Chapter 07

直流暫態

學習目標

7-1　e 與指數函數

7-2　電阻電容暫態電路

7-3　電阻電感暫態電路

7-4　本章內容摘要

7-5　課後習題

學習綱要

1. 能瞭解 e 的緣由與 $f(x)=e^{-x}$ 圖形。
2. 能夠瞭解與計算電阻電容暫態電路的電壓與電流變化。
3. 能夠瞭解與計算電阻電感暫態電路的電壓與電流變化。

前面我們已經介紹電阻接直流電壓的實驗，我們發現其電壓與電流瞬間就達穩定狀態。但是，電容與電感就不同了，其電壓與電流要達穩定狀態需要一個時間，且此時間與電感、電容、電阻值有關。在電壓還沒穩定之前這段期間的電壓與電流變化狀況，我們稱爲暫態 (transient state)，等電壓與電流穩定了，我們稱此爲穩態 (steady state)。以下我們分別介紹電容與電感的暫態，但其暫態的描述，都與 e 與指數函數 $y=e^{-x}$、$y=1-e^{-x}$ 有關，所以，以下 7-1 節先介紹 e 與指數函數。

7-1 e與指數函數

因爲本章的實驗結果與 e 與指數函數 $f(x)=e^x$ 有關，所以我們先介紹 e 與指數函數的圖形。

範例7-1a

說明 $e \cong 2.718$ 的簡述。

實習步驟

工程與科學的指數與對數函數，通常不是以 2 或 10 爲底，而是以 e 爲底，在此簡單闡述如下：

1. 假設借款金額爲一元，年利率爲 100%，每年複利一次，則一年後的本利和爲 2 元。

   $$1\times(1+1)^1=2$$

2. 假設借款金額爲一元，年利率爲 100%，每月複利一次，則一年後的本利和爲 2.613。

   $$1\times(1+\frac{1}{12})^{12}=2.613$$

3. 假設借款金額爲一元，年利率爲 100%，每日複利一次，則一年後的本利和爲 2.714。

   $$1\times(1+\frac{1}{365})^{365}=2.714$$

4. 假設借款金額爲一元，年利率爲 100%，每秒複利一次，則一年後本利和爲 2.718。

$$1\times(1+\frac{1}{365\times24\times60\times60})^{365\times24\times60\times60}=2.718$$

5. 以上計算，請鍵入以下程式，觀察執行結果。

```
def aa(a):
    m=1*(1+1/a)**(a)
    print(m)
a=1;aa(a)              #2.0
a=12;aa(a)             #2.613
a=365;aa(a)            #2.714
a=365*24*60*60;aa(a) #2.718
```

6. 細菌的繁殖、或電容、電感的充放電等，細菌與電子的數量都非常龐大，這些非常龐大物件的成長現象，都要用 e 來解釋才能理解。也就是數量非常龐大的物件，若其一年「平均」成長 2 倍，則一年後總數量會成長爲 2.718 倍，而不是 2 倍。(平均分裂時間爲 1 年，表示有些可能 1,2,3 個月就分裂爲 2，也有些可能 12,13,14 個月才分裂爲 2，那些 1 個月就分裂爲 2 的，表示 1 年就成長爲 2^{12} 倍，將每個月的成長數量累加、平均，其值接近 2.718，所以以上擁有龐大數量物質一年後的數量平均會是接近 2.718 倍，而不是 2 倍)

指數函數

我們國中已經介紹未知數 x 的一次函數，例如，$f(x)=3x+1$；也介紹未知數 x 的二次函數，例如，$f(x)=2x^2-3x+1$；也介紹未知數 x 的倒數函數，例如，$f(x)=\frac{1}{x}$。現在則要介紹未知數 x 的指數函數，例如，$f(x)=2^x$，請留意未知數 x 出現在指數的位置。指數是高一下數學的課程，數學課很可能跟不上基電，所以我們把要用的指數運算先介紹如下：

1. 倒數關係：指數的負號代表倒數。例如：

$$2^{-x}=\frac{1}{2^x}(例如，2^{-2}=\frac{1}{2^2}=\frac{1}{4})$$

$$2^{x-y}=\frac{2^x}{2^y}(例如，2^{3-2}=\frac{2^3}{2^2}=2)$$

2. e爲底：數學介紹指數函數都是以$2 \cdot 3 \cdot \frac{1}{2}$或$\frac{1}{3}$爲底，但我們基本電學都是以$e$爲底，$e \cong 2.718$。例如：

$e^2 = e \cdot e \doteqdot 7.38$

$e^{-1} = \frac{1}{e^1} \doteqdot 0.368$

$e^{-2} = \frac{1}{e^2} \doteqdot 0.135$

以上計算的 Python 程式如下：

```
import math#載入math模組
e=math.e #使用e常數
print (e)#2.718
print(e**2)#7.38
print(e**-1)#0.368
print(e**-2)#0.135
print(e**-3)#0.05
print(e**-4)#0.02
print(e**-5)#0.006看成0
```

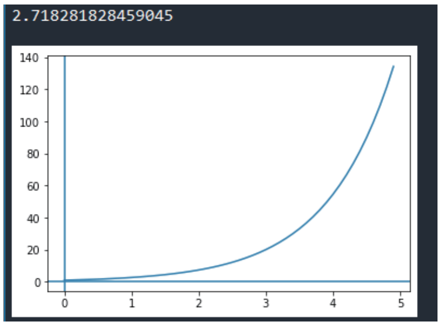
範例7-1b

繪製指數函數 $f(x) = e^x$ 圖形。

實習步驟

1. 請鍵入以下程式，觀察指數函數 $f(x) = e^x$ 圖形。

```
import matplotlib.pyplot as plt
#載入繪圖模組
import numpy as np #載入numpy 模組
print(np.e) #輸出e=2.718281828459045
x = np.arange(0, 5, 0.1)
# x爲串列，其值從0到5，dx=0.1
y=(np.e)**(x)#計算每一個x對應的y值，y也是
串列
plt.plot(x,y)#繪出函數圖形
plt.axhline(y=0)#繪出x軸
plt.axvline(x=0)#繪出y軸
plt.show() #於視窗輸出圖形
```



圖(1)　$f(x) = e^x$ 圖

2. 以上程式執行結果，如圖 (1)。
3. 圖 (1) 是 $f(x)=e^x$ 的圖形，但這並非電學所要的，我們電學需要 $f(x)=e^{-x}$，指數爲負表示整個函數倒數，所以此函數爲 $f(x)=1/e^x$，以下我們寫程式觀察此函數圖形。

範例7-1c

請寫一程式輸出 $x=0,1,2,3,4,5,6,7$ 的指數函數 $f(x)=e^{-x}$ 值。

實習步驟

1. 請鍵入以下程式，觀察指數函數 $f(x)=e^{-x}$ 的輸出結果。

```
import numpy as np #載入numpy 模組
print(np.e) #輸出e=2.718281828459045
x = np.arange(0, 8, 1)
# x爲串列，其值從0到7，dx=1
y=(np.e)**(-x)#計算每一個x對應的y值，y也是
串列
for i in range(8):
    print(x[i],end=" ")
    print(("{:7.3f}").format(y[i]))#輸
出佔七格，小數取3位
```

```
2.718281828459045
0   1.000
1   0.368
2   0.135
3   0.050
4   0.018
5   0.007
6   0.002
7   0.001
```

圖 (1)　$f(x)=e^{-x}$ 的輸出結果

2. 以上程式執行如圖 (1)。
3. 由圖(1)的結果，我們發現 $e^{-1}\fallingdotseq\frac{1}{e}=0.368$，$e^{-2}\fallingdotseq\frac{1}{e^2}=0.135$，$e^{-3}\fallingdotseq 0.05$，$e^{-4}\fallingdotseq 0.018\fallingdotseq 0.02$，$x=5$ 之後，e^{-x} 就非常小，我們就說其值趨近於0，這些值要記起來，這樣本章的計算才會快，以上運算將是本章重點。

範例7-1d

寫程式繪出 $x=0,1,2,3,4,5$ 的指數函數 $f(x)=e^{-x}$ 圖形。

操作步驟

1. 請鍵入以下程式，觀察指數函數 $f(x)=e^{-x}$ 圖形。

```
import matplotlib.pyplot as plt
#載入繪圖模組
import numpy as np #載入numpy 模組
print(np.e) #輸出e=2.718281828459045
x = np.arange(0, 8, 0.1)
# x為串列，其值從0到8，dx=0.1
y=(np.e)**(-x)#計算每一個x對應的y值，y也是
串列
plt.plot(x,y)#繪出函數圖形
plt.axhline(y=0)#繪出x軸
plt.axvline(x=0)#繪出y軸
plt.show() #於視窗輸出圖形
```

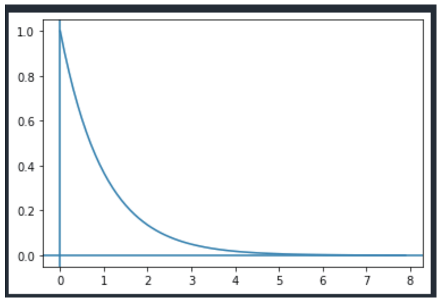


圖 (1)

2. 以上程式執行結果如圖 (1)。由圖 (1)，我們發現指數函數 $f(x)=e^{-x}$，x 大於等於 5 以後就趨近 0，此即為本章關鍵重點。

範例7-1e

寫程式輸出 $x=0,1,2,3,4,5$ 的指數函數 $f(x)=1-e^{-x}$ 之值。

操作步驟

1. 請鍵入以下程式，觀察指數函數 $f(x)=1-e^{-x}$ 的輸出結果。

```
import numpy as np #載入numpy 模組
print(np.e) #輸出 2.718281828459045
e=np.e
x = np.arange(0, 8, 1)
# x為串列，其值從0到7，dx=1
y=1-e**(-x)#計算每一個x對應的y值，y也是串列
for i in range(8):
    print(x[i],end=" ")
    print(("{:7.3f}").format(y[i]))#輸
出佔七格，小數取3位
```

```
2.718281828459045
0   0.000
1   0.632
2   0.865
3   0.950
4   0.982
5   0.993
6   0.998
7   0.999
```

圖 (1)　程式執行結果

2. 以上程式執行結果如圖 (1)，我們發現 $x>=5$ 以後 , 其值接近 1。
3. 以上x=1,f(x)≒0.632;x=2,f(x)≒0.86;x=3,f(x)≒0.95;x=4,f(x)≒0.98;x=5,f(x)≒0.99，這些值要記起來，這樣本章的計算才會快。

範例7-1f

寫程式繪出 $x=0,1,2,3,4,5$ 的指數函數 $f(x)=1-e^{-x}$ 圖形。

操作步驟

1. 請鍵入以下程式，觀察指數函數 $f(x)=1-e^{-x}$ 圖形。

```
import matplotlib.pyplot as plt
#載入繪圖模組
import numpy as np #載入numpy 模組
print(np.e) #輸出e=2.718281828459045
x = np.arange(0, 8, 0.1)
# x為串列，其值從0到8，dx=0.1
y=1-(np.e)**(-x)#計算每一個x對應的y值，y也是串列
plt.plot(x,y)#繪出函數圖形
plt.axhline(y=0)#繪出x軸
plt.axvline(x=0)#繪出y軸
plt.show() #於視窗輸出圖形
```

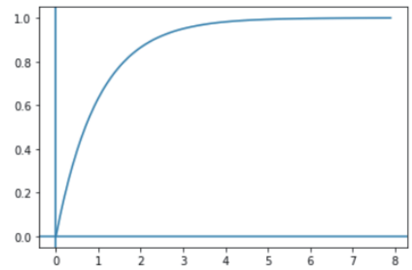


圖 (1)　$f(x)=1-e^{-x}$ 圖形

2. 以上程式執行結果如圖 (1)。由圖 (1)，我們發現指數函數，x 大於等於 5 以後就趨近 1，此即爲本章重點。

自我練習

1. 請將自己從出生到現在，年齡爲 x 軸，身高爲 y 軸，繪出函數圖，且此一圖形，可以用以下哪一函數來表示呢？

   (A) $y=3x+10$

   (B) $y=3x^2+10$

   (C) $y=\dfrac{1}{3x+1}$

   (D) $y=170(1-e^{\frac{-x}{5}})$

7-2 電阻電容暫態電路

電阻電容充電暫態

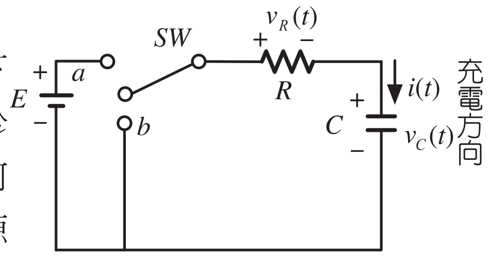


圖 7-2a

圖 7-2a 稱為電阻電容充電電路，以下簡稱 RC 充電電路。開關 SW 初始狀態位於位置 b，此時電容器放電完畢，未儲存任何電荷。當 $t=0$ 時，開關 SW 連接 a 點，電源 E 流出的電流 $i(t)$ 經 R 向電容器 C 充電（電流是順時針），電容器兩端電壓 $v_C(t)$ 從 0 隨著時間 t 的增加逐漸增加，這段時間電壓一直在上升，一直在變化，我們稱為暫態。經過一段時間後，電容器兩端的電壓 $v_C(t)$ 會因電荷被充滿而等於電源電壓 E，電流為 0，此時電壓與電流都穩定下來，不再變化，我們稱為穩態。以上充電過程中，$v_C(t)$、$v_R(t)$、$i(t)$ 的示波器函數圖形如圖 7-2b、7-2c、7-2d。

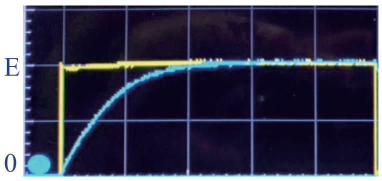


圖 7-2b　$v_C(t)$

黃色是電源，藍色是 $v_C(t)$

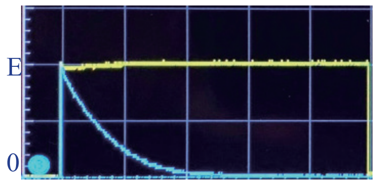


圖 7-2c　$v_R(t)$

黃色是電源，藍色是 $v_R(t)$

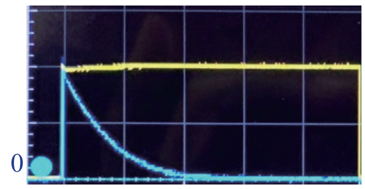


圖 7-2d　$i(t)$

黃色是電源，藍色是 $i(t)$

以上波形與 7-1 節的 $y=e^{-x}$、$y=1-e^{-x}$ 相近，經過科學家不斷實驗，我們發現都與時間 t、E、R、C 有關，且為時間 t 函數，隨著時間 t 的改變而改變，且其值可以由以下方程式表示：

$$v_C(t) = E(1-e^{-\frac{t}{RC}})\text{（伏特，V）}$$ **（公式7-2a）**

$$v_R(t) = Ee^{-\frac{t}{RC}}\text{（伏特，V）or } v_R(t)=E-v_C(t)\text{（伏特，V）}$$ **（公式7-2b）**

$$i(t) = \frac{E}{R}e^{-\frac{t}{RC}}\text{（安培，A）or } i(t)=v_R(t)/R\text{（安培，A）}$$ **（公式7-2c）**

時間常數

RC 充電電路中，電容器在充電過程電壓是由小變大，電路處在暫態，暫態時間長短是取決於電阻值與電容值乘積的大小，由實驗結果發現，電容電壓充電達到電源電壓所需時間是 $5RC$，也就是經果 $5RC$ 時間，電容電壓值穩定下來，達到穩態。因此，我們定義一個時間常數 (time constant，符號爲 τ ，讀音 tau)，其公式爲：

$\tau = RC$ （秒，s）　**（公式7-2d）**

τ ：時間常數，單位爲秒(s)。

R：電阻值，單位爲歐姆(Ω)。

C：電容值，單位爲法拉(F)。

範例7-2a

圖 (1) 是一個 RC 充電電路，時間 t 爲 0 時，電容未儲存任何電荷。試求

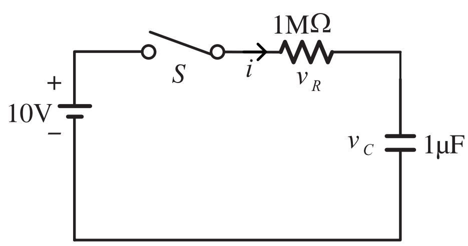


圖 (1)

(1) 此電路時間常數爲多少秒？

(2) 開關閉合瞬間 $t = 0$ 時，v_C，v_R，i 分別是多少？

(3) 開關閉合瞬間 $t = 1s$ 時，v_C，v_R，i 分別是多少？

(4) 開關閉合瞬間 $t = 2s$ 時，v_C，v_R，i 分別是多少？

(5) 開關閉合瞬間 $t = 3s$ 時，v_C，v_R，i 分別是多少？

(6) 開關閉合瞬間 $t = 4s$ 時，v_C，v_R，i 分別是多少？

(7) 開關閉合瞬間 $t = 5s$ 時，v_C，v_R，i 分別是多少？

(8) 繪出 $v_C(t)$ 圖。

(9) 繪出 $v_R(t)$ 圖。

(10) 繪出 $i(t)$ 圖。

(11) 寫程式繪出 $v_C(t)$ 與 $v_R(t)$ 函數圖形。

解

(1) 時間常數；依據公式 7-2d：

$\tau = RC = 1\text{M}\cdot 1\mu = 1\text{s}$

(2) 依據公式 7-2a、7-2b：

$v_C(t) = E(1-e^{-t/RC})$，$v_R(t) = E\cdot e^{-t/RC}$，$i(t) = \dfrac{E}{R}e^{-t/RC}$

將t=0代入以上公式，得到：

$v_C(0) = E(1-1) = 0\text{V}$，$v_R(0) = E\cdot e^{0} = 10\text{V}$，$i(0) = \dfrac{v_R(0)}{1M} = 10\mu\text{A}$

(3) t=1，t/RC=1表示經過1個時間常數，將$-t/RC$使用-1代入公式：

$v_C(1) = 10(1-e^{-1}) = 10(1-\dfrac{1}{e}) = 10(1-0.368) \risingdotseq 6.32\text{V}$

$v_R(1) = 10e^{-1} \risingdotseq 3.68\text{V}$ or $v_R(1) = E - v_C(1) = 10-6.32 \risingdotseq 3.68\text{V}$，$i(1) = \dfrac{v_R(1)}{1M} \risingdotseq 3.68\mu\text{A}$

(4) t=2，t/RC=2表示經過2個時間常數，將$-t/RC$使用-2代入公式：

$v_C(2) = 10(1-e^{-2}) = 10(1-0.135) \risingdotseq 8.65\text{V}$

$v_R(2) = 10e^{-2} \risingdotseq 1.35\text{V}$ or $v_R(2) = 10-8.65 \risingdotseq 1.35\text{V}$，$i(2) = \dfrac{v_R(2)}{1M} \risingdotseq 1.35\mu\text{A}$

(5) $v_C(3) = 10(1-e^{-3}) = 10(1-0.05) \risingdotseq 9.5\text{V}$

$v_R(3) = E - v_C(3) = 10-9.5 \risingdotseq 0.5$，$i(3) = \dfrac{v_R(3)}{R} = \dfrac{0.5}{1M} \risingdotseq 0.5\mu\text{A}$

(6) $v_C(4) = 10(1-e^{-4}) = 10(1-0.02) \risingdotseq 9.8\text{V}$

$v_R(4) = E - v_C(4) \risingdotseq 0.2\text{V}$

$i(4) = \dfrac{v_R(4)}{R} = \dfrac{0.2}{1M} \risingdotseq 0.2\mu\text{A}$

(7) $v_C(5) = 10(1-e^{-5}) = 10(1-0) \risingdotseq 10\text{V}$

$v_R(5) = 10 - v_R(5) = 10-10 \risingdotseq 0$

$i(5) = \dfrac{v_R(5)}{R} \risingdotseq 0$

(8) $v_C(t)$ 函數圖如圖 (2)。(9) $v_R(t)$ 函數圖如圖 (3)。(10) $i(t)$ 函數圖如圖 (4)。請觀察計算結果，與實驗值（圖 7-2a、圖 7-2b、圖 7-2c) 是否接近，驗證公式是否正確。

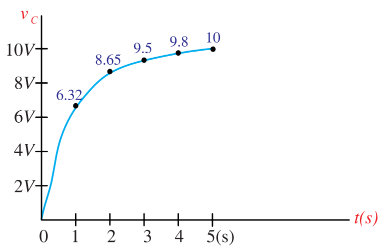


圖 (2) $v_C(t)$ 函數圖

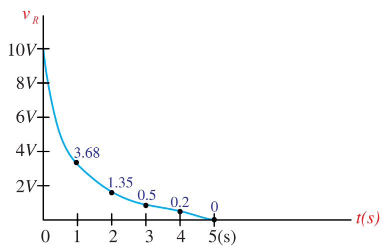


圖 (3) $v_R(t)$ 函數圖

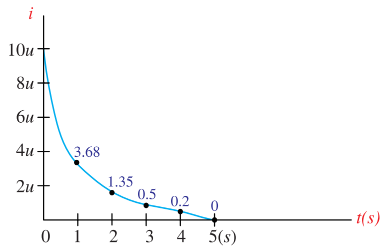


圖 (4) $i(t)$ 函數圖

(11) 撰寫程式如下，繪出 $v_C(t)$ 與 $v_R(t)$ 函式圖形。

```
import matplotlib.pyplot as plt
#載入繪圖模組
import numpy as np #載入numpy 模組
e=np.e #e=2.718281828459045
M=1000000;u=0.000001;
E=10;R=1*M;C=1*u;tau=R*C
t = np.arange(0, 5*tau, 0.1)
# t為串列，其值從0到5*tau，dx=0.1
y1=E*(1-e**(-(t/tau))) #vc(t)
y2=E*e**(-(t/tau)) #vr(t)
plt.plot(t,y1)#繪出vc(t)函數圖形,藍色
plt.plot(t,y2)#繪出vr(t)函數圖形，橘紅
色
plt.axhline(y=0)#繪出x軸
plt.axvline(x=0)#繪出y軸
plt.show() #於視窗輸出圖形
```

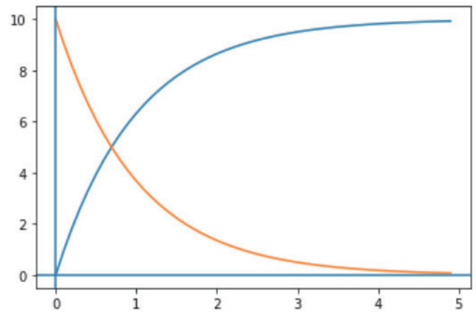


圖 (5)　程式執行圖，藍色是 $v_C(t)$，橘紅色是 $v_R(t)$

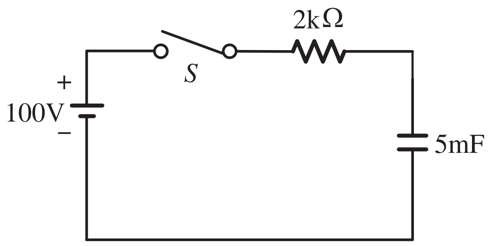
(12) 以上程式，執行結果如圖 (5)。

(13) 以上程式可繪出函數圖形，若只要求出指定時間的 v_C、v_R、i 值，則程式如下：

```
import math#載入math模組
e=math.e #使用e常數
M=1000000;u=0.000001
E=10;R=1*M;C=1*u;tau=R*C;t=1 #時間在此調整
vc=E*(1-e**(-(t/tau))) #vc(t)
vr=E*e**(-(t/tau)) #vr(t)
i=vr/R
print("vc=",vc)#6.32
print("vr=",vr)#3.68
print("i=",i)#3.68e-06
```

自我練習

1. 如右圖所示，為一個 RC 充電電路，$t=0$時，電容器未儲存任何電荷。



試求：

(1) 此電路的時間常數為多少秒？

(2) 開關閉合後，$t=0$，v_C、v_R及i分別是多少？

(3) 開關閉合後，$t=10s$，v_C、v_R及i分別是多少？

(4) 開關閉合後，$t=20s$，v_C、v_R及i分別是多少？

(5) 開關閉合後，$t=40s$，v_C、v_R及i分別是多少？

(6) 開關閉合後，$t=80s$，v_C、v_R及i分別是多少？

(7) 將以上v_C、v_R、i之值繪圖。

(8) 程式繪出$v_C(t)$與$v_R(t)$函數圖形。

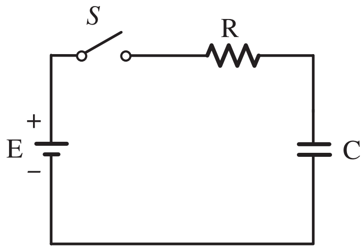
2. 電阻與電容串聯電路，電阻為 2kΩ，電容為 25μF，此電路的時間常數為何？ 統測 112

(A) 12.5ms (B) 25ms (C) 50ms (D) 100ms

3. 電阻 R_1 與電容 C_1 串聯電路，此電路時間常數為 50ms，電容 C_1 為 20μF，則電阻 R_1 為何？ 統測 110

(A) 20 kΩ (B) 2.5kΩ (C) 50Ω (D) 2.5Ω

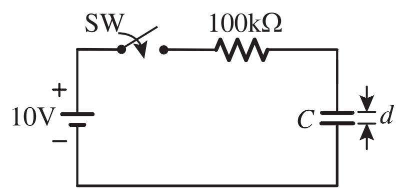
4. 如右圖所示之電路，E=100V，R=100kΩ，C=50μF，當 t=0 時將 S 閉合，該電路的時間常數τ為多少？ 台北自來水 111



(A)2.5 秒 (B)5 秒

(C)25 秒 (D)2.5Ω

5. 如右圖所示之平行板電容器 C，已知兩極板之面積為 10m^2，間距 $d=1$mm，介質相對介電係數 $\varepsilon_r=100/8.85$。若此電容器初始儲能為零，則當開關 SW 閉合後 0.1 秒時，電容器兩極板間之電場強度 (V/m) 約為何？ ($e\cong 2.718$) 統測 108



(A) 6320 (B) 3680 (C) 2880 (D) 1440

範例7-2b

圖 (1) 的電路，開關 S 閉合前，電容器未儲存任何電荷，求 S 閉合瞬間 ($t=0$)，v_C 爲何？v_R 爲何？i 爲何？

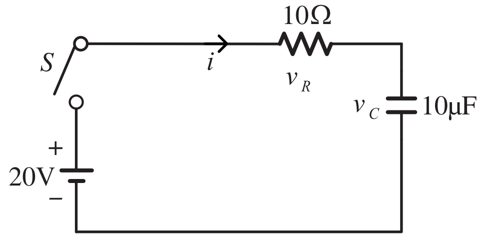


圖 (1)

解

1. 依據公式 7-2a、7-2b、7-2c：

$$v_C(t)=E(1-e^{-\frac{t}{RC}})$$

$$v_R(t)=Ee^{-\frac{t}{RC}}$$

$$i(t)=\frac{E}{R}e^{-\frac{t}{RC}}$$

2. $t=0$ 代入以上公式得

$$v_C(0)=20(1-1)=0$$

$$v_R(0)=20\text{V}$$

$$i(0)=\frac{20}{10}=2\,\text{A}$$

3. 由以上結果可知，S 閉合瞬間，電容端電壓端電壓爲 0，視爲短路。

自我練習

1. 同範例 7-2b，(1) 求充電時間常數？ (2) 求多少時間後，電路達穩定？(3) 電路穩定後，v_c 爲多少？ v_R 爲多少？ i 爲多少？　統測 107
2. 一電阻 R 與一無初始電荷的電容 C 串聯接於直流源電壓 E 之 RC 充電暫態電路，若開始充電的時間是 $t=0$，則下列敘述何者錯誤？ 統測 107
   (A) 在時間 $t=RC$ 時，電容的端電壓約爲 0.368E
   (B) 電容兩端的電壓隨時間增加會愈來愈大，穩態時達定値 E
   (C) 在時間 $t=3RC$ 時，電阻的端電壓約爲 0.05E
   (D) 電阻兩端的電壓隨時間增加會愈來愈小，穩態時爲零
3. 電路如圖 (2)，試求 (1) 電容充電時間常數？ (2) 當開關 S 閉合瞬間，V_0 是多少？
4. 電路如圖 (3)，RC 電路的時間常數是多少？

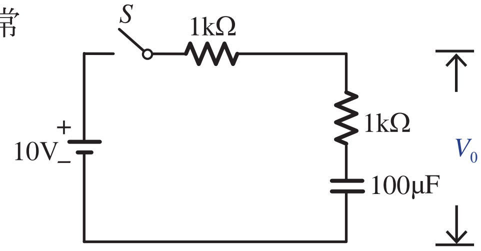


圖 (2)

5. 電路如圖 (4)，RC 電路的時間常數是多少？

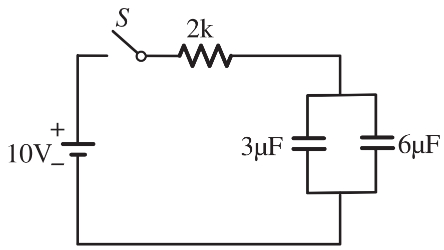


圖 (3)

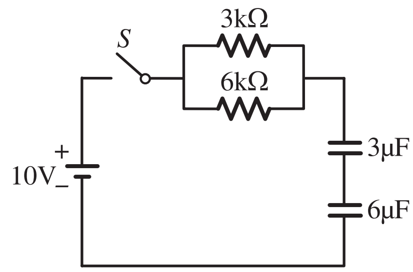


圖 (4)

範例7-2c

如圖 (1) 所示，試求：

(1) 充電時間常數？

(2) 開關閉合 0.03 秒後 v_C？

(3) 開關閉合 1 秒後 v_C？

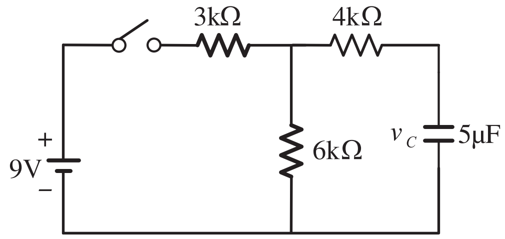


圖 (1)

解

(1) 本例負載是電容器，電路有點複雜，但若先求其戴維寧等效電路，就能得到標準 RC 充電電路，而套用 RC 充電公式。

(a) 負載移開，求負載端看到的等效電阻與等效電壓。

(b) 將電源短路，如圖 (2)，此爲戴維寧等效電阻。

$$R_{th} = 4k + (3k / 16k) = 6k\Omega$$

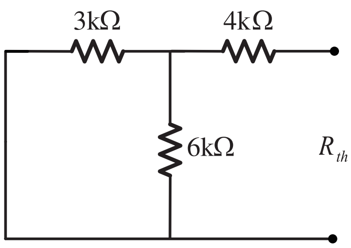


圖 (2)

(c) 負載端的分壓，如圖 (3)，此爲戴維寧等效電壓。

$$V_{th} = 9(\frac{6}{3+6}) = 6\text{V}$$

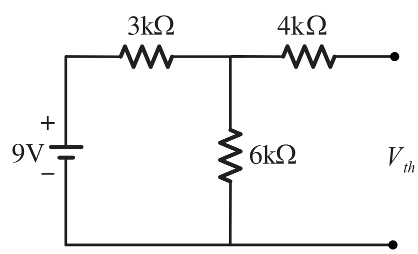


圖 (3)

(2) 等效電路如圖 (4)，此即為標準 RC 充電電路，所以

$\tau = R \cdot C = 6k \cdot 5\mu = 0.03$ 秒。

(3) 閉合 0.03 秒，為一個時間常數，所以

$v_C = 6(1-e^{-1}) = 6(1-0.368) = 6 \cdot 0.632 = 3.8\text{V}$。

(4) 1 秒後已超過 5 個時間常數，電容已經充滿電，所以 v_C 等於 6V。

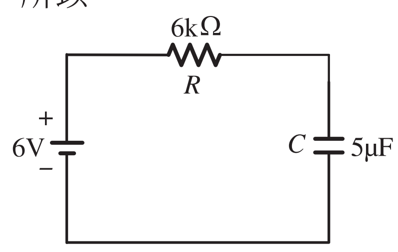
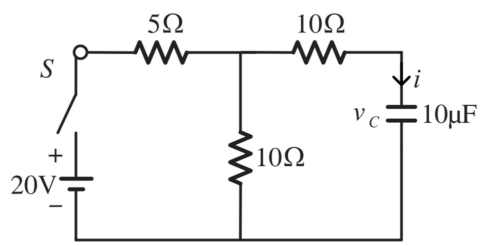


圖 (4)

自我練習

1. 如右圖電路，開關 S 閉合前，電容器未儲存任何電荷，求 S 閉合瞬間 v_C 為何？i 如何？



範例7-2d

如圖 (1) 所示電容器未儲存任何電荷。試求：

(1) S 閉合瞬間 v_C、i_1 與 i_2 為何？

(2) 電路穩定後，v_C、i_1、i_2 為何？

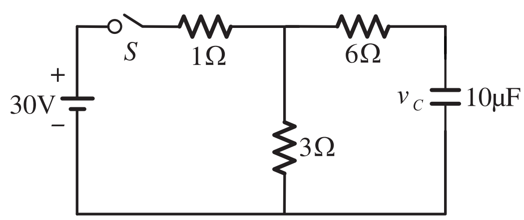


圖 (1)

解

(1) S 閉合瞬間，電容視為短路 $v_C = 0$，等效電路如圖 (2)。

$$i_1 = \frac{30}{1+(6//3)} = \frac{30}{3} = 10\text{A}$$

$$i_2 = 10 \cdot \frac{3}{3+6} = 10 \cdot \frac{3}{9} \doteqdot 3.3\text{A}$$

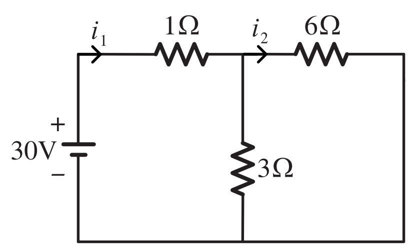


圖 (2)

(2) 電路穩定後，v_C 充滿電，電容視為開路，如圖 (3)。

$i_1 = 30/(1+3) = 7.5\text{A}$

$i_2 = 0$

$v_C = 7.5 \times 3 = 22.5\text{V}$

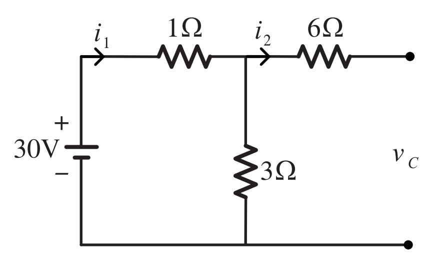


圖 (3)

自我練習

1. 如圖 (4) 所示電路，$t=0$ 秒前電容器電壓爲零，若 $t=0$ 秒時將開關 S 閉合，則電容器兩端電壓 $v_C(t)$ 爲何？ 統測 111

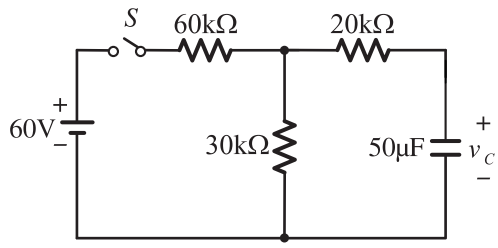


圖 (4)

(A)$60\,(1-e^{-0.5t})$ V (B)$20\,(1-e^{-0.5t})$ V (C)$60\,(1-e^{-0.05t})$ V (D)$20\,(1-e^{-0.05t})$ V

2. 如圖 (5) 所示電路，若開關 S 閉合前，電容器無儲存能量。S 於時間 $t=0$ 時閉合，則在 S 閉合瞬間 $(t=0)$ 和電路穩態 $(t=\infty)$，I 分別爲何？ 統測 109

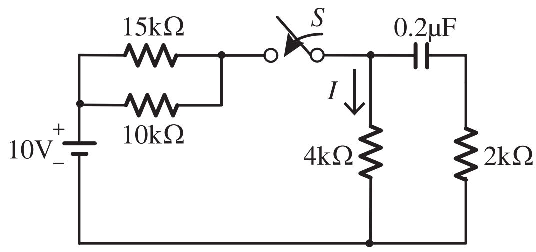


圖 (5)

(A) 0.46mA，1mA (B) 1.25mA，2mA
(C) 1.25mA，0.46mA (D) 1mA，1.25mA

RC放電

圖 7-2a 當電容器充滿以後，$v_C(t)=E$，$v_R(t)=0$，$i(t)=0$，電路呈現穩定狀態。若此時開關 SW 切換至 b 的位置，如圖 7-2e，電容器開始逆時針放電，電容器兩端的電壓 $v_C(t)$ 隨時間逐漸降低，科學家經過不斷的實驗，發現也是經過同樣 5 倍的時間常數 τ（$\tau=RC$）後，$v_C(t)$、$v_R(t)$、$i(t)$ 逐漸降爲 0。以上放電過程中，$v_C(t)$、$v_R(t)$、$i(t)$ 的示波器函數圖形如圖 7-2f、7-2g、7-2h，請留意 $v_R(t)$、$i(t)$ 都是由負到 0，這代表放電的方向與充電時相反。

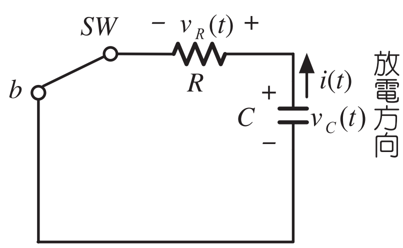


圖 7-2e

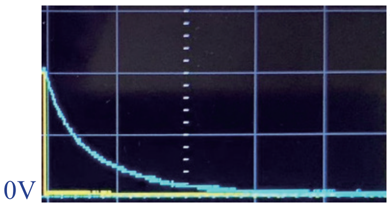


圖 7-2f $v_C(t)$
黃色是電源，藍色是 $v_C(t)$

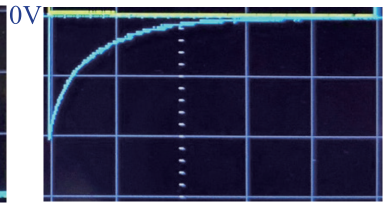


圖 7-2g $v_R(t)$
黃色是電源，藍色是 $v_R(t)$

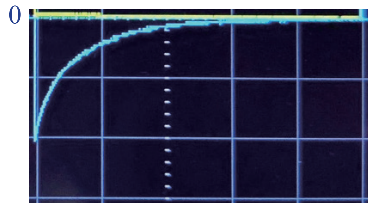


圖 7-2h $i(t)$
黃色是電源，藍色是 $i(t)$

以上波形與 7-1 節的 $y=e^{-x}$ 與 $y=1-e^{-x}$ 相近，經過科學家不斷實驗，發現都與時間 t、E、R、C 有關，且爲時間 t 函數，隨著時間 t 的改變而改變，其値如下：

$$v_C(t)=Ee^{-\frac{t}{RC}}$$（伏特，V）　**（公式7-2e）**

$$v_R(t)=-Ee^{-\frac{t}{RC}}$$（伏特，V）　or　$v_R(t)=-v_C(t)$（伏特，V）

（負號表示與原充電電壓極性相反）　**（公式7-2f）**

$$i(t)=-\frac{E}{R}e^{-\frac{t}{RC}}$$（安培，A）　or　$i(t)=v_R(t)/R$（安培，A）

（負號表示與原充電電流方向相反）　**（公式7-2g）**

RC放電時間常數

電容放電時間與電容充電時間相同，一樣是需要 $5RC$ 的時間，才能放電完畢，電壓歸零，所以一樣定義一個電容放電時間常數爲：

$\tau=RC$（秒，s）　**（公式7-2h）**

也是配合 e 常數，剛好是電容放電剩下 36.8% 爲 1 個時間常數。

範例7-2e

RC 放電電路如圖7-2a，$E=10\text{V}$，$R=2\text{k}$，$C=1\text{mF}$，當電容充滿電後，開關 SW 於 $t=0$ 時切換到位置 b。試求：

(1) 放電時間常數 τ？　　(2) 放電方向？

(3) $t=2s$ 的 v_C、v_R、i？　　(4) $t=4s$ 的 v_C、v_R、i？

(5) $t=6s$ 的 v_C、v_R、i？　　(6) $t=8s$ 的 v_C、v_R、i？

(7) $t=10s$ 的 v_C、v_R、i？　　(8) 撰寫程式繪出 $v_C(t)$ 與 $v_R(t)$。

解

(1) 依據公式 7-2h，放電時間常數 $\tau=R\cdot C=2k\cdot 1m=2\text{s}$。

(2) 放電方向爲從 C 流向 R，與充電方向相反，所以 v_R 與 i 的標示要加上負號。

(3) 依據公式 7-2e、7-2f、7-2g，$\tau=2$，$t=2$時，表示經過一個時間常數，所以 –t/RC 以 –1代入。

$$v_C=v_C(2)=E\cdot e^{-2/2}=10\cdot e^{-\frac{2}{2}}=10\cdot e^{-1}\fallingdotseq 3.68\text{V}$$

$$v_R=v_R(2)=-E\cdot e^{-2/2}=-v_C\fallingdotseq -3.68\text{V}$$（負號表示與原充電方向相反）

$$i=i(2)=-\frac{E}{R}e^{-2/2}=\frac{3.68}{2k}\fallingdotseq -1.84\text{mA}$$（負號表示與原充電方向相反）

(4) $t=4$，表示經過2個時間常數。

$$v_C=v_C(4)=E\cdot e^{-4/2}=10\cdot e^{-2}\fallingdotseq 1.35\text{V}$$

$$v_R=-v_C\fallingdotseq -1.35\text{V}$$

$$i=v_R/R=-1.35/2k\fallingdotseq -0.67\text{mA}$$

(5) $t=6$，表示經過3個時間常數。

$$v_C=v_C(6)=10\cdot e^{-3}\fallingdotseq 0.5\text{V}$$

$$v_R=-v_C\fallingdotseq -0.5\text{V}$$

$$i=v_R/R=-0.5/2k\fallingdotseq -0.25\text{mA}$$

(6) $t=8$，表示經過4個時間常數。

$$v_C=v_C(8)=10\cdot e^{-4}\fallingdotseq 0.2\text{V}$$

$$v_R=-v_C\fallingdotseq -0.2\text{V}$$

$$i=v_R/R=-0.2/2k\fallingdotseq -0.1\text{mA}$$

(7) $t=10$，表示經過 5 個時間常數。

$$v_C=v_C(10)=10\cdot e^{-5}\fallingdotseq 0$$

$$v_R\fallingdotseq 0$$

$$i\fallingdotseq 0$$

(8) 將以上結果繪圖。$v_C(t)$ 如圖 (1)，$v_R(t)$ 如圖 (2)，$i(t)$ 如圖 (3)。

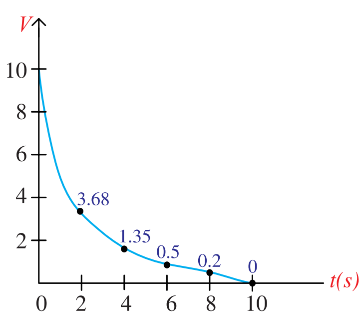


圖 (1)　$v_C(t)$函數圖

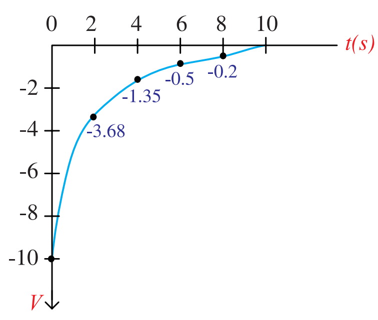


圖 (2)　$v_R(t)$函數圖

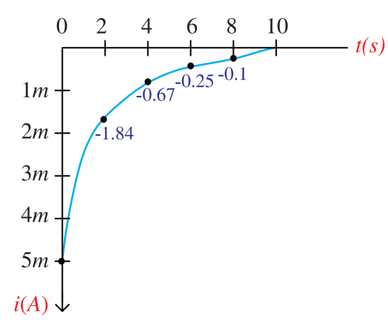


圖 (3)　$i(t)$函數圖

(9) 撰寫程式如下，可繪出$v_C(t)$與$v_R(t)$函數圖。

```
import matplotlib.pyplot as plt
#載入繪圖模組
import numpy as np #載入numpy 模組
e=np.e #e=2.718281828459045
k=1000;m=0.001
E=10;R=2*k;C=1*m;tau=R*C
t = np.arange(0, 5*tau, 0.1)
```

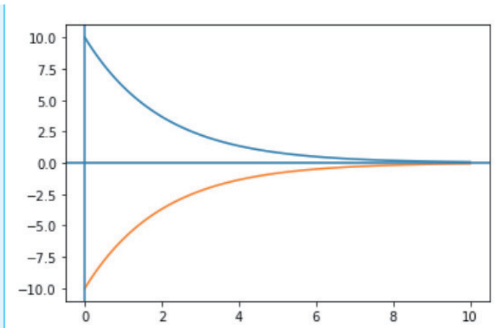


圖 (4) 藍色是$v_C(t)$，橘紅色是$v_R(t)$

```
# t爲串列，其值從0到5*tau，dx=0.1
y1=E*e**(-(t/tau)) #vc(t)
y2=-E*e**(-(t/tau)) #vr(t)
plt.plot(t,y1)#繪出vc(t)函數圖形,藍色
plt.plot(t,y2)#繪出vr(t)函數圖形，橘紅
色
plt.axhline(y=0)#繪出x軸
plt.axvline(x=0)#繪出y軸
plt.show() #於視窗輸出圖形
```

(10) 執行結果如圖 (4)。

(11) 以上程式可繪出函數圖形，若只要求出指定時間的 v_C、v_R、i 值，則程式如下：

```
import math#載入math模組
e=math.e #使用e常數
k=1000;m=0.001
E=10;R=2*k;C=1*m;tau=R*C
t=2 #時間在此調整
vc=E*e**(-(t/tau)) #vc(t)
vr=-E*e**(-(t/tau)) #vr(t)
i=vr/R
print("vc=",vc)#3.68
print("vr=",vr)#-3.68
print("i=",i)#-0.00184
```

(12) RC 充放電都是先求 v_C，次求 v_R，最後 i 爲 v_R/i。

(13) 請同學要多繪圖，才能將結果透過圖像牢牢記住，將稱爲圖像記憶法。

(14) RC 暫態電路都是先求 v_C，接著求 v_R，充電 v_R 是 $E-v_C$，放電 v_R 是 $-v_C$，i 則一定是 v_R/R。

自我練習

1. RC 放電電路如圖 7-2e，$E=20$，$R=4\text{k}$，$C=0.5\text{mF}$。試求：

   (1) 放電時間常數。

   (2) 分別求 $t=$ 2,4,6,8,10 的 v_C、v_R 及 i。

   (3) 將 (2) 之結果以時間爲 x 軸，電壓與電流爲 y 軸，繪出圖形。

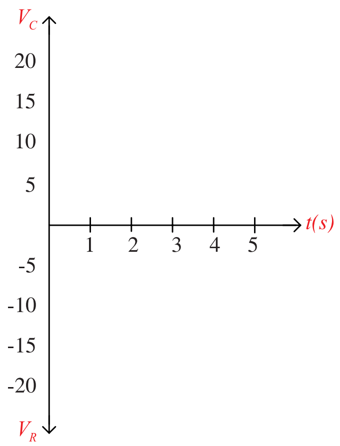


圖 (1)　$v_C(t)$與$v_R(t)$

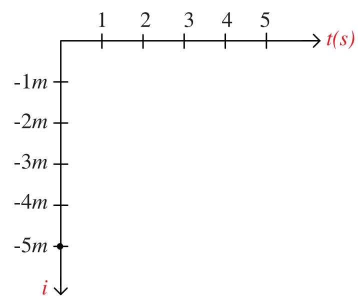
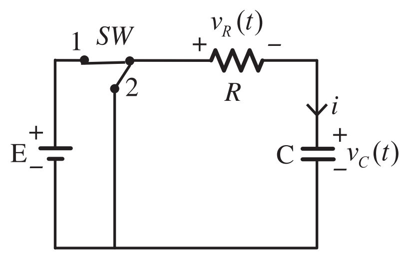


圖 (2) $i(t)$

(4) 寫程式繪出$v_C(t)$與$v_R(t)$函數圖。

2. 如右圖所示之電路，電路之時間常數為 τ ，若電容之初值電壓為零，在 $t=0$ 時將 SW 切入位置 1，並在 $t=5\tau$ 時，再將開關 SW 切回位置 2。則 $t=0$ 之後 $v_R(\tau)+v_C(\tau)+v_R(6\tau)+v_C(6\tau)$ 之值為何？　統測 108



(A) E　(B) $0.5E$　(C) $0.368E$　(D) $0.144E$

範例7-2f

如圖 (1)，$t=0$，S閉合，試求：

(1) 充電時間常數？

(2) 充電 8 秒v_C與i_C之值？

(3) $t=25$秒時S打開，求放電時間常數？

(4) $t=31$秒時v_C與i之值？

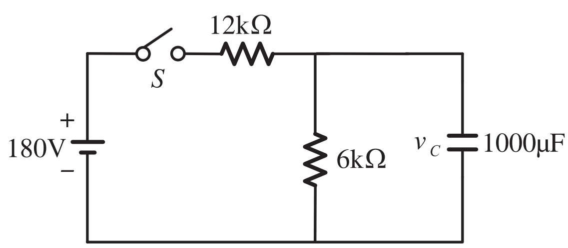


圖 (1)

解

(1) 將電容器當作負載，求其戴維寧等效電路。

(a) 負載移開，求從負載端看到的等效電阻與等效電壓。

(b) 電源短路，如圖 (2)，此為戴維寧等效電阻

$R_{th}=12k/16k=4k\Omega$ 。

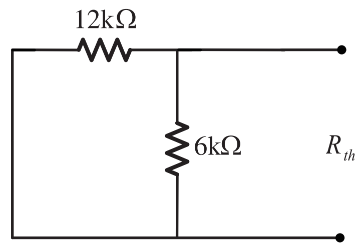


圖 (2)

(c) 負載端的分壓為 V_{th}，如圖 (3)，

$$V_{th}=\frac{180}{(12+6)}\cdot 6=60\text{V}$$

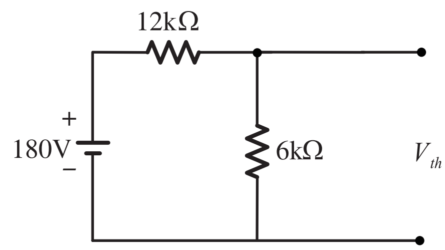


圖 (3)

(2) 等效電路如圖 (4) 此即為標準 RC 充放電電路，即可套用現成充放電公式，

$\tau=4k\cdot 1000\mu=4\text{s}$。

(3) 充電 8 秒為 2 個時間常數。

$v_C=60(1-e^{-2})\fallingdotseq 52\text{V}$

$v_R=60-52=8\text{V}$

$i=8/4k=2\text{mA}$

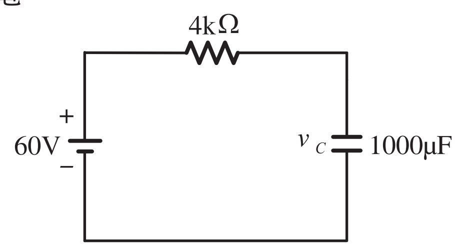


圖 (4)

(4) S 打開，放電電路如圖 (5)

$\tau=R\cdot C=6k\cdot\ 1000\mu\fallingdotseq 6\text{s}$

(5) $t=31$ 秒，表示放電 6 秒，6 秒為一個時間常數。

$V_C=60\cdot e^{-1}=60\cdot 0.368\fallingdotseq 22\text{V}$

$v_R\fallingdotseq -22\text{V}$（負號表示與充電方向相反）

$i=\dfrac{-22}{6k}\fallingdotseq -3.6\,\text{mA}$（負號表示與充電方向相反）

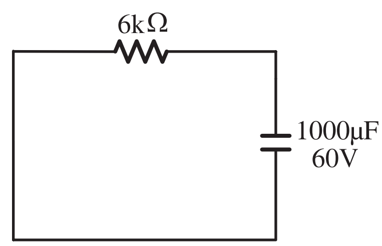


圖 (5)

自我練習

1. 如圖 (6) 所示電路，開關 S 已經閉合一段時間，電路已達穩定。若在 $t=0$ 秒時將開關打開，此時線路電流 $I=$ ？

自來水 110

(A) 0.2mA (B) 0A

(C) 2mA (D) 2.5mA

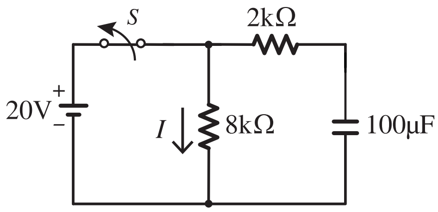


圖 (6)

7-3　電阻電感暫態電路

電阻電感充電暫態

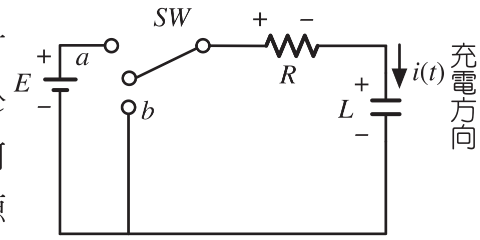


圖 7-3a

圖 7-3a 稱爲電阻電感充電電路，以下簡稱 RL 充電電路。開關 SW 初始狀態位於位置 b，此時電感器放電完畢，未儲存任何電荷。當 $t=0$ 時，開關 SW 連接 a 點，電源 E 流出的電流，先經過電阻 R，再向電感器充電，電感器兩端瞬間感應一個電動勢 E，來抵抗電流的增加，此稱爲楞次定律。但此電壓 E，隨著時間的增加逐漸降低，這段時間電壓一直在下降，一直在變化，我們稱爲暫態。經過一段時間後，電感器兩端的電壓逐漸降爲 0，電壓穩定下來，不再變化，我們稱爲穩態。此時，電流爲 $E\ /\ R$，順時針。以上充電過程中，$v_L(t)$、$v_C(t)$、$i(t)$ 的示波器函數圖形如圖 7-3b、7-3c、7-3d。

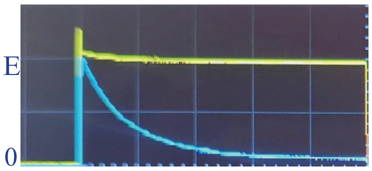


圖 7-3b　$v_L(t)$

黃色是電源，藍色是 $v_L(t)$

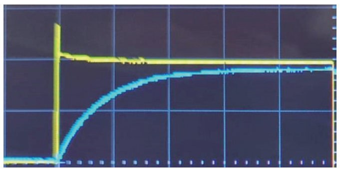


圖 7-3c　$v_R(t)$

黃色是電源，藍色是 $v_R(t)$

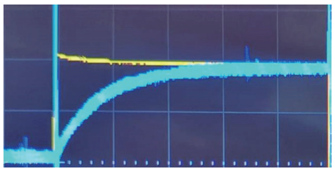


圖 7-3d　$i(t)$

黃色是電源，藍色是 $i(t)$

以上波形與 7-1 節 $y=e^{-x}$ 與 $y=1-e^{-x}$ 相近，經過科學家不斷實驗，我們發現都與時間 t、E、R、L 有關，且爲時間 t 函數，隨著時間的改變而改變，且其值可由以下方程式表示：

$$v_L(t)=Ee^{-\frac{t}{L/R}}\text{（伏特，V）}\qquad\text{（公式7-3a）}$$

$$v_R(t)=E(1-e^{-\frac{t}{L/R}})\text{（伏特，V）or }v_R(t)=E-v_L(t)\text{（伏特，V）}\qquad\text{（公式7-3b）}$$

$$i(t)=\frac{E}{R}(1-e^{-\frac{t}{L/R}})\text{（安培，A）or }i(t)=v_R(t)/R\text{（安培，A）}\qquad\text{（公式7-3c）}$$

時間常數

RL 充電電路中，開關接觸接點 a，電感器瞬間感應一個反電動勢，以抵抗電流的增加。然後此電壓逐漸降低，電路處於暫態，暫態時間長短是取決於電感值與電阻值比值的大小，其值經由實驗證明是 5（$\frac{L}{R}$）。因此，我們定義一個時間常數 (time constant)，符號為 τ，其公式為：

$$\tau = \frac{L}{R}\text{（秒，s）}$$ （公式7-3d）

τ：時間常數，單位為秒(s)。

R：電阻值，單位為歐姆(Ω)。

L：電感值，單位為亨利(H)。

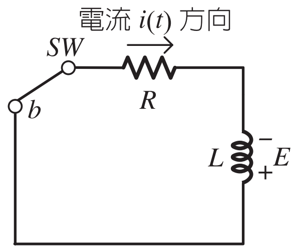


圖 7-3e RL 放電

RL放電

圖 7-3a 當電感器充滿以後，電感電壓為 0，電路呈現穩定狀態，此時電流為 E / R，方向為順時針。若此時開關 SW 切換至 b 的位置，如圖 7-3e，電感器瞬間感應一個反向電壓 E（下面正，上面負），以能讓電流持續再順時針流動一下（電感就是電流來了，反抗一下，電流沒了，彌補一下，都是在維持現狀，此即為楞次定律）。但是此電動勢會隨時間的改變而逐漸降低，科學家經過不斷的實驗，發現也是經過同樣 5 個時間常數 ($\tau = \frac{L}{R}$) 後，逐漸降為 0。以上放電過程中，$v_L(t)$、$v_R(t)$、$i(t)$ 的示波器函數圖形如圖 7-3f、7-3g、7-3h。

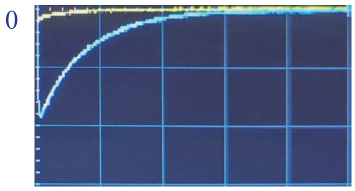


圖 7-3f $v_L(t)$

黃色是電源，藍色是 $v_L(t)$

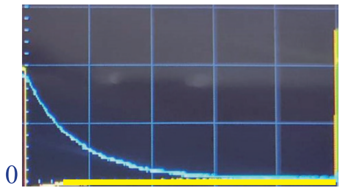


圖 7-3g $v_R(t)$

黃色是電源，藍色是 $v_R(t)$

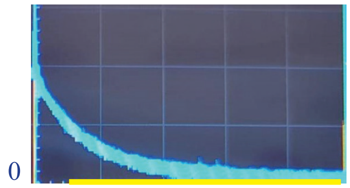


圖 7-3h $i(t)$

黃色是電源，藍色是 $i(t)$

以上波形與 7-1 節 $y=e^{-x}$ 與 $y=1-e^{-x}$ 相近，經過科學家不斷實驗，發現都與時間 t、E、R、L 有關，且為時間 t 函數，隨著時間 t 的改變而改變，其值可由方程式表示如下：

$v_L(t) = -Ee^{-\frac{t}{L/R}}$（伏特，V）

（負號表示與原充電電壓極性相反） **（公式7-3e）**

$v_R(t) = Ee^{-\frac{t}{L/R}}$（伏特，V）or $v_R(t) = -v_L(t)$（伏特，V） **（公式7-3f）**

$i(t) = \dfrac{E}{R}e^{-\frac{t}{L/R}}$（安培，A）or $i(t) = v_R(t) / R$（安培，A） **（公式7-3g）**

RL放電時間常數

電感放電時間與充電時間相同，所以一樣定義一個電感放電時間常數 τ 為：

$\tau = \dfrac{L}{R}$（秒，s） **（公式7-3g）**

也是配合 e 常數，剛好是電感放電剩下 36.8% 為 1 個時間常數。

範例7-3a

電阻與電感串聯電路如圖 (1)，電感無任何電荷，$t=0$ 時，S 接通 a 點求：

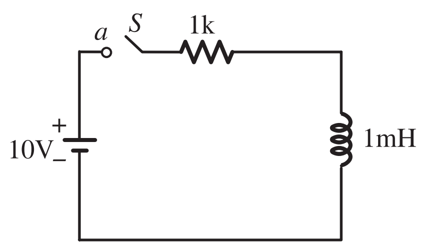


圖 (1)

(1) 充電時間常數 τ 為何？

(2) $t=0$ 時 v_L、v_R、i 分別為何？

(3) $t=1$ us 時 v_L、v_R、i 分別為何？

(4) $t=2$ us 時 v_L、v_R、i 分別為何？

(5) $t=3$ us 時 v_L、v_R、i 分別為何？

(6) $t=4$ us 時 v_L、v_R、i 分別為何？

(7) $t=5$ us 時 v_L、v_R、i 分別為何？

(8) 依照以上數據繪出 $v_L(t)$、$v_R(t)$ 的函數圖形。

(9) 依照課本公式，寫程式繪出 $v_L(t)$ 與 $v_R(t)$ 函數圖形。

解

(1) 電阻電感串聯充電時間常數 $\tau=\dfrac{L}{R}=\dfrac{1m}{1k}=1\mu s$。（充放電題目，都是先算出時間常數）

$v_L(t)=Ee^{-\frac{t}{L/R}}(V)$，$v_R(t)=E(1-e^{-\frac{t}{L/R}})(V)$，$i(t)=\dfrac{E}{R}(1-e^{-\frac{t}{L/R}})(A)$

（電感充電瞬間，電感瞬間感應 10V 來反抗電流的變化，讓電流維持現狀）

(2) $t=0$，$v_L(0)=E=10V$，$v_R(0)=0V$，$i(0)=0A$

(3) t=1us，代表歷經一個時間常數，–t/(L/R) 以 –1 代入 $v_L(1)=10\times e^{-1}\fallingdotseq 3.68V$，$v_R(1)=10-V_L(1)\fallingdotseq 6.32V$，$i(1)=v_R(1)/R\fallingdotseq 6.32mA$

(4) t=2us，代表歷經二個時間常數，–t/(L/R) 以 –2 代入 $v_L(2)=10\times e^{-2}\fallingdotseq 1.35V$，$v_R(2)=10-V_L(2)\fallingdotseq 8.65V$，$i(2)=v_R(2)/R\fallingdotseq 8.65mA$

(5) $t=3us$，$v_L(3)\fallingdotseq 0.05V$，$v_R(3)\fallingdotseq 9.95V$，$i(3)\fallingdotseq 9.95mA$

(6) $t=4us$，$v_L(4)\fallingdotseq 0.02V$，$v_R(4)\fallingdotseq 9.98V$，$i(4)\fallingdotseq 9.98mA$

(7) $t=5us$，$v_L(5)\fallingdotseq 0$，$v_R(5)\fallingdotseq 10V$，$i(5)\fallingdotseq 10mA$

(8) $v_L(t)$ 函數如圖 (2)，$v_R(t)$ 函數如圖 (3)。

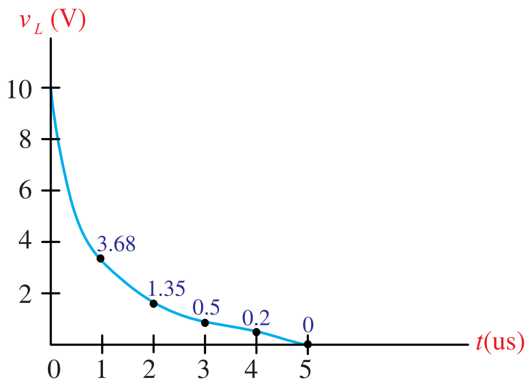


圖 (2)　$v_L(t)$ 函數圖

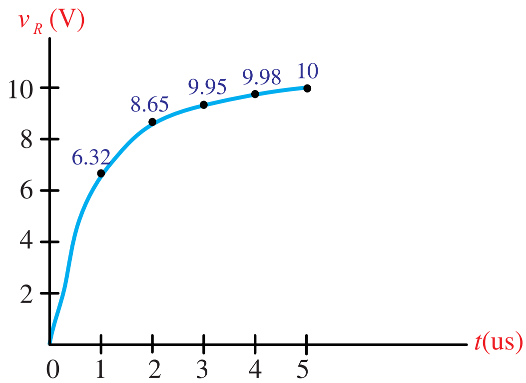


圖 (3)　$v_R(t)$ 函數圖

(9) 撰寫 Python 程式如下，繪出 $v_L(t)$ 與 $v_R(t)$ 函數圖形。

```
import matplotlib.pyplot as plt
#載入繪圖模組
import numpy as np #載入numpy 模組
k=1000;m=0.001
E=10;R=1*k;L=1*m
tau=L/R
t = np.arange(0, 5*tau, tau/10)
```

```
# t爲串列，其值從0到5*tau，dt=0.1tau
y1=E*(np.e)**(-t/tau)#計算每一個x對應的y
值，y也是串列
y2=E*(1-(np.e)**(-t/tau))
plt.plot(t,y1)#繪出vL函數圖形
plt.plot(t,y2)#繪出vR函數圖形
plt.axhline(y=0)#繪出x軸
plt.axvline(x=0)#繪出y軸
plt.show() #於視窗輸出圖形
```

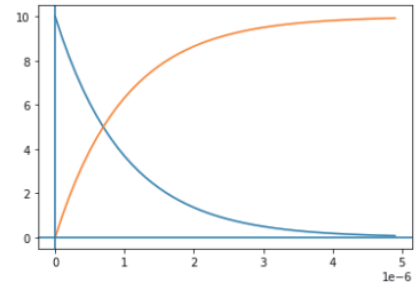


圖 (4)　$v_L(t)$ 與 $v_R(t)$ 函數圖，藍色是 $v_L(t)$，橘色是 $v_R(t)$

(10) 以上程式可繪出函數圖形，若只要求出指定時間的 v_L、v_R、i 值，則程式如下：

```
import math#載入math模組
e=math.e #使用e常數
k=1000;m=0.001;u=0.000001
E=10;R=1*k;L=1*m;tau=L/R
t=1*u #時間在此調整
vl=E*e**(-(t/tau)) #vc(t)
vr=E*(1-e**(-(t/tau))) #vl(t)
i=vr/R
print("vl=",vl)#3.68
print("vr=",vr)#6.32
print("i=",i)#0.00632
```

自我練習

1. 同範例 7-3a，但 E 改爲 20V，R 改爲 2kΩ，L 改爲 10mH。
   (1) 試計算放電時間常數。
   (2) 分別計算 1,2,3,4,5 個時間常數的 v_L、v_R 與 i，填入下表。
   (3) 依照以上數據，繪出 $v_L(t)$ 與 $v_R(t)$ 函數圖。

$\tau =$ 　s	電感電壓v_L	電阻電壓v_R	電阻電流i
$t=1\tau=$____s			
$t=2\tau=$____s			
$t=3\tau=$____s			
$t=4\tau=$____s			
$t=5\tau=$____s			

2. 如下頁圖 (5) 所示之暫態電路及電流 $i_L(t)$ 時間響應圖，電流 $I_S=10\text{A}$，時間常數 τ 為 0.02 秒。已知電阻 $R_S=2\Omega$，且電感在開關 S_1 閉合前無儲存能量，當時間為零時（$t=0$ 秒）開關 S_1 閉合（導通），則此電路的直流電壓源 E_S 與電感 L_S 分別為何？ 統測 112

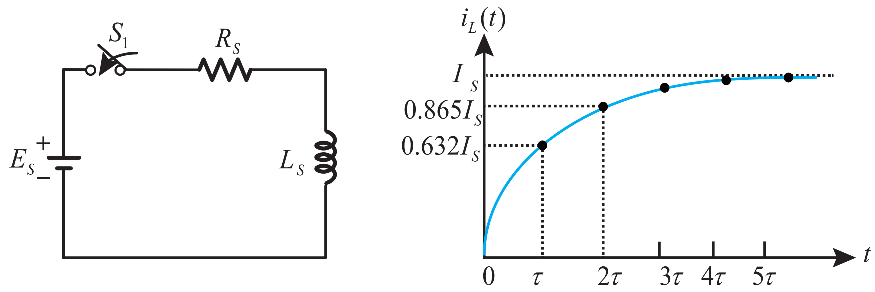


圖 (5)

(A) $E_S=20\text{V}$、$L_S=40\text{mH}$ (B) $E_S=10\text{V}$、$L_S=30\text{mH}$
(C) $E_S=20\text{V}$、$L_S=20\text{mH}$ (D) $E_S=10\text{V}$、$L_S=10\text{mH}$

3. 如圖 (6) 所示電路，$t=0$ 秒前電感器儲存能量為零，若 $t=0$ 秒時將開關 S 由位置 1 切至位置 2，則下列敘述何者正確？ 統測 111

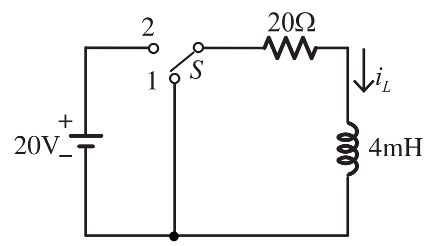


圖 (6)

(A) 流經電感器的初始電流值為 1A 且電路時間常數為 80ms
(B) 流經電感器的初始電流值為 0A 且電路時間常數為 80ms
(C) 流經電感器的初始電流值為 1A 且電路時間常數為 0.2ms
(D) 流經電感器的初始電流值為 0A 且電路時間常數為 0.2ms

範例7-3b

RL 串聯電路如圖 (1)，$t<0$ 時，開關置於 a，$t=0$ 時開關 S 置於 b。求：

(1) 放電時間常數 $\tau=$？
(2) $t<0$，v_L、v_R、i 分別是多少？
(3) $t=0$，v_L、v_R、i 分別是多少？
(4) $t=2\text{s}$，v_L、v_R、i 分別是多少？
(5) $t=4\text{s}$，v_L、v_R、i 分別是多少？

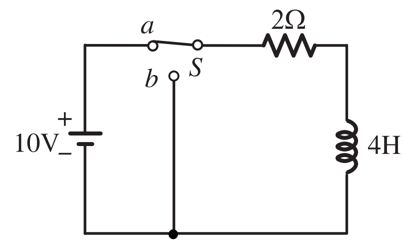


圖 (1)

(6) $t=6$s，v_L、v_R、i 分別是多少？

(7) $t=8$s，v_L、v_R、i 分別是多少？

(8) $t=10$s，v_L、v_R、i 分別是多少？

(9) 依照以上數據繪出 $v_L(t)$ 與 $v_R(t)$ 函數圖。

解

(1) 放電時間常數 τ =L/R=4/2=2s，放電期間

$$v_L(t)=-Ee^{\frac{-t}{L/R}} \quad v_R(t)=Ee^{\frac{-t}{L/R}}=-v(t) \quad i(t)=\frac{E}{R}e^{\frac{-t}{L/R}}=\frac{v_R(t)}{R}$$

(2) $t<0$ 時，$v_L=0$，$v_R=10$V，$i=10/2=5$A（順時針）。

(3) $t=0$ 時，$v_L(0)=-10$V，$v_R(0)=10$V，$i(0)=5$A（瞬間也是順時針 5A）。（$t=0$ 時電感瞬間感應一個下正上負的 10V 電壓，以便維持原電流的大小與方向）

(4) $t=2$s，$v_L(2)\fallingdotseq-3.68$V，$v_R(2)\fallingdotseq 3.68$V，$i(2)\fallingdotseq 1.84$A

(5) $t=4$s，$v_L(4)\fallingdotseq-1.35$V，$v_R(4)\fallingdotseq 1.35$V，$i(4)\fallingdotseq 0.67$A

(6) $t=6$s，$v_L(6)\fallingdotseq-0.5$V，$v_R(6)\fallingdotseq 0.5$V，$i(6)\fallingdotseq 0.25$A

(7) $t=8$s，$v_L(8)\fallingdotseq-0.2$V，$v_R(8)\fallingdotseq 0.2$V，$i(8)\fallingdotseq 0.1$A

(8) $t=10$s，$v_L(10)\fallingdotseq 0$，$v_R(10)\fallingdotseq 0$，$i(10)\fallingdotseq 0$

(9) $v_L(t)$ 函數如圖 (2)，$v_R(t)$ 函數如圖 (3)。

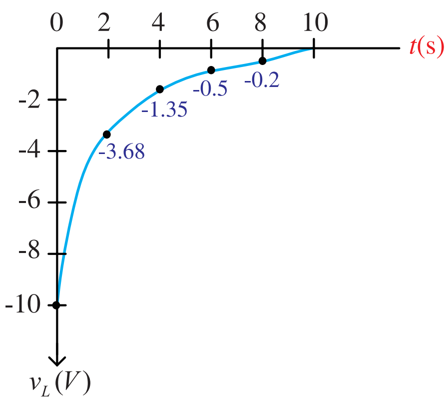


圖 (2) $v_L(t)$ 函數圖

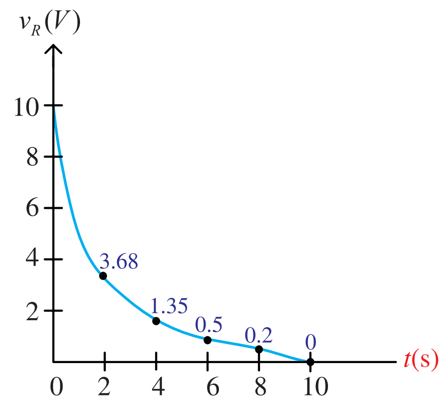


圖 (3) $v_R(t)$ 函數圖

(10) 以下是依據放電公式，寫程式繪出 $v_L(t)$ 與 $v_R(t)$ 函數圖

```
import matplotlib.pyplot as plt
#載入繪圖模組
import numpy as np #載入numpy 模組
E=10;R=2;L=4;tau=L/R
t = np.arange(0, 5*tau, tau/10)
# t爲串列，其值從0到5*tau，dt=0.1tau
y1=-E*(np.e)**(-t/tau)#計算每一個x對應的y
值，y也是串列
y2=E*(np.e)**(-t/tau)
plt.plot(t,y1)#繪出vL函數圖形,藍色
plt.plot(t,y2)#繪出vR函數圖形，紅色
plt.axhline(y=0)#繪出x軸
plt.axvline(x=0)#繪出y軸
plt.show() #於視窗輸出圖形
```

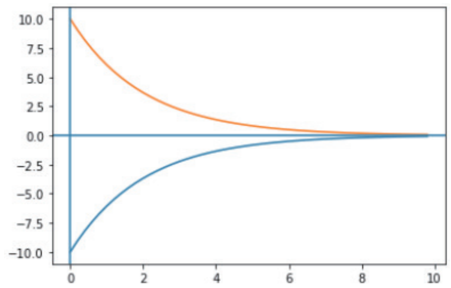


圖 (4)　藍色是 $v_L(t)$，紅色是 $v_R(t)$ 函數圖

(11) 以上程式可繪出函數圖形，若只要求出指定時間的 v_L、v_R、i 值，則程式如下：

```
import math#載入math模組
e=math.e #使用e常數
E=10;R=2;L=4;tau=L/R
t=2 #時間在此修改
vl=-E*e**(-(t/tau)) #vc(t)
vr=E*e**(-(t/tau)) #vl(t)
i=vr/R
print(vl)#-3.68
print(vr)#3.68
print(i)#1.83
```

範例7-3c

如圖 (1) 所示之電路，開關 SW 閉合一段時間達穩態後，在 $t=0$ 時將開關 SW 切離，則切離瞬間電感器兩端之電壓 v_L 爲何？

統測 108

(A) 10V　(B) 20V　(C) 40V　(D) 50V

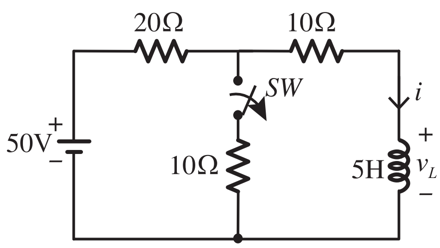


圖 (1)

解

(1) 電感的特性是電流維持不變，也就是電流來了，我產生電壓反抗，電流沒了，我提供電壓，讓電流能維持不變。

(2) 本例 SW 閉合穩定時 $v_L=0$，等效電路如圖 (2)。

$$I=\frac{50}{20+(10//10)}=2\text{A} \Rightarrow I_1=I_2=1\text{A}$$

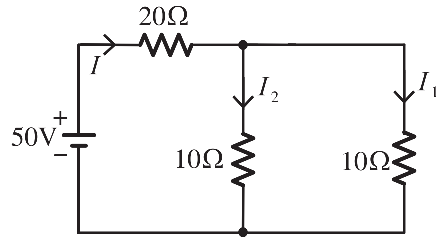


圖 (2)

(3) SW 切離前，電感電流向下 1A，SW 切離瞬間，電感電流也要維持 1A，所以 $50=20\cdot1+10\cdot1+v_L \Rightarrow v_L=20\text{V}$

自我練習

1. 如圖 (3) 所示電路，若電感器，電容器於開關 S 閉合前皆無儲存能量，則 S 閉合後之電流 I 的穩態值爲何？
(A) 1.27mA　(B) 1.56mA
(C) 2mA　(D) 2.8mA

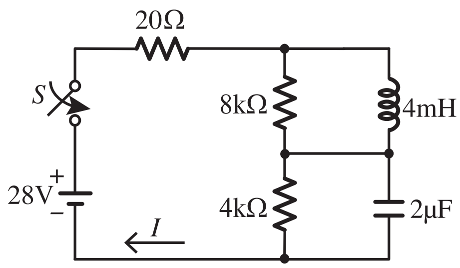


圖 (3)

範例7-3d

如圖 (1) 所示，電感在開關 S 閉合前已無儲能，若開關 S 在時間 $t=0$ 時閉合，則 $t>0$ 的電壓 $v(t)$ 爲何？

(A) $v(t)=20(1-e^{-100t})$V
(B) $v(t)=20(1-e^{-50t})$V
(C) $v(t)=20+10e^{-100t}$V
(D) $v(t)=20+10e^{-50t}$V

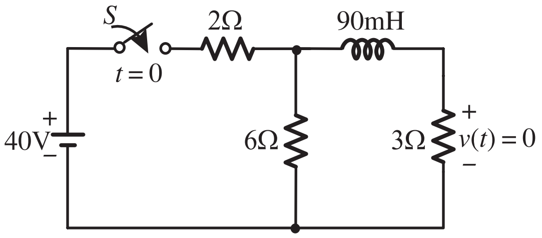


圖 (1)

解

1. 看到複雜的電路大多是先用戴維寧等效電路化簡，本例將 90mH 的電感與 3Ω 的電阻看成負載求其戴維寧等效電路。

$$V_{th}=40\cdot\frac{6}{2+6}=30\text{V}$$

$$R_{th}=(2//6)=\frac{2\cdot 6}{2+6}=\frac{3}{2}=1.5\Omega$$

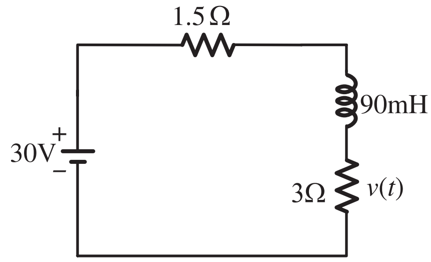


圖 (2)

2. 重畫簡化後的電路如圖 (2)，此即爲標準 R_L 充電電路，可使用 RL 串聯充電公式，所以充電時間常數

$$\tau=\frac{L}{R}=\frac{90m}{4.5}=0.02\text{ s}$$

3. $v_R(t)=30(1-e^{-\frac{t}{0.02}})=30(1-\text{e}^{-50t})$，此 v_R 是 1.5Ω 與 3Ω 的共同效應，題目只要 3Ω 的效應，所以是 $\frac{3}{4.5}\cdot 30(1-e^{-50t})=20(1-e^{-50t})\text{V}$，答案選 B。

自我練習

1. 電路如圖 (3)，求 (1) 電路導通的瞬間，電流 i 爲多少？(2) 電路的時間常數？(3) 電路達穩態後的電流 i 是多少？

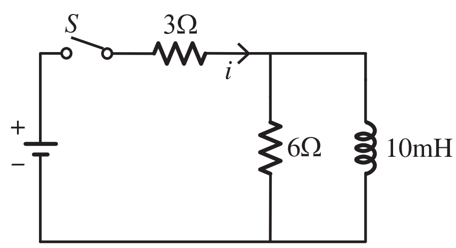


圖 (3)

2. 電路如圖 (4)，(1) 開關 S 閉合一段時間，i 爲多少？(2) 打開 S 瞬間，v_L 是多少？(3) 打開後，$t=0.4$ 秒，v_L 是多少？(4) 打開穩定後，i 爲多少？

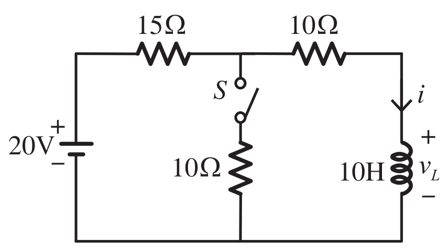


圖 (4)

3. 電路如圖 (5)，開關 S 打開的瞬間，電感的感應電動勢爲何？（請註明方向）

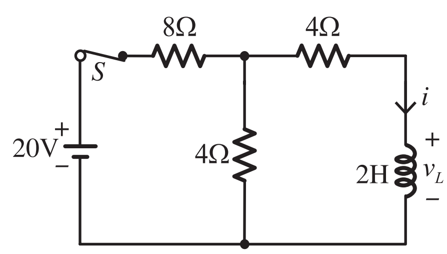


圖 (5)

7-4 本章內容摘要

1. $e \doteqdot 2.718$，$e^{0} \doteqdot 1$，$e^{-1} \doteqdot 0.368$，$e^{-2} \doteqdot 0.135$，$e^{-3} \doteqdot 0.05$，$e^{-4} \doteqdot 0.02$，$e^{-5} \doteqdot 0$。
2. $1-e^{-1} \doteqdot 0.632$，$1-e^{-2} \doteqdot 0.865$，$1-e^{-3} \doteqdot 0.95$，$1-e^{-4} \doteqdot 0.98$，$1-e^{-5} \doteqdot 1$。
3. $f(x)=e^{-x}$ 圖形如圖 (1)（趨近於 0），$f(x)=1-e^{-x}$ 圖形如圖 (2)（趨近於 1）。

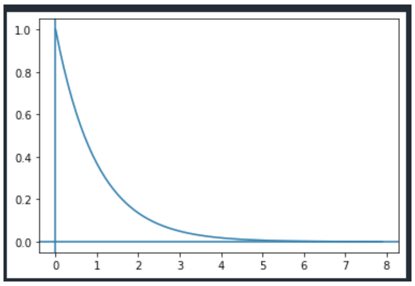


圖 (1)　$f(x)=e^{-x}$ 圖形

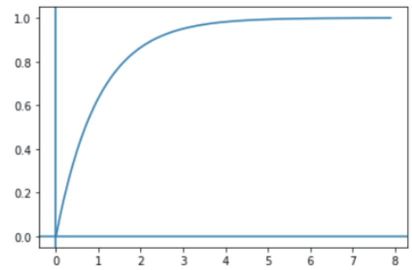


圖 (2)　$f(x)=1-e^{-x}$ 圖形

4. 電容是由平行電板組成，可以儲存電荷。
5. 電容充電，$v_C(t)$、$v_R(t)$、$i(t)$ 波形，如圖 (3)、圖 (4)、圖 (5)：

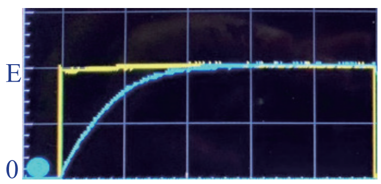


圖 (3)　$v_C(t)$

黃色是電源，藍色是 $v_C(t)$

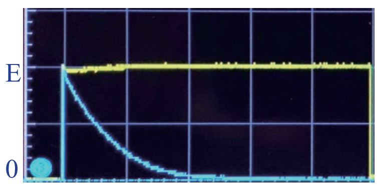


圖 (4)　$v_R(t)$

黃色是電源，藍色是 $v_R(t)$

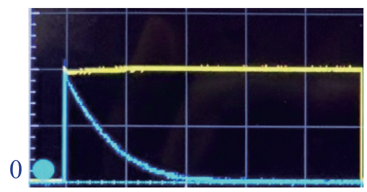


圖 (5)　$i(t)$

黃色是電源，藍色是 $i(t)$

$v_C(t)$、$v_R(t)$、$i(t)$ 充電方程式分別是：

$v_C(t)=E(1-e^{-\frac{t}{RC}})$ (V)（電容充電後，v_C 趨近於 E）　**（公式7-2a）**

$v_R(t)=Ee^{-\frac{t}{RC}}$ (V) $=E-v_C(t)$ (V)（電容充電後，v_R 趨近於 0）　**（公式7-2b）**

$i(t)=\frac{E}{R}e^{-\frac{t}{RC}}$ (A) $=v_R(t)/R$ (A)　**（公式7-2c）**

時間常數 $\tau=RC$ (s)　**（公式7-2d）**

6. 電容放電，$v_C(\text{t})$、$v_R(t)$、$i(t)$ 波形，如圖 (6)、圖 (7)、圖 (8)：

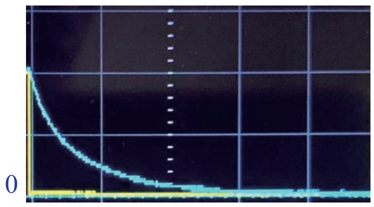


圖 (6)　$v_C(t)$

黃色是電源，藍色是 $v_C(t)$

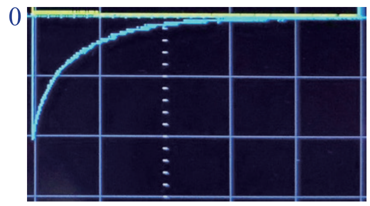


圖 (7)　$v_R(t)$

黃色是電源，藍色是 $v_R(t)$

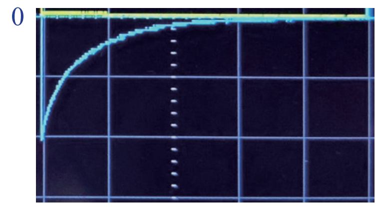


圖 (8)　$i(t)$

黃色是電源，藍色是 $i(t)$

$v_C(t)$、$v_R(t)$、$i(t)$ 充電方程式分別是：

$v_C(t) = Ee^{-\frac{t}{RC}}$ (V)（放電都是放到 0）　**（公式7-2e）**

$v_R(t) = -Ee^{-\frac{t}{RC}}$ (V)$=-v_C(t)$(V)（放電都是放到 0，請留意放電方向改變了）

（負號表示與原充電電壓極性相反）　**（公式7-2f）**

$i(t) = -\dfrac{E}{R}e^{-\frac{t}{RC}}(\text{A}) = \dfrac{v_R(t)}{R}(\text{A})$

（負號表示與原充電電流方向相反）　**（公式7-2g）**

7. 電感是由線圈纏繞而成，當電流來時，會瞬間產生反電動勢抵抗，然後此反電動勢會慢慢消失；當電流消失時，會瞬間產生電動勢彌補電流的消失，且此反電動勢也會慢慢消失，也就是電感的特性，都在維持電流能維持不變。

8. 電感充電，$v_L(t)$、$v_R(t)$、$i(t)$ 波形，如圖 (9)、圖 (10)、圖 (11)：

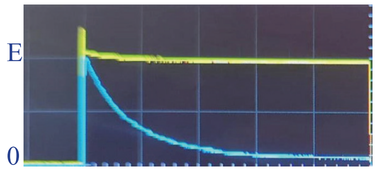


圖 (9)　$v_L(t)$

黃色是電源，藍色是 $v_L(t)$

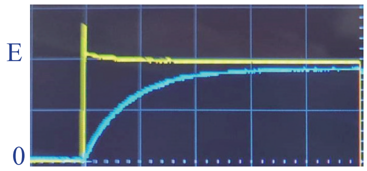


圖 (10)　$v_R(t)$

黃色是電源，藍色是 $v_R(t)$

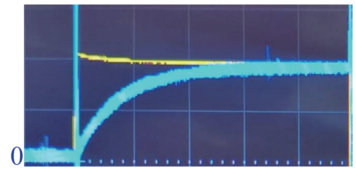


圖 (11)　$i(t)$

黃色是電源，藍色是 $i(t)$

$v_C(t)$、$v_R(t)$、$i(t)$ 充電方程式分別是：

$v_L(t)=Ee^{-\frac{t}{L/R}}(\text{V})$ **（公式7-3a）**
（電感充電是感應 E，反抗一下，然後趨近 0）

$v_R(t)=E(1-e^{-\frac{t}{L/R}})(\text{V})=E-v_L(t)(\text{V})$ **（公式7-3b）**
（充電是『電阻+電感＝E』，所以趨近 E）

$i(t)=\dfrac{E}{R}(1-e^{-\frac{t}{L/R}})(\text{A})=\dfrac{v_R(t)}{R}(\text{A})$（$i$ 都是v_R/R） **（公式7-3c）**

$\tau=\dfrac{L}{R}$（s，電容充放電是 $\tau=RC$） **（公式 7-3d）**

9. 電感放電，$v_L(t)$、$v_R(t)$、$i(t)$ 波形，如圖 (12)、圖 (13)、圖 (14)：

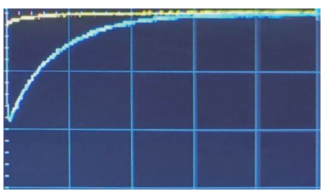


圖 (12)　$v_L(t)$
黃色是電源，藍色是$v_L(t)$

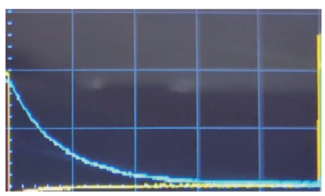


圖 (13)　$v_R(t)$
黃色是電源，藍色是 $v_R(t)$

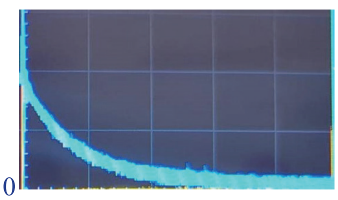


圖 (14)　$i(t)$
黃色是電源，藍色是 $i(t)$

$v_C(t)$、$v_R(t)$、$i(t)$ 充電方程式分別是：

$v_L(t)=-Ee^{-\frac{t}{L/R}}(\text{V})$（電感放電是補充一下 E，然後趨近 0）
（負號表示與原充電電壓極性相反） **（公式7-3e）**

$v_R(t)=Ee^{-\frac{t}{L/R}}(\text{V})=-v_L(t)(\text{V})$（放電放到 0，且同充電方向） **（公式7-3f）**

$i(t)=\dfrac{E}{R}e^{-\frac{t}{L/R}}(\text{A})=\dfrac{v_R(t)}{R}(\text{A})$（$i$ 都是 v_R/R） **（公式7-3g）**

10. 以上電容與電感充放電的電壓與電流整理如下表：（放電的負號代表與充電方向相反）

RC充放電	電容電壓	電阻電壓	電流	電流方向
電容充電	0 → E	E → 0	E/R → 0	順時針
電容放電	E → 0	–E → 0	–E/R → 0	逆時針
RL充放電	電感電壓	電阻電壓	電流	電流方向
電感充電	E → 0	0 → E	0 → E/R	順時針
電感放電	–E → 0	E → 0	E/R → 0	順時針

11. 電容充放電解題步驟。

(1) 都是先算出充放電時間常數，電容充放電時間常數是 $\tau=RC$，電感充放電時間常數是 $\tau=L/R$，充放電時間都與 C 與 L 成正比，C 與 L 都是放分子；電感都是相反，所以電感的 R 放分母。

(2) 算出經過幾個時間常數。

(3) 電容 C 與電感 L 是主角，電容充放電先算出電容電壓，電感充放電先算出電感電壓。

(4) 依據 KVL，充電時電阻電壓是：（電源電壓 E）-（電容或電感電壓）；放電時，電阻電壓都是：（電容或電感電壓）的負值。

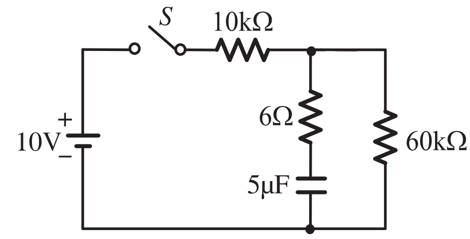
(5) 依據歐姆定律，電流都是電阻電壓除以電阻值。

(6) 若電路複雜，不是標準 RC 或 RL 充放電電路，都是先嘗試使用戴維寧定理，將電容或電感先移開，化簡電路，使其剩下單一電源與單一戴維寧電阻，然後就是標準電容或電感充放電電路，就可帶入電容或電感充放電公式。

7-5 課後習題

選擇題

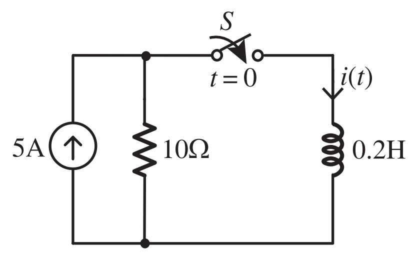
1. 如右圖所示，開關 S 閉合時的充電時間常數及開關 S 啓斷後的放電時間常數，分別為多少秒？　統測 106



(A) 0.25 及 0.4　(B) 0.4 及 0.2

(C) 0.4 及 0.25　(D) 0.2 及 0.4

2. 如右圖所示，若開關 S 閉合時 $t=0$，則 $t>0$ 的電流 $i(t)$ 為何？　統測 106



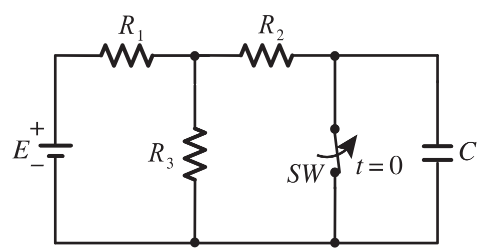
(A) $i(t)=50(1-e^{-50t})$A

(B) $i(t)=50(1-e^{-t/50t})$A

(C) $i(t)=5(1-e^{-50t})$A

(D) $i(t)=5e^{-50t}$A

3. 如右圖所示，若電壓源 E=15V，$R_1=R_2=R_3=10\Omega$，$C=10\mu$F，開關 SW 打開時為 $t=0$，則下列敘述何者錯誤？　統測 105



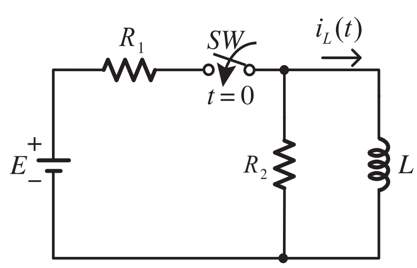
(A) $t>0$ 之電路時間常數 $\tau=0.3$ms

(B) $t=0$ 電容器的電壓為零

(C) 開關打開後電路達穩態時電容器 C 電壓大小為 7.5V

(D) 電路達穩態後，沒有電流流過電容器 C

4. 如右圖所示，若電壓源 $E=24$V，$R_1=3\Omega$，$R_2=6\Omega$，$L=5$mH，開關 SW 閉合時為 $t=0$，請問 $t>0$ 之 $i_L(t)$ 為何？　統測 105



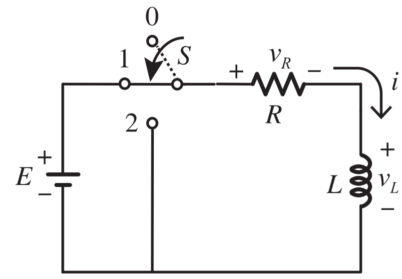
(A) $16(1-e^{-400t})$A

(B) $8(1-e^{-400t})$A

(C) $16e^{-400t}$A

(D) $8e^{-400t}$A

5. 如 右 圖 所 示， 假 設 $E=20\text{V}$，$R=5\Omega$，$L=5\text{H}$，若將開關 S 由位置 "0" 切換至 "1"，試求： 台電 111



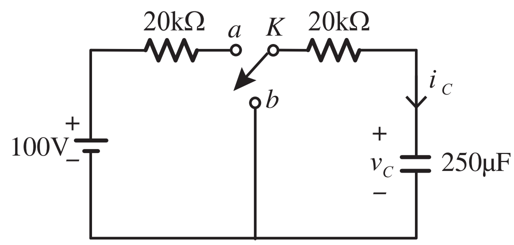
(1) $t=0$ 秒時之 v_L

(2) $t=1$ 秒時之 v_L、v_R、i

(3) $t \geq 5$ 秒時之 v_L

(註：$e^{-1}=0.368$、$e^{-2}=0.135$、$e^{-3}=0.05$)

6. 如右圖所示，假設電容無初始儲存能量，當 $t=0$ 秒時將 K 扳至 a 點，試求： 台電 109



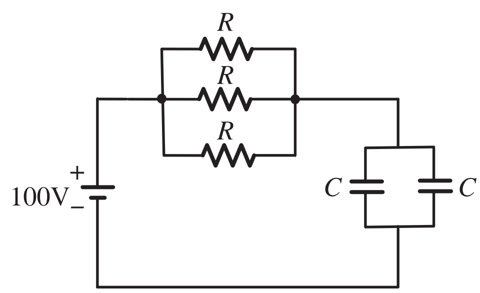
(1) 電路時間常數 τ 為多少秒？

(2) 當 $t=30$ 秒時，$V_c(t=30\text{s})$ 為多少伏特 (V) ？

(3) 若在 $t=30$ 秒時瞬間將 K 扳至 b 點，則 $t=40$ 秒時，i_C 為多少安培 (A) ？

(註：$e^{-1}=0.368$、$e^{-2}=0.135$、$e^{-3}=0.05$)

7. 如右圖所示電路，$R=6\text{k}\Omega$，$C=1\mu\text{F}$，則時間常數為多少？ 中油 111



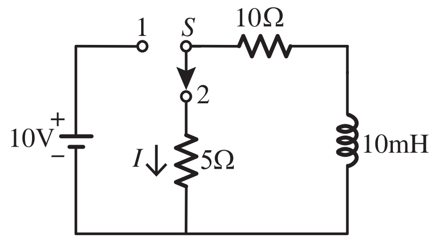
(A) 1m sec

(B) 4m sec

(C) 9m sec

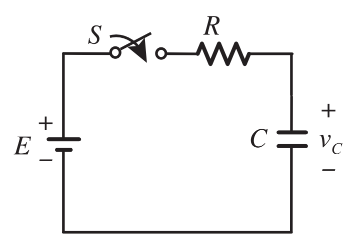
(D) 36m sec

8. 如右圖所示電路，開關 S 已經在 1 的位置一段時間，電路已達穩定。若將開關切到 2 的位置，請問圖中 I 的瞬間電流大小為何？ 自來水 110



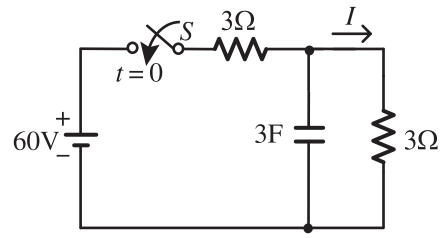
(A) 1A (B) –1A (C) 2A (D) –2A

9. 如右圖所示，若 $E=100\text{V}$，$R=10\text{k}\Omega$，$C=50\text{nF}$，且電容器的初始電壓為 30V，當開關 S 閉合之瞬間，流經電阻的電流為多少？ 112 台北捷運



(A) 1.1mA (B) 1.8mA (C) 3.5mA (D) 7.0mA

10. 如右圖所示，開關閉合前，電容器沒有儲存能量。在開關閉合後的瞬間，電流 I 為多少安培 (A)？　112 台北捷運



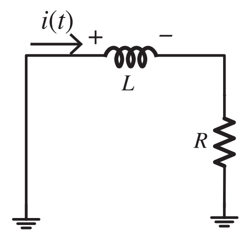
(A) 10A

(B) 0A

(C) 1A

(D) 20A

11. 如右圖所示之無源 RL 電路，若 $L=2\text{mH}$，$R=10\Omega$ 及 $I(0)=I_0=5\text{A}$，求電流 $i(t)$ 之方程式？　111 鐵路特考



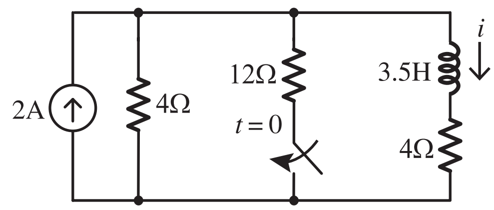
(A) $i(t)=0.5e^{-5000t}\text{A}$

(B) $i(t)=0.5e^{-500t}\text{A}$

(C) $i(t)=5e^{-500t}\text{A}$

(D) $i(t)=5e^{-5000t}\text{A}$

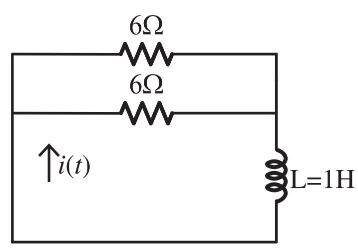
12. 如右圖所示之電路，開關於 $t=0$ 時閉合，求 $i(\infty)$ 為何？　112 身心障礙特考



(A) 12/7A　(B) 1.0A

(C) 6/7A　(D) 8/7A

13. 如右圖所示之電路，在 $t=0$ 時之電流 $i(0)=10\text{A}$，求其 $t>0$ 之電流 $i(t)$ 為何？　112 初等考試



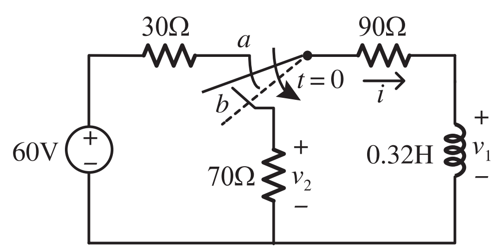
(A) $10e^{-t}$

(B) $10e^{-2t}$

(C) $10e^{-3t}$

(D) $10e^{-4t}$

14. 如右圖所示的電路，電源是 60V 的直流電，電感值為 0.32H。開關停留在 a 的位置很長一段時間，電路處於穩定的狀態；在 $t=0$ 秒鐘時，迅速切換到 b 位置，試回答下列的開題：



(1) $t=0$ 時，開關在 a 位置，流經電感的電流 i 為多少？

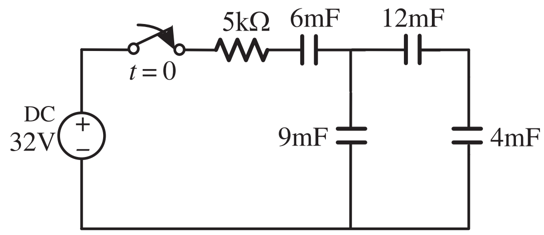
(2) $t=0$ 時，電感儲存的能量為多少焦耳？

(3) $t=0$ 時，開關已切換到 b 位置時的電流 i 為多少？

(4) $t \geq 0$ 之後，$i(t)$ 的時間常數及電流暫態電流方程式。

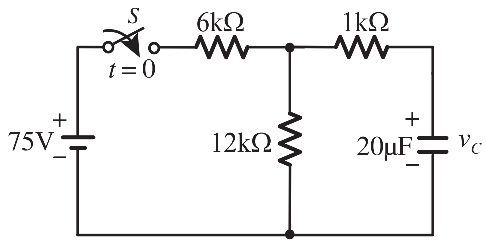
(5) $t \geq 0$ 之後，電感兩端的電壓方程式。　112 關務特考

15. 如右圖所示的電路中，各個電容器原本都沒有儲存任何電荷量，開關在時間 $t=0$ 時閉合，假設經過 5 倍時間常數電容器能夠充滿電荷達到直流穩態，計算此電路需幾秒即可完成充電？　112 鐵路特考



(A) 40 秒　(B) 60 秒　(C) 100 秒　(D) 120 秒

16. 如右圖所示電路，在 $t=0$ 秒時將開關 S 閉合；若電容電壓初值為 10V，則 S 閉合後的電容器瞬間電流 $I_C(0)$ 與充電時間常數 T_C 分別為何？　111 台北自來水



(A) $I_C(0)=8\text{mA}$，$T_C=0.1$ 秒

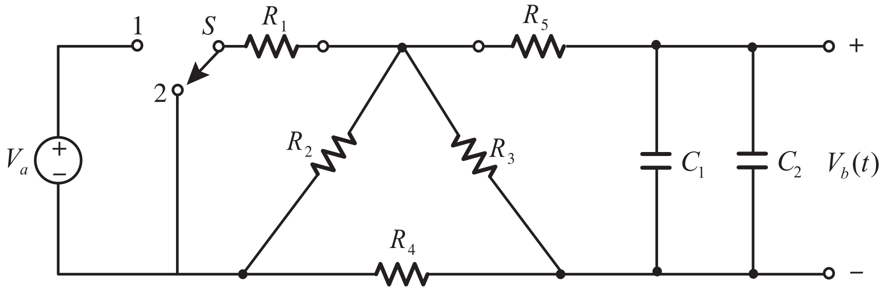
(B) $I_C(0)=10\text{mA}$，$T_C=0.15$ 秒

(C) $I_C(0)=12\text{mA}$，$T_C=0.2$ 秒

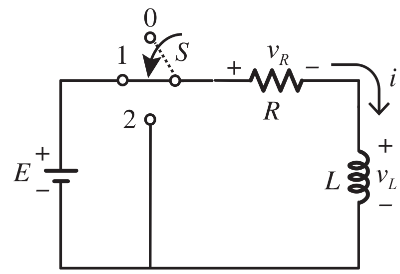
(D) $I_C(0)=15\text{mA}$，$T_C=0.25$ 秒

17. 如圖所示之電路，電容 C_1 和 C_2 之初始電壓為 0，即 $V_b(0)=0$，開關 S 在 $t<0$ 時，長時間穩定接在 2 的位置點，在 $t=0$ 時，S 接到 1 的位置點，$t \geq 0$ 時，V_a 開始供電電路，其中 $V_a=10\text{V}$，$C_1=C_2=1\mu\text{F}$，$R_1=R_5=10\Omega$，$R_2=R_3=R_4=6\Omega$，試計算在時間 $t \geq 0$ 時，$V_b(t)$ 的電壓變化等式為何 (V)？

112 普考



18. 如右圖所示，假設 E=20V，R=5Ω，L=5H，若將開關 S 由位置 "0" 切換至 "1" 試求：111 台電



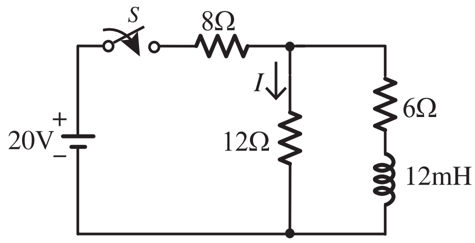
(1) $t=0$ 秒時之 V_L

(2) $t=1$ 秒時之 V_L、V_R、i

(3) $t \geq 5$ 秒時之 V_L

（註：$e^{-1}=0.368$、$e^{-2}=0.135$、$e^{-3}=0.05$）

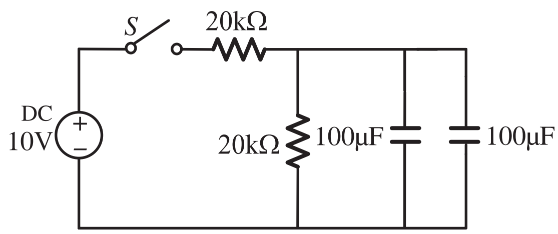
19. 如右圖所示電路，開關未閉合前，流經電感器之電流為 0A，當開關 S 按下的瞬間，電流 I= ？　111 台糖



(A) $\frac{5}{9}$ A　(B) 1A

(C) $\frac{9}{10}$ A　(D) $\frac{5}{3}$ A

20. 如右圖所示電路，在時間 $t=0$ 時開關 S 閉合，計算此電路之充電時間常數為何？　111 地方特考



(A) 1 秒　(B) 2 秒

(C) 4 秒　(D) 5 秒

素養觀念題

1. 圖 (1) 是 RC 充放電示波器輸出圖，黃色 CH1 是 $v_S(t)$ 波形（Volts/Div=5V），藍色 CH2 是 $v_C(t)$ 波形（Volts/Div=5V），Time/Div=100μs，請問電源 $v_S(t)$ 頻率 =_________，RC 充放電時間常數 =_______，電源 $v_S(t)$ 的 $V_{p\text{-}p}$=_________，直流偏壓 =_________。

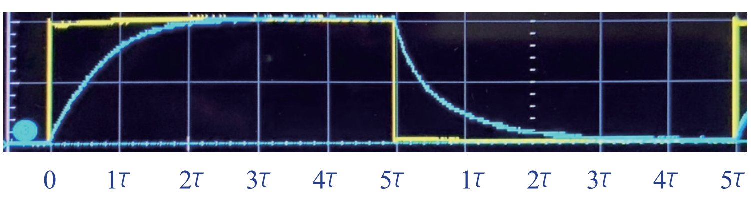


圖 (1)

2. 圖 (2) 是 RC 充放電示波器圖，黃色 CH1 是 $v_S(t)$ 波形（Volts/Div=5V），藍色 CH2 是 $v_R(t)$ 波形（Volts/Div=5V），Time/Div=200μs，請問電源 $v_S(t)$ 頻率 =________，RC 時間常數 =__________，充電與放電的電流方向是否相同？________。

3. 圖 (3) 是 RC 充放電示波器圖，黃色 CH1 是 $v_S(t)$ 波形（Volts/Div=5V），藍色 CH2 是 $i(t)$ 波形（Volts/Div=5mV），Time/Div=100μs，請問電源頻率 =________，RC 時間常數 =__________，充電與放電的電流方向是否相同？________。

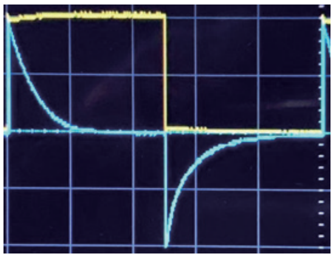


圖 (2)

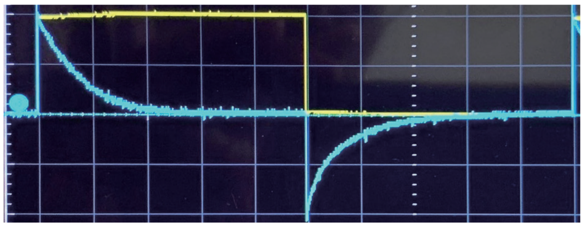


圖 (3)

4. 圖 (4) 是 RL 充放電示波器圖，黃色 CH1 是 $v_S(t)$ 波形（Volts/Div=5V），藍色 CH2 是 $v_L(t)$ 波形（Volts/Div=5V），Time/Div=10μs，請問電源頻率 =________，RL 時間常數 =________。

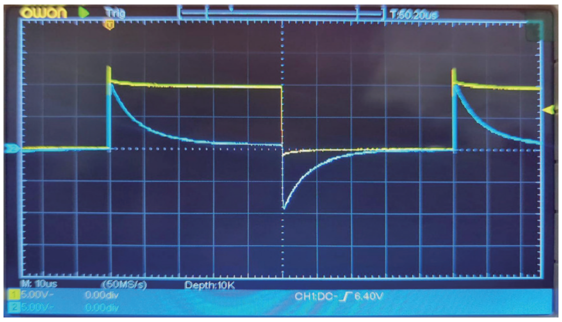


圖 (4)

5. 圖 (5) 是 RL 充放電示波器圖，黃色 CH1 是 $v_S(t)$ 波形（Volts/Div=5V），藍色 CH2 是 $v_R(t)$ 波形（Volts/Div=5V），Time/Div=10μs，請問電源頻率 =________，RL 時間常數 =__________，充電與放電的電流方向是否相同？________。

6. 圖 (6) 是 RL 充放電示波器圖，黃色 CH1 是 $v_S(t)$ 波形（Volts/Div=5V），藍色 CH2 是 $i(t)$ 波形（Volts/Div=5mV），Time/Div=10μs，請問電源頻率 = ________，RL 時間常數 =__________，充電與放電的電流方向是否相同？________。

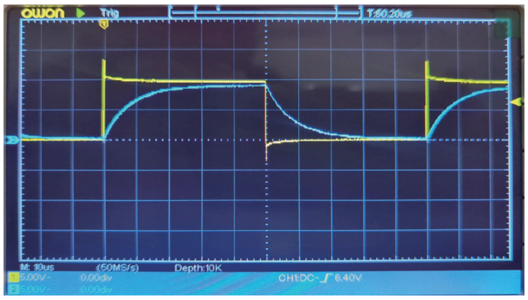


圖 (5)

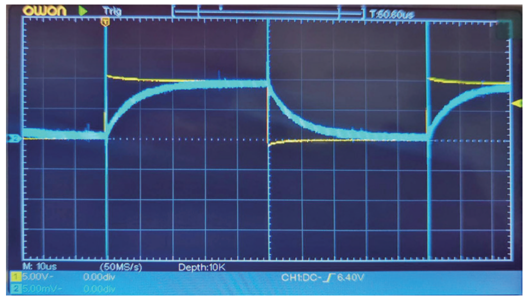


圖 (6)

MEMO