

21 世纪 高等学校本科系列教材

总主编 吴中福

电路及电子技术

(6)

杨立功 蒋 军 吴培明 主编



重庆大学出版社

电路及电子技术

杨立功 蒋军 吴培明 主编

重庆大学出版社

内 容 提 要

全书共分10章,主要内容包括电路模型和电路定律、电阻电路的分析方法、电路的暂态分析、正弦电流电路的稳态分析、常用半导体器件、基本放大电路、负反馈放大器、集成运算放大器的应用、集成功率放大器、直流稳压电源。每章后附有思考题与习题。

本书可作为高等院校计算机、自动化、电子工程等专业的教材,也可供有关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电路及电子技术/杨立功,蒋军,吴培明主编. —重
庆:重庆大学出版社,2001. 11
计算机科学与技术专业本科系列教材
ISBN 7-5624-2364-4

I. 电... II. ①杨...②蒋...③吴... III. ①电路
—高等学校—教材②电子技术—高等学校—教材
IV. ①TM13②TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 061076 号

电路及电子技术

杨立功 蒋军 吴培明 主编
责任编辑 梁涛

*

重庆大学出版社出版发行
新华书店经销
重庆大学建大印刷厂印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:18 字数:449 千
2001 年 11 月第 1 版 2001 年 11 月第 1 次印刷
印数:1—6 000

ISBN 7-5624-2364-4 /TN·48 定价:28.00 元

前言

本书是按照国家教育委员会制定的《电路和电子技术课程教学基本要求》,为高等院校计算机科学与技术专业编写的专业基础课程教材。

针对计算机科学与技术专业的特点和各大专院校的实际,各院校普遍开设《数字电子技术和逻辑设计》课程,本书把电路部分和模拟电子技术合编为一册。电路部分在介绍各种基本概念的基础上,重点叙述电路理论的基本定律和基本分析方法。模拟电子技术部分较为详细介绍了半导体器件和基本放大电路的常用分析方法。在保证基本内容完整的前提下,适当选编了部分目前广泛应用半导体线性集成器件。由于一本名为《电路及电子技术实习指导》的配套教材同时出版,本书不再介绍半导体器件实际应用知识和电路安装调试等内容。鉴于目前许多电路分析和设计软件已经引入高校教学,复杂电路可以直接由计算机仿真得到结果,所以本书在电路分析中,以定性分析为主,相对弱化繁琐的数学推导。

参加本书编写的各位编者及分工是:蒋军编写第4章、第10章,吴培明编写第2章、第8章,向荣编写第1章、第9章,朱荣编写第3章、第7章,杨立功编写第5章、第6章。蒋军、吴培明为副主编,杨立功作为主编,负责全书统稿。

本书由北京理工大学王远教授主审。

由于我们水平有限,加之时间仓促,书中难免存在不少错误和不妥之处,敬请读者给予批评指正。

编 者

2001年6月

目录

第 1 章 电路模型和电路定律	1
1.1 电路和电路模型.....	1
1.2 电流、电压和电动势的参考方向	2
1.3 电路元件的功率.....	4
1.4 电阻元件.....	6
1.5 电容元件.....	7
1.6 电感元件	10
1.7 电源元件	13
1.8 受控源	16
1.9 克希荷夫定律	16
1.10 电路中点电位的计算.....	19
习题.....	20
 第 2 章 电阻电路的分析方法	25
2.1 电阻的串联、并联和串并联.....	25
2.2 电压源与电流源的等效变换	28
2.3 电压源、电流源的串联和并联.....	30
2.4 电阻网络的等效变换	33
2.5 支路法	37
2.6 节点法	38
*2.7 网孔法和回路法	41
2.8 叠加原理	44
2.9 戴维南定理和诺顿定理	47
*2.10 非线性电阻电路的伏安特性.....	50
*2.11 非线性电阻的串联和并联.....	52
*2.12 分段线性化方法和小信号分析法.....	54
习题.....	57

第3章 电路的暂态分析	62
3.1 动态电路概述	62
3.2 换路定则及电路初始值的确定	63
3.3 一阶电路的零输入响应	64
3.4 一阶电路的零状态响应	68
3.5 一阶电路的全响应	69
3.6 一阶电路的三要素法	70
3.7 一阶电路的阶跃响应	72
3.8 一阶电路的矩形波响应	73
*3.9 二阶电路的零输入响应	75
*3.10 二阶电路的零状态响应	78
习题	79
第4章 正弦电流电路的稳态分析	82
4.1 正弦电流电路及正弦量的概念	82
4.2 相量法的基本概念	84
4.3 电路定律的相量形式	87
4.4 复阻抗与复导纳	89
4.5 RLC 串联的正弦电流电路	90
4.6 阻抗(导纳)的串联和并联	93
4.7 正弦电流电路的稳态分析	94
4.8 正弦电流电路的功率	97
4.9 正弦电流电路的串联谐振	99
4.10 正弦电流电路的并联谐振	102
*4.11 三相电源	103
*4.12 对称三相电路的分析	105
*4.13 不对称三相电路的示例	107
*4.14 三相电路功率的计算	108
习题	110
第5章 常用半导体器件	115
5.1 PN 结及其单向导电性	115
5.2 半导体二极管	119
5.3 双极型半导体三极管(BJT)	122
5.4 半导体场效应管(FET)	128
习题	136
第6章 基本放大电路	139

6.1	基本放大电路的组成	139
6.2	放大电路的性能指标	140
6.3	基本放大电路的图解分析方法	142
6.4	放大电路的微变等效电路分析法	145
6.5	共集电极和共基极放大电路	151
6.6	场效应管放大电路	154
6.7	多级放大电路	157
6.8	差动放大电路	160
6.9	集成运算放大器	165
	习题	172
第7章	负反馈放大器	181
7.1	反馈的基本概念及反馈类型	181
7.2	反馈的表示方法	185
7.3	负反馈对放大电路性能的影响	186
7.4	负反馈放大电路的计算	190
7.5	负反馈放大电路的自激振荡及其校正	193
	习题	195
第8章	集成运算放大器的应用	200
8.1	集成运算放大器在信号运算方面的应用	201
8.2	集成运算放大器在信号处理方面的应用	210
8.3	集成运算放大器在波形处理方面的应用	213
8.4	有源滤波电路	224
	习题	230
第9章	集成功率放大器	236
9.1	功率放大电路的特殊问题	236
9.2	OCL 功率放大电路	237
9.3	集成功率放大电路	241
	习题	242
第10章	直流稳压电源	243
10.1	直流稳压电源的组成	243
10.2	单相整流电路	243
10.3	滤波电路	248
10.4	并联硅稳压管稳压电路	250
10.5	串联型线性直流稳压电源	251
10.6	集成稳压电源	253
10.7	开关型直流稳压电源	255

习题	256
附录一 半导体器件型号命名方法	259
附录二 常用半导体器件参数	261
参考答案	268
常用符号说明	276
主要参考文献	280

第 1 章

电路模型和电路定律

本章将介绍集总参数元件,电路与电路模型,电路分析的基本物理量,以及作为进行电路分析基本依据的克希荷夫定律和电阻、电容、电感元件的伏安关系等基本内容。它们是本书最为基础的内容,其中的许多重要结论始终贯穿全书。

1.1 电路和电路模型

在日常生活、工农业生产、科研以及国防中,使用着各种各样的电器设备,如照明电灯、计算机、程控交换机、电视机等,这些电器设备都是由实际的电路构成。

1.1.1 电路与电路的作用

电路是指由用电设备如电阻器、电容器、线圈、变压器、晶体管、电源等用导线相互联接所组成的电流闭合路径。

实际电路种类繁多,但就其功能来说,电路的作用大致可分为:①提供能量,如供电电路;②传送和处理信号,如电话线路、放大电路;③测量电路,如万用表电路(用来测量电压、电流和电阻等);④信息存储,如计算机的内、外存储器电路,存放数据和程序等。

我们日常生活中所用的手电筒电路就是一个最简单的电路,它是由电池、灯泡、手电筒壳(联接导体)组成的。电池是一种电源,对电路提供能量;灯泡是用电的器件,常称其为负载,当电流流过时能发热到白炽状态而发光;联接导体可使电流构成通路。手电筒电路如图 1.1 所示。

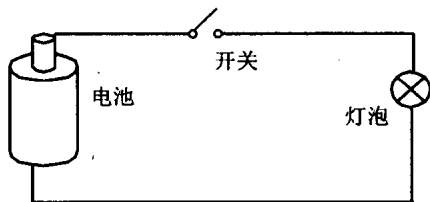


图 1.1

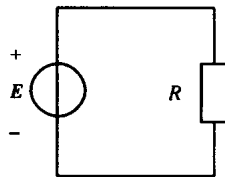


图 1.2

1.1.2 集总电路模型

实际电路中使用的各种电气元件包含的物理特性比较复杂,完全考虑它们是相当困难的。实际的电路分析中常用集总元件的概念理想化地来近似表示各种实际器件的主要物理性能,

忽略其次要的物理特性。如考虑到电阻器主要呈现对电流的阻碍作用,可用集总元件电阻代替电路中的电阻器;考虑到电容器在电路中主要呈现存储电场能量的作用,可用集总元件电容代替电容器,用集总电感元件代替电感线圈等。引进集总参数概念的目的是为了简化电路的分析和计算。由集总参数(理想)元件构成的电路称为集总参数电路。本书研究的重点就是所谓的集总电路。

上图所示的实际电路中由电源元件代替干电池,用电阻元件代替灯泡,用导线代替电路中的连接导体,可得其集总电路模型为图 1.2。

1.1.3 集总假设的条件

采用上述的集总参数元件替代实际电路的用电器件是有条件的。集总意味着把器件的电场和磁场分隔开,电场只与电容元件相关联,这样,两种场之间就不存在相互作用。而电场与磁场间的相互作用将产生电磁波,一部分能量将通过辐射损失掉。因此,只有在辐射能量可以忽略不计的情况下才能采用集总的概念。这就要求器件的尺寸远小于正常工作频率所对应的波长,这便是采用集总概念的条件,即

$$l \leq \lambda$$

集总假设是本书最主要的假设。以后所述的电路基本定律均是在这一假设的前提下才能使用的。

1.1.4 分布参数及分布参数电路模型

前面提到的集总电阻元件是对实际电阻器的抽象化、理想化后得到的。实际电路中的电阻器有电流流过时不仅具有对电流的阻碍作用,在其周围还会产生磁场,因而还兼有电感的性质;一个实际电容器除了具有储存电场能量的作用,还有部分的电能损耗及磁现象,即具有电阻和电感的性质。完全描述实际电阻器的性质用集总参数是不够的,还需用其他参数,这便是所谓分布参数的概念。由用电器件的分布参数构成的电路模型称为分布参数的电路模型。分布参数的电路模型分析起来相当困难,这里不作要求。

1.2 电流、电压和电动势的参考方向

电路分析中,人们关心的物理量是电流、电压及功率。在具体讲解电路的分析方法之前,首先应掌握电路中的这些基本概念。

1.2.1 电流及电流的参考方向

电荷有规则的定向移动形成传导电流。把每单位时间内通过导体横截面的电量定义为电流强度,用以衡量电流的大小。电流强度常简称为电流,用符号 $i(t)$ 表示,即

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

习惯上常规定正电荷运动的方向为电流方向。

如果电流的大小恒定和方向不变,则称其为恒定电流,又称直流电流,用符号 I 表示。如

果电流的大小和方向均随时间变化,则称其为交流电流。

在国际单位制中,电流的单位为安培(中文代号为安,国际代号为A)。电路理论中规定正电荷运动的方向为电流的方向,但实际问题中电流的真实方向有时难以判定,这时可引进参考方向这一概念。电路中的电流参考方向可以任意选定,在电路图中用箭头表示。我们规定:如果电流的真实方向与参考方向一致,电流取值为正;如果两者相反,电流取负值。在分析电路时,完全可以任意假定电流的参考方向,并以此为准去进行分析、计算,从求得答案的正、负值来确定电流的真实方向。显然,在未假定参考方向的情况下,电流的正负是无任何实际意义的。

今后,电路图中所标的电流方向箭头都是参考方向箭头,不一定就是电流的真实方向。电流的参考方向也称电流的正方向。在集总假设的情况下,在任一时刻从任一元件一端流入的电流等于从它另一端流出的电流,流经元件的电流是一个可确定的量。具体使用中要结合电流的参考方向和具体数值,判断某一支路上电流的大小。

例 1.1 图 1.3(a) 中的方框泛指元件。设 2A 的电流由 a 向 b 流过图中元件,试问该电流应如何表示?

解 有两种表示法:

1) 用图(b)所示的 i_1 表示,则 i_1 应表示为

$$i_1 = 2\text{A}$$

2) 用图(c)所示的 i_2 表示,则 i_2 应表示为

$$i_2 = -2\text{A}$$

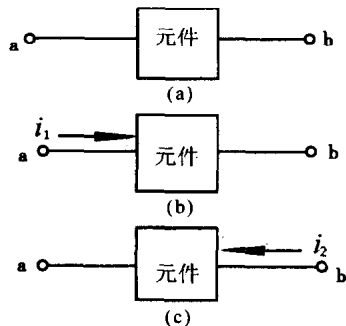


图 1.3

1.2.2 电压及电压参考方向

为了分析方便,在电路理论中引入“电压”这一物理量。电压有时也称“电位差”,用符号 u 表示。电路中的 a, b 两点间的电压表明了单位正电荷由 a 点转移到 b 点时所获得或失去的能量,即

$$u(t) = \frac{dW}{dq} \quad (1.2)$$

其中 dq 为由 a 点转移到 b 点的电量,单位为库仑(C); dW 为转移过程中,电荷 dq 所获得或失去的能量,单位为焦耳(J)。电压的单位为伏特(V)。

如果电压的大小和极性都不随时间而变化,这样的电压称为恒定电压或直流电压,用符号 U 表示;如果电压的大小和极性都随时间变化,则称其为交变电压或交流电压。

对于电压,也规定了参考方向(参考极性)。电压的参考极性有别于电流参考方向的表示,它是在元件的两端用“+”、“-”符号表示。通常“+”表示高电位端,“-”表示低电位端。在电路图中,元件电压参考极性也可以任意选定,需把计算所得电压的正值或负值与图中的参考极性相结合,才能判定元件电压的实际方向。

例 1.2 图 1.4(a) 所示元件两端电压为 1V, 已知正电荷由元件的 b 端移向 a 端且获得能量,试标出电压的真实极性。试为该电压选择参考极性,并写出相应的电压表示式。

解 正电荷由 b 点转移到 a 点获得能量,电压的真实极性是 a 点为+而 b 点为-。

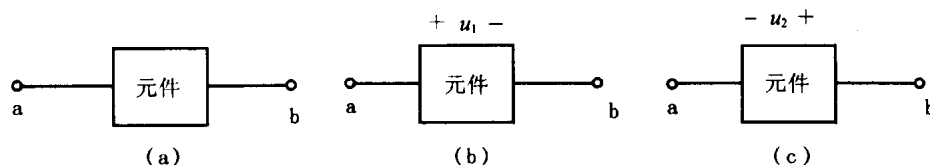


图 1.4

因参考极性可以任意选取,所以有两种结果:

1) 当电压参考极性如图 1.4(b) 所示

$$u_1 = 1\text{V}$$

2) 当电压参考极性如图 1.4(c) 所示

$$u_2 = -1\text{V}$$

1.2.3 电动势及其参考方向

大家知道,在前述的手电筒电路中,干电池要向电路中的用电器件提供能量,它所提供的电能实质是由其内部的化学能转换而来的。在化学能的作用下把由正端流出经由闭合回路而转移到负端的正电荷,经电源内部搬回到正端,使电路中的电流能周而复始地流动。电路理论中定义电动势为单位正电荷从负极经电源内部转移到正极所吸收的能量。实质上电路中的电动势概念与电压密切相关,如设某一元件的电压降为 u ,元件的电动势为 e ,则 $u = -e$ 。

综上所述,在分析电路时,既要为元件的电流假设参考方向,也要为元件的端电压假设参考极性,这两者彼此本可相互独立无关地设定。但为了方便和统一,常把元件的电压参考极性和流过元件的电流参考方向设为关联方向,即电流参考方向与电压参考“+”极到“-”极的方向一致,也即电流流动方向与电压降方向一致。这样,在电路图中就只需标出电流参考方向或电压参考极性即可。

1.3 电路元件的功率

1.3.1 功率的基本概念

现在来讨论电路中某一段所吸收或产生能量的速率即功率的计算。功率用符号 p 表示。

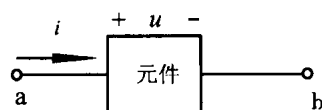


图 1.5

用图 1.5 所示的方框表示某段电路,它可能是一个电阻或是一个电源,也可能是若干元件的组合。采用关联的电压、电流参考方向如图示。

设在 dt 时间内由 a 点到 b 点的正电荷量为 dq ,且由 a 到 b 为电压降,其值为 u ,则根据式(1.2)可知在转移过程中 dq 失去的能量

$$dW = udq \quad (1.3)$$

电荷失去能量意味着该段电路吸收能量,亦即能量由电路的其他部分传送到这一部分。功率即为能量变化的速率,即

$$p(t) = \frac{dW}{dt} = \frac{udq}{dt}$$

因

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

所以

$$p(t) = u(t)i(t) \quad (1.4)$$

1.3.2 关联和非关联情况下功率的计算公式

把能量传输(流动)的方向定为功率的方向。如同把电流、电压作为代数量处理一样,也可将功率假设参考方向。当功率的实际方向与参考方向一致时,功率为正;否则,功率为负。根据规定,功率的参考方向用箭头表示,其指向可以任意设定。从式(1.4)的推导过程可知:如果所研究的电路部分,电压、电流的参考方向系关联的,设功率的参考方向系进入该电路部分的,三者关系见图1.6所示,则运用式(1.4)计算该电路部分的功率时,若算得的功率为正,表示功率的实际方向与参考方向一致,亦即该电路部分吸收功率;若算得的功率为负,表示功率的实际方向与参考方向相反,亦即该电路部分产生功率。

显然, u, i, p 三者的参考方向中若改变其中任何一个使其与图1.6中所示者相反,则需改用

$$p(t) = -u(t)i(t) \quad (1.5)$$

计算功率时,若功率为正,仍表示吸收功率;功率为负,仍表示产生功率。

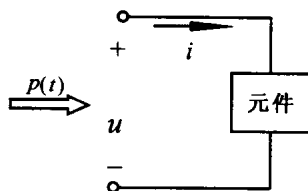


图 1.6

在国际单位制中,功率的单位为瓦特,简称为瓦(W)。

在图1.6所示参考方向下,在 t_0 到 t 的时段内该部分电路所吸收的能量为

$$W(t) = \int_{t_0}^t p(\xi) d(\xi) \quad (1.6)$$

在国际单位制中能量的单位为焦耳,简称焦(J)。

例 1.3 在图1.7(a)和(b)中,若电流均为2A,且均由a流向b,求该两电路元件吸收或产生的功率。

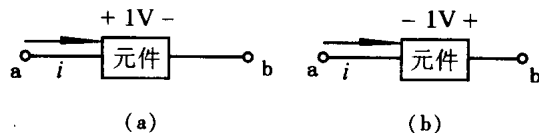


图 1.7

解 设电流 i 的方向由 a 指向 b, 则

$$i = 2\text{A}$$

对图(a)所示元件来说,电压、电流系关联参考方向,故

$$p = u_1 i = 1 \times 2\text{W} = 2\text{W} \quad (\text{吸收})$$

对图(b)所示元件来说,电压、电流系非关联参考方向,故

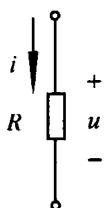
$$p = -u_2 i = -1 \times 2\text{W} = -2\text{W} \quad (\text{产生})$$

1.4 电阻元件

电阻元件是对实际电阻器的抽象。

1.4.1 电阻的定义

电阻元件的定义如下：



任何一个二端元件,如果在任一时刻的电压 $u(t)$ 和电流 $i(t)$ 之间存在代数关系,亦即这一关系可以由 $u-i$ 平面(或 $i-u$ 平面)上一条曲线所决定,不论电压或电流波形如何,则此二端元件就称为电阻元件。

线性电阻元件的符号如图 1.8 所示。

1.4.2 电阻元件的伏安关系曲线

图 1.8 如果把图 1.8 中电阻元件的电压取为纵坐标,电流取为横坐标,可绘出 $u-i$ 平面上的曲线,称为电阻元件的伏安特性曲线。显然,线性电阻元件的伏安特性曲线是一条经过坐标原点的直线,如图 1.9 所示,电阻值可由直线的斜率来确定。

电阻可分为线性和非线性电阻,还可分为时变和非时变电阻。若电阻元件的伏安特性曲线不随时间而变化,则称其为非时变电阻(或称为定常电阻),否则称其为时变电阻。通常,电阻元件的伏安特性曲线都是在关联的参考方向下测得或绘制的。

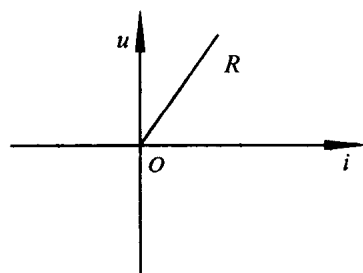


图 1.9

1.4.3 电导

电压与电流是电路的变量。线性的电阻元件可以用它的电阻 R 来表征它的特性,也可以用电导来表征。电导用符号 G 表示,其定义为

$$G = \frac{1}{R} \quad (1.7)$$

在国际单位制中电导的单位是西门子,简称为西(国际代号为 S)。用电导表征线性电阻元件时,欧姆定律为

$$i(t) = Gu(t) \quad (1.8)$$

1.4.4 电阻元件的性质

从图 1.9 所示的伏安特性曲线就可看到:在任一时刻,线性电阻的电压(或电流)是由同一时刻的电流(或电压)所决定的。这就是说,线性电阻的电压(或电流)不能“记忆”电流(或电压)在“历史”上所起过的作用。显然,这种无记忆的性质不只为线性电阻所具有。任何一个二端元件只要它的 $u(t)$ 与 $i(t)$ 之间存在着代数关系,不论这关系是线性的还是非线性的,都具有这种性质。因此,凡电阻元件都是无记忆元件。

从电阻元件的伏安关系可发现电阻元件的伏安关系对称于原点,说明电阻元件对不同方向的电流或不同极性的电压其表现是一样的。这种性质为所有的线性电阻所具备,称为双向性。也即线性电阻在使用时它的两个端钮没有任何区别。

有电流流过电阻时,电阻将消耗能量,所以电阻具有耗能的性质。电阻元件的瞬时功率为

$$p(t) = u(t)i(t) = i^2(t)R = \frac{u^2(t)}{R} \quad (1.9)$$

式中 $i(t)$ 是流过电阻 R 的电流, $u(t)$ 是电阻 R 两端的电压。若 $R \geq 0$, 式(1.9)所算得的结果即为该电阻所消耗的瞬时功率。

例 1.4 阻值为 2Ω 的电阻上的电压、电流参考方向关联, 已知电阻上电压 $u(t) = 10\cos t$ V, 求其中的电流 $i(t)$ 、消耗的瞬时功率 $p(t)$ 。

解 因电阻上电压、电流参考方向关联, 所以其中的电流为

$$i(t) = \frac{u(t)}{R} = \frac{10\cos t}{2} = 5\cos t \text{ A}$$

消耗的瞬时功率为

$$p(t) = R \times i^2(t) = 2 \times (5\cos t)^2 = 50\cos^2 t \text{ W}$$

例 1.5 求一只额定功率为 50W、额定电压为 220V 的灯泡的额定电流及其电阻值。

解 由

$$P = UI = \frac{U^2}{R}$$

得

$$I = \frac{P}{U} = \frac{50\text{W}}{220\text{V}} = 0.227 \text{ A}$$

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{220^2\text{V}^2}{50\text{W}} = 968 \Omega$$

1.4.5 电阻的两种特殊情况

线性电阻有两种值得注意的特殊情况——开路和短路。一个二端电阻元件不论其电压 u 是多大其电流恒等于零, 则此电阻元件称为开路。在 i - u 平面上, 特性曲线的斜率为无限大, 即 $R = \infty$ 。类似地, 一个二端电阻元件不论其电流 i 是多大, 其电压恒等于零, 则此电阻元件称为短路。在 u - i 平面上, 特性曲线斜率为无限大, 即 $G = \infty$; 在 i - u 平面上, 特性曲线的斜率为零, 即 $R = 0$ 。

1.5 电容元件

电路理论中的电容元件是实际电容器的理想化模型。

1.5.1 电容元件的定义

电容元件的定义如下: 一个二端元件, 如果在任一时刻 t , 它的电荷 $q(t)$ 同它的端电压 $u(t)$ 之间的关系可以用 q - u 平面上的一条曲线来确定, 则此二端元件称为电容元件。在某一

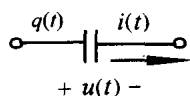


图 1.10

时刻 t , $q(t)$ 和 $u(t)$ 所取的值分别称为电荷和电压在该时刻的瞬时值。因此, 电容元件的电荷瞬时值与电压瞬时值之间存在着一一种代数关系。电容元件的符号如图 1.10 所示。在讨论 $q(t)$ 与 $u(t)$ 的关系时, 通常采用关联的参考方向, 即在假定为正电位的极板上电荷也假定为正。把 $q(t)$

标注在假定为正电荷的极板侧, 亦即标注在假定为正电位的极板侧。图 1.10 所示即为关联参考方向。

如果 q - u 平面的曲线是一条通过原点的直线, 且不随时间而变化, 则此电容元件称之为线性非时变电容元件, 亦即

$$q(t) = Cu(t) \quad (1.10)$$

式中 C 为正值常数, 它是用来度量特性曲线斜率的, 称之为电容。在国际单位制中, C 的单位为法拉(中文代号为法, 国际代号为 F)。习惯上, 也常把电容元件简称为电容, 并且, 如不加申明, 电容都系指线性非时变电容。

实际的电容器除了具有上述的存储电荷的主要性质外, 还有一些漏电现象。这是由于介质不可能是理想的, 多少有点导电能力的缘故。在这种情况下, 电容器的模型中除了上述的电容元件外, 还应增添电阻元件。

每一个电容器允许承受的电压是有限的, 电压过高, 介质就会被击穿。所以使用电容器时不应超过它的额定工作电压。

1.5.2 电容元件的伏安关系

电容是根据 q - u 关系来定义的, 但在电路分析和电子技术中我们感兴趣的往往是元件的伏安关系。所以下边推导电容的伏安关系。

设图 1.10 中的电流 $i(t)$ 的参考方向箭头指向标注 $q(t)$ 的正极板, 这就意味着当 $i(t)$ 为正值时, 正电荷向这一极板聚集, 因而电荷 $q(t)$ 的变化率为正。于是, 有

$$i(t) = \frac{dq}{dt} \quad (1.11)$$

又设电压 $u(t)$ 和 $q(t)$ 参考方向一致, 则对线性电容, 得

$$q(t) = Cu(t) \quad (1.12)$$

将式(1.11)代入式(1.12)得

$$i(t) = \frac{dCu(t)}{dt} = C \frac{du(t)}{dt} \quad (1.13)$$

式(1.13)为电容的伏安关系, 其中涉及对电压的微分。上式表明: 在某一时刻电容的电流取决于电容电压的变化率。如果电压不变化, 那么, du/dt 等于零, 虽有电压, 但电流为零, 因此, 电容有隔离直流的作用。这和电阻元件是不相同的, 电阻两端有电压(无论其是否变化), 电阻中就一定有电流。如 u 和 i 的参考方向不一致, 则

$$i(t) = \frac{dq}{dt} = -C \frac{du(t)}{dt} \quad (1.14)$$

也可以通过简单的数学变换把电容的电压 u 表示为电流 i 的函数。对式(1.13)积分可得

$$u(t) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(\xi) d(\xi) \quad (1.15)$$

如果只需了解在某一任意选定的初始时刻 t_0 以后电容电压的情况, 可以把上式写为

$$u(t) = u(t_0) + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\xi) d(\xi) \quad (1.16)$$

1.5.3 电容的性质

式(1.15)表明在某一时刻 t 的电容电压的数值并不取决于该时刻的电流大小,而是取决于从 $-\infty$ 到 t 所有时刻的电流值,也就是说,与电流全部过去历史有关。

式(1.16)反映电容电压的两个重要性质,即电容电压的连续性质和记忆性质。

电容电压的连续性质可表述如下:

若电容电流 $i(t)$ 在闭区间 $[t_a, t_b]$ 内为有界,则电容电压 $u_C(t)$ 在开区间 (t_a, t_b) 内为连续的。特别是,对任何时间 t ,且 $t_a < t < t_b$,则

$$u_C(t_-) = u_C(t_+)$$

上式常简称为电容电压不能跃变。

电容电压的记忆性质是指某一时刻电容的电压值取决于过去所有时刻电容的电流值。因此,电容电压有记忆电流的性质,电容是一种记忆元件。

1.5.4 电容元件的储能公式

设在 t_1 到 t_2 期间对电容 C 充电,电容电压为 $u(t)$,电流为 $i(t)$,则在此期间供给电容的能量为

$$W_C(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} p(\xi) d(\xi) = \int_{t_1}^{t_2} u(\xi) i(\xi) d(\xi) \quad (1.17)$$

上式也可改写为

$$W_C(t_1, t_2) = \frac{1}{2} C [u_2^2(t) - u_1^2(t)] \quad (1.18)$$

由上式可见:在 t_1 到 t_2 期间供给电容的能量只与时间端点的电值 $u(t_1)$ 和 $u(t_2)$ 有关,与在此期间其他电压无关。

例 1.6 图 1.11(a) 所示电路中的 $u_s(t)$ 波形如图 1.11(b) 所示, 已知电容 $C = 0.5\text{F}$, 求电流 i 、功率 $p(t)$ 和储能 $W_C(t)$ 。

解 写出 u_s 的函数表示式为

$$\begin{aligned} t \leq 0 \text{ 时 } & u_s = 0 \text{ V} \\ 0 \leq t \leq 1 \text{ s } & u_s = 2t \text{ V} \\ 1 \leq t \leq 2 \text{ s } & u_s = -2(t-2) \text{ V} \\ t \geq 2 \text{ s } & u_s = 0 \text{ V} \end{aligned}$$

根据电容的伏安关系,得电流为

$$\begin{aligned} t < 0 & i(t) = 0 \text{ A} \\ 0 \leq t < 1 \text{ s } & i(t) = 1 \text{ A} \\ 1 \leq t < 2 \text{ s } & i(t) = -1 \text{ A} \\ t \geq 2 \text{ s } & i(t) = 0 \text{ A} \end{aligned}$$

根据其功率关系式得

$$t < 0 \quad p(t) = 0 \text{ W}$$