

电工部分

项目 1 电路基础

【能力目标】

- (1) 了解基本电路组成以及电阻、电容、电感参数识别；
- (2) 掌握电阻的串并联、电位的计算；
- (3) 认识并掌握电路常用的正弦波、方波等信号的特点；
- (4) 掌握电流与电压的关联参考方向。

【任务分析】

找一块简单电路板，可以是实验板或家庭简单电器，拆开认识其上电路元件，查阅有关资料，了解元件功能，并绘制简单电路原理图。

电工、电子技术的巨大发展是 20 世纪取得的伟大成就之一。从电子管到晶体管，再到集成电路，当今社会已进入了固态电子迅猛发展的新时代。大规模集成电路(LSI)技术的发展，使得微型计算机以及能存储、处理各种信息的电子设备都可用硅芯片来实现。而随着当前超大规模集成(VLSI)电路技术的迅猛发展，使得一些性能更为优越的电子器件不断问世。

本项目首先研究电路的特性以及一些构成电工、电子技术的基本要素。为此，有必要对电压、电流、功率以及构成电子电路的元件进行研究，以便培养读者对电路设计与电路特性的直觉意识并加强理解。认识这些电路基础知识之后，再对有源电路，如放大器、振荡器、逻辑电路等进行研究。

任务 1 电压、电流与电阻

一、电压与电流

在日常生活和生产实践中，一般用导线、开关等将电源和用电设备或用电器连接起来，构成一个电流流通的闭合路径，这就是所谓的电路。通常我们利用电池（电化）、发电机（磁力）、太阳能电池（光能量的电转换）等装置对电荷做功就可以产生电压，然后将电压加于一些电路中，即可获得电流。如图 1.1 所示。

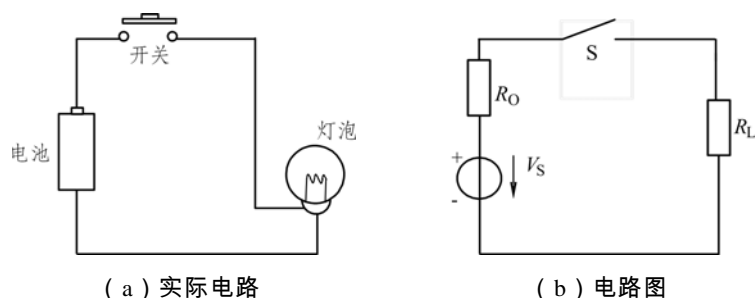


图 1.1 电路

在电路中，我们总要跟踪两个量：电压与电流，它们通常随时间变化。

电压（符号： V ，有时用 E 表示）。两点之间的电压就是将一个单位正电荷从低电位点搬移到高电位点时所做的功（损耗的能量）。等效地看，它是一个单位电荷从高电位点向低电位点下降时所释放的能量。电压又称为电位差或电动势（EMF），其单位是伏特，通常表示为伏（V）、千伏（ $1\text{ kV} = 10^3\text{ V}$ ）、毫伏（ $1\text{ mV} = 10^{-3}\text{ V}$ ）或微伏（ $1\text{ }\mu\text{V} = 10^{-6}\text{ V}$ ）。移动 1 C （库仑）电荷通过 1 V （伏）的电位差所需的功（能量）就是 1 J （焦），其中库仑是电荷的单位，近似等于 6×10^{18} 个电子的电量。

电流符号： I 。电流是电荷流经一点的流量速率，单位是安培，通常用安（A）、毫安（ $1\text{ mA} = 10^{-3}\text{ A}$ ）、微安（ $1\text{ }\mu\text{A} = 10^{-6}\text{ A}$ ）与纳安（ $1\text{ nA} = 10^{-9}\text{ A}$ ）表示。 1 A 的电流就是每秒 1 C 电荷的流动。根据习惯规定，电路中的电流被认为是正电荷从较正的电位点流向较负的电位点，尽管实际电路中的电子流动方向与这个规定相反。

要记住，电压是对电路两点之间而言的，而电流是对通过一个器件或电路连接而言的。

“电压是通过一个电阻……”的说法是完全不正确的。不过，我们也的确经常提到电路中某一点的电压，这是由于我们都已默认了它是指该点对“地”端的电位。这个“地”端是我们所知的电路中的一个公共点。

在实际电路中，电子元器件总是用导线连接在一起的。对电路中的每根导线或导体而言，我们认为导线上任何一点对地的电压都相同，即在导线上无电压降（在高频或低阻抗区域，这并不一定是正确的。现在，这种观点还是一种较好的近似）。强调这一点是为了让读者明白，一个实际电路看起来不一定像它的原理图，因为导线在电路中可以重新布线连接。

以下是一些关于电压与电流的简单规则：

(1) 流进某点的电流之和等于流出该点的电流之和（电荷守恒），称之为基尔霍夫电流定律。工程师们常称这一点为节点。由此得出以下结论：对于一个串联电路，流经电路中任

何一点的电流相同。

(2) 任何闭合环路中的电压降之和为零, 这就是基尔霍夫电压定律。

(3) 一个电路元器件损耗的功率(单位时间内的功)是 $P = VI$ 。电压用伏特表示, 电流用安培表示, 则功率为瓦特, 即焦耳/秒。

功率通常转变成热量的形式, 有时也变为机械功(如电动机)、辐射的能量(电灯、发射机)或存储的能量(电池、电容)。处理一个复杂系统中的热负荷也是系统设计的一个关键部分(例如, 在一台大型计算机中, 许多千瓦的电能量被转换成热量, 而只得到看上去与能量无较大关系的几页计算结果)。

二、电压与电流之间的关系: 电阻

这是电子电路中的核心问题。简单地说, 电阻是表示电路中电流与电压

变化关系 (I/V) 的一类元件, 比如, 电阻 (I 与 V 成正比)、电容 (I 与 V 的

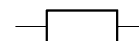


图 1.2 电阻

变化率成正比)、二极管(电流 I 只能单向流动)、热敏电阻(阻值与温度变

化相关)、光电阻(阻值与光照强弱相关)。现在先讨论最常见且用途最广的电路元件——电

阻(见图 1.2)。

(一) 电阻与电阻器

这是一个很有趣的事实, 即通过一个金属导体(或其他具有部分导电性能的材料)的电流与它的端电压成正比(在电路中, 通常选择足够粗的导线, 以使这些导线本身的压降可被忽略)。然而, 这并不是对所有导体电路通用的定律。

电阻是由某种导电材料制成的(如碳, 一种薄层金属, 即碳膜, 或具有较差导电率的导线), 电阻的每一端有引线接出。电阻的阻值描述为

$$R = \frac{V}{I} \quad (1-1)$$

其中, V 的单位为伏特 (V), I 的单位为安培 (A) 时, R 的单位即为欧姆 (Ω)。这就是著名的欧姆定律。最典型的常用电阻的阻值范围为 $1 \Omega \sim 22 M\Omega$ 。电阻的描述还可用其他参数, 如偏差(精度)、温度系数、噪声、电压系数。

简单地讲, 电阻可用于将电压转换为电流, 反之亦然。这一点似乎是电子学中的一个基本常识, 我们很快会明白这一点的重要性。

(二) 电阻的串联与并联

根据电阻 R 的定义, 可得到如下的一些简单结果:

(1) 如图 1.3 所示, 两个电阻的串联值是 $R = R_1 + R_2$, 因此, 利用电阻的串联, 总可以得到一个阻值较大的电阻。

(2) 如图 1.4 所示, 两个电阻的并联值为

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \text{ 或 } R = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \quad (1-2)$$



图 1.3 两个电阻的串联

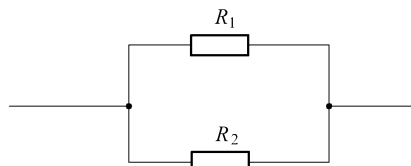


图 1.4 两个电阻的并联

因此, 利用电阻的并联, 总可以得到一个阻值较小的电阻。

初学者在对电子电路的理解过程中往往习惯依赖于复杂的代数公式, 而本书着重培养读者对电路的直觉与简化能力。关于电阻并联的应用技巧:

应用技巧 1: 一个较大的电阻与一个较小的电阻串联 (或并联) 后其阻值接近于较大的 (或较小的) 电阻。

应用技巧 2: 假设用一个 5Ω 的电阻与一个 10Ω 的电阻并联, 如果把这个 5Ω 的电阻看成两个 10Ω 电阻并联而成的, 那么整个电路就等效为 3 个 10Ω 的电阻相并联。因为 n 个相同的电阻并联后的阻值等于单个电阻值的 $1/n$, 这样, 这种情况下的电阻并联值即为 3.33Ω 。显然, 这种方案是非常便利的, 这样可使读者通过思考来迅速分析电路, 而不需要进行相应计算。

(三) 电阻的功率

一个电阻 (或任何其他器件) 损耗的功率是

$$P = IV \quad (1-3)$$

采用欧姆定律, 可得到其等效形式:

$$P = I^2 R \text{ 或 } P = V^2 / R$$

(四) 输入与输出

几乎可以在所有的电子电路上施加某种输入 (通常是电压), 然后产生某种相应的输出 (通常还是电压)。例如, 一个音频放大器可以产生一个变化着的输出电压, 该电压的变化与输入

电压的变化相似，但幅值增大 100 倍。当描述这样一个放大器时，可以想象一个已知的输入电压，然后来测量其输出电压。工程师们常用传递函数 H 来研究这个问题。 H 是已测量到的输出与所加的输入之比。对于上述的音频放大器， H 就是一个常数 ($H=100$)。我们将很快在下面章节接触到放大器的内容。然而，仅就电阻而言，我们可以研究一个非常重要的电路，即分压电路（也称为“衰减器”）。

三、分压器

现在来分析分压器，它是一种应用最广泛的电子电路之一。考查任意实用的电路，会发现其中有一半是分压电路。简单地说，分压器是这样一种电路：在给定一个输入电压的情况下，它会将一个给定的输入电压的一部分作为输出电压。最简单的分压电路如图 1.5 所示。

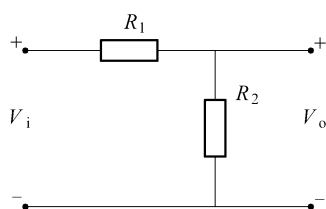


图 1.5 分压电路

一个外加的电压 V_i 导致一个较小的输出电压 V_o ，求输出 V_o 值。流经 R_1 与 R_2 的电流（假设在输出端未接负载，则流经 R_1 与 R_2 的电流相同）是

$$I = \frac{V_i}{R_1 + R_2} \quad (1-4)$$

这里沿用电阻及其串联的定义。考虑 R_2 ，则有

$$V_o = IR_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_i \quad (1-5)$$

注意：输出电压总是小于（或等于）输入电压，这就是被称为分压器的原因。

分压器常用于从一个较大且固定的（或变化的）电压中产生一个特定的电压值。例如，假设 V_i 是一个变化的电压， R_2 是一个可调电阻[见图 1.6 (a)]，可得到一种音量控制电路；更简单的是， R_1 和 R_2 的组合可由一个可调电阻（或电位器）来构成[见图 1.6 (b)]。尽管这种普通的分压电路只是作为研究电路的一种方式，但它还是非常有用的。作为研究电路的一种方式，分压器的输入电压与上部分的电阻可代表一个放大器的输出，而下部分的电阻可以代表下一级的输入。在这种情况下，由分压器方程 (1-5) 可知有多少输入电压信号作为下一级的输入。

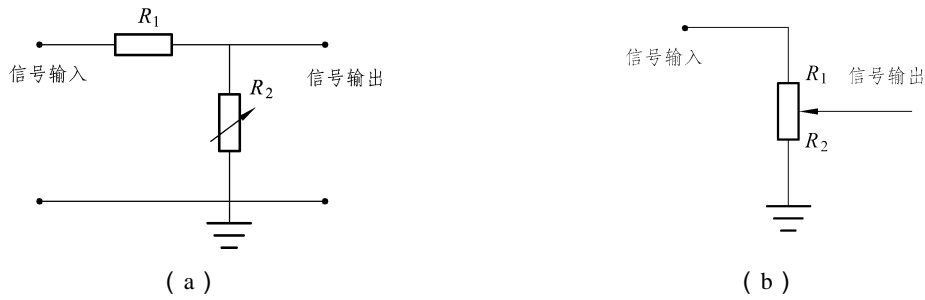


图 1.6 可调的分压电路

四、电压源和电流源

一个理想的电压源是一个二端黑匣子，不管所接的负载电阻如何，两端的输出总是一个恒定的电压。例如，当一个电阻 R 接到电压源的两端时，这就意味着电压源必须供给电阻 R 一个电流 $I = V/R$ 。而现实中的电压源只能供给一个有限的电流。并且，它通常表现为一个理想电压源与一个小电阻串联的特性。显然这个串联电阻越小，电压源的特性就越好。例如，一个标准 9 V 的碱性电池的特性就像一个理想的 9 V 电压源与一个 $3\ \Omega$ 的电阻串联，能提供 3 A 的最大短路电流（当然，这会使电池在几分钟内耗尽）。显然，电压源“喜欢”开路负载，“憎恨”短路负载。在此简单解释一下电压源的开路与短路：开路是指输出端无任何支路连接，而短路则指输出端接一段导线。电压源的符号如图 1.7 所示。电压源既可以是稳定的直流也可以是变化的交流。

一个理想的电流源也是一个二端黑匣子。不管所接的负载电阻与所加的电压如何，其总是给外部电路输出一个恒定的电流。为了达到这一点，电流源两端必须能够输出所需的任何电压。现实中的电流源（这是一个在大多数教材中被忽视的主题）总有一个输出电压的限定值，又称容量。此外，它们也不能提供一个绝对不变的输出电流。这样的电流源“偏爱”输出端短路，而“痛恨”开路。电流源的符号如图 1.8 所示。

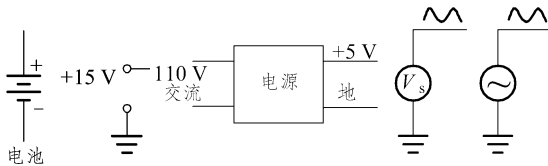


图 1.7 电压源的符号

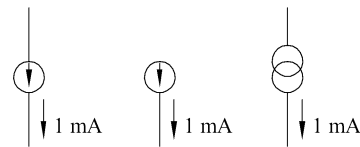


图 1.8 电流源符号

五、电压与电流的关联参考方向

1. 电流的参考极性

对于简单的电路很容易判断出电流的方向，但复杂电路却难以判定出电路中的电流方向，如电桥电路，故而无法计算求解电桥电路。为此，任意设定参考方向，并以此进行分析计算。

参考方向：假定电流方向，若求得为正值，参考方向即为实际方向；若求得为负值，参考方向则为实际的反方向。

注：以后的计算中会经常出现电流、电压的负值。

2. 电压的参考极性

电压的方向规定为电压降的方向，即从高电位指向低电位，也就是电流的方向。但通常用极性表示： $+$ 表示高电位， $-$ 表示低电位。

同电流一样，各元件电压的极性也难以提前判断出来，因此，也采用参考极性。同理若电压值为正，参考极性为实际极性，反之与实际极性相反。

3. 电压与电流的关联参考方向

电压的方向即为电流的方向，称为关联参考方向，故有时电压极性与电流方向只标出其一，如图 1.9 所示。

4. 功率性质的判断

我们接触的电气设备大多数是用电器而非电源，故用负载来衡量功率的性质更为妥当，负载只会消耗功率，故消耗功率规定为正值。

显然，电压与电流为关联方向时，计算公式取正号；若为反关联方向时，计算公式取负号。计算结果为正时，表明该元件消耗功率，通常属于负载类型；结果为负时，表明该元件提供功率，属于电源类型。

判断图 1.10 中各功率的性质。

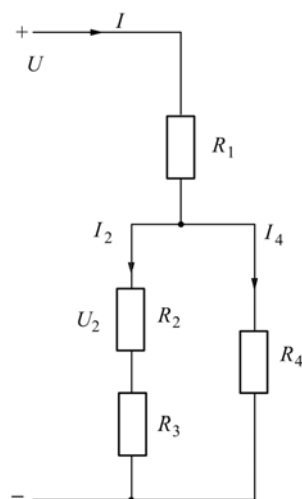
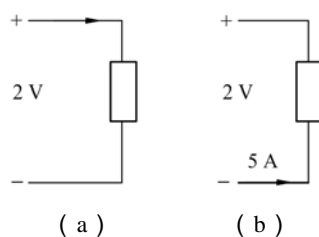


图 1.9 电压与电流的关联参考方向



(a)

(b)

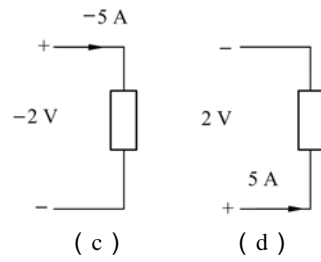


图 1.10 功率性质判断

(a) $P = 2 \times 5 = 10$ (W) 消耗功率； (b) $P = -(2 \times 5) = -10$ (W) 产生功率；

(c) $P = (-2) \times (-5) = 10$ (W) 消耗功率； (d) $P = 2 \times 5 = 10$ (W) 消耗功率。

注：提供功率的肯定是电源，但消耗功率的不一定是负载，电源充电时也消耗功率。

六、电位及其计算

电压是针对元器件的两端或电路中的两点，如 U_{R_2} 、 U_{ab} 等。实际电路中却将电源的最低端与设备的外壳连在一起，并与地端相连，称为参考点，如图 1.7 所示。而电位为电路中某点与参考点间的电压。

例 1-1 已知图 1.11 (a) 中 $R_1 = R_3 = 2 \Omega$ ， $R_2 = 4 \Omega$ ，求 U_B 。

隐藏参考点，如何求 U_B ？尽管 10 V 和 -2 V 悬空，但由于给出了电位，可以视为对参考点的两个电源，或对参考点的一段电路；而 B 点没有电位，则为纯悬空，没有电流，故 R_3 上没有电压降， $U_B = U_A$ ，求 U_B 则为求 U_A 。 $U_B = U_A = -2 + IR_2 = -2 + \frac{10 - (-2)}{R_1 + R_2} \times R_2 = -2 +$

$$\frac{10+2}{2+4} \times 4 = -2 + \frac{12}{6} \times 4 = 6 \text{ (V)}$$

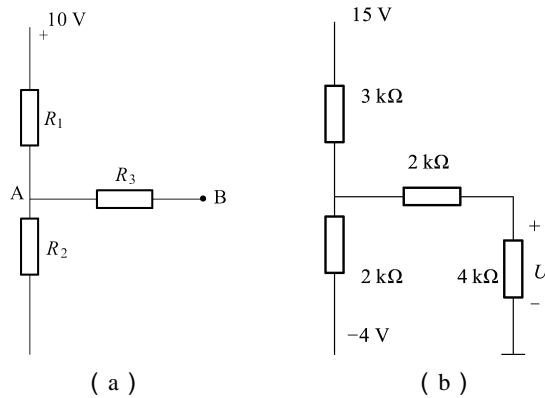


图 1.11 例 1-1 电路图

任务 2 电 容 器

电容器是一种储能元件，其最基本功能是储存电荷。电容器储存电荷的能力用电容量表示，基本单位是法拉，以 F 表示。由于法拉的单位太大，因而电容量的常用单位是微法 (μF) 和皮法 (pF)。

在电路中电压与电流发生变化，就会用到两种在直流电路中用处很少，但在交流电路中却非常有用的元件：电容与电感。这些元件与电阻相结合即组成三位一体的无源线性电路，构成了几乎所有电路的基础。尤其是电容，它差不多是每种电路应用的基本元件，可用于波形产生、滤波、阻塞与旁路，也用于积分器与微分器中。在与电感结合应用时，它们可构成一种特性尽可能尖锐的滤波器，以便从背景噪声中滤出所需的信号。

一、电容的分类与性质

电容器的分类方法很多，按其结构可分为固定电容器、半可变电容器、可变电容器三种；按照有无极性可分为有极性电容和无极性电容。其在电路中的表示符号如图 1.12 所示，有两根引线接出，并具有如下性质：

$$Q = CV \quad (1-6)$$

上式的意义是：在一个具有 C 法拉的电容两端跨接电压 V 时，该电容的一个极板上就有电荷 Q 存储，而在另一个极板上也有电荷 $-Q$ 存储。

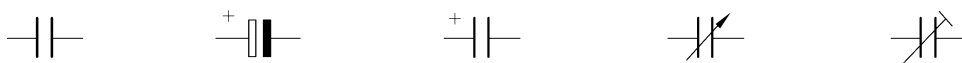


图 1.12 电容器在电路中的表示符号

电容可近似看作一个依赖频率的电阻元件。这样就可用它构成一个依赖频率的分压电路。例如，在一些（旁路、耦合）应用场合，就需要用到这一点。但在其他（滤波、能量存储、谐振电路等）应用场合，就需要对电容具有更深刻的理解。例如，尽管电流能流过电容，但因电压与电流是正交的（ 90° 相位差），所以电容不会损耗功率。取式（1-6）导数，可以得到

$$I = C \frac{dV}{dt} \quad (1-7)$$

因此，电容比电阻复杂得多，流过的电流并不与电压成比例，而是与电压关于时间的变化率成比例。如果按 1 V/s 的速率改变加在 1 F 电容两端的电压，就相当于要供给其 1 A 的电流；相反地，如果提供 1 A 的电流，那么电容的电压按 1 V/s 变化。由此看来， 1 F 的电容是非常大的，我们通常只用到微法 (μF) 或皮法 (pF) 的电容。例如，给 $1 \mu\text{F}$ 的电容提供 1 mA 的电流，那么，它两端的电压将以 1000 V/s 的速度上升。一个 10 ms 脉宽的脉冲电流将会使

该电容的端电压上升 10 V (见图 1.13)。

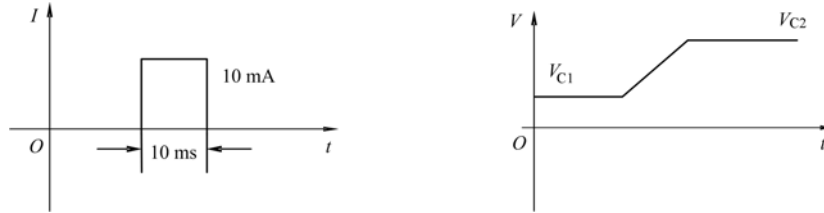


图 1.13 电容的电流、电压变化曲线

二、RC 电路：随时间变化的 V 与 I

当讨论交流电路时，总是采用两种可能的探讨方法。可以讨论相对于时间变化的 v 与 i ，或者也可以涉及它随信号频率变化的振幅。这两种探讨方法均有它们自己的优点，我们将按照具体的情形来选择一种最方便使用的方法。

具有电容的电路的有何特征？为了回答这个问题，先研究简单的 RC 电路（如图 1.14 所示）。根据电容的公式，得到

$$C \frac{dV}{dt} = I = -\frac{V}{R} \quad (1-8)$$

式 (1-8) 得到的是一个微分方程，它的解是

$$V = Ae^{-t/RC} \quad (1-9)$$

因此，一个已充电的电容与电阻并联之后将放电，如图 1.15 所示。

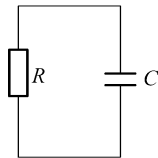


图 1.14 简单的 RC 电路

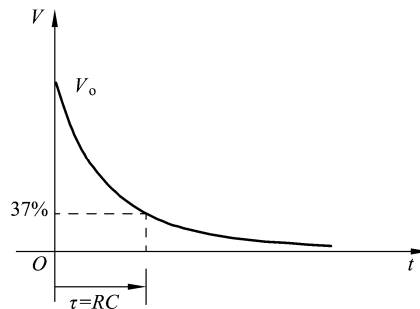


图 1.15 电容放电曲线

(一) 时间常数

式 (1-9) 中的 RC 乘积称为电路的时间常数，如果电阻 R 的单位为欧姆，电容 C 的单位为法拉，那么， RC 乘积的单位为秒。例如，一个 $1 \mu\text{F}$ 的电容并接在 $1.0 \text{ k}\Omega$ 电阻之后，该 RC 电路的时间常数即为 1 ms ；如果该电容初始充至 1 V ，则初始电流为 1.0 mA 。

如图 1.16 所示充电电路，在 $t=0$ 时刻，电路接上电源。然后，关于这个电路的方程是

$$I = C \frac{dV}{dt} = \frac{V_i - V}{R} \quad (1-10)$$

它的解是

$$V = V_i + Ae^{-t/RC} \quad (1-11)$$

上式中的常数 A 是由初始条件 (见图 1.17) $t=0$ 处 $V=0$ 来确定的, 因此 $A = -V_i$, 便有

$$V = V_i + (-V_i) \cdot e^{-t/RC} = V_i(1 - e^{-t/RC}) \quad (1-12)$$

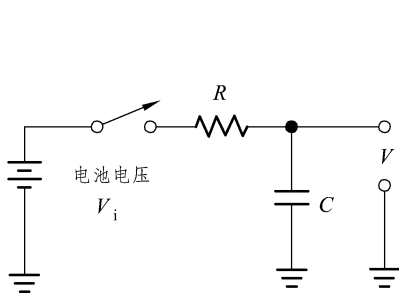


图 1.16 RC 充电电路

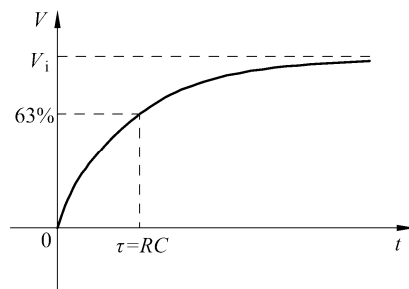


图 1.17 充电曲线

(二) 衰减至平衡状态

最终 (当 $t \gg 5RC$ 时), V 升至 V_i (常用“ $5RC$ 经验准则”: 在 5 倍的时间常数内, 一个电容充电或放电至最终值的 1% 范围内)。如果将 V 变化至一个其他值 (譬如 0), 那么 V 将以指数因子 $e^{-t/RC}$ 朝着那个新值下降。

显然, 要问的下一个问题可能是: 对于任意的 $V_i(t)$, $V(t)$ 是什么? 这一问题的答案已涉及非齐次微分方程, 可由标准方法来求解。可求得

$$V(t) = \frac{1}{RC} \int_{-\infty}^t V_i(\tau) e^{-(t-\tau)/RC} d\tau \quad (1-13)$$

任务 3 电感与变压器

一、电 感

如果我们对电容有所了解, 就不难理解如图 1.18 所示的电感, 因为它们与电容密切相关。

电感中的电流变化率取决于它两端所加的电压，而电容中的电压变化率则依赖于流过它的电流。电感电压的定义式是

$$V = L \frac{dI}{dt}$$

(1-14)

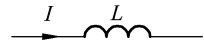


图 1.18 电感

其中， L 称为电感，单位是亨利（H 或 mH、 μ H 等）。

在电感两端加一电压会引起电流以指数函数形式上升（对于电容，一个恒定电流会引起其电压以指数函数形式上升）；1 V 的电压加于 1 H 的电感上会产生每秒增加 1 A 的电流。

如同容性电流一样，感性电流也不是与电压成正比的。此外，与电阻情形也不同，与感性电流相关的功率（ $V \cdot I$ ）并没有转化成热量，但仍以能量的形式存储在电感的磁场中。

普通电感的电路符号看起来像一个线圈，这是它最简单又最具本质的形式。其他形式的电感还有绕在不同的磁芯材料的线圈，因为磁性材料可以有效增加线圈的电感量。

二、变压器

变压器是一种包含两个紧密耦合线圈的装置，这两个线圈分别称为初级与次级。在其初级侧加一交流电压，会引起次级电压出现。次级电压以变压器匝数比的倍数（正比）增加，而对应的次级电流则与匝数比的倍数成反比。显然，这是因为功率总是不变的。如图 1.19 所示显示了一个层叠铁芯变压器的电路符号（这种变压器用于 50 Hz 的交流电源变换）。

变压器的功率传输效率相当高（输出功率非常接近输入功率）。因此，升压变压器能输出较高的电压，但给出较低的电流。变压器的匝数比 n 将次级的阻抗变换至初级并呈 n^2 倍出现。如果次级开路（未带负载），那么初级只会出现很小的电流。

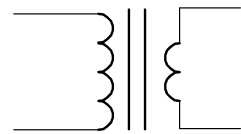


图 1.19 变压器

在电子仪器设备中，变压器有两个重要的功能。它们能将交流电源线上的电压改变至一个有用的值（通常是较低的电压值），这个较低的电压可用于实际电路。因为变压器的初次级绕组是相互绝缘的，还能将电子装置与电源进行隔离。电源变压器（专门用于 110 V 的电源线）能输出大量不同类型的次级电压与电流。例如，输出电压可以低至几伏或高至几千伏，输出电流可以从几毫安至几百安变化。典型的用于电子仪器中的变压器的次级电压为 10 ~ 50 V，而输出电流的额定值为 0.1 ~ 5 A。