

难,但由于这个网络中存在的电源比较多,看起来比较复杂。不过,在前面的第3章已经讨论了这类问题的求解,这里不包含任何新的内容。首先来求电流,从左上端的节点开始,可以看到 $i_R(0^+) = 4 - 5 = -1 \text{ A}$ 。然后考虑右上端的节点,可以得到 $i_C(0^+) = -1 + 5 = 4 \text{ A}$ 。因此,显然有 $i_L(0^+) = 5 \text{ A}$ 。

下一步来考虑电压的求解。根据欧姆定律,可得 $v_R(0^+) = 30(-1) = -30 \text{ V}$ 。对于电感,根据 KVL 可得 $v_L(0^+) = -30 + 150 = 120 \text{ V}$ 。最后,包括已知的 $v_C(0^+) = 150 \text{ V}$,就得到了所有在 $t = 0^+$ 上的值。

练习

9.6 如图 9.20 所示电路,设 $i_s = 10u(-t) - 20u(t) \text{ A}$, 求 (a) $i_L(0^-)$; (b) $v_C(0^+)$; (c) $v_R(0^+)$; (d) $i_L(\infty)$; (e) $i_L(0.1 \text{ ms})$ 。

答案: 10 A; 200 V; 100 V; -20 A; 2.07 A

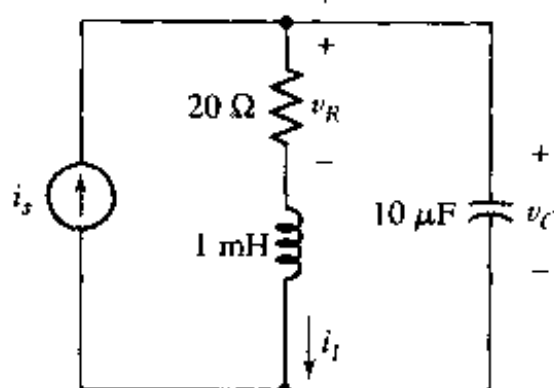


图 9.20

例 9.5 如图 9.18 所示电路,重新画出如图 9.21 所示,通过首先求出 $t = 0^+$ 时 3 个电压和 3 个电流的一阶导数来完成其初始条件的计算

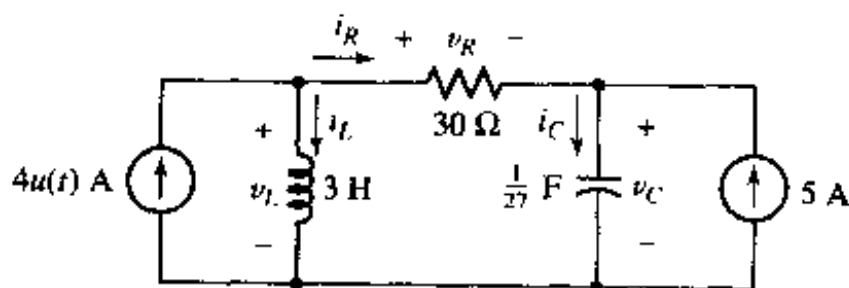


图 9.21 重新画出的例题 9.5 中的图 9.18 所示的电路

首先来考虑两个储能元件。对于电感:

$$v_L = L \frac{di_L}{dt}$$

特别是:

$$v_L(0^+) = L \left. \frac{di_L}{dt} \right|_{t=0^+}$$

于是:

$$\left. \frac{di_L}{dt} \right|_{t=0^+} = \frac{v_L(0^+)}{L} = \frac{120}{3} = 40 \text{ A/s}$$

类似地:

$$\left. \frac{dv_C}{dt} \right|_{t=0^+} = \frac{i_C(0^+)}{C} = \frac{4}{1/27} = 108 \text{ V/s}$$

注意到,对于导数,KCL和KVL仍然适用,于是可以求出其他4个导数。例如,对图9.21中左边的节点有:

$$4 - i_L - i_R = 0, \quad t > 0$$

于是有:

$$0 - \frac{di_L}{dt} - \frac{di_R}{dt} = 0, \quad t > 0$$

因此得到:

$$\left. \frac{di_R}{dt} \right|_{t=0^+} = -40 \text{ A/s}$$

用类似的方法可以求出其他3个导数的初始值为:

$$\left. \frac{dv_R}{dt} \right|_{t=0^+} = -1200 \text{ V/s}$$

$$\left. \frac{dv_L}{dt} \right|_{t=0^+} = -1092 \text{ V/s}$$

和

$$\left. \frac{di_C}{dt} \right|_{t=0^+} = -40 \text{ A/s}$$

在结束讨论如何确定所需要的初始条件值之前,需要指出,前面至少略去了一种求解它们的有效方法,即通过首先对初始电路列出一般的节点或者回路方程,然后代入在 $t=0^-$ 时已知为零的电感电压和电容电流的值,然后就可以得到在 $t=0^-$ 的其他几个电压或电流的值,并容易求出剩余的量。对 $t=0^+$ 可以进行类似的分析。这是一种很重要的分析方法,尤其是对于那些不能采用前面简单的循序渐进的方法来分析的复杂电路,必须采用这种方法。

下面求解图9.21所示电路的响应 $v_C(t)$ 。当两个电源均不起作用时,电路表现为一个串联RLC电路,容易求出 s_1 和 s_2 分别为 -1 和 -9 。仅通过观察就可以得到受迫响应;不过,如果必要,可以通过画出电路的直流等效来求出受迫响应,这时的等效电路与图9.19(a)类似,只是多了一个4A电流源。求出受迫响应为150V,于是:

$$v_C(t) = 150 + Ae^{-t} + Be^{-9t}$$

和

$$v_C(0^+) = 150 = 150 + A + B$$

或

$$A + B = 0$$

然后求导有:

$$\frac{dv_C}{dt} = -Ae^{-t} - 9Be^{-9t}$$

和

$$\left. \frac{dv_C}{dt} \right|_{t=0^+} = 108 = -A - 9B$$

最后,得到:

$$A = 13.5 \quad B = -13.5$$

和

$$v_C(t) = 150 + 13.5(e^{-t} - e^{-9t}) \quad \text{V}$$

9.7.3 求解过程的简单回顾

下面对前面的求解过程做一个总结。当希望确定一个简单三元件 RLC 电路的暂态特性时,首先必须确定要分析的是串联电路还是并联电路,以便于使用正确的 α 的表达式。这两个方程分别为:

$$\alpha = \frac{1}{2RC} \quad (\text{并联 } RLC)$$

$$\alpha = \frac{R}{2L} \quad (\text{串联 } RLC)$$

下一步,判断电路响应的类型。对于两个电路, ω_0 均为:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

如果 $\alpha > \omega_0$, 电路为过阻尼, 自由响应具有以下形式:

$$f_n(t) = A_1 e^{s_1 t} + A_2 e^{s_2 t}$$

其中:

$$s_{1,2} = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}$$

如果 $\alpha = \omega_0$, 电路为临界阻尼, 并且:

$$f_n(t) = e^{-\alpha t} (A_1 t + A_2)$$

最后, 如果 $\alpha < \omega_0$, 得到的为欠阻尼响应:

$$f_n(t) = e^{-\alpha t} (A_1 \cos \omega_d t + A_2 \sin \omega_d t)$$

其中:

$$\omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$$

最后, 判断电路是无源电路还是有源电路。如果在开关切换或不连续过程结束后独立源在电路中不起作用, 那么电路为无源电路, 自由响应即为完全响应。而如果有独立源存在, 那么为有源电路, 必须确定受迫响应, 这时的完全响应为上面两个响应的和:

$$f(t) = f_f(t) + f_n(t)$$

这对于电路中的任意电流或电压均适用。最后一步, 根据给定的初始条件求出待定的常量。

练习

- 9.7 如图 9.22 所示电路, 设 $v_s = 10 + 20u(t)$ V, 求 (a) $i_L(0)$; (b) $v_C(0)$; (c) i_L, f ; (d) $i_L(0.1\text{s})$ 。

答案: 0.2 A; 10 V; 0.6 A; 0.319 A

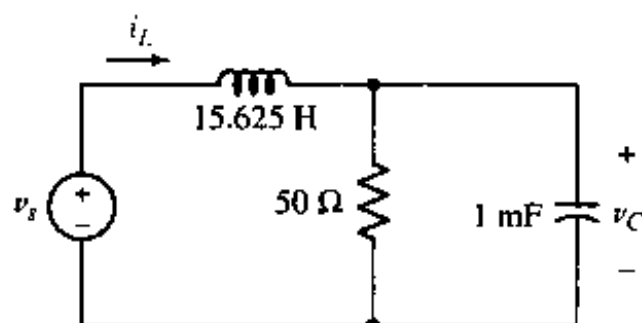


图 9.22

实际应用

对汽车悬挂减震系统的建模

在引言中提起过,可以将本章中的一些概念扩展到电路分析之外。事实上,前面研究过的微分方程的一般形式可以在很多其他领域看到——所需要做的不过是“翻译”新的参数名词。例如,考虑图 9.23 所示的简单的汽车悬挂减震系统。活塞不是附在汽缸上,而是同时附在弹簧和车轮上,因此运动的部分是弹簧、活塞和车轮。

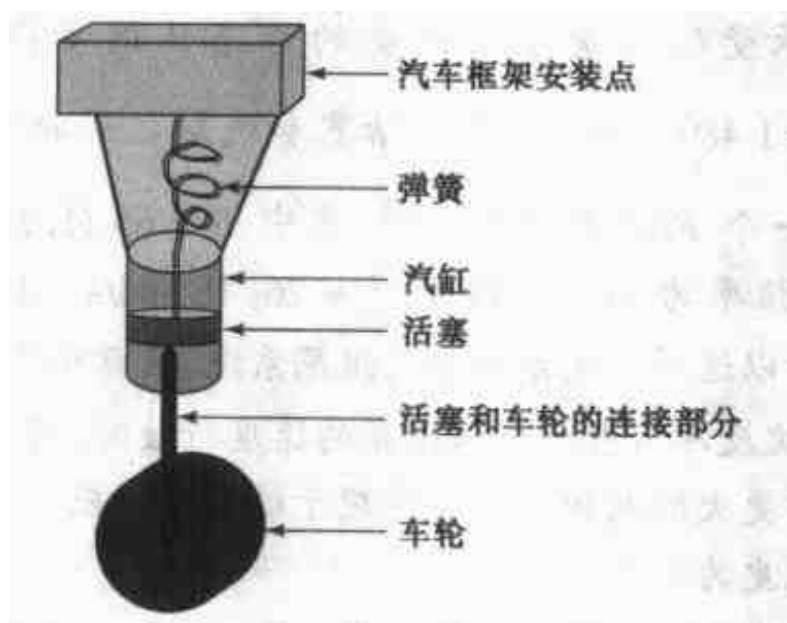


图 9.23 汽车悬挂减震系统的简单模型,这里只是用来说明本章讨论的方法和概念应用的广泛性

首先通过分析这个过程中存在的作用力来对这个物理系统进行建模。定义位置函数 $p(t)$,它描述活塞在汽缸中的位置,然后将作用在弹簧上的力写成:

$$F_s = Kp(t)$$

其中, K 称为倔强系数,单位为 lb/ft ^①。作用在车轮上的力 F_w 等于车轮的质量乘以它的加速度,即:

$$F_w = m \frac{d^2 p(t)}{dt^2}$$

其中 m 的单位为 $\text{lb} \cdot \text{s}^2/\text{ft}$ 。需要考虑的最后一个(但不是最小的)力是作用在活塞上的摩擦力:

$$F_f = \mu_f \frac{dp(t)}{dt}$$

^① lb 为磅,其中 $1 \text{ lb} = 0.4536 \text{ kg}$ 。 ft 为英尺, $1 \text{ ft} = 0.3048 \text{ m}$ ——编者注。

其中, μ_f 为摩擦系数, 单位为 $\text{lb}\cdot\text{s}/\text{ft}$ 。

根据基础物理课程可知, 作用于该系统的所有力的和必然为零, 所以:

$$m \frac{d^2 p(t)}{dt^2} + \mu_f \frac{dp(t)}{dt} + Kp(t) = 0 \quad (9.24)$$

在我们的学术生涯的某个阶段, 求解这类方程似乎是场噩梦, 不过它们将不再是了, 因为如果将方程(9.24)与方程(9.22)和方程(9.23)比较, 立即可以看到明显的相似之处。以方程(9.22)为例, 它是描述了串联 RLC 电路响应的微分方程, 可以得到下面的对应关系:

质量	m	$\rightarrow$	电感	L
摩擦系数	μ_f	$\rightarrow$	电阻	R
倔强系数	K	$\rightarrow$	电容的倒数	C^{-1}
位置量	$p(t)$	$\rightarrow$	电流量	$i(t)$

所以, 如果讨论的是英寸^① 而不是安培, 是 $\text{lb}\cdot\text{s}^2/\text{ft}$ 而不是 H , 是 ft/lb 而不是 F , 是 $\text{lb}\cdot\text{s}/\text{ft}$ 而不是 Ω , 那么可以将在建模 RLC 电路中新学到方法应用到对汽车减震器的估算。

假定汽车车轮的典型重量为 70 lb, 通过将它除以地球重力加速度 ($32.17 \text{ ft}/\text{s}^2$), 得到车轮的质量为 $m = 2.176 \text{ lb}\cdot\text{s}^2/\text{ft}$ 。汽车的总重量为 1 985 lb, 弹簧静态(在没有乘客时)压缩量为 4 英寸。通过将各减震器承受的重量除以弹簧的静态压缩量得到倔强系数, 所以 $K = \left(\frac{1}{4}\right) \times (1\,985) \times (3 \text{ ft}^{-1}) = 1\,489 \text{ lb}/\text{ft}$ 。还已知活塞和汽缸之间的摩擦系数为 $65 \text{ lb}\cdot\text{s}/\text{ft}$ 。因此, 可以将这个减震器用一个 RLC 电路来建模, 其中 $R = 65 \Omega$, $L = 2.176 \text{ H}$ 和 $C = K^{-1} = 671.6 \mu\text{F}$ 。减震器的谐振频率为 $\omega_0 = (LC)^{-1/2} = 26.16 \text{ rad}/\text{s}$, 阻尼系数为 $\alpha = R/(2L) = 14.94 \text{ s}^{-1}$ 。因为 $\alpha < \omega_0$, 所以这个减震系统为欠阻尼系统, 这意味着当汽车驾驶经过路上的一个坑洼时司机将感受到几次反冲。当汽车以很高的速度行驶时, 需要减小震动(即需要更大的摩擦系数, 或者电路模型中更大的电阻), 这时对应于过阻尼响应。不过, 如果驾驶在未铺平的道路上, 轻微欠阻尼的响应更为合适。

感兴趣的读者可以参看 R. W. Goody, *MicroSim PSpice for Windows*, vol. 1, 2d ed., Prentice Hall, 1998, 在那里可以找到用 RLC 电路建模悬挂减震系统更详细的讨论。

9.8 无损耗 LC 电路

如果在并联 RLC 电路中电阻为无限大, 或者在串联 RLC 电路中电阻为零, 就得到一个简单 LC 回路, 在这个回路中响应可以永久维持。首先来看一个这种电路的例子, 然后讨论不使用任何电感如何得到同样的响应。

考虑图 9.24 所示的无源电路, 为方便计算, 这里使用了大电感 $L = 4 \text{ H}$ 和大电容 $C = \frac{1}{36} \text{ F}$ 。假定 $i(0) = -\frac{1}{6} \text{ A}$ 和 $v(0) = 0$, 得到 $\alpha = 0$ 和 $\omega_0^2 = 9 \text{ s}^{-1}$, 所以 $\omega_d = 3 \text{ rad}/\text{s}$ 。如果忽略指数衰减项, 则电压 v 为:

① 1 英寸 = 2.54 cm ——编者注。

$$v = A \cos 3t + B \sin 3t$$

因为 $v(0) = 0$, 所以得到 $A = 0$ 。下一步, 对电压求导并计算导数在 $t = 0$ 时的值:

$$\left. \frac{dv}{dt} \right|_{t=0} = 3B = -\frac{i(0)}{1/36}$$

又已知 $i(0) = -\frac{1}{6}$, 因此 $t = 0$ 时 $dv/dt = 6 \text{ V/s}$, 于是必然有 $B = 2 \text{ V}$, 所以:

$$v = 2 \sin 3t \text{ V}$$

这是一个无阻尼的正弦振荡, 换句话说, 这个电压响应不随时间衰减。下面来看不采用 LC 电路如何得到相同的电压。我们希望写出 v 满足的微分方程, 然后用一组运放来得到该微分方程的解。尽管这里是针对一个特定的例子来进行讨论, 不过它是一种通用的方法, 可以应用到任何线性齐次微分方程中。

对图 9.24 所示 LC 电路, 选取 v 为变量, 并令向下流过电感与流过电容的电流和为零:

$$\frac{1}{4} \int_{t_0}^t v dt' - \frac{1}{6} + \frac{1}{36} \frac{dv}{dt} = 0$$

求导, 得到:

$$\frac{1}{4} v + \frac{1}{36} \frac{d^2 v}{dt^2} = 0$$

或

$$\frac{d^2 v}{dt^2} = -9v$$

为了求解该方程, 采用运放作为积分器。假定微分方程的最高导数项, 为 $d^2 v/dt^2$, 出现在结构图中的 A 点。这里, 使用 7.6 节中讨论过的积分器进行积分, 其中 $RC = 1$ 。因为输入为 $d^2 v/dt^2$, 所以积分器的输出必然为 $-dv/dt$, 其中符号的改变是由于积分器使用了一个反相放大器。前面分析这个电路时已经得到 dv/dt 的初始值为 6 V/s , 于是, 在积分器中必须设置 -6 V 的初始值。负的一阶导数现在就成了第二级积分器的输入, 因此它的输出为 $v(t)$, 并且初始值为 $v(0) = 0$ 。现在, 只需要将 v 乘以 -9 就可以得到 A 点对应的二阶导数。乘以 -9 即放大 9 倍并改变符号, 容易采用反相运放来完成这个过程。

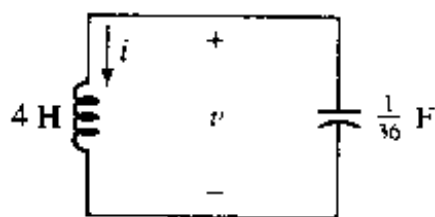


图 9.24 这个电路为无损电路, 如果 $v(0) = 0$, $i(0) = -\frac{1}{6} \text{ A}$, 它的输出为无阻尼的正弦振荡 $v = 2 \sin 3t \text{ V}$

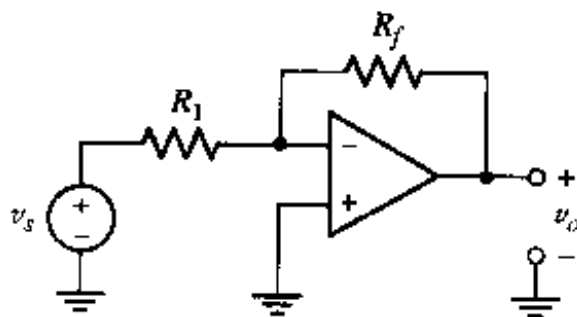


图 9.25 一个反相运放电路, 假定其中的运放为理想运放, 其增益为 $v_o/v_i = -R_f/R_1$

图 9.25 画出了一个反相放大器电路。对于理想运放, 输入电流和输入电压均为零, 于是向右流过 R_1 的电流为 v_i/R_1 , 而向左流过 R_f 的电流为 v_o/R_f 。因为它们的和为零, 所以有:

$$\frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_f}{R_1}$$

因此,可以通过设置恰当的值来得到 -9 的增益,例如取 $R_f = 90 \text{ k}\Omega$, $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ 。

如果在每个积分器中取 R 为 $1 \text{ M}\Omega$, C 为 $1 \mu\text{F}$,那么对于各积分器:

$$v_o = - \int_0^t v_i dt + v_o(0)$$

反相放大器的输出现在就成了在 A 点的输入,这组运放的结构如图 9.26 所示。如果左边的开关在 $t = 0$ 时刻闭合,同时两个初始条件开关打开,则第二个积分器的输出将为无阻尼的正弦波 $v = 2 \sin 3t \text{ V}$ 。

注意到,图 9.24 所示的 LC 电路和图 9.26 所示的运放电路具有相同的输出,但是运放电路中不含有任何电感,它只是工作起来像含有一个电感,它的输出端与地之间的电压即为所需的正弦电压。因为通常情况下电感比较笨重,而且昂贵,损耗也大(因此与“理想”模型符合得不那么好),所以避免使用电感的电路设计将更实用,更经济。

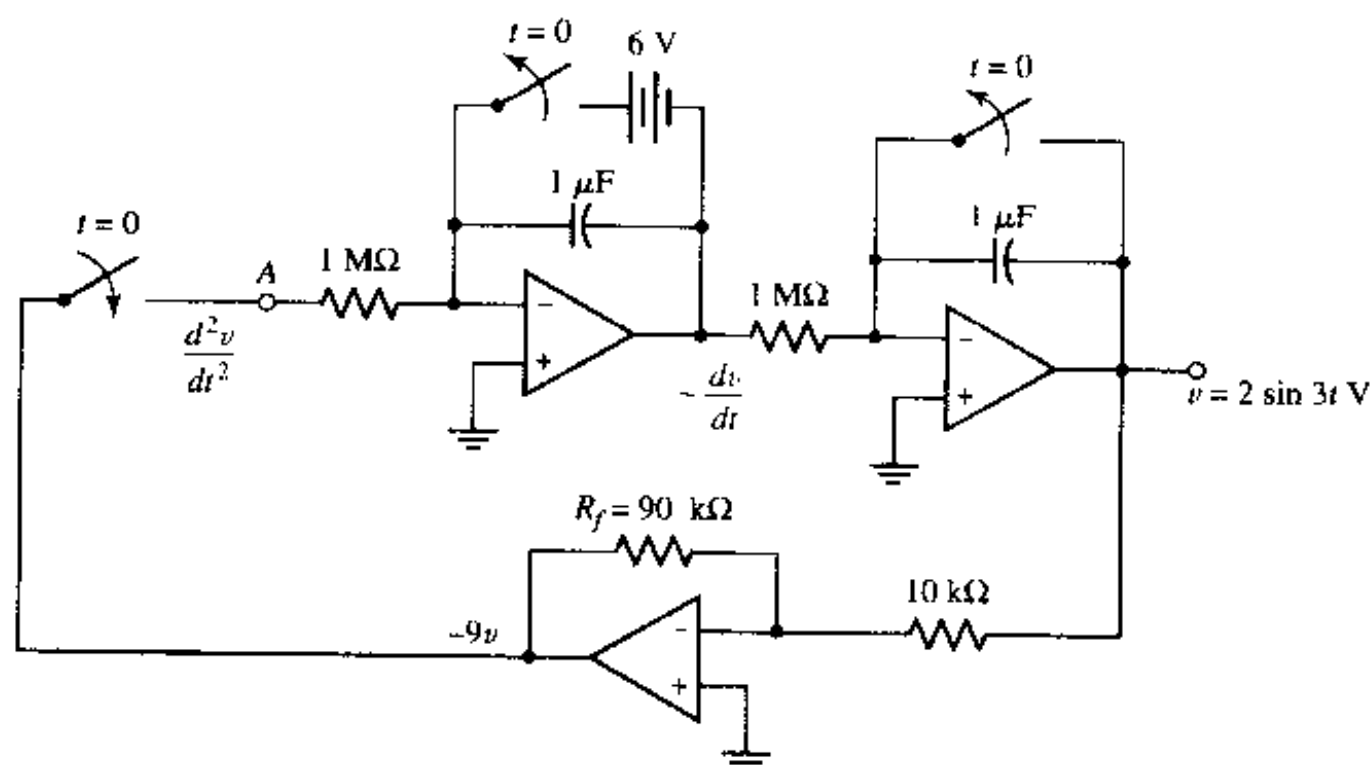


图 9.26 两个积分器和一个反相放大器相连接用以求解方程 $d^2 v/dt^2 = -9v$

练习

- 9.8 对于图 9.26 所示电路,如果其输出表示图 9.27 所示电路的电压 $v(t)$,确定图 9.26 中 R_f 的值和两个初始电压值。

答案: $250 \text{ k}\Omega$; 400 V ; 10 V

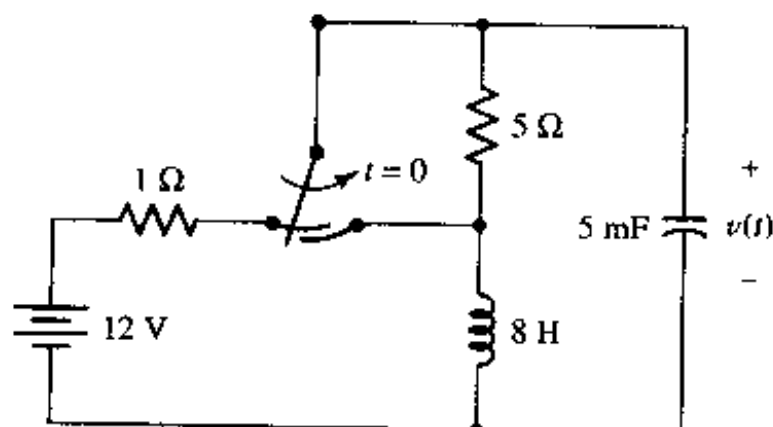


图 9.27

9.9 小结与复习

- 对于含有两个储能元件但不能采用串联或并联方法进行组合的电路,需要用二阶微分方程来描述。
- 串联和并联 RLC 电路可归结为下面三类的一种,取决于 R 、 L 和 C 值的相对大小:
过阻尼($\alpha > \omega_0$)
临界阻尼($\alpha = \omega_0$)
欠阻尼($\alpha < \omega_0$)
- 对串联 RLC 电路, $\alpha = R/2L$ 和 $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ 。
- 对并联 RLC 电路, $\alpha = 1/2RC$ 和 $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ 。
- 过阻尼响应的典型形式为两个指数项的和,其中的一项往往比另一项衰减快,例如 $A_1 e^{-t} + A_2 e^{-6t}$ 。
- 临界阻尼响应的典型形式为 $e^{-\alpha t}(A_1 t + A_2)$ 。
- 欠阻尼响应的典型形式为指数衰减的正弦: $e^{-\alpha t}(B_1 \cos \omega_d t + B_2 \sin \omega_d t)$ 。
- 在 RLC 电路的暂态过程中,能量在储能元件和电路的阻性部分之间转移,直到消耗完所有能量为止,电路的阻性部分充当消耗初始储存能量的作用。

习题

1. 一个无源并联 RLC 电路,包含一个 $\omega_0 L$ 为 10Ω 的电感。如果 $s_1 = -6 \text{ s}^{-1}$, $s_2 = -8 \text{ s}^{-1}$,求 R 、 L 和 C 。
2. 如图 9.28 所示电路,电容电流为 $i_C = 40e^{-100t} - 30e^{-200t} \text{ mA}$ 。如果 $C = 1 \text{ mF}$, $v(0) = -0.5 \text{ V}$,求(a) $v(t)$; (b) $i_R(t)$; (c) $i(t)$ 。
3. 某个并联 RLC 电路的固有谐振频率为 $\omega_0 = 70.71 \times 10^{12} \text{ rad/s}$,并且已知电感 $L = 2 \text{ pH}$ 。
(a) 计算 C ; (b) 确定电阻 R 的值,使得指数阻尼系数为 5 Gs^{-1} ; (c) 确定电路的奈培频率; (d) 计算 s_1 和 s_2 ; (e) 计算电路的阻尼比率。
4. 验证如果 $L = 4R^2 C$,则方程 $v(t) = e^{-\alpha t}(A_1 t + A_2)$ 是方程(9.4)的解。如果 $v(0) = 16 \text{ V}$, $dv/dt|_{t=0} = 4$,求 A_1 和 A_2 。
5. 用一根长 5 m 的 18 AWG 实芯铜导线代替练习 9.1 中的电阻。(a) 计算新电路的谐振频率; (b) 计算新电路的奈培频率; (c) 计算阻尼比率改变的百分比。

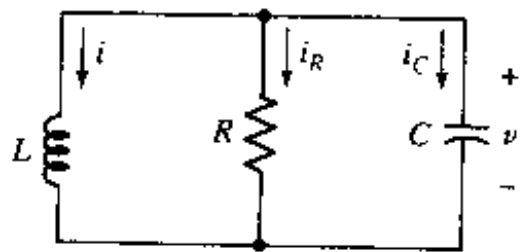


图 9.28

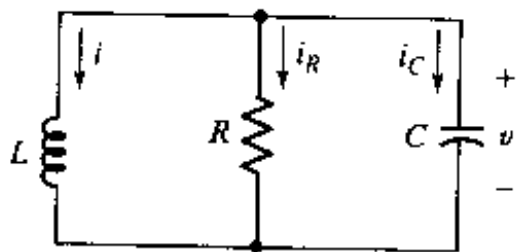


图 9.29

6. 在图 9.29 所示电路中, 设 $L = 5 \text{ H}$, $R = 8 \Omega$, $C = 12.5 \text{ mF}$, $v(0^+) = 40 \text{ V}$ 。(a), 如果 $i(0^+) = 8 \text{ A}$, 求 $v(t)$; (b) 如果 $i_C(0^+) = 8 \text{ A}$, 求 $i(t)$ 。
7. 参看图 9.29 所示电路, 设 $i(0) = 40 \text{ A}$ 和 $v(0) = 40 \text{ V}$ 。如果 $L = 12.5 \text{ mH}$, $R = 0.1 \Omega$, $C = 0.2 \text{ F}$ 。(a) 求 $v(t)$ 和 (b) 画出 $0 < t < 0.3 \text{ s}$ 时 i 的草图。
8. 如图 9.30 所示电路, 求出 $i_L(t)$ 的表达式。
9. 求图 9.31 中 $t \geq 0$ 时 $i_L(t)$ 的表达式。

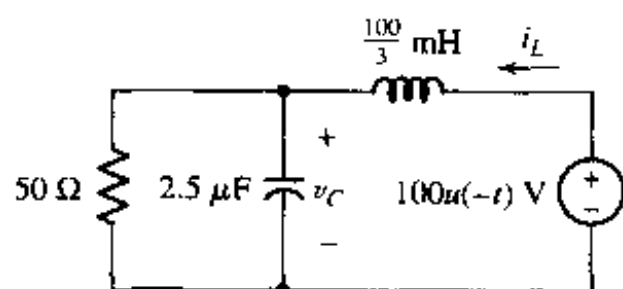


图 9.30

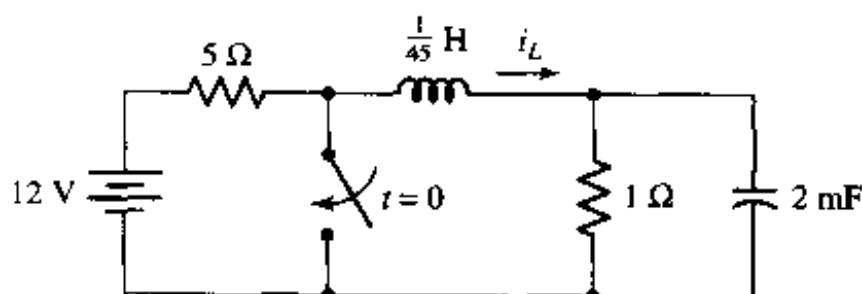


图 9.31

10. 图 9.32 所示电路已处在该状态很长的时间, 在 $t = 0$ 开关闭合后, 求 (a) $v(t)$; (b) $i(t)$; (c) $v(t)$ 的下降时间。
11. 如图 9.33 所示电路, 电感的大小为 1250 mH , 如果已知电容初始存储能量为 390 J , 电感初始存储能量为零, 求 $v(t)$ 。
12. 参看图 9.33 所示电路, (a) L 为多大时, 电路的暂态响应形式为 $v = Ae^{-4t} + Be^{-6t}$? (b) 如果 $i_R(0^+) = 10 \text{ A}$ 和 $i_C(0^+) = 15 \text{ A}$, 求 A 和 B 。

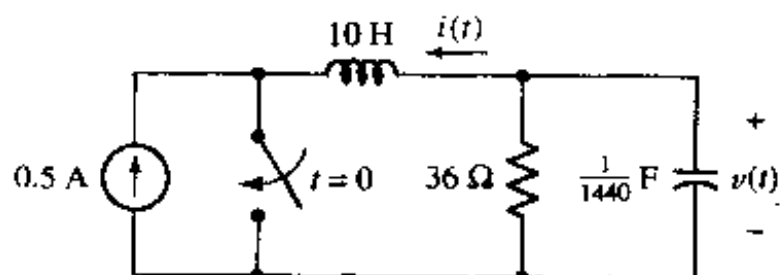


图 9.32

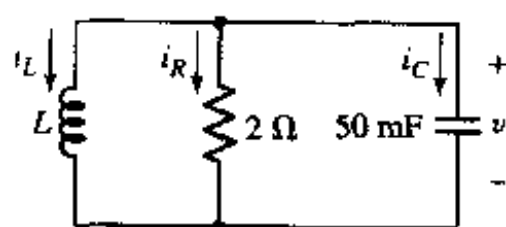


图 9.33

13. 图 9.34 所示电路中的开关已打开很长的时间, 求 (a) $v_C(0^+)$; (b) $i_C(0^+)$; (c) $v_C(t)$; (d) 画出 $v_C(t)$ 的图形; (e) 如果 $v_C(t) = 0$, 确定 t ; (f) 求电路的下降时间。
14. 图 9.35 所示电路中的开关在 $t = 0$ 前已闭合很长的时间, (a) 求 $i_A(0^-)$; (b) 求 $i_A(0^+)$; (c) 求 $v_C(0^-)$; (d) 求 $t > 0$ 时的与 L 和 C 并联的等效电阻; (e) 求 $i_A(t)$ 。

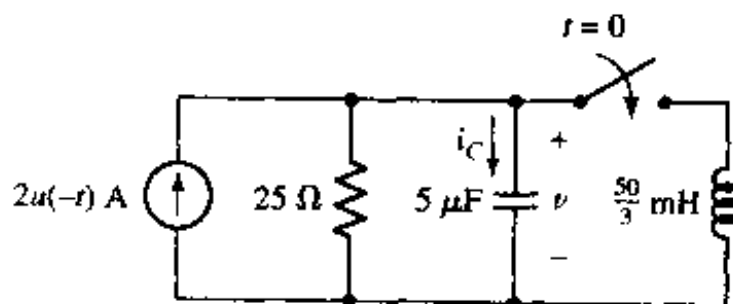


图 9.34

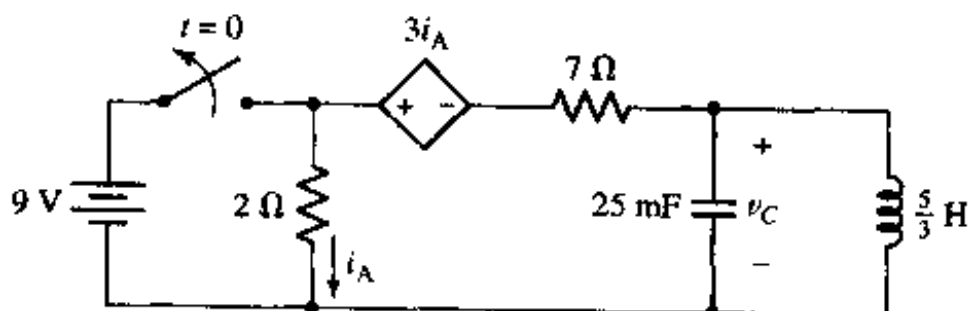


图 9.35

15. 两个一角硬币用温度为 80 K 的 1 mm 厚的冰层隔开。具有电感为 $4\ \mu\text{H}$ 的一个钇钡氧化铜超导线圈(电阻为零)不小心从实验室工作台上被风吹落,其两端恰好分别与两枚硬币相触。这里的冰层含有杂质离子,这使得它导电。需要多大的冰层使这个奇特结构的电路表现为一个过阻尼的并联 RLC 电路?
16. (a)图 9.30 所示电路需要用什么样的新阻值才能达到临界阻尼?(b)使用这个新电阻值,求 $t > 0$ 时 $v_C(t)$ 的表达式。
17. 改变图 9.31 所示电路中电感的值,直到电路达到临界阻尼。(a)这个新电感的值为多大?(b)求 $t = 5\ \text{ms}$ 的 i_L ;(c)求出下降时间。
18. 在图 9.29 中的电路,设 $v(0) = -400\ \text{V}$, $i(0) = 0.1\ \text{A}$ 。如果 $L = 5\ \text{mH}$, $C = 10\ \text{nF}$, 电路处于临界阻尼:(a)求 R ;(b)求 $|i|_{\max}$;(c)求 $i_{\max}$ 。
19. 在习题 15 描述的情况下,冰层必须具有多大的电阻以得到一个临界阻尼的电路。
20. 某个并联 RLC 电路的 $\alpha = 1\ \text{ms}^{-1}$, $R = 1\ \text{M}\Omega$, 已知其处于临界阻尼状态。假定电感的值可以用表达式 $L = \mu N^2 A/s$ 计算,其中 $\mu = 4\pi \times 10^{-7}\ \text{H/m}$, N 为线圈的匝数, A 为线圈的横截面积,以及 s 为整个线圈的轴向长度。电感的横截面积为 $1\ \text{cm}^2$, 每厘米的线圈匝数为 50, 线圈由一种新发现的元素 gluonium 构成,该元素直到 $100\ ^\circ\text{F}$ 仍保持超导状态。问该线圈有多长?
21. 如图 9.36 所示电路,求 $t > 0$ 时 $i_C(t)$ 的表达式。
22. 对图 9.37 所示电路,求 (a) $i_L(0^+)$; (b) $v_C(0^+)$; (c) $di_L/dt|_{t=0^+}$; (d) $dv_C/dt|_{t=0^-}$; (e) $v_C(t)$; (f) 画出 $-0.1 < t < 2\ \text{s}$ 时 $v_C(t)$ 的图形。

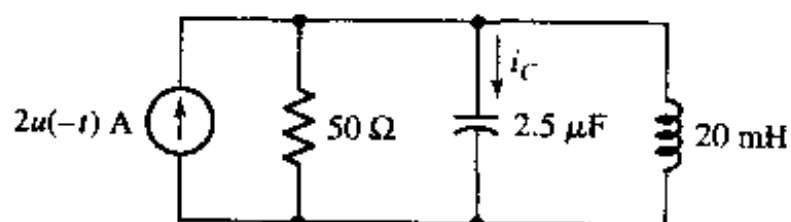


图 9.36

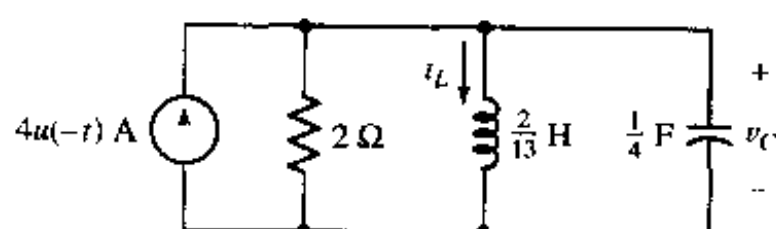


图 9.37

23. 图 9.38 所示电路,其中的开关已打开了很长的时间,在 $t = 0$ 时开关闭合。求 $t > 0$ 时的 (a) $v_C(t)$; (b) $i_{\text{sw}}(t)$ 。

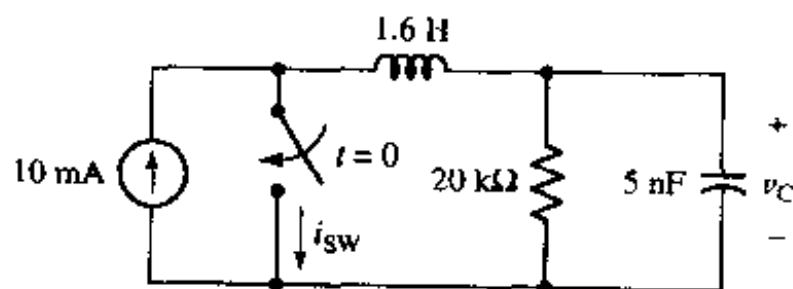


图 9.38

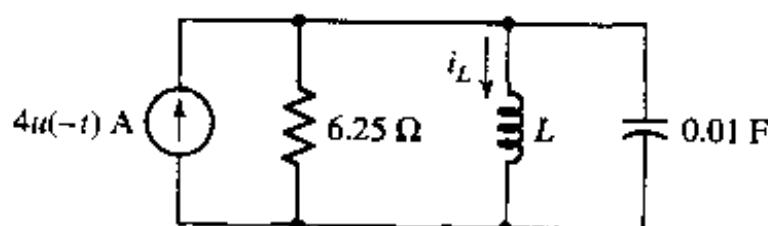


图 9.39

24. 设图 9.39 所示电路中 $\omega_d = 6\ \text{rad/s}$ 。(a)求 L ;(b)求 $i_L(t)$ 的表达式;(c)画出 $-0.1 < t < 0.6\ \text{s}$ 时 $i_L(t)$ 的曲线。
25. 对图 9.40 所示电路,求 $t > 0$ 时 $i_1(t)$ 的表达式。
26. (a)对图 9.41 所示电路,求 $t > 0$ 时 $v(t)$ 的表达式;(b)快速画出在时间区间 $0 < t < 0.1\ \text{s}$ 时 $v(t)$ 的曲线。

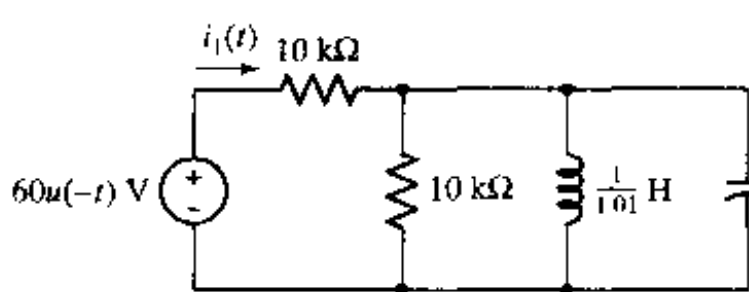


图 9.40

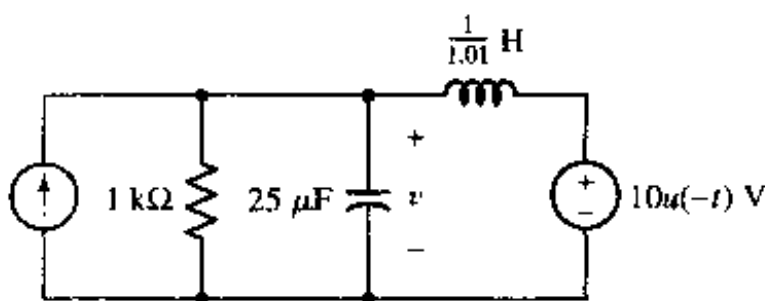


图 9.41

27. 已知图 9.8 所示电路 [$L = 7 \text{ H}$, $C = \frac{1}{42} \text{ F}$, $i(0) = 10 \text{ A}$, $v(0) = 0$] 处于欠阻尼状态, 确定 R 的值使得下降时间 t_d 为最小, 并求此时的 t_d 。
28. 需要以多大的电阻来替代图 9.34 所示电路中的 25Ω 电阻, 如果需要 $v(t)$ 为欠阻尼响应? 将你求出的电阻乘以 1 000, 并画出响应。用 PSpice 确定下降时间, 并给出正确标注好的原理图。
29. (a) 用 PSpice 建模图 9.37 所示的电路, 移去 $4u(-t) \text{ A}$ 电流源, 并通过设定合适的电感和电容初始条件得到一个等效的无源电路, 提交一个正确标注好的原理图; (b) 用 Probe 画出电流 $i_L(t)$, 并与手算得到的解相比较。用 Probe 求出下降时间。
30. (a) 将图 9.37 中的 2Ω 电阻替换为 5Ω 电阻, 求出 $i_L(t)$ 的表达式, 并求出 $t = 2.5 \text{ s}$ 时的解; (b) 将图 9.37 中的 2Ω 电阻替换为 0.5Ω 电阻, 求出 $i_L(t)$ 的表达式, 并求出 $t = 250 \text{ ms}$ 时的解; (c) 仿真 (a) 和 (b) 中的电路, 并在同一张图中画出各电路中的电感电流。同时提交一份标注好的原理图。
31. 如图 9.42 所示电路, 求 $t > 0$ 时 $i_L(t)$ 的表达式。
32. 如图 9.43 所示电路, 求 $t = 40 \text{ ms}$ 时 v_C , v_R 和 v_L 的值。

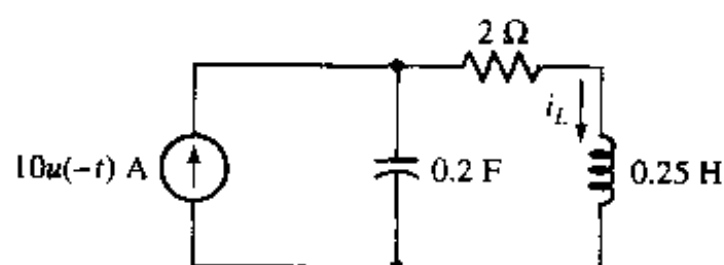


图 9.42

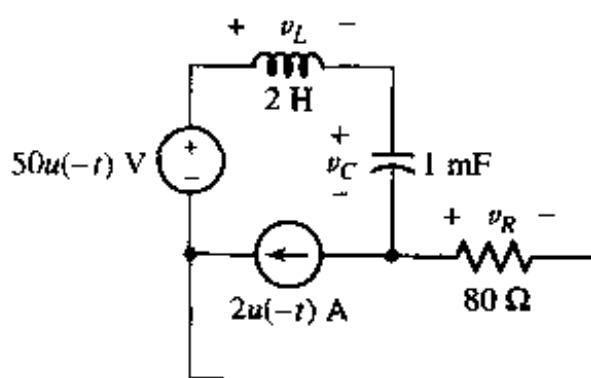


图 9.43

33. 写出习题 8 的对偶问题, 包括图 9.30 所示电路的对偶电路, 并求解该对偶问题。
34. 图 9.15(a) 电路中, 设 $R = 300 \Omega$ 和 $C = 1 \mu\text{F}$, 以及电路处于临界阻尼状态。如果 $v_C(0) = -10 \text{ V}$; $i(0) = -150 \text{ mA}$, 求 (a) $v_C(t)$; (b) $|v_C|_{\max}$; (c) $v_{C, \max}$ 。
35. 如图 9.44 所示电路, 对 $t > 0$, 求 (a) $i_L(t)$; (b) $v_C(t)$ 的表达式。

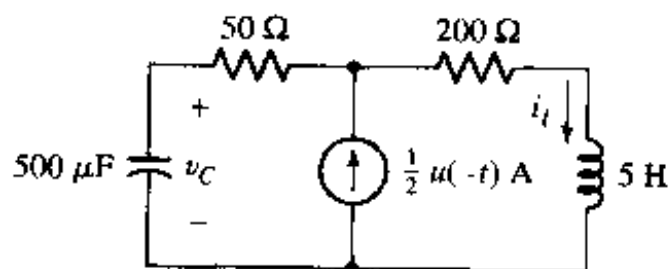


图 9.44

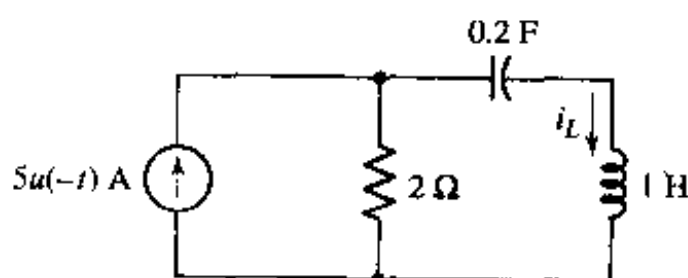


图 9.45

36. (a) 如图 9.45 所示电路, 求 $t > 0$ 时 $i_L(t)$ 的表达式; (b) 求 $|i_L|_{\max}$ 和 $i_{L,\max}$ 。
37. 图 9.46 所示电路中的开关已闭合了很长的时间, $t = 0$ 时刻开关打开, 求在 500 mH 电感上产生的电压的最大幅度, 并用 PSpice 验证你的答案。
38. 如图 9.47 所示电路, 求 $t = 2$ s 时储存在电感上的能量, 并用 PSpice 验证你的答案。

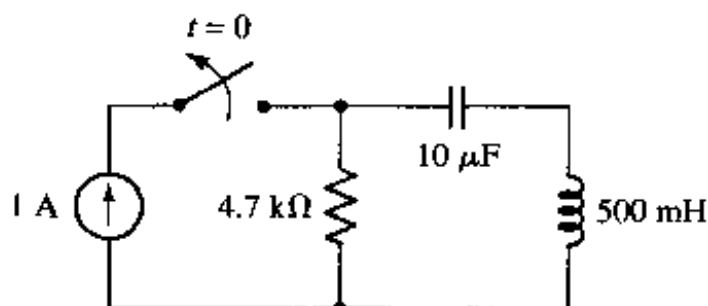


图 9.46

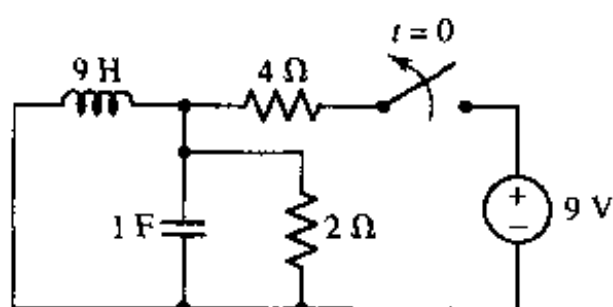


图 9.47

39. 如图 9.47 所示电路, 需要将电路中的 2Ω 电阻替换成阻值为多大的电阻才能够使得电路达到临界阻尼? 计算 $t = 100$ ms 时储存在电感的能量。
40. 一个制作精良的电容器被连接到一个 12 V 的电池上, 在电池被放回雪地汽车时已经充足电, 电容被放在位于加拿大北部的一个无线电收发室的地板上。在一次轻微地震中, 一个旧的电话机软线从书架上跌落到地板上, 其中的一端恰与电容的一端接触。该电话机软线具有 $14 \text{ m}\Omega$ 的电阻和 $5 \mu\text{H}$ 的电感, 电容初始储存能量为 144 mJ。
- (a) 在地震开始前的瞬间电容电压为多大? (b) 在电话机软线掉到汽车地板上与电容接触 1 s 后电容电压为多大? (c) 一只浸了水的北极熊为寻找食物而闯进这个收发室, 并且碰巧一只手掌放在电话器软线的未连接的一端, 而另一只手掌放在电容未连接的一端, 北极熊的肌肉抽搐了 $18 \mu\text{s}$, 然后怒吼着跑出了房间。如果熊抽搐得这么厉害时需要 100 mA 的电流, 那么浸湿的熊皮电阻为多大(提示: 北极熊没有触电而死是难以置信的, 如果你是一只北极熊, 并且看到了这个习题, 请不要在家里进行类似的尝试)?
41. 将图 9.42 所示电路中的电源替换成 $10u(t)$ A, 求 $i_L(t)$ 的表达式。
42. (a) 求图 9.48 所示电路中 $i_L(t)$ 的表达式。 (b) $t = 0$ 之后, 在什么时刻使得 $i_L(t) = 0$?
43. 将图 9.36 所示的电源替换成 $i_s = 2[1 + u(t)]$ A, 求 $t > 0$ 时 $i_C(t)$ 的表达式。
44. 将图 9.44 所示的电源替换成 $i_s = 0.5[1 - 2u(t)]$ A, 求 $i_L(t)$ 的表达式。
45. 图 9.49 所示电路中的开关已闭合很长的时间, 在 $t = 0$ 时刻打开, 求 $t > 0$ 时 $v_C(t)$ 的表达式。

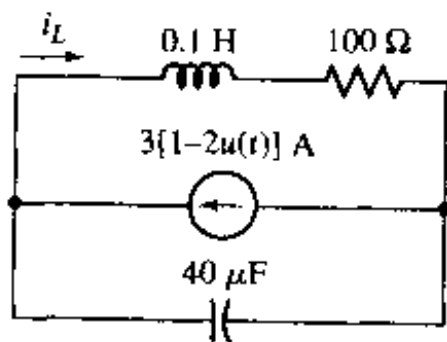


图 9.48

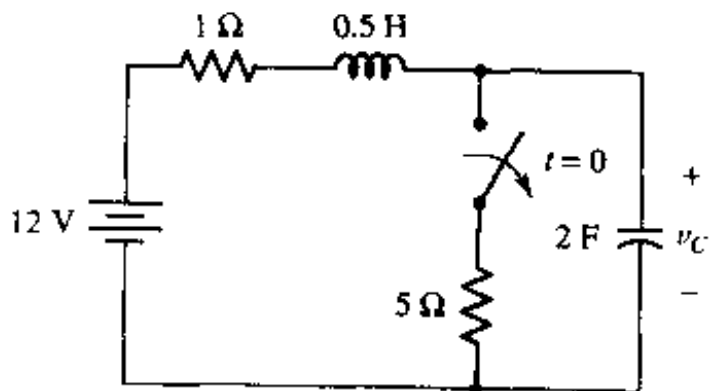


图 9.49

46. (a)如图 9.50 所示电路,求 $t > 0$ 时 $v_C(t)$ 的表达式;(b)画出 $v_C(t)$ 随 t 变化的曲线,设时间区间为 $-0.1 < t < 2 \text{ ms}$ 。

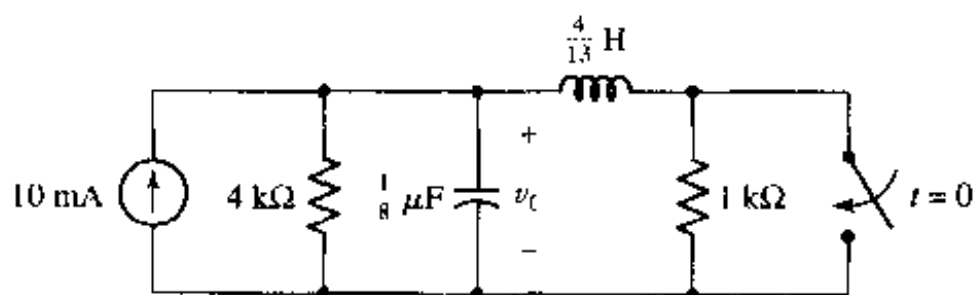


图 9.50

47. 如图 9.51 所示电路,如果 $v_s(t)$ 等于(a) $10u(-t) \text{ V}$; (b) $10u(t) \text{ V}$, 求 $t > 0$ 时 $i_s(t)$ 的表达式。
48. 如图 9.52 所示电路,如果 $v_s(t)$ 等于(a) $10u(-t) \text{ V}$; (b) $10u(t) \text{ V}$, 求 $t > 0$ 时 $i_R(t)$ 的表达式。

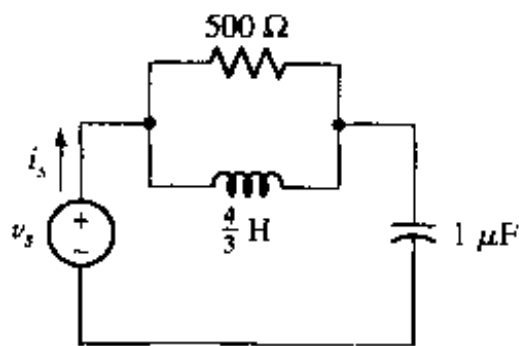


图 9.51

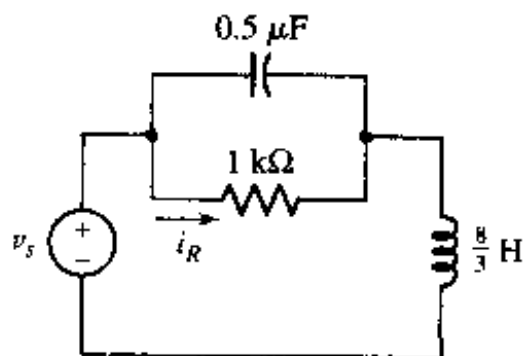


图 9.52

49. 如图 9.53 所示电路中的电流源在 $t = 0$ 时刻突然从 15 A 增大到 22 A , 求在下面时刻的电压 v_s : (a) $t = 0^-$; (b) $t = 0^+$; (c) $t = \infty$; (d) $t = 3.4 \text{ s}$, 并用恰当的 PSpice 仿真验证你的答案。
50. 将图 9.53 所示电路中的 2Ω 电阻替换为 3 H 电感, 如果在 $t = 0$ 时刻电流源从 15 A 增大到 22 A , 确定 $t = 200 \text{ ms}$ 时储存在电容的能量。用 PSpice 验证你的答案。
51. 5 mH 电感与 $25 \mu\text{F}$ 电容, 20Ω 电阻以及电压源 $v_s(t)$ 串联。该电压源在 $t = 0$ 之前为零, 在 $t = 0$ 时刻跳变到 75 V , 然后在 $t = 1 \text{ ms}$ 又变为零, 又在 $t = 2 \text{ ms}$ 跳变到 75 V , 并随后周期重复该过程。求在下面时刻的电源电流: (a) $t = 0^-$; (b) $t = 0^+$; (c) $t = 1 \text{ ms}$; (d) $t = 2 \text{ ms}$ 。
52. 图 9.53 所示电路中的电流源在 $t = 0$ 时刻突然从 15 A 降到 0 A , 然后在 $t = 1 \text{ s}$ 增长到 3 A 。画出 $v_s(t)$, 并用 PSpice 验证你的答案。
53. 一个 12 V 的电池放在位于太平洋的某个荒岛的小屋中, 其正极连接到一个 314.2 pF 的电容的一端, 而该电容与一个 $869.1 \mu\text{H}$ 的电感串联。在日本的 Bonin 岛上的地震触发了一次海啸, 海啸冲入小屋, 海水洒到一块布上, 而该布将电感-电容组合的另一端与电池的负极连接起来, 这样构成了一个串联 RLC 电路。由此产生的振荡被附近一艘船上正在监测 290.5 kHz (1.825 Mrad/s) 频率无线电导航信号的设备接收到。问潮湿的布的等效电阻是多大?

54. 设计一个电路产生衰减的正弦脉冲, 峰值电压为 5 V, 并且至少有另外三个电压幅度大于 1 V 的峰值。用 PSpice 验证你的设计。
55. 求出图 9.54 所示电路中 $t = 1 \text{ ms}$ 时电容两端的电压 $v_C(t)$ 。用 PSpice 验证你的答案。

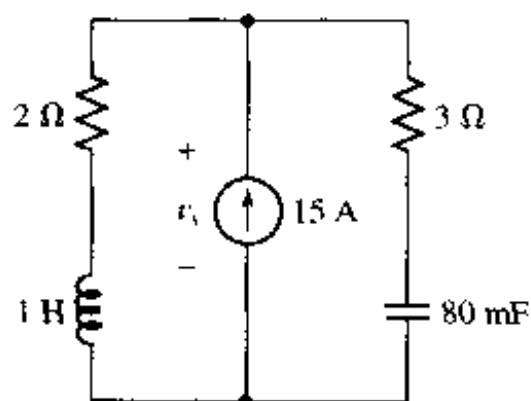


图 9.53

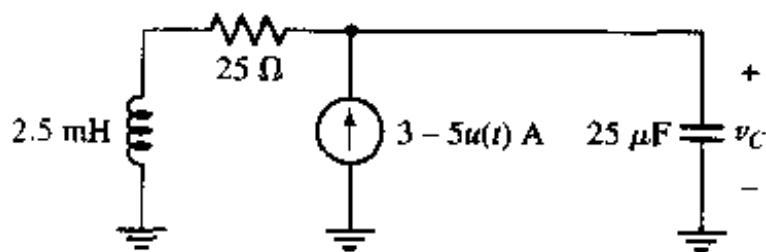


图 9.54

56. 设计一个运放电路来对图 9.55 所示 LC 电路的电压响应建模。用 $\mu\text{A}741$ 运放来仿真图 9.55 所示的电路以及你设计的电路来验证你的设计。
57. 某无源电路由一个 $1 \text{ k}\Omega$ 电阻和一个 3.3 mF 电容组成, 其中电容两端的初始电压为 1.2 V。(a) 列出 $t > 0$ 时电容两端电压 v 的微分方程; (b) 设计一个运放电路, 其输出为 $v(t)$ 。
58. 参看图 9.56, 设计一个运放电路, 当 $t > 0$ 时其输出为 $i(t)$ 。

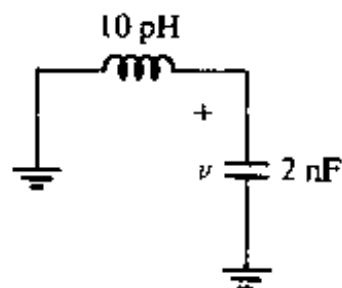


图 9.55

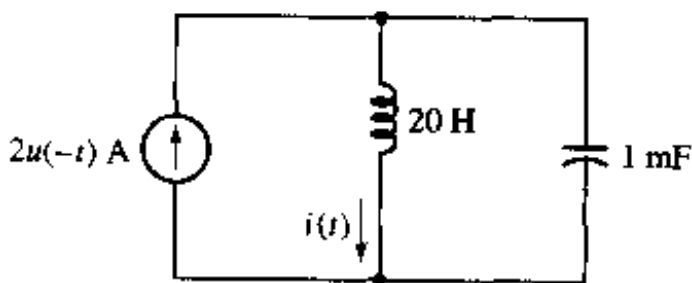


图 9.56

59. 一个 20Ω 电阻和一个 5 H 电感组成无源电路, 如果电感的初始电流为 2 A。(a) 列出 $t > 0$ 时电感电流 i 的微分方程; (b) 设计一个运放积分器, 其输出为 $i(t)$, 取 $R_1 = 1 \text{ M}\Omega$, $C_f = 1 \mu\text{F}$ 。
60. 将图 9.55 所示电路中的电容替换为 20 H 电感与 $5 \mu\text{F}$ 电容的并联组合。设计一个运放电路, 使得 $t > 0$ 时其输出为 $i(t)$ 。在 PSpice 中, 使用 LM111 运放来仿真电容 - 电感电路以及你设计的运放电路以验证你的设计。

第 10 章 正弦稳态分析

本章要点:

- 熟悉正弦函数的性质
- 掌握阻抗和导纳的概念
- 使用相量来确定正弦激励下电路的受迫响应
- 掌握相量形式的网孔分析、节点分析、叠加原理、电源变换和戴维南定理的应用

10.1 引言

线性电路的完全响应由两部分组成:自由响应和受迫响应。自由响应是电路在电路条件突然发生改变时产生的暂态响应,受迫响应则是电路在接入任意独立电源时产生的长期存在的稳态响应。到目前为止,都是考虑直流电源激励产生的受迫响应,而另一种很常见的激励函数为正弦波,例如可以用正弦波来描述市电电压,以及连接到家庭居住区与工业区的电力线上的高压电压。

在本章中,我们不关心电路的暂态响应,集中考虑电路(例如电视机、烤面包机或者电力配电网等)对正弦电压或正弦电流产生的稳态响应,并采用一种可以将积分微分方程转化为代数方程的有效分析方法来分析这样的电路。

10.2 正弦波特性

考虑一个正弦变化的电压:

$$v(t) = V_m \sin \omega t$$

其波形如图 10.1(a)和图 10.1(b)所示。正弦波的幅度为 V_m ,幅角为 ωt ,弧度频率或角频率为 ω 。图 10.1(a)为 $V_m \sin \omega t$ 随幅角 ωt 变化的曲线,可以明显看出,正弦波是周期性的,它以 2π 弧度周期重复,因此它的周期为 2π 弧度。图 10.1(b)为 $V_m \sin \omega t$ 随时间 t 变化的曲线,周期为 T 。周期为 T 的正弦曲线必然每秒出现 $1/T$ 个周期,即它的频率 f 为 $1/T$ 赫兹(Hertz),简写为 Hz。因此:

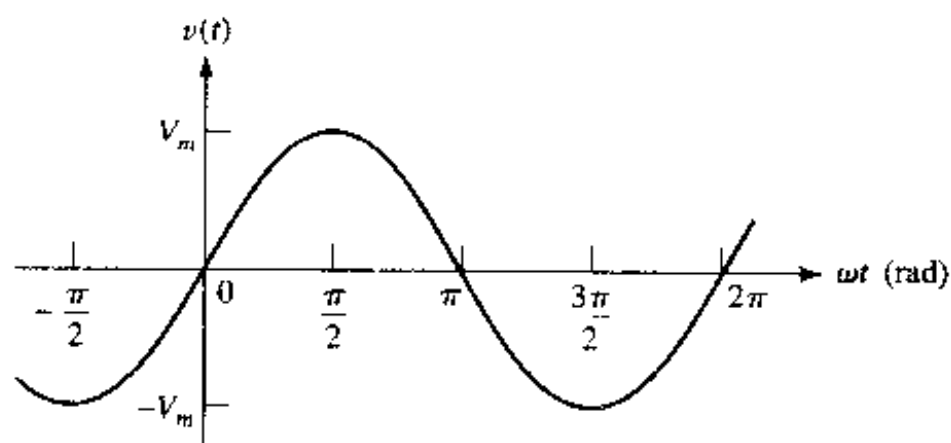
$$f = \frac{1}{T}$$

又由于:

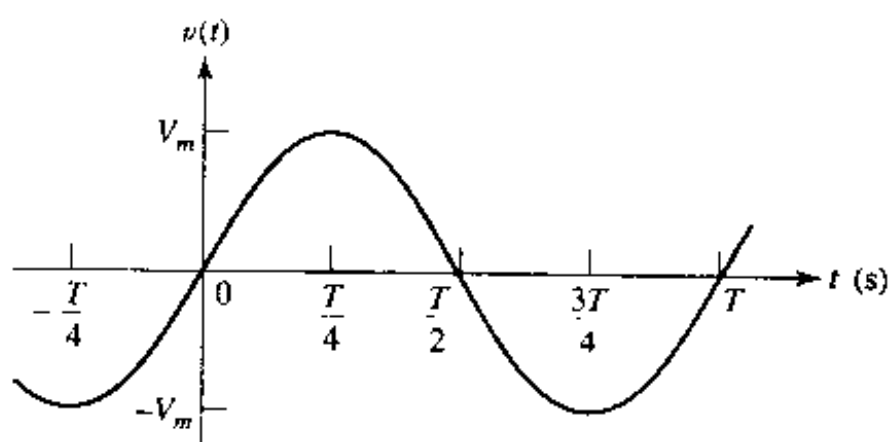
$$\omega T = 2\pi$$

于是得到频率与角频率的关系为:

$$\omega = 2\pi f$$



(a)



(b)

图 10.1 正弦波 $v(t) = V_m \sin \omega t$ 随(a) ωt 和(b)随 t 变化的曲线

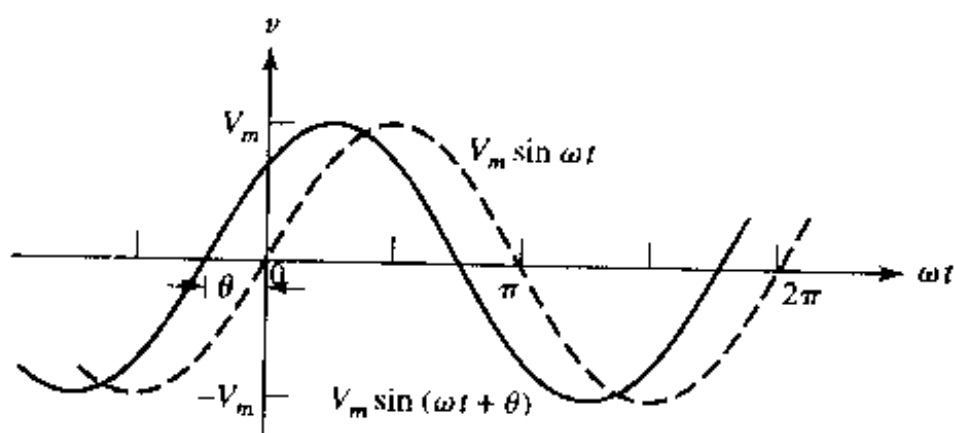
10.2.1 滞后与超前

更一般的正弦形式为：

$$v(t) = V_m \sin(\omega t + \theta) \quad (10.1)$$

这时幅角还包含一个相角 θ 。图 10.2 画出了方程(10.1)随 ωt 变化的曲线,其中相角表示从初始的正弦曲线(图中虚线所示)往左移动(即在时间上超前)的弧度。因为曲线 $V_m \sin(\omega t + \theta)$ 上的点比曲线 $V_m \sin \omega t$ 相应的点早发生 θ 弧度,或早 θ/ω 秒,所以称 $V_m \sin(\omega t + \theta)$ 比 $V_m \sin \omega t$ 超前 θ 弧度。因此,说 $V_m \sin \omega t$ 比 $V_m \sin(\omega t + \theta)$ 滞后 θ 弧度,比 $V_m \sin(\omega t + \theta)$ 超前 $-\theta$ 弧度,或比 $V_m \sin(\omega t - \theta)$ 超前 θ 弧度都是正确的。

在超前和滞后两种情况下,称两个正弦曲线异相,反之,如果相角相等,则称两个正弦曲线同相。

图 10.2 正弦 $V_m \sin(\omega t + \theta)$ 比 $V_m \sin \omega t$ 超前 θ 弧度

在电子工程中,相角通常以角度而不是弧度给出。为了避免混淆,以后总是使用角度的符号。因此,不写成:

$$v = 100 \sin\left(2\pi 1\,000t - \frac{\pi}{6}\right)$$

而通常写成:

$$v = 100 \sin(2\pi 1\,000t - 30^\circ)$$

记住,将弧度转化为角度时,只需将弧度乘以 $180/\pi$ 即可。

在计算特定时刻的表达式时,例如对于 $t = 10^{-4}$ s, $2\pi 1\,000t$ 等于 0.2π 弧度,必须将它表示为 36° 后,才能用它减去 30° 。

在比较两个正弦的相角之前:

1. 必须同时写成正弦的形式,或者同时写成余弦的形式。
2. 必须同时写成正幅度的形式。
3. 必须具有相同的频率。

10.2.2 将正弦化为余弦

从本质上说,正弦和余弦是同一个函数,但它们具有 90° 的相位差,即 $\sin \omega t = \cos(\omega t - 90^\circ)$ 。任意正弦的幅角加上或者减去 360° 的整数倍均不改变其函数值,因此,可以写出如下的式子:

$$\begin{aligned} v_1 &= V_{m_1} \cos(5t + 10^\circ) \\ &= V_{m_1} \sin(5t + 90^\circ + 10^\circ) \\ &= V_{m_1} \sin(5t + 100^\circ) \end{aligned}$$

它比:

$$v_2 = V_{m_2} \sin(5t - 30^\circ)$$

超前 130° ,或者说 v_1 比 v_2 滞后 230° ,这也是正确的,因此 v_1 还可以写成:

$$v_1 = V_{m_1} \sin(5t - 260^\circ)$$

这里假定 V_{m_1} 和 V_{m_2} 均为正数。图 10.3 画出了这两个函数的一种图形表示方法,要注意的是,两个正弦函数的频率必须相同(在本例中均为 5 rad/s),否则将它们进行比较将失去意义。通常情况下,两个正弦函数的相差应该用小于或等于 180° 的角度来表示。

后面将广泛用到超前或者滞后的概念,并且同时从数学上和图形上来区分。

练习

- 10.1 如果 $v_1 = 120 \cos(120\pi t - 40^\circ) \text{ V}$, i_1 等于: (a) $2.5 \cos(120\pi t + 20^\circ) \text{ A}$; (b) $1.4 \sin(120\pi t - 70^\circ) \text{ A}$; (c) $-0.8 \cos(120\pi t - 110^\circ) \text{ A}$, 求 i_1 滞后 v_1 的相角大小。
- 10.2 如果 $40 \cos(100t - 40^\circ) - 20 \sin(100t + 170^\circ) = A \cos 100t + B \sin 100t = C \cos(100t + \phi)$, 求 A, B, C 和 ϕ 。

答案:10.1: -60° ; 120° ; -110° ; 10.2: 27.2; 45.4; 52.9; -59.1°

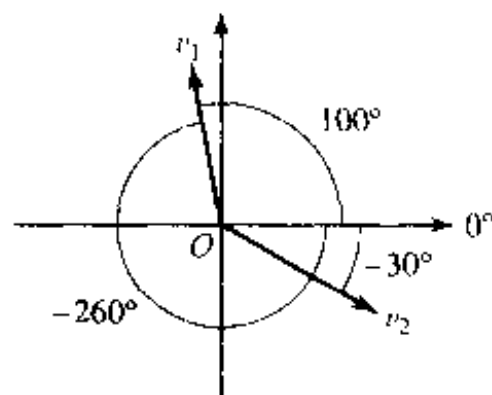


图 10.3 两个正弦函数的图形表示,其中正弦的幅度用相应箭头的长度表示,相角用相对于 x 轴正方向转过的角度表示。在本图中, v_1 比 v_2 超前 $100^\circ + 30^\circ = 130^\circ$ 。尽管也可以说 v_2 比 v_1 超前 230° ,但是相差通常用小于或等于 180° 的角度来表示

10.3 正弦函数激励下的受迫响应

现在已经熟悉了正弦函数的数学特性,下面将正弦激励函数接入简单电路并求电路的受迫响应。首先,写出接入正弦激励后电路的微分方程,微分方程的完全解由两部分组成,即通解(称为自由响应)和特解(称为受迫响应)。本章不关心电路暂时存在的响应即自由响应,只关心那些长期存在的响应即“稳态”响应。

10.3.1 稳态响应

这里,稳态响应这个词用做受迫响应的同义词,对于下面要分析的电路,通常称它们处于“正弦稳态”。可是,很多学生错误地认为,稳态总是与“不随时间变化”相联系的。对于直流激励函数产生的响应,这是正确的,但是对于正弦稳态响应,它显然是随时间变化的。所以,这里的稳态的含义是指暂态或者说自由响应已经消失后所达到的状态。

受迫响应具有激励函数的数学形式,并且它的各阶微分和一次积分形式也具有激励函数的数学形式。这样,就可以得到求解受迫响应的一种方法,即假定它的解由一些函数的和组成,这些函数均含有待定的幅度,通过直接代入微分方程可以确定这些未知幅度。不过下面将要看到,这将是一个繁琐的过程,所以需要寻找另一种更简单的求解方法。

考虑图 10.4 所示串联 RL 电路,正弦电压源电压 $v_s = V_m \cos \omega t$ 已经接入电路很长时间,电路的自由响应已经消失。需要求出受迫(或稳态)响应,它必须满足下面的微分方程:

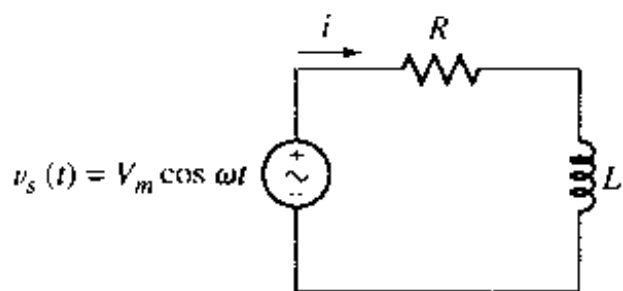
$$L \frac{di}{dt} + Ri = V_m \cos \omega t$$

通过沿回路应用 KVL 可以得到上面的方程。注意到,当电流导数为零时,电流必然具有 $i \propto \cos \omega t$ 的形式。类似地,当电流为零时,电流导数必然与 $\cos \omega t$ 成正比,这表明电流具有正弦 $\sin \omega t$ 的形式。因此,可以假设受迫响应具有以下的一般形式:

$$i(t) = I_1 \cos \omega t + I_2 \sin \omega t$$

其中 I_1 和 I_2 为实常量,由 V_m , R , L 和 ω 确定,上式不包含常数项,也不包含指数函数。将这个假定的解代入微分方程,得到:

$$L(-I_1\omega \sin \omega t + I_2\omega \cos \omega t) + R(I_1 \cos \omega t + I_2 \sin \omega t) = V_m \cos \omega t$$

图 10.4 求该串联 RL 电路的受迫响应

再对 $\sin$ 和 $\cos$ 合并同类项,得到:

$$(-LI_1\omega + RI_2)\sin \omega t + (LI_2\omega + RI_1 - V_m)\cos \omega t = 0$$

这个等式必须对所有时间 t 成立,而这只有当 $\cos \omega t$ 和 $\sin \omega t$ 前的乘积因子均为零才可能成立,所以:

$$-\omega LI_1 + RI_2 = 0 \quad \text{和} \quad \omega LI_2 + RI_1 - V_m = 0$$

联立求解,得到 I_1 和 I_2 为:

$$I_1 = \frac{RV_m}{R^2 + \omega^2 L^2}, \quad I_2 = \frac{\omega LV_m}{R^2 + \omega^2 L^2}$$

从而得到受迫响应为:

$$i(t) = \frac{RV_m}{R^2 + \omega^2 L^2} \cos \omega t + \frac{\omega LV_m}{R^2 + \omega^2 L^2} \sin \omega t \quad (10.2)$$

10.3.2 更简洁直观的方法

上面已得到了受迫响应的表达式,不过这个表达式有些复杂,可以将响应表示成包含相角的单个正弦函数或者余弦函数的形式,这样更直观一些。这里将其表示成余弦函数的形式:

$$i(t) = A \cos(\omega t - \theta) \quad (10.3)$$

至少有两种求 A 和 θ 的方法,其中可以将方程(10.3)直接代入原方程而得到,也可以令方程(10.2)和方程(10.3)这两个方程相等而得到。这里采用后一种方法,展开函数 $\cos(\omega t - \theta)$,可得:

$$A \cos \theta \cos \omega t + A \sin \theta \sin \omega t = \frac{RV_m}{R^2 + \omega^2 L^2} \cos \omega t + \frac{\omega LV_m}{R^2 + \omega^2 L^2} \sin \omega t$$

于是,比较 $\cos \omega t$ 和 $\sin \omega t$ 的系数,得到:

$$A \cos \theta = \frac{RV_m}{R^2 + \omega^2 L^2} \quad \text{和} \quad A \sin \theta = \frac{\omega LV_m}{R^2 + \omega^2 L^2}$$

为了求出 A 和 θ ,用前一个方程除以后一个方程得:

$$\frac{A \sin \theta}{A \cos \theta} = \tan \theta = \frac{\omega L}{R}$$

再将两个方程平方并相加,得:

$$A^2 \cos^2 \theta + A^2 \sin^2 \theta = A^2 = \frac{R^2 V_m^2}{(R^2 + \omega^2 L^2)^2} + \frac{\omega^2 L^2 V_m^2}{(R^2 + \omega^2 L^2)^2} = \frac{V_m^2}{R^2 + \omega^2 L^2}$$

因此:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R}$$

和

$$A = \frac{V_m}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$$

于是,得到受迫响应的另一种形式为:

$$i(t) = \frac{V_m}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \cos\left(\omega t - \tan^{-1} \frac{\omega L}{R}\right) \quad (10.4)$$

可以看到,响应的幅度与激励函数的幅度成正比。事实上,如果不是这样,那么将不满足线性性质。另外,响应的幅度还随 R, L 或 ω 的增大而减小,但并不成比例。还可以看到,电流比接入电压滞后 $\tan^{-1}(\omega L/R)$,它在 0 和 90° 之间。当 $\omega = 0$ 或者 $L = 0$ 时,电流必然与电压同相,因为前者对应于直流电压的情形,而后者对应于电阻电路的情形。这个结论与以前的结果一致。当 $R = 0$ 时,电流滞后电压 90° 。于是,如果电感遵循无源符号规则,那么电流恰好滞后电压 90° 。类似地^①,可以得到流过电容的电流超前电容两端的电压 90° 。

电流和电压之间的相位差决定于 ωL 与 R 的比值。称 ωL 为电感的感抗,单位为欧姆,它代表电感对流过的正弦电流的抵抗能力。

下面来看如何将上面的一般分析结果应用到简单串联电路以外的其他电路。

例题 10.1 如图 10.5(a)所示电路,求电流 i_L

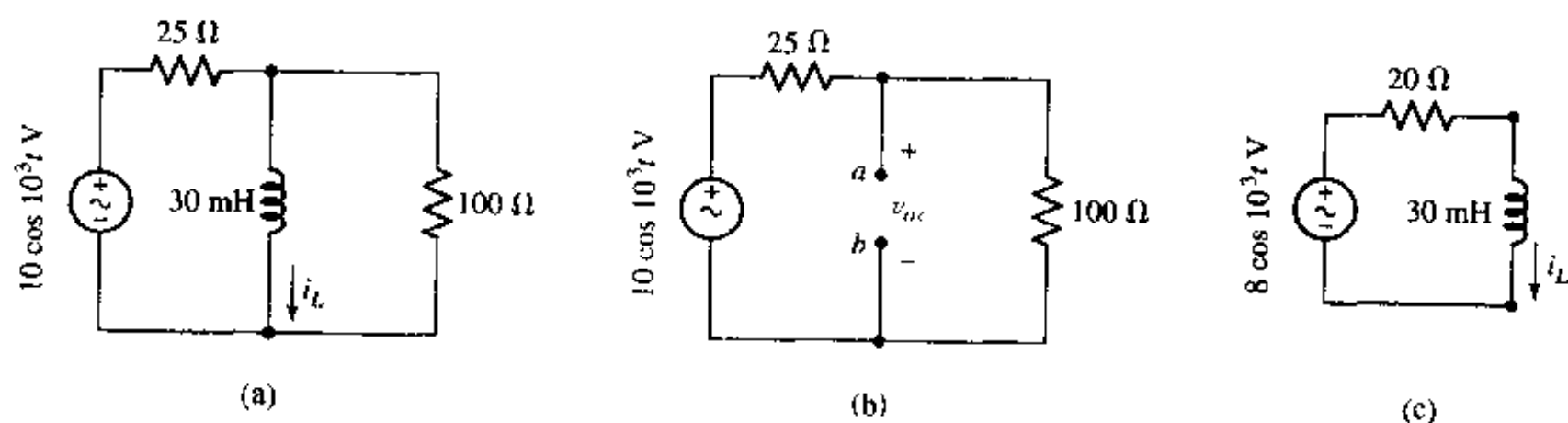


图 10.5 (a)例题 10.1 的电路,求 i_L ; (b)求端点 a 和 b 之间的戴维南等效; (c)简化后的电路

尽管这个电路只包含一个正弦电压源和一个电感,但它包含两个电阻,所以它并不是单回路电路。为了应用前面分析得到的结果,需要求出从端点 a 和 b 看过去的戴维南等效电路,如图 10.5(b)所示。

① 以前用符号 E (代表电动势 electromotive force) 来表示电压,于是那时每个学生都知道一句话“ELI the ICE man”,用它来帮助记忆在电感电路中电压超前电流(ELI),而在电容电路中电流超前电压(ICE)。现在改用 V 来表示电压,所以就不能用同样的话来记忆了(在“ELI”和“ICE”中, E 表示电压, I 表示电流, L 表示电感, C 表示电容)。