺顿定理,以及动态电路分析中的“三要素法”,正弦稳态电路中的相量、阻抗、导纳概念和相量分析方法等内容,从多个侧面阐述问题,例举了各种类型的例子,让读者深刻理解概念,熟练掌握分析方法。

(3) 对基本概念的讲解,力求准确清晰,多从物理概念作定性说明。对必须的定量数学推导,要做到交待清楚思路,推导过程简明扼要,结论明确,便于读者掌握。

(4) 配置例题目的性强,力求结合工程实际并具有典型性。所举例题精心配置元件数据,使读者阅读时,不至于因计算过程数据的不整齐而困惑。每节后配置有思考练习题,每章后配置有深浅度适当的习题,在书末给出了这些题目的部分参考答案。思考练习题,多是在当节讲授内容的基础上,为拓展读者的思路、引发读者联想所提出值得思考的问题。

(5) 编写文字力求简明、通俗易懂,符号、图表规范,符合国家标准,便于读者自学,教师施教。

全书主要内容包括:电路基本概念与定律、电阻电路的一般分析方法、常用的电路定

理、动态电路时域分析、正弦稳态电路分析、耦合电感与理想变压器、电路频率响应、双口网络、非线性电阻电路共九章内容。使用本教材的教学参考学时为 60~70。

本书第 1、2、3、7、9 章由张永瑞同志编写,第 4、5、6、8 章由陈生潭同志编写。全书由张永瑞主编,负责统稿。

书稿策划与编辑中得到了王传臣副总编的热情帮助,在此表示诚挚的感谢。还要感谢多年来关心和支持我们的所有同事。

由于编著者水平有限,又加上编写时间紧迫,所以书中难免还存在不足或错误,恳请广大读者批评指正。

编著者

2002 年 8 月于西安电子科技大学

目 录

第 1 章 电路的基本概念与定律	(1)
1.1 电路模型	(1)
1.1.1 实际电路组成与功能	(1)
1.1.2 电路模型	(2)
1.2 电路变量	(4)
1.2.1 电流	(4)
1.2.2 电压	(5)
1.2.3 电功率	(8)
思考与练习	(10)
1.3 电阻元件与欧姆定律	(11)
1.3.1 电阻元件	(11)
1.3.2 欧姆定律	(12)
1.3.3 电阻元件上消耗的功率与能量	(13)
思考与练习	(15)
1.4 理想电源	(15)
1.4.1 理想电压源	(15)
1.4.2 理想电流源	(18)
思考与练习	(20)
1.5 基尔霍夫定律	(21)
1.5.1 基尔霍夫电流定律(KCL)	(22)
1.5.2 基尔霍夫电压定律(KVL)	(23)
思考与练习	(26)
1.6 电路等效	(27)
1.6.1 电路等效的一般概念	(27)
1.6.2 电阻的串联与并联等效	(28)
1.6.3 理想电源的串联与并联等效	(35)
思考与练习	(36)
1.7 实际电源的模型及其互换等效	(37)

1.7.1 实际电源的模型	(37)
1.7.2 电压源、电流源模型互换等效	(39)
思考与练习	(41)
1.8 电阻 Δ , Y 电路互换等效	(42)
1.8.1 Δ 形电路等效变换为 Y 形电路	(42)
1.8.2 Y 形电路等效变换为 Δ 形电路	(44)
思考与练习	(46)
1.9 受控源及含受控源电路的等效	(47)
1.9.1 受控源	(47)
1.9.2 含受控源电路的等效	(49)
思考与练习	(51)
习题一	(52)
第 2 章 电阻电路的一般分析方法	(59)
2.1 图与电路方程	(59)
2.1.1 网络(电路)的拓扑图	(59)
2.1.2 回路、割集、树	(61)
2.1.3 KCL 和 KVL 的独立方程	(63)
思考与练习	(65)
2.2 $2b$ 法和 b 法	(66)
2.2.1 $2b$ 法	(66)
2.2.2 b 法	(67)
思考与练习	(71)
2.3 回路法与网孔法	(71)
2.3.1 回路法	(71)
2.3.2 网孔法	(73)
思考与练习	(80)
2.4 割集法与节点法	(81)
2.4.1 割集法	(81)
2.4.2 节点法	(82)
思考与练习	(90)
习题二	(91)
第 3 章 常用的电路定理	(96)
3.1 叠加定理和齐次定理	(96)
3.1.1 叠加定理	(96)

3.1.2 齐次定理	(100)
思考与练习	(102)
3.2 置换定理	(103)
思考与练习	(109)
3.3 戴维南定理与诺顿定理	(109)
3.3.1 戴维南定理	(110)
3.3.2 诺顿定理	(112)
思考与练习	(117)
3.4 最大功率传输定理	(118)
思考与练习	(124)
3.5 互易定理	(125)
思考与练习	(131)
习题三	(132)
第 4 章 动态电路时域分析	(138)
4.1 动态电路元件	(138)
4.1.1 电感元件	(138)
4.1.2 电容元件	(142)
4.1.3 电感、电容的串联和并联	(144)
思考与练习	(147)
4.2 动态电路的方程	(148)
4.2.1 电路微分方程	(148)
4.2.2 电路量初始值的计算	(149)
思考与练习	(152)
4.3 一阶电路的零输入响应	(152)
4.3.1 一阶 RC 电路的零输入响应	(153)
4.3.2 一阶 RL 电路的零输入响应	(154)
思考与练习	(157)
4.4 一阶电路的零状态响应	(157)
4.4.1 一阶 RC 电路的零状态响应	(157)
4.4.2 一阶 RL 电路的零状态响应	(160)
思考与练习	(162)
4.5 一阶电路的全响应	(163)
4.5.1 全响应及其分解	(163)
4.5.2 三要素法	(165)

思考与练习·····	(171)
4.6 一阶电路的阶跃响应·····	(172)
4.6.1 阶跃函数·····	(172)
4.6.2 阶跃响应·····	(173)
思考与练习·····	(175)
4.7 二阶电路分析·····	(176)
4.7.1 零输入响应·····	(177)
4.7.2 单位阶跃响应·····	(181)
思考与练习·····	(182)
4.8 正弦激励下一阶电路的响应·····	(182)
思考与练习·····	(184)
习题四·····	(185)
第5章 正弦稳态电路分析 ·····	(191)
5.1 正弦电流与电压·····	(191)
5.1.1 正弦量的三要素·····	(191)
5.1.2 相位差·····	(193)
5.1.3 有效值·····	(195)
思考与练习·····	(196)
5.2 正弦量的相量表示·····	(197)
5.2.1 复数及其运算·····	(197)
5.2.2 正弦量的相量表示·····	(198)
思考与练习·····	(204)
5.3 电路定律的相量形式·····	(204)
5.3.1 基本元件 VCR 的相量形式·····	(204)
5.3.2 KCL, KVL 的相量形式·····	(208)
思考与练习·····	(212)
5.4 相量模型·····	(212)
5.4.1 阻抗与导纳·····	(212)
5.4.2 正弦电源相量模型·····	(215)
5.4.3 正弦稳态电路相量模型·····	(215)
5.4.4 阻抗和导纳的串、并联·····	(216)
思考与练习·····	(219)
5.5 相量法分析·····	(220)
5.5.1 方程法分析·····	(221)

5.5.2 等效法分析	(225)
思考与练习	(230)
5.6 正弦稳态电路的功率	(231)
5.6.1 单口电路的功率	(231)
5.6.2 最大功率传输条件	(235)
思考与练习	(239)
5.7 三相电路	(240)
5.7.1 三相电源	(240)
5.7.2 三相电路的计算	(243)
思考与练习	(249)
习题五	(249)
第 6 章 耦合电感与理想变压器	(257)
6.1 耦合电感元件	(257)
6.1.1 耦合线圈	(257)
6.1.2 耦合电感的电压、电流关系	(258)
思考与练习	(263)
6.2 耦合电感的去耦等效	(264)
6.2.1 耦合电感的 C CVS 去耦等效	(264)
6.2.2 耦合电感的 T 形去耦等效	(265)
思考与练习	(269)
6.3 含耦合电感电路的相量法分析	(269)
6.3.1 方程法分析	(270)
6.3.2 等效法分析	(270)
思考与练习	(276)
6.4 理想变压器	(277)
6.4.1 理想变压器的条件	(277)
6.4.2 理想变压器的基本特性	(278)
思考与练习	(285)
6.5 实际变压器	(285)
6.5.1 全耦合变压器	(286)
6.5.2 空心变压器	(289)
6.5.3 铁心变压器	(290)
思考与练习	(290)
习题六	(291)

第 7 章 电路频率响应	(296)
7.1 网络函数与频率响应	(296)
7.1.1 网络函数	(296)
7.1.2 网络频响特性	(297)
思考与练习	(299)
7.2 常用 RC 一阶电路的频率特性	(299)
7.2.1 RC 一阶低通电路的频率特性	(299)
7.2.2 RC 一阶高通电路的频率特性	(304)
思考与练习	(306)
7.3 常用 rLC 串联谐振电路的频率特性	(307)
7.3.1 串联谐振	(308)
7.3.2 频率特性	(314)
7.3.3 通频带	(317)
思考与练习	(320)
7.4 实用 rLC 并联谐振电路的频率特性	(321)
7.4.1 并联谐振	(322)
7.4.2 频率特性	(325)
7.4.3 通频带	(328)
思考与练习	(331)
习题七	(332)
第 8 章 双口网络	(338)
8.1 双口网络	(338)
思考与练习	(339)
8.2 双口网络的方程与参数	(339)
8.2.1 Z 方程与 z 参数	(340)
8.2.2 Y 方程与 y 参数	(342)
8.2.3 A 方程与 a 参数	(344)
8.2.4 H 方程与 h 参数	(345)
思考与练习	(349)
8.3 双口网络的联接	(349)
8.3.1 串联	(350)
8.3.2 并联	(351)
8.3.3 级联	(351)
8.3.4 双口网络联接有效性检验	(353)

思考与练习·····	(356)
8.4 双口网络的等效·····	(357)
8.4.1 双口网络的 z 参数等效电路·····	(357)
8.4.2 双口网络的 y 参数等效电路·····	(359)
思考与练习·····	(361)
8.5 双口网络的网络函数与特性阻抗·····	(362)
8.5.1 策动网络函数·····	(362)
8.5.2 传输网络函数·····	(365)
8.5.3 特性阻抗·····	(368)
思考与练习·····	(370)
习题八·····	(371)
第9章 非线性电阻电路 ·····	(377)
9.1 非线性电阻元件·····	(377)
9.1.1 压控、流控及单调型非线性电阻·····	(377)
9.1.2 双向性、单向性电阻和静态、动态电阻·····	(379)
思考与练习·····	(381)
9.2 非线性电阻的串联与并联等效·····	(381)
9.2.1 非线性电阻的串联等效·····	(382)
9.2.2 非线性电阻的并联等效·····	(385)
思考与练习·····	(387)
9.3 常用的非线性电阻电路分析法·····	(388)
9.3.1 图解法·····	(388)
9.3.2 分段线性化法·····	(391)
9.3.3 小信号分析法·····	(394)
思考与练习·····	(397)
习题九·····	(397)
部分练习题与习题参考答案 ·····	(402)

第 1 章 电路的基本概念与定律

学习“电路分析基础”课程主要是掌握电路的基本规律和基本分析方法。本章从建立电路模型、认识电路变量等最基本的问题出发,重点讨论理想电源、欧姆定律、基尔霍夫定律、电路等效等重要概念。本章末介绍受控源。

1.1 电路模型

“模型”是现代各个自然学科、社会学科分析研究问题中普遍使用的重要概念。如,没有宽窄厚薄的“直线”是数学学科研究中的一种模型;不占空间尺寸却有一定质量的“质点”是物理学科研究中的一种模型。人们在分析、设计某一实际系统时,几乎都采用模型化的方法,即先建立能反映该系统基本特性的模型,使问题得到合理简化,然后对该模型进行定量分析,以求得该系统的某些分析研究结果。研究电路问题也是如此,我们首先要建立电路模型,然后进行定量分析。

1.1.1 实际电路组成与功能

在现代工农业生产、国防建设、科学研究,以及日常生活中,使用着各种各样的电器设备,如电动机、雷达导航设备、计算机、电视机、手机等,广义上说,这些电器设备都是实际中的电路。

图 1.1-1 是最简单的一种实际照明电路。它由 3 部分组成:①是提供电能的能源,简称**电源**,它的作用是将其他形式的能量转换为电能(图中干电池电源是将化学能转换为电能);②是**用电装置**,统称其为**负载**,它将电源供给的电能转换为其他形式的能量(图中灯泡将电能转换成光和热能);③是**连接电源与负载传输电能的金属导线**,简称**导线**。图中 S 是为了节约电能所加的控制开关,需要照明时将开关 S 闭合,不需要照明时将 S 打开。电源、负载与连接导线是任何实际电路都不可缺少的 3 个组成部分。

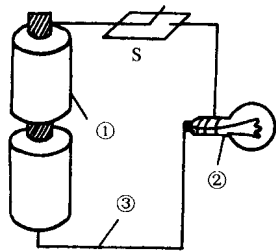


图 1.1-1 手电筒电路

实际电路种类繁多,但就其功能来说可概括为两个方面。其一,是进行**能量的产生、传输、分配与转换**。典型的例子是电力系统中的发电、输电电路。发电厂的发电机组将其他形式的能量(或热能、或水的势能、或原子能、或太阳能等)转换成电能,通过变压器、输电线输送给各用户负载,那里又把电能转

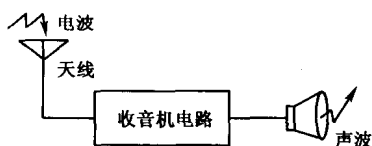


图 1.1-2 接收机电路

换成机械能(如负载是电动机)、光能(如负载是灯泡)、热能(如负载是电炉、电烙铁等),为人们生产、生活所利用。
其二,是实现信号的产生、传递、变换、处理与控制。这方面典型的例子有电话、收音机、电视机电路。如图 1.1-2 所示,接收天线把载有语言、音乐、图像信息的电磁波接收后,通过接收机电路把输入信号(又称激励)变换或处理为人们所需要的输出信号(又称响应),送到扬声器或显像管,再还原为语言、音乐或图像。

1.1.2 电路模型

在实际电路中使用着各种电气、电子元件(又统称为电路部件),如电阻器、电容器、电感器、灯泡、电池、晶体管、变压器等等。实际的电路部件虽然种类繁多,但在电磁方面

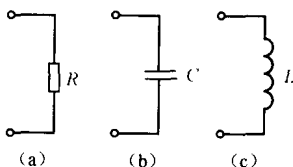


图 1.1-3 理想电阻、电容、电感元件模型

却有许多共同的地方。譬如,电阻器、灯泡、电炉等,它们主要是消耗电能,这样可用一个具有两个端钮的理想电阻来反映消耗电能的特征,其模型符号如图 1.1-3(a)所示。类似地各种实际电容器主要是储存电能,用一个理想的二端电容来反映储存电能的特征,理想电容元件的模型符号如图 1.1-3(b)所示。各种实际电感器主要是储存磁能,用一个理想的二端电感元件来反映储存磁能的特征,其模型符号如图 1.1-3(c)所示。

有了上述定义的理想电阻、理想电容、理想电感元件模型,任何一个实际的电阻器、电容器、电感器部件,就能用足以反映其电磁性能的一些理想元件模型或其组合来表示,构成实际部件的电路模型。譬如,灯泡、电炉、电阻器,它们的主要电磁性能都是消耗电能,在低频应用时,它们中储藏的电能、磁能比起它们消耗的电能来说很微小,可以忽略不计,这些实际部件的电路模型都可用图 1.1-3(a)中的理想电阻 R 来表示。这样,就抽掉了这些实际部件的外形、尺寸的差异性,而抓住了它们所表现出来共性的东西即消耗电能。再如一个实际的电感器,它是在一个骨架上用良好金属导线绕制而成的,如图 1.1-4(a)所示。如果应用在低频电路里,它所表现出的电磁性能主要是储藏磁能,它所消耗的电能与储藏的电能都很小,与储藏的磁能相比可以忽略不计,在这种应用条件下的实际电感器,它的模型可视为图 1.1-4(b)所示的理想电感。如果应用在高频电路中,绕制该线圈的导线所消耗的电能需要考虑,它储藏的电能仍可忽略,那么,这种情况的实际电感器的模型就可用体现电能消耗的理想电阻 r 与体现磁能储藏的理想电感 L 相串联,如图 1.1-4(c)所示。如果这个实际电感器应用在更高频率的电路中,它储藏的电能也需要考虑,那么这种情况下的实际电感器的电路模型可用图 1.1-4(d)来表示。

其他的实际电路部件都可类似地将其表示为应用条件下的模型,这里不一一列举。

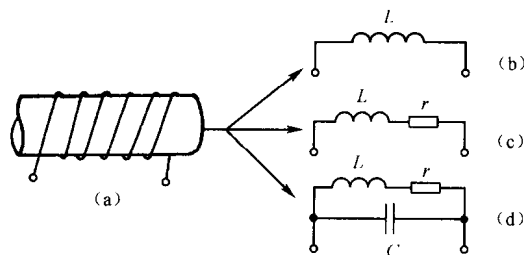


图 1.1-4 实际电感元件在不同
应用条件下之模型

关于电路部件的模型概念这里再强调说明几点：(1)理想电路元件是具有某种确定的电磁性能的理想元件：理想电阻元件只消耗电能(既不储藏电能,也不储藏磁能);理想电容元件只储藏电能(既不消耗电能,也不储藏磁能);理想电感元件只储藏磁能(既不消耗电能,也不储藏电能)。理想电路元件是一种理想的模型并具有精确的数学定义,实际中并不存在。但是不能说所定义的理想电路元件模型理论脱离实际,是无用的。这犹如实际中并不存在“质点”,但“质点”这种理想模型在物理学科运动学原理分析与研究中举足轻重一样,人们所定义的理想电路元件模型在电路理论问题分析与研究中充当着重要角色。(2)不同的实际电路部件,只要具有相同的主要电磁性能,在一定条件下可用同一个模型表示,如上所述的灯泡、电炉、电阻器这些不同的实际电路部件在低频电路里都可用理想电阻 R 表示。(3)同一个实际电路部件在不同的应用条件下,它的模型也可以有不同的形式,如图 1.1-4 所示实际电感器在各种应用条件下之模型。

将实际电路中各个部件用其模型符号表示,这样画出的图称作为实际电路的电路模型图,亦称作电原理图。如图 1.1-5 就是图 1.1-1 实际电路的电路模型。

还应指出,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,它们交织在一起并发生在整个部件中。这里所述的“理想化”是指:假定这些现象可以分别研究,并且这些电磁过程都分别集中在各元件内部进行,这样的元件称为集总参数元件,简称为集总元件。由集总元件构成的电路称为集总参数电路。众所周知,电荷激发电场,电流激发磁场,一切电、磁现象的本质都应是电场、磁场的问题。集总参数电路问题是满足一定条件下的电、磁场问题的简化问题。即是说,用集总参数电路模型来近似地描述实际电路是有条件的,它要求实际电路的尺寸 l (长度)要远小于电路工作时的电磁波的波长 λ ,即

$$l \ll \lambda \quad (1.1-1)$$

集总参数电路的突出特点:电流在集总参数电路中流动不需要时间;没有任何电、磁能量辐射,电磁能量的消耗、储存都集中在元件内部进行。

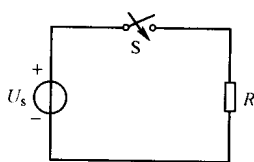


图 1.1-5 图 1.1-1
实际电路的模型图

若不能满足式(1.1-1)条件,实际电路便不能按集总参数电路模型来处理。本书只讨论集总参数电路。

1.2 电路变量

在电路问题分析中,人们主要关注的物理量是电流、电压和功率,有时也涉及到能量、电荷、磁通(或磁链)变量。在具体展开分析、讨论电路问题之前,首先建立并深刻理解一些重要物理量的有关基本概念是非常必要的。

1.2.1 电流

电荷有规则的定向运动,形成传导电流。我们知道,一段金属导体内含有大量的带负电荷的自由电子,通常情况下,这些自由电子在其内部作无规则的热运动,并不形成电流;若在该段金属导体两端连接上电源,那么带负电荷的自由电子就要逆电场方向运动,于是在该段金属导体中便形成有电流。在其他场合,如电解溶液中的带电离子作规则定向运动也会形成传导电流。

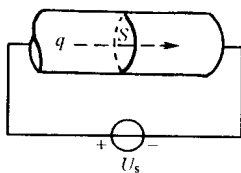


图 1.2-1 电流强度定义说明图

电流,虽然人们看不见它,但可通过电流的各种效应(譬如磁效应、热效应)来感知它的客观存在,即是说,电流是客观存在的物理现象。为了从量的方面量度电流的大小,引入电流强度的概念。单位时间内通过导体横截面的电荷量定义为电流强度,如图 1.2-1 所示。电流强度用 $i(t)$ ^① 表示,即

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} \quad (1.2-1)$$

式中 $q(t)$ 为通过导体横截面的电荷量,若 $dq(t)/dt$ 为常数,即是直流电流,常用大写字母 I 表示。电流强度的单位是安培(A),简称“安”。电力系统中嫌安培单位小,有时取千安(kA)为电流强度的单位。而无线电接收系统中又嫌安培这个单位太大,常用毫安(mA)、微安(μ A)作电流强度单位。它们之间的换算关系是

$$1 \text{ kA} = 10^3 \text{ A}$$

$$1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ A}$$

$$1 \text{ } \mu\text{A} = 10^{-6} \text{ A}$$

在电路问题分析中,电流强度是经常使用的物理量,为了简便,简称为电流。所以“电流”一词不仅表示一种物理现象,而且也代表一个物理量。

电流不但有大小,而且有方向性。规定正电荷运动的方向为电流的实际方向。在一

^① 时间函数 $i(t)$,也常简化书写为 i 。