

第七章 場效電晶體放大電路

- 7-1 金氧半場效電晶體放大器工作原理
- 7-2 場效電晶體交流等效電路
- 7-3 共源極放大電路
- 7-4 共汲極放大電路
- 7-5 共閘極放大電路



7 - 1

E176B1 適用

旗立

光碟、紙張用得少，
你我讓地球更美好！

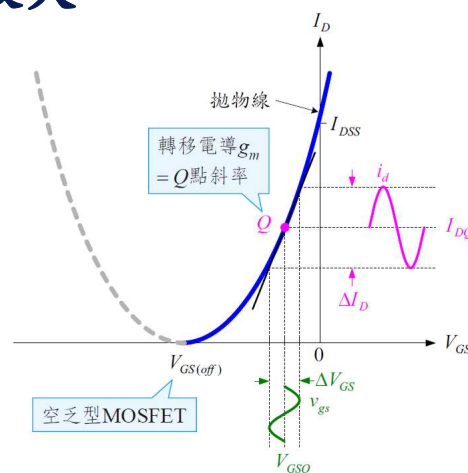
MOSFET的小信號放大

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}}\right)^2$$

(空乏型MOSFET)

$$I_D = K(V_{GS} - V_t)^2$$

(增強型MOSFET)



▲圖7-1 N通道空乏型MOSFET在飽和區的 $V_{GS} - I_D$ 特性曲線



7 - 2

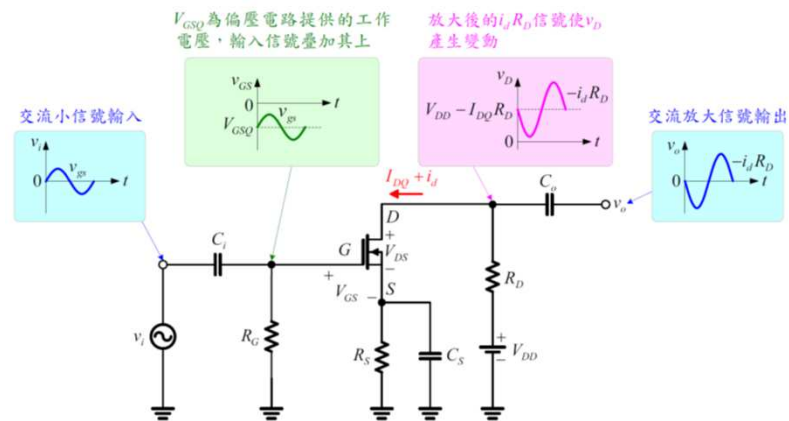
E176B1 適用

旗立

光碟、紙張用得少，
你我讓地球更美好！

第 7 章 場效電晶體放大電路

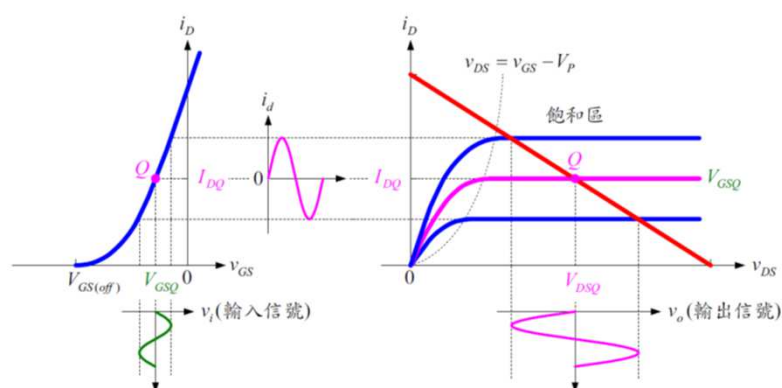
MOSFET放大的動作原理 (1)



(a) N通道空乏型MOSFET自給偏壓放大電路

▲圖7-2 N通道空乏型MOSFET的小信號放大

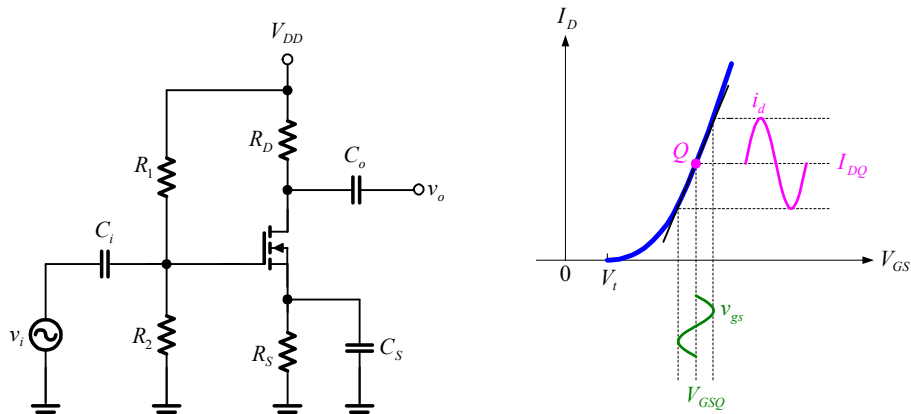
FET放大的動作原理 (2)



(b) 轉換特性曲線 ($v_{GS} - i_D$) 與輸出特性曲線 ($v_{DS} - i_D$)

▲圖7-2 N通道空乏型MOSFET的小信號放大 (續)

N通道增強型MOSFET分壓偏壓放大電路



▲圖7-3 N通道增強型MOSFET分壓偏壓放大電路

旗立



光緒一萬年曆
你與歷史同在！

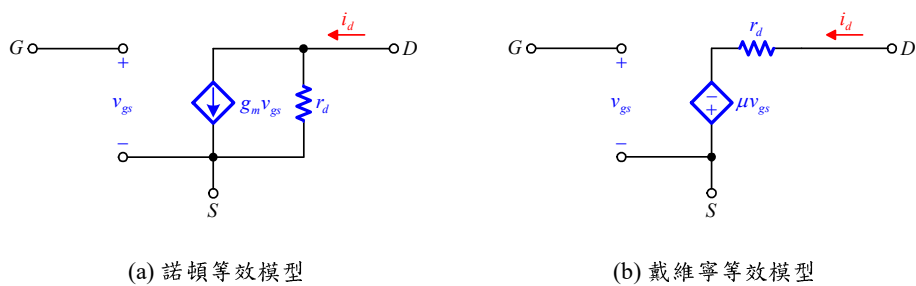
第7章 場效電晶體放大電路



E176B1 通用

7 - 5

FET的低頻小信號模型(1)



▲圖7-4 FET的低頻小信號模型

旗立



光緒一萬年曆
你與歷史同在！

第7章 場效電晶體放大電路



E176B1 通用

7 - 6

FET的低頻小信號模型(2)

◆ 轉移電導 g_m (單位: A/V、S 或 Ω^{-1})

● 公式 7-2-1

$$g_m = \left. \frac{\Delta I_D}{\Delta V_{GS}} \right|_{V_{DS} = \text{定值}} = \left. \frac{i_d}{v_{gs}} \right|_{v_{ds} = 0}$$

◆ 放大因數 μ (無單位)

● 公式 7-2-3

$$\mu = - \left. \frac{\Delta V_{DS}}{\Delta V_{GS}} \right|_{I_D = \text{定值}} = - \left. \frac{v_{ds}}{v_{gs}} \right|_{i_d = 0}$$

◆ 輸出電阻 r_d (單位: Ω)

● 公式 7-2-2

$$r_d = \left. \frac{\Delta V_{DS}}{\Delta I_D} \right|_{V_{GS} = \text{定值}} = \left. \frac{v_{ds}}{i_d} \right|_{v_{gs} = 0}$$

旗立



光線一點點，
智慧就亮起來！

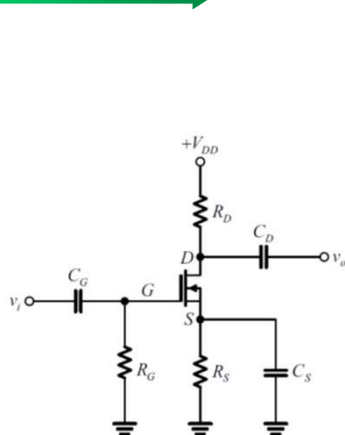
第 7 章 場效電晶體放大電路



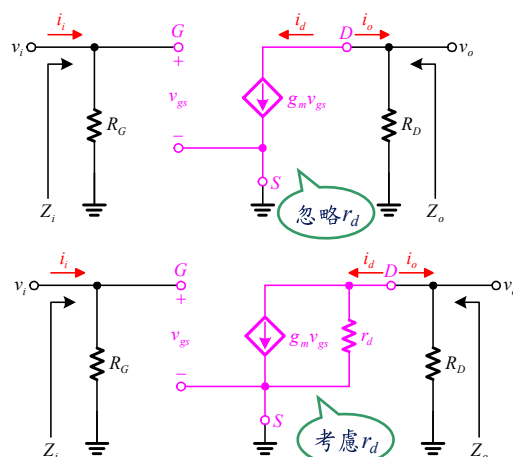
E176B1 通用

7 - 7

共源極放大電路 (無電阻 R_S)



(a) 電路圖



(b) 小信號等效電路

▲ 圖 7-6 共源極放大電路的小信號分析 (無電阻 R_S)

旗立



光線一點點，
智慧就亮起來！

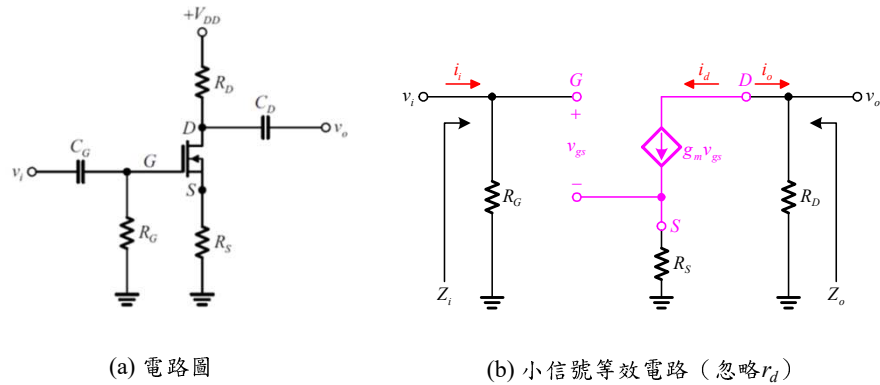
第 7 章 場效電晶體放大電路



E176B1 通用

7 - 8

共源極放大電路（有電阻 R_S ）



▲圖7-7 共源極放大電路的小信號分析（有電阻 R_S ）

旗立



電源一電路圖解
你讀懂了嗎？

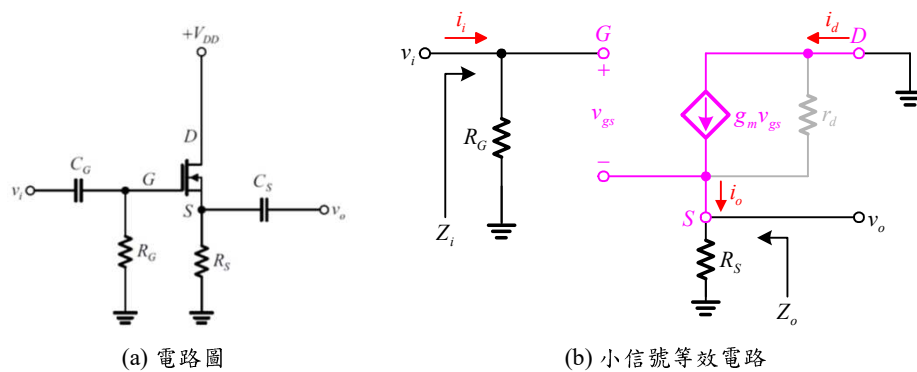
第7章 場效電晶體放大電路



E176B1 適用

7 - 9

共汲極放大電路(1)



▲圖7-8 共汲極放大電路的小信號分析

旗立



電源一電路圖解
你讀懂了嗎？

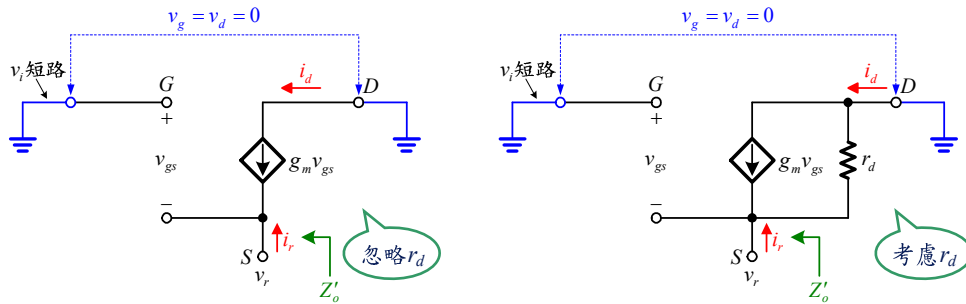
第7章 場效電晶體放大電路



E176B1 適用

7 - 10

共汲極放大電路(2)



▲圖7-9 由FET源極看入的輸出阻抗

旗立



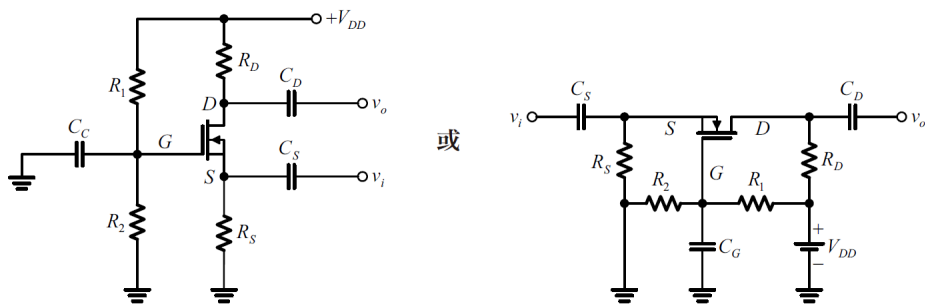
電路、電子與資訊
你與我的共同語言！

第7章 場效電晶體放大電路



E176B1 通用 7 - 11

共開極放大電路(1)



(a)電路圖-分壓偏壓

▲圖7-10 共開極放大電路的小信號分析

旗立



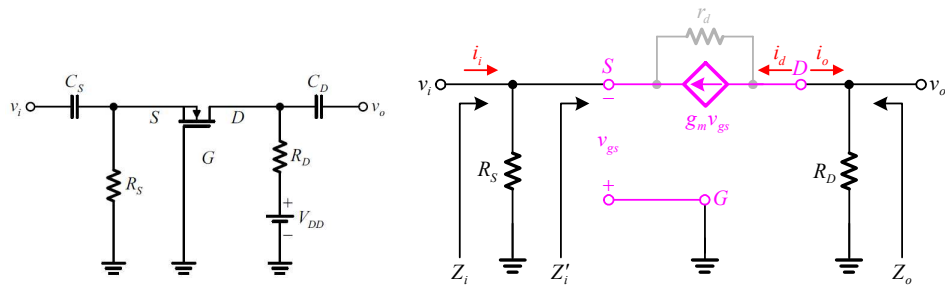
電路、電子與資訊
你與我的共同語言！

第7章 場效電晶體放大電路



E176B1 通用 7 - 12

共閘極放大電路(2)



(b)電路圖-自給偏壓

(c)小信號等效電路

▲圖7-10 共閘極放大電路的小信號分析（續）

第八章 金氧半場效電晶體 多級放大電路

8-1 疊接放大電路

8-2 直接耦合串級放大電路

8-3 頻率響應*



8 - 1

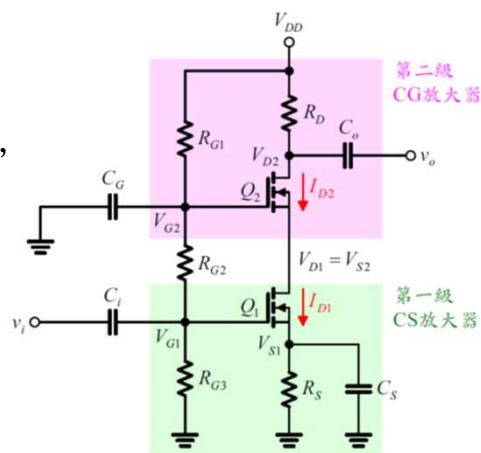
旗立

光碟、紙張用得少，
你我讓地球更美好！

E176B1 適用

疊接放大電路(1)

第一級由增強型 MOSFET 組成共源極 (CS) 組態放大器，第二級為共閘極 (CG) 組態放大器；因輸入信號由第一級閘極 (G) 端輸入，並由其汲極 (D) 端輸出與第二級的源極 (S) 端輸入直接連接在一起。



▲圖8-1 疊接放大電路



8 - 2

旗立

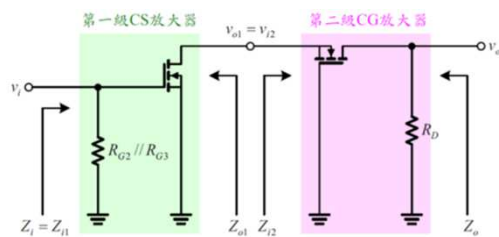
光碟、紙張用得少，
你我讓地球更美好！

第 8 章 金氧半場效電晶體多級放大電路

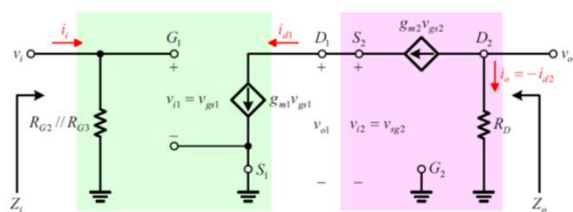
E176B1 適用

疊接放大電路(1)

小信號等效電路



(a) 將直流電壓與電容視為短路



(b) 以近似小信號模型代入

旗立



電源、電路與電子
技術與應用

第 8 章 金氧半場效電晶體多級放大電路

E176B1 通用

8 - 3

直接耦合串級放大電路(1)

兩級皆由共源極（CS）組態放大器所組成。由於級與級間無任何耦合元件交流放大時有較佳之低頻特性；但如上一級直流電壓或電流，因溫度產生變化或其他因素變化，便會影響下一級的直流工作點電壓及電流。

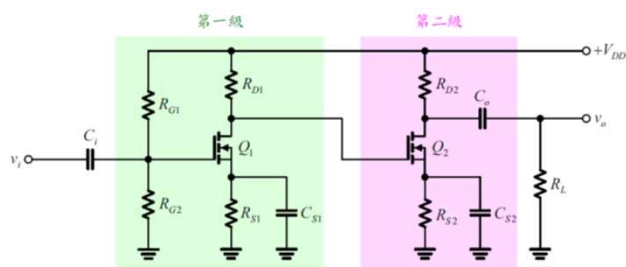


圖 8-3 MOSFET 直接耦合串級放大電路

旗立



電源、電路與電子
技術與應用

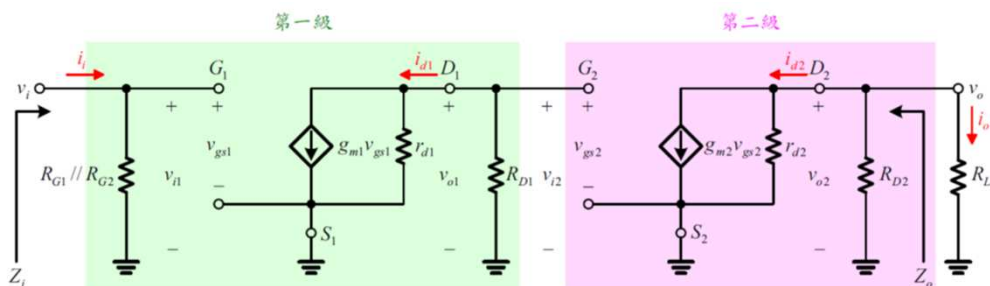
第 8 章 金氧半場效電晶體多級放大電路

E176B1 通用

8 - 4

直接耦合串級放大電路(2)

小信號等效電路



▲ 圖8-4 兩級直接耦合串級放大器之小信號等效電路

旗立



光線一經折射，
物像便會失真！

第 8 章 金氧半場效電晶體多級放大電路

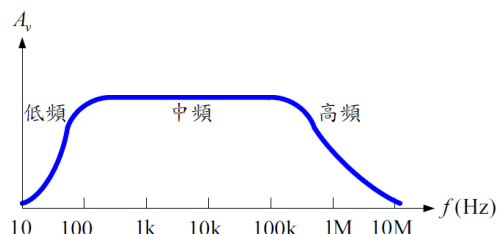


E176B1 通用

8 - 5

RC耦合串級放大電路

在低頻率區域，放大器的增益值下降，這是由於低頻時電路中耦合電容的容抗值增加，使得在耦合電容上產生較多的電壓降，且旁路電容的容抗值亦增加，使得與射極電阻 R_E (BJT) 或源極電阻 R_S (FET) 無法完全被短路，造成增益下降。在高頻率區域，由於電晶體的極際電容與一些雜散電容的容抗值減少，造成增益下降。



▲ 圖8-5 RC耦合放大電路的頻率響應曲線

旗立



光線一經折射，
物像便會失真！

第 8 章 金氧半場效電晶體多級放大電路

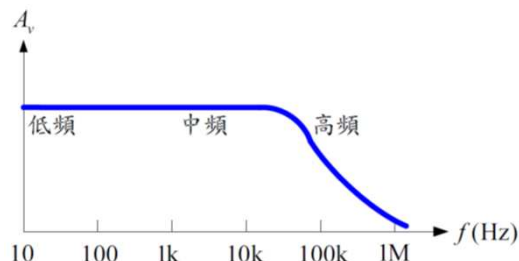


E176B1 通用

8 - 6

直接耦合串級放大電路頻率響應曲線

在低頻率區域，放大器的增益值與中頻段相同，這是由於電路在級與級之間未使用耦合電容或旁路電容器的緣故。而在高頻率區域，放大器的增益也往下降，這是由於極際電容與雜散電容所產生的影響。



▲圖8-6 直接耦合放大電路的頻率響應曲線

旗立



光線一點點，
智慧就亮起來了！

第 8 章 金氧半場效電晶體多級放大電路



E176B1 適用

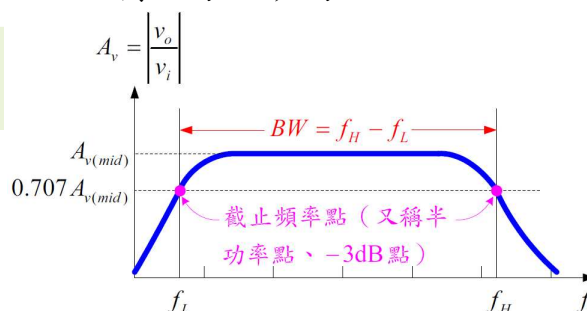
8 - 7

截止頻率

增益值在 $0.707A_{v(mid)}$ ($\frac{1}{\sqrt{2}}A_{v(mid)}$) 處所對應的頻率值為截止頻率 (cutoff frequency) 其中 f_H 稱為高頻截止頻率， f_L 稱為低頻截止頻率。頻帶寬度 (BandWidth，簡記為 BW) 為：

○ 公式8-3-1

$$BW = f_H - f_L$$



▲圖8-7 一般放大器之頻率響應曲線

旗立



光線一點點，
智慧就亮起來了！

第 8 章 金氧半場效電晶體多級放大電路



E176B1 適用

8 - 8

分貝表示的頻率響應曲線

睪 以增益值除上中頻增益 $A_{v(mid)}$ ，
並以分貝為單位來表示：

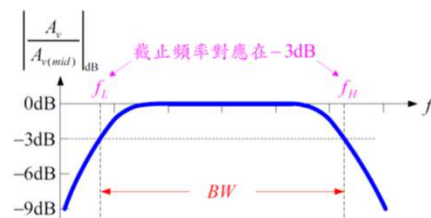
● 公式8-3-3

$$\left| \frac{A_v}{A_{v(mid)}} \right|_{dB} = 20 \log_{10} \left| \frac{A_v}{A_{v(mid)}} \right| \quad [dB]$$

睪 在截止頻率時， $A_v = 0.707A_{v(mid)}$ ，
得：

● 公式8-3-4

$$\left| \frac{A_v}{A_{v(mid)}} \right|_{dB} = 20 \log_{10} \frac{1}{\sqrt{2}} \cong -3 \text{ dB}$$



▲圖8-8 以分貝為單位的頻率響應曲線

旗立



光線一點點，
智慧就出來了！

第 8 章 金氧半場效電晶體多級放大電路



E176B1 通用

8 - 9

n 級串接系統的頻寬

● 公式8-3-5

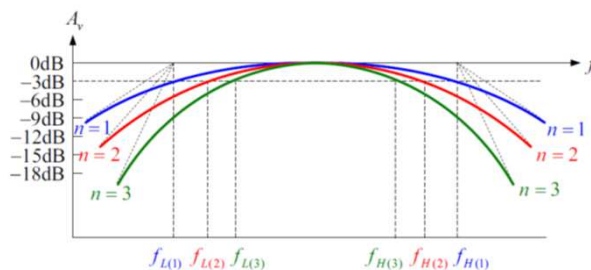
低頻截止頻率：

$$f_{L(n)} = \frac{1}{\sqrt{2^{\frac{1}{n}} - 1}} \cdot f_L$$

● 公式8-3-6

高頻截止頻率：

$$f_{H(n)} = \sqrt{2^{\frac{1}{n}} - 1} \cdot f_H$$



▲圖8-9 串級系統對頻寬的影響

旗立



光線一點點，
智慧就出來了！

第 8 章 金氧半場效電晶體多級放大電路



E176B1 通用

8 - 10

第九章 金氧半場效電晶體 數位電路

- 9-1 金氧半場效電晶體反相器
- 9-2 金氧半場效電晶體反及閘
- 9-3 金氧半場效電晶體反或閘
- 9-4 金氧半場效電晶體數位電路



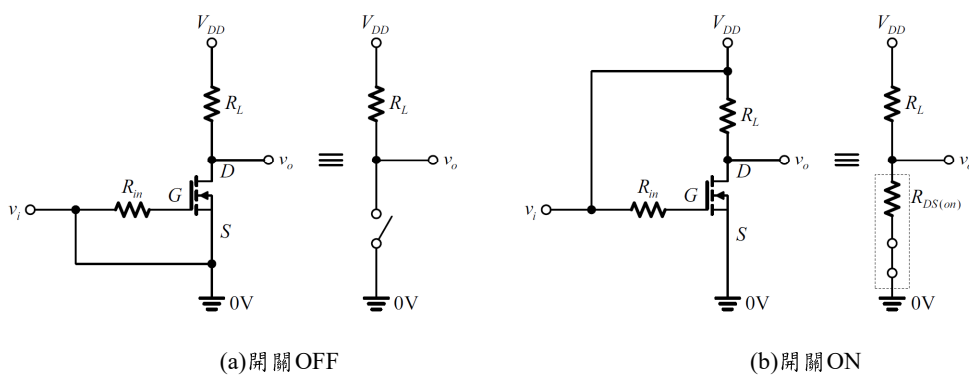
9 - 1

E176B1 適用

旗立

光碟、紙張用得少，
你我讓地球更美好！

MOSFET的開關作用



▲圖9-1 MOSFET的開關作用



9 - 2

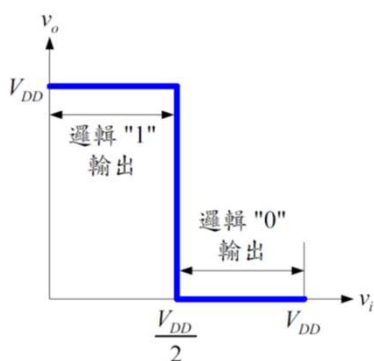
E176B1 適用

旗立

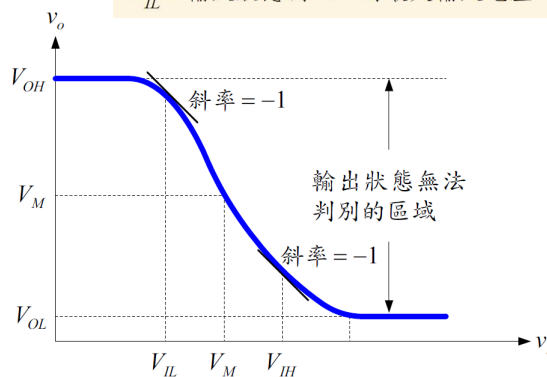
光碟、紙張用得少，
你我讓地球更美好！

第 9 章 金氧半場效電晶體數位電路

反相器的特性曲線



▲圖9-2 理想反相器的電壓轉移特性曲線



▲圖9-3 實際反相器電壓轉換特性曲線

旗立

光線一點點，
智慧無限大！
你與我的智慧，
就是我們的未來！

第9章 金氧半場效電晶體數位電路



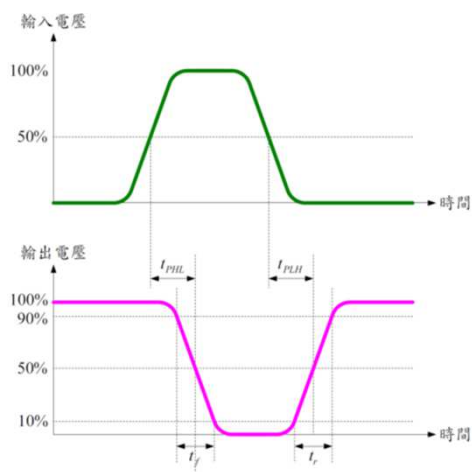
E176B1 通用

9 - 3

實際的反相器輸入輸出電壓波形

- 睇 1. 上升時間 (t_r)
- 睇 2. 下降時間 (t_f)
- 睇 3. 高到低延遲時間 (t_{PHL})
- 睇 4. 低到高延遲時間 (t_{PLH})
- 睇 5. 平均延遲時間 (t_d) :

$$t_d = \frac{t_{PHL} + t_{PLH}}{2}$$



▲圖9-4 實際反相器電壓轉換特性曲線

旗立



光線一點點，
智慧無限大！
你與我的智慧，
就是我們的未來！

第9章 金氧半場效電晶體數位電路



E176B1 通用

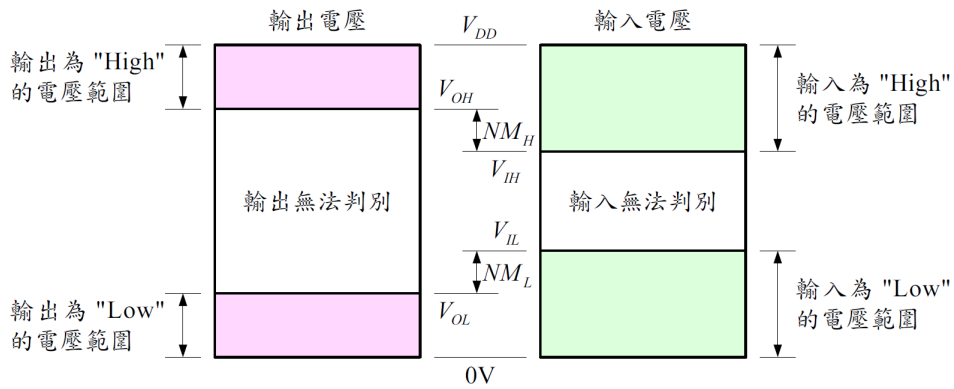
9 - 4

反相器的雜訊邊限

公式9-1-1

高準位雜訊邊限： $NM_H = V_{OH} - V_{IH}$

低準位雜訊邊限： $NM_L = V_{IL} - V_{OL}$



▲圖9-5 數位電路的雜訊邊限

旗立



光碟、網路與電子
你與我的世界最好！

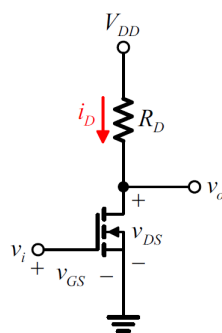
第9章 金氧半場效電晶體數位電路



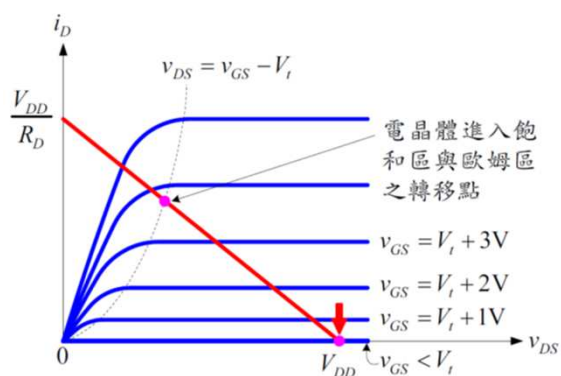
E176B1 通用

9 - 5

電阻式負載之NMOS反相器



▲圖9-6 電阻式負載
NMOS反相器



▲圖9-7 增強型NMOS輸出特性
曲線與負載線

旗立



光碟、網路與電子
你與我的世界最好！

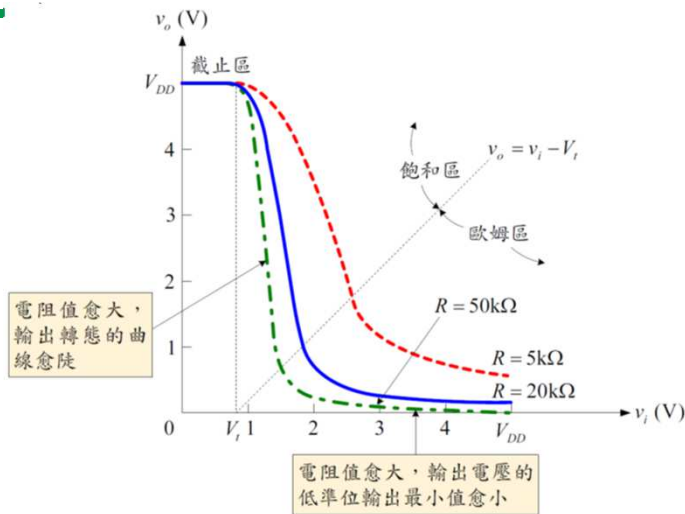
第9章 金氧半場效電晶體數位電路



E176B1 通用

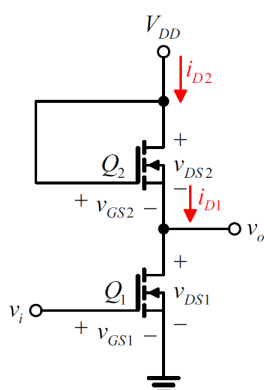
9 - 6

負載電阻值對於反相器之VTC曲線的影響

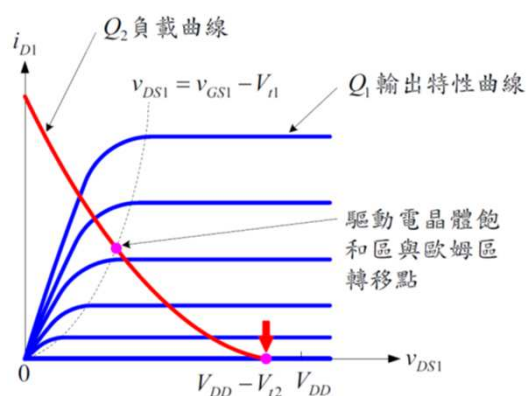


▲ 圖9-8 負載電阻值對於反相器之VTC曲線的影響

增強型負載之NMOS反相器



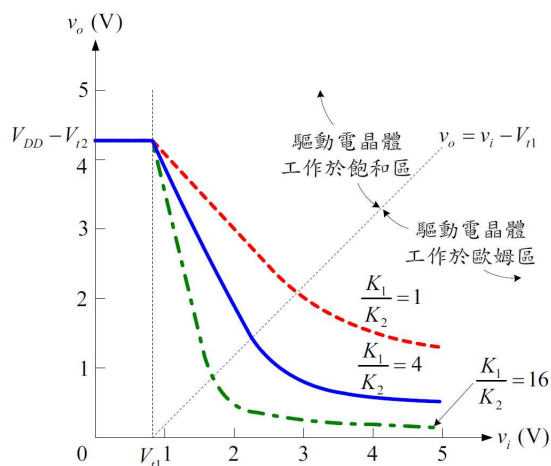
▲ 圖9-9 增強型負載之NMOS反相器



▲ 圖9-10 NMOS驅動電晶體輸出特性曲線與增強型主動式負載曲線

增強型負載NMOS反相器之VTC曲線

1. 增強型負載電晶體的 G 極與 D 極短路，只要導通就會進入飽和區。
2. $\frac{K_1}{K_2}$ 比值愈大，電壓轉移特性曲線在輸出高、低準位轉換時愈陡峭，且輸出的最低電壓值愈小，愈接近理想的反相器。



▲圖9-11 $\frac{K_1}{K_2}$ 值對於增強型負載NMOS反相器之VTC曲線的影響

旗立



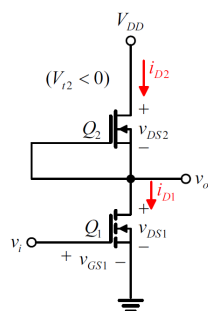
金氣半導體公司
金氣半導體公司

第9章 金氣半場效電晶體數位電路

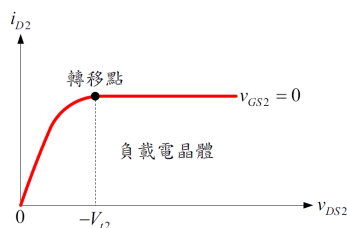
E176B1 通用

9 - 9

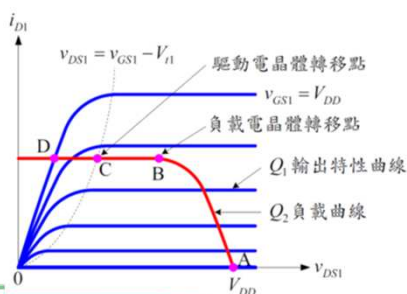
空乏型負載之NMOS反相器



▲圖9-12 空乏型負載之NMOS反相器



▲圖9-13 空乏型負載電晶體 $i_{D2} - v_{DS2}$ 關係圖



▲圖9-14 NMOS驅動電晶體輸出特性曲線與空乏型主動式負載曲線

旗立



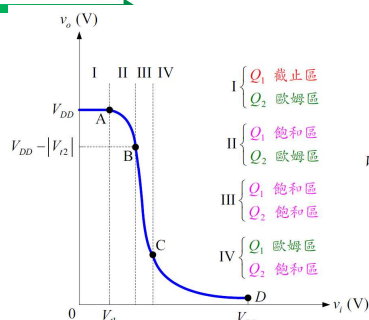
金氣半導體公司
金氣半導體公司

第9章 金氣半場效電晶體數位電路

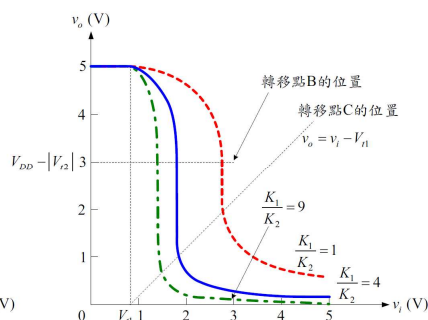
E176B1 通用

9 - 10

空乏型負載NMOS反相器之VTC曲線



▲圖9-15 空乏型負載NMOS反相器之VTC曲線



▲圖9-16 $\frac{K_1}{K_2}$ 值對於空乏型負載NMOS反相器之VTC曲線的影響

相較於增強型負載，空乏型負載的 $\frac{K_1}{K_2}$ 比值就算不是很大，
電壓轉移特性曲線在輸出高、低準位轉換時也可以很陡峭，
且輸出的最低電壓值小，接近理想的反相器。

旗立



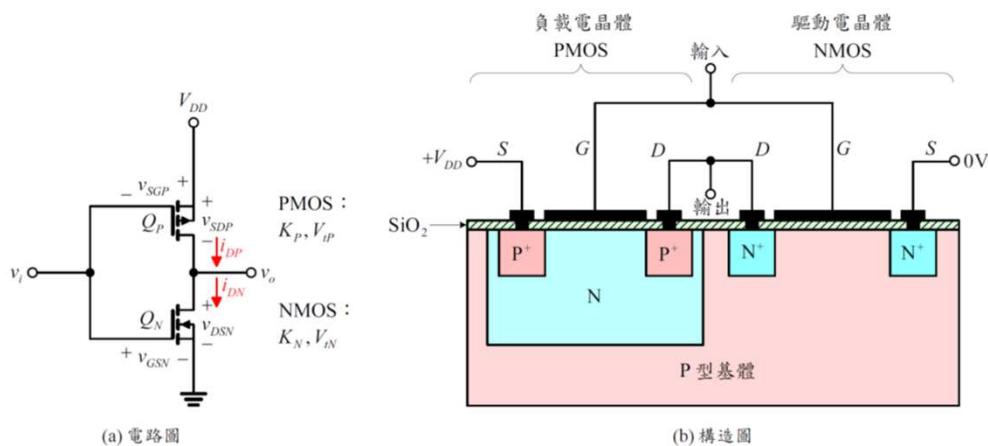
光線，照亮你的心
知識，改變你的世界！

第9章 金氧半場效電晶體數位電路

E176B1 通用

9 - 11

CMOS反相器



▲圖9-17 CMOS反相器

旗立



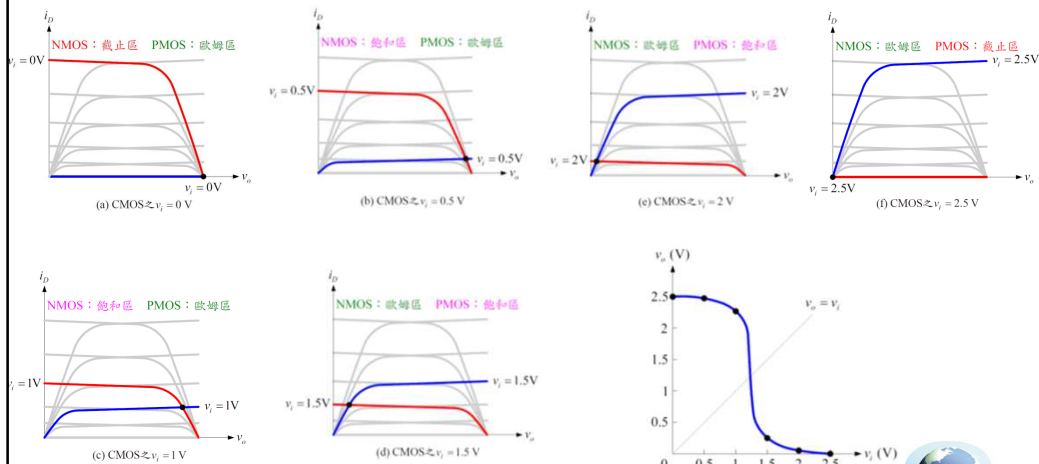
光線，照亮你的心
知識，改變你的世界！

第9章 金氧半場效電晶體數位電路

E176B1 通用

9 - 12

CMOS反相器的電壓轉移特性曲線 $v_o - v_i$ 關係



▲圖9-18 CMOS反相器工作點的變動情形

▲圖9-19 CMOS反相器之VTC曲線

旗立



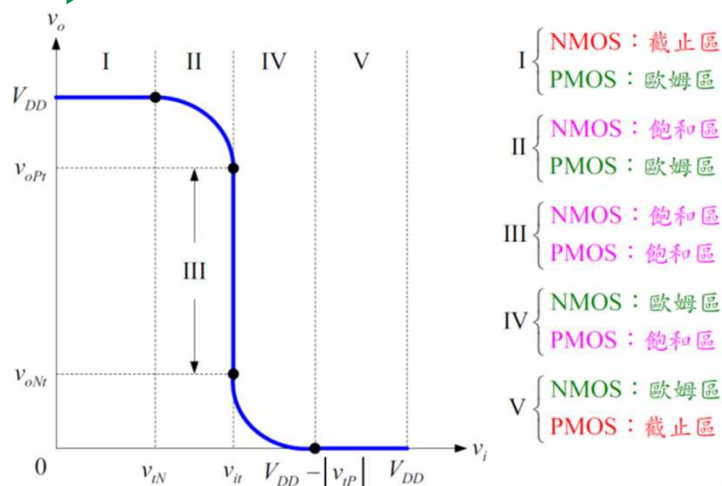
光線一點點，
世界就變美好！

第9章 金氧半場效電晶體數位電路

E176B1 通用

9 - 13

CMOS反相器之VTC曲線



▲圖9-20 依電晶體工作區表示CMOS反相器之VTC曲線

旗立



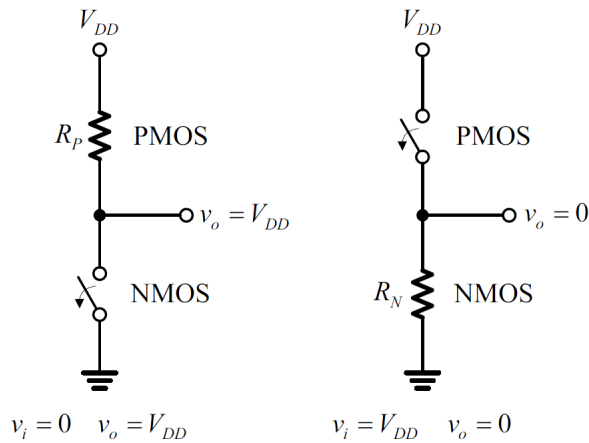
光線一點點，
世界就變美好！

第9章 金氧半場效電晶體數位電路

E176B1 通用

9 - 14

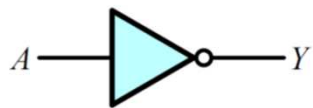
CMOS反相器的等效電路



▲圖9-21 CMOS反相器的等效電路



反相器的符號及真值表



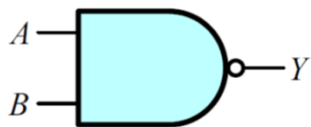
(a) 符號

A	Y
0	1
1	0

(b) 真值表



反及閘的符號、真值表及常見IC型號



(a) 符號

A	B	Y
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

(b) 真值表

旗立



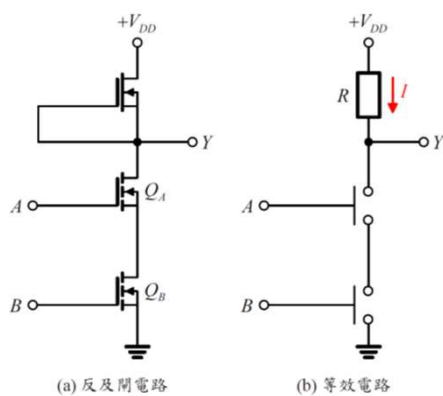
光碟、網路與電子書
您最滿意的學習選擇！

第9章 金氧半場效電晶體數位電路



E176B1 適用 9 - 17

NMOS反及閘



(a) 反及閘電路

(b) 等效電路

▼表9-1 NMOS反及閘的輸出與輸入關係（真值表）

輸入		電晶體動作		輸出
A	B	Q_A	Q_B	Y
0	0	截止	截止	1
0	1	截止	導通	1
1	0	導通	截止	1
1	1	導通	導通	0

註：“1”代表高電位，“0”代表低電位。

▲圖9-22 NMOS反及閘

旗立



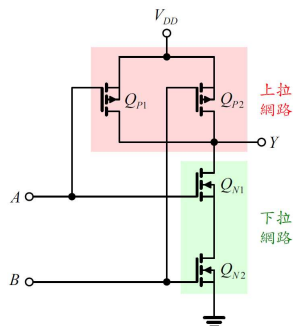
光碟、網路與電子書
您最滿意的學習選擇！

第9章 金氧半場效電晶體數位電路



E176B1 適用 9 - 18

CMOS反及閘



▼表9-2 CMOS反及閘的輸出與輸入關係（真值表）

輸入		電晶體動作				輸出
A	B	Q_{P1}	Q_{N1}	Q_{P2}	Q_{N2}	Y
0	0	導通	截止	導通	截止	1
0	1	導通	截止	截止	導通	1
1	0	截止	導通	導通	截止	1
1	1	截止	導通	截止	導通	0

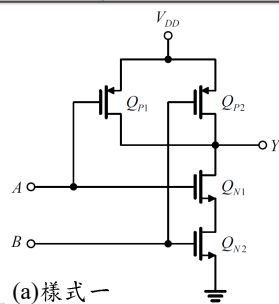
註：“1”代表高電位，“0”代表低電位。

▲圖9-23 CMOS反及閘

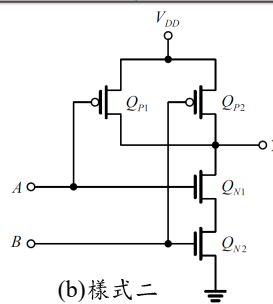


NMOS與PMOS的元件符號

電晶體	本書採用型式	其他常見型式一	其他常見型式二
NMOS			
PMOS			



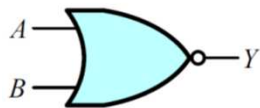
(a)樣式一



(b)樣式二



反或閘的符號、真值表及常見IC型號



(a) 符號

A	B	Y
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

(b) 真值表

旗立



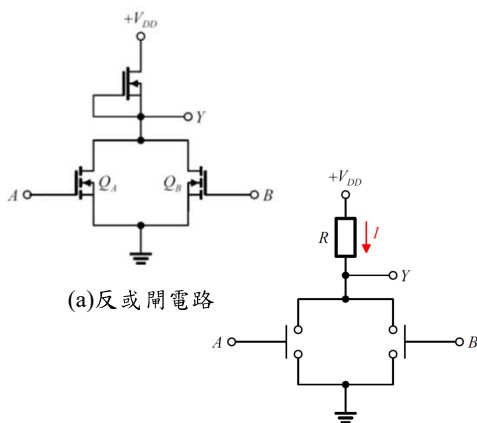
光碟、網路與電子
你與讀者都愛讀！

第9章 金氧半場效電晶體數位電路



E176B1 適用 9 - 21

NMOS反或閘



(a) 反或閘電路

(b) 等效電路

▼表9-3 NMOS反或閘的輸出與輸入關係（真值表）

輸入		電晶體動作		輸出
A	B	Q_A	Q_B	Y
0	0	截止	截止	1
0	1	截止	導通	0
1	0	導通	截止	0
1	1	導通	導通	0

註：“1”代表高電位，“0”代表低電位。

▲圖9-24 NMOS反或閘

旗立



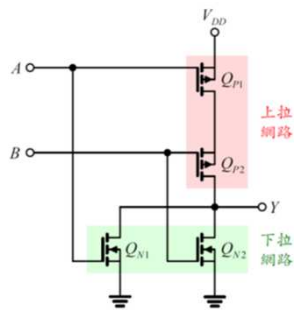
光碟、網路與電子
你與讀者都愛讀！

第9章 金氧半場效電晶體數位電路



E176B1 適用 9 - 22

CMOS反或閥



▼表9-4 CMOS反或閥的輸出與輸入關係（真值表）

輸入		電晶體動作				輸出
A	B	Q_{P1}	Q_{N1}	Q_{P2}	Q_{N2}	Y
0	0	導通	截止	導通	截止	1
0	1	導通	截止	截止	導通	0
1	0	截止	導通	導通	截止	0
1	1	截止	導通	截止	導通	0

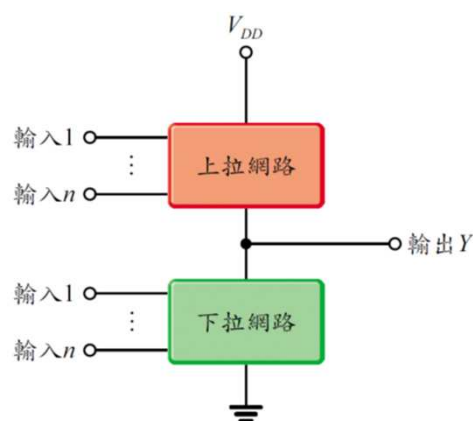
註："1" 代表高電位，"0" 代表低電位。

▲圖9-25 CMOS反或閥



CMOS邏輯電路架構

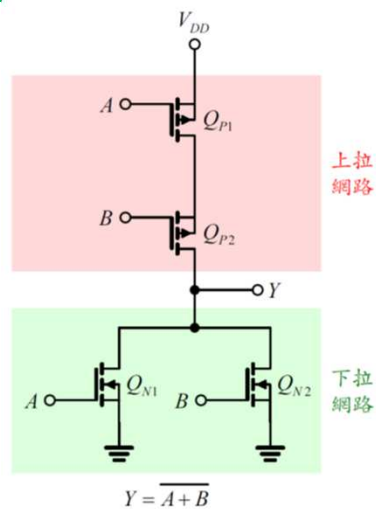
若要使輸出Y呈現高電位（"1"），電源 V_{DD} 與輸出端之間至少要存在一條導通的路徑，而且輸出端與接地端之間的下拉網路，沒有任何導通路徑存在。若要使輸出Y呈現低電位（"0"），電源 V_{DD} 與輸出端之間的上拉網路，沒有任何導通路徑存在，而且輸出端與接地端之間的下拉網路，至少要存在一條導通的路徑。



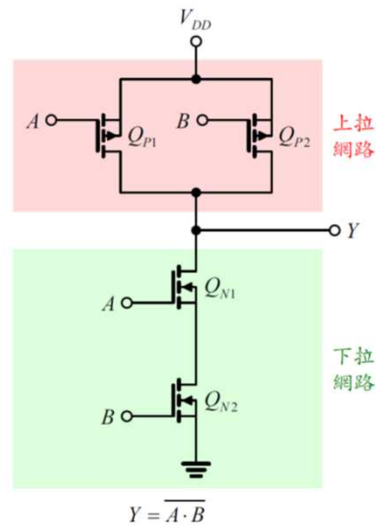
▲圖9-26 CMOS電路構造分析



CMOS所組成之反或閘與反及閘



▲圖9-27 CMOS所組成反或閘



▲圖9-28 CMOS所組成反及閘

旗立

光緒一萬年
光緒一萬年

第9章 金氧半場效電晶體數位電路

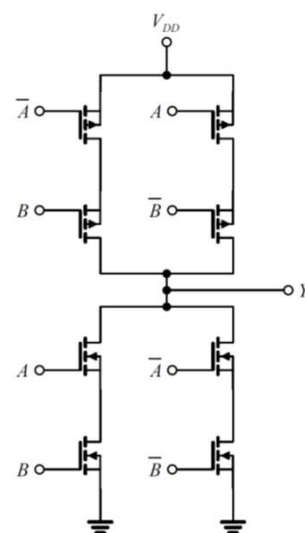


E176B1 通用 9 - 25

CMOS互斥或閘

- 互斥或閘輸出與輸入的邏輯關係為

$$Y = \overline{AB} + A\overline{B}$$
- 上拉網路：目的使得輸出為“1”，發生在 $\overline{AB}$ ，因此 $(A, B) = (0, 1)$ 或 $(1, 0)$ 皆有可能，因此會有兩條路徑 $\overline{AB}$ 、 $A\overline{B}$ 並聯。
- 下拉網路：目的使得輸出為“0”，發生在 AB ，因此 $(A, B) = (0, 0)$ 或 $(1, 1)$ 皆有可能，因此會有兩條路徑 AB 、 $\overline{A\overline{B}}$ 並聯。



▲圖9-29 CMOS互斥或閘

旗立



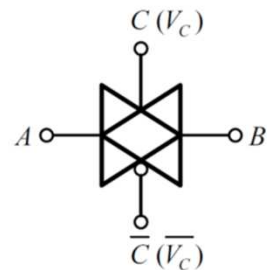
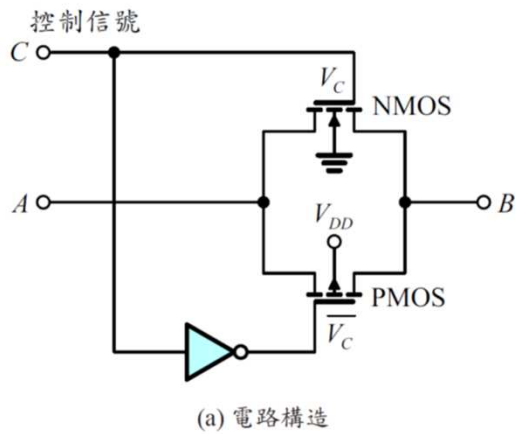
光緒一萬年
光緒一萬年

第9章 金氧半場效電晶體數位電路



E176B1 通用 9 - 26

CMOS傳輸開



▲圖9-30 CMOS 傳輸開

旗立



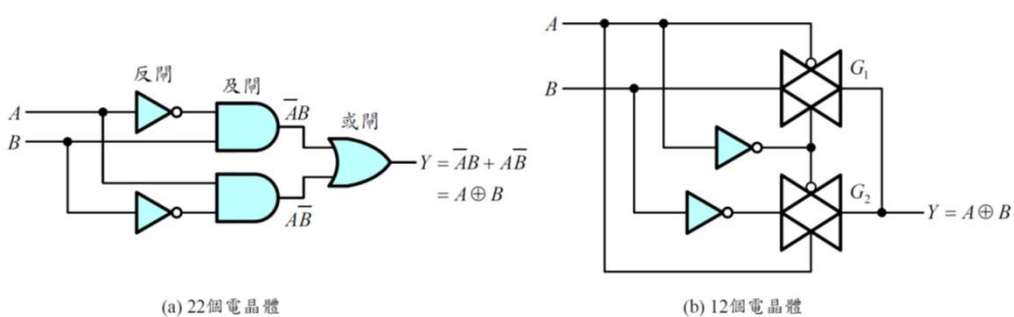
光線一經點燃，
智慧火花便會湧現！

第9章 金氧半場效電晶體數位電路



E176B1 通用 9 - 27

傳輸開應用在數位電路



▲圖9-31 傳輸開應用在數位電路

旗立



光線一經點燃，
智慧火花便會湧現！

第9章 金氧半場效電晶體數位電路



E176B1 通用 9 - 28

第十章 運算放大器

- 10-1 理想運算放大器的認識
- 10-2 運算放大器之特性及參數
- 10-3 反相及非反相放大器
- 10-4 加法器及減法器
- 10-5 微分器及積分器
- 10-6 比較器



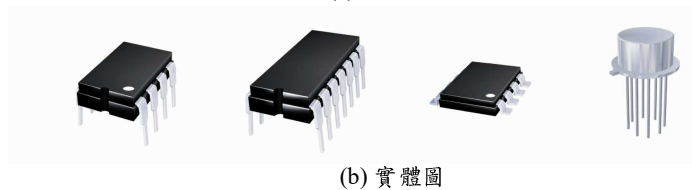
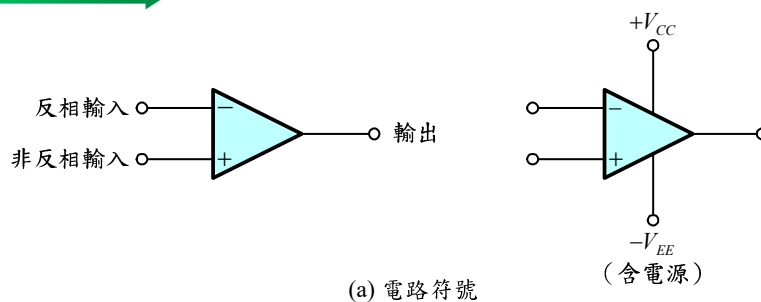
10 - 1

E176B1 適用

旗立

光碟、紙張用得少，
你我讓地球更美好！

運算放大器的電路符號與實體圖



(b) 實體圖

▲ 圖10-1 運算放大器的電路符號與實體圖



E176B1 適用

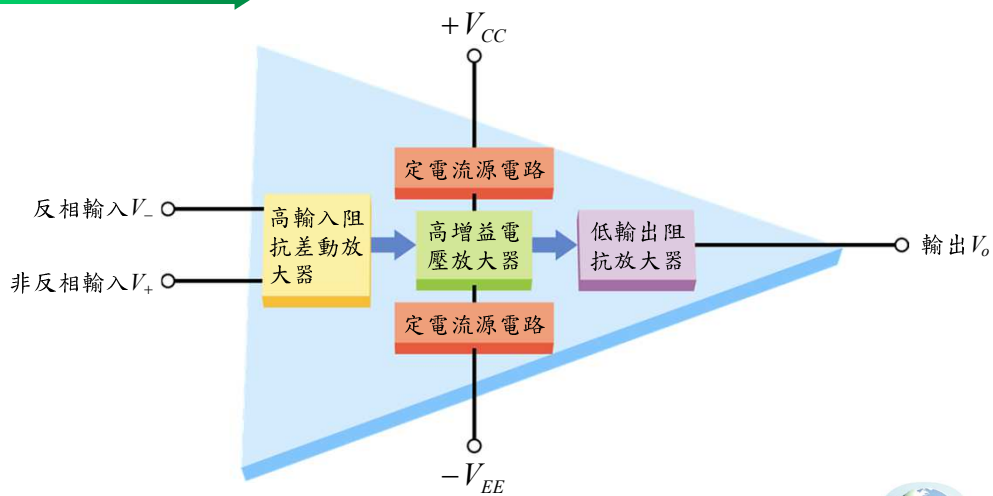
10 - 2

旗立

光碟、紙張用得少，
你我讓地球更美好！

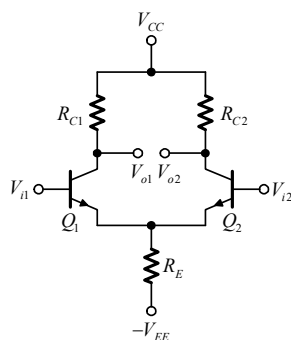
第 10 章 運算放大器

運算放大器的結構方塊圖

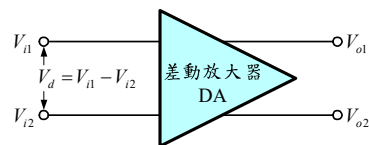


▲圖10-2 運算放大器的結構方塊圖

差動放大器的電路圖與電路符號



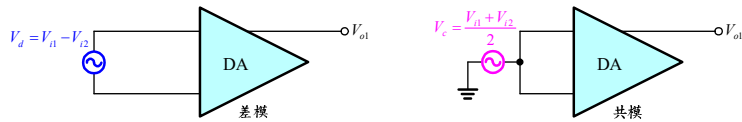
(a) 電路圖



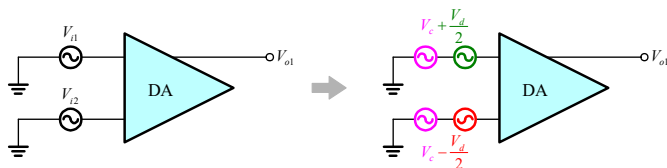
(b) 電路符號

▲圖10-3 差動放大器的電路圖與電路符號

差模信號與共模信號



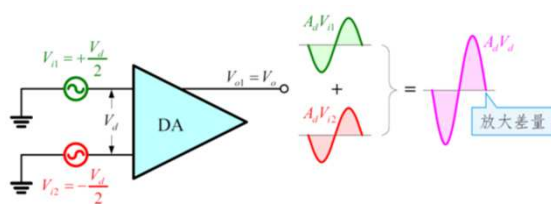
(a) 差模與共模信號的輸入模式



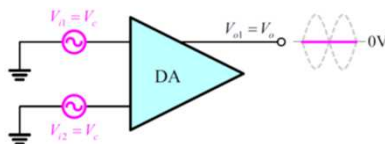
(b) 任意輸入信號可分解為差模與共模信號的組合

▲圖10-4 差模信號與共模信號

理想差動放大器的輸出



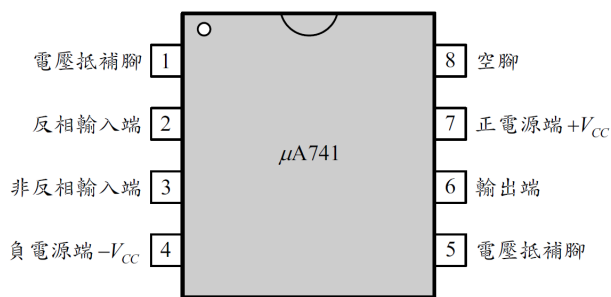
(a) 差模輸入



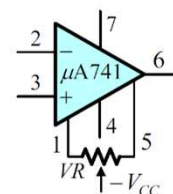
(b) 共模輸入

▲圖10-5 理想差動放大器的差模與共模信號輸出

運算放大器IC $\mu A741$



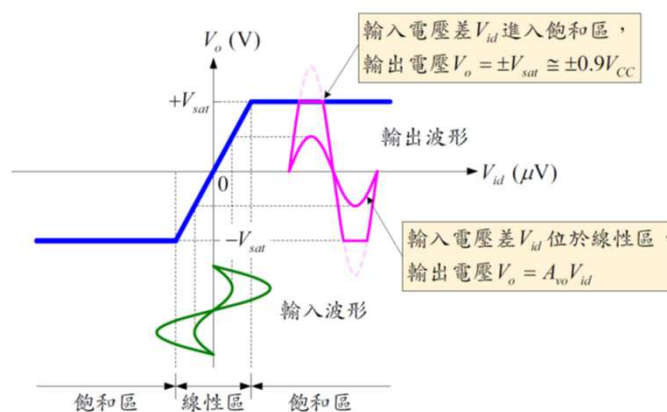
(a)接腳圖



(b)電路符號及腳位

▲圖10-6 運算放大器IC $\mu A741$

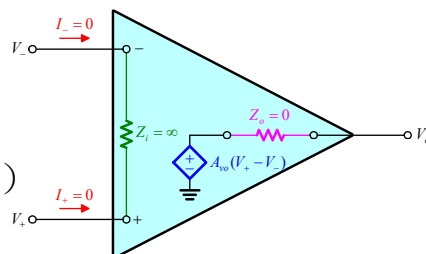
OPA輸出電壓與輸入電壓差關係圖



▲圖10-7 OPA輸出電壓與輸入電壓差關係圖

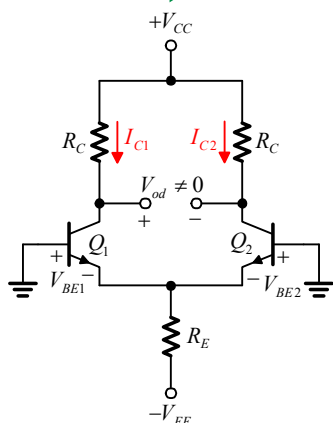
理想運算放大器的基本特性

- ◆ 輸入阻抗 $Z_i = \infty$
 睞 (典型值約為 $Z_i = 2 \text{ M}\Omega$)
- ◆ 輸出阻抗 $Z_o = 0$
 睞 (典型值約為 $Z_o = 75 \Omega$)
- ◆ 開迴路電壓增益 $A_{vo} = \infty$
 睞 (典型值約為 $A_{vo} = 2 \times 10^5$ 或 106dB)
- ◆ 頻帶寬度 $BW = \infty$
- ◆ 抵補電壓為零
- ◆ 共模拒斥比 $CMRR = \infty$
 睞 (典型值約為 $CMRR(\text{dB}) = 90 \text{ dB}$)
- ◆ 響應時間為零

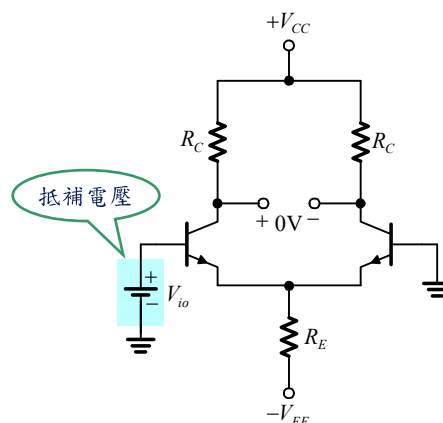


▲ 圖10-8 理想運算放大器的等效電路

OPA之輸入級電晶體不匹配的影響



(a) $V_{BE1} \neq V_{BE2} \Rightarrow I_{C1} \neq I_{C2}, V_{od} \neq 0$

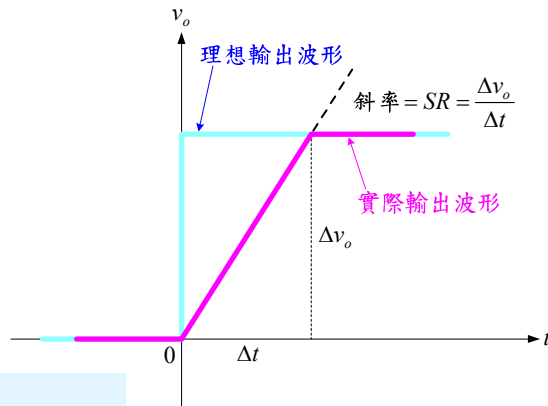


(b) 加入抵補電壓, $V_{od} = 0$

▲ 圖10-9 OPA之輸入級電晶體不匹配的影響

轉動率

轉動率又稱為變動率、迴轉率或延遲率，其意義為當運算放大器的輸入電壓變動時，輸出電壓的最大變化率。



▲圖10-12 轉動率圖示

$$SR = \left. \frac{dv_o}{dt} \right|_{\max} \quad \text{或} \quad \frac{\Delta v_o}{\Delta t} \quad \text{公式10-2-3}$$

旗立



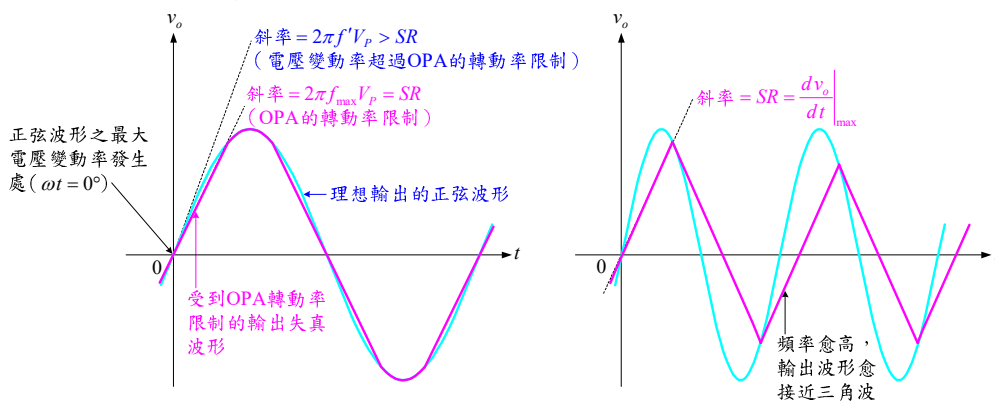
知識、經驗與信心
為您帶來更多美好！

第 10 章 運算放大器



E176B1 通用 10 - 11

受OPA轉動率限制之輸出波形



使輸出電壓不失真的最大頻率為：

$$f_{\max} = \frac{SR}{2\pi V_p}$$

旗立



知識、經驗與信心
為您帶來更多美好！

第 10 章 運算放大器



E176B1 通用 10 - 12

反相放大器

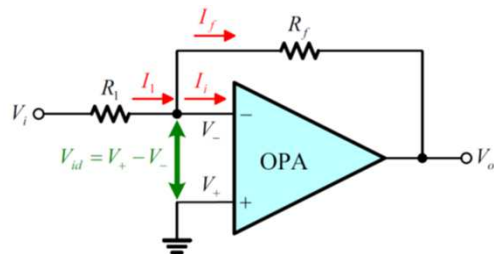
分析OPA電路常用的兩大觀念：

◆ 運算放大器的輸入電流
 I_i 為零 ($I_i = 0$)

◆ 運算放大器的兩輸入端
電位相等 ($V_- = V_+$)

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_f}{R_1}$$

公式10-3-2



▲ 圖10-14 反相放大器

旗立



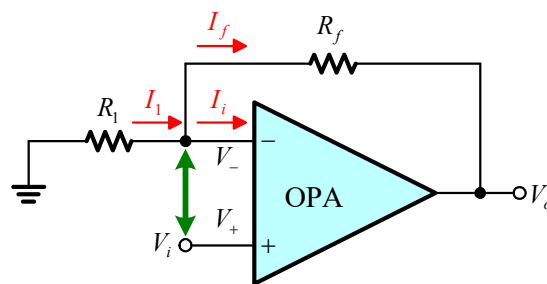
光緒 - 臺灣開埠
百年慶典紀念

第 10 章 運算放大器



E176B1 適用 10 - 13

非反相放大器



▲ 圖10-15 非反相放大器

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

公式10-3-4

旗立



光緒 - 臺灣開埠
百年慶典紀念

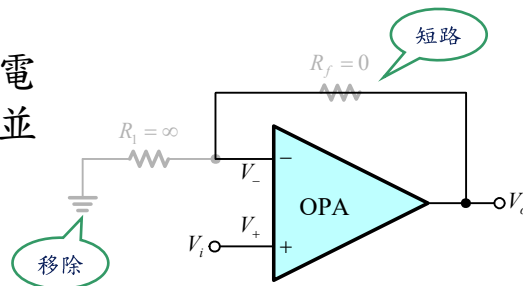
第 10 章 運算放大器



E176B1 適用 10 - 14

電壓隨耦器

非反相放大器的回授電阻 R_f 短路 ($R_f = 0$)，並將電阻移除 ($R_1 = \infty$)



▲ 圖10-16 電壓隨耦器

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{R_f}{R_1} = 1 + \frac{0}{\infty} = 1$$

公式10-3-5

旗立



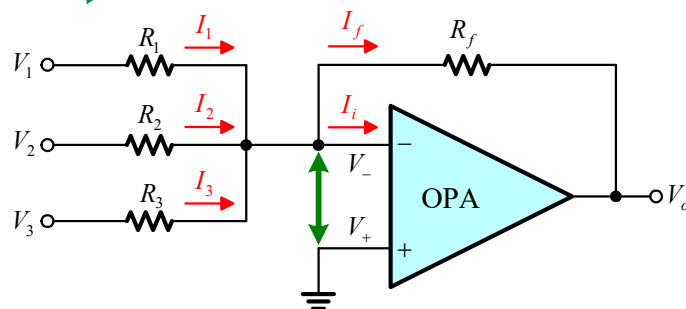
電腦、網路、資訊、
你與我的世界一起變好！

第 10 章 運算放大器



E176B1 通用 10 - 15

反相加法器



▲ 圖10-17 反相加法器

$$V_o = -R_f \left(\frac{1}{R_1} V_1 + \frac{1}{R_2} V_2 + \frac{1}{R_3} V_3 \right)$$

公式10-4-1

旗立



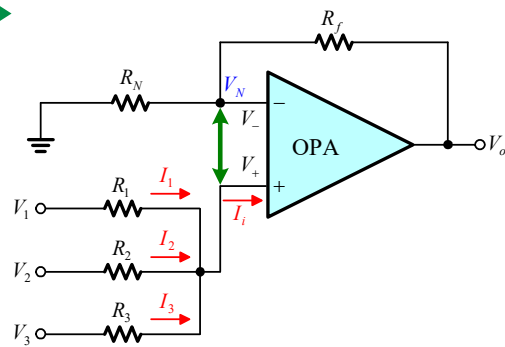
電腦、網路、資訊、
你與我的世界一起變好！

第 10 章 運算放大器



E176B1 通用 10 - 16

非反相加法器



▲圖10-18 非反相加法器

$$V_o = \frac{1}{n} \left(1 + \frac{R_f}{R_N} \right) (V_1 + V_2 + \dots + V_n)$$

公式10-4-6

旗立



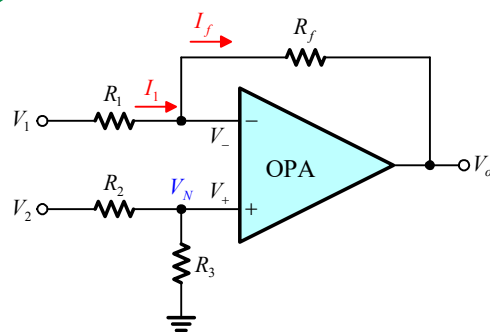
電腦、網路、電子、
你願意學習嗎？

第 10 章 運算放大器



E176B1 通用 10 - 17

減法器



▲圖10-19 減法器

$$V_o = -\frac{R_f}{R_1} V_1 + \left(1 + \frac{R_f}{R_1} \right) \left(\frac{R_3}{R_2 + R_3} \right) V_2$$

公式10-4-7

旗立



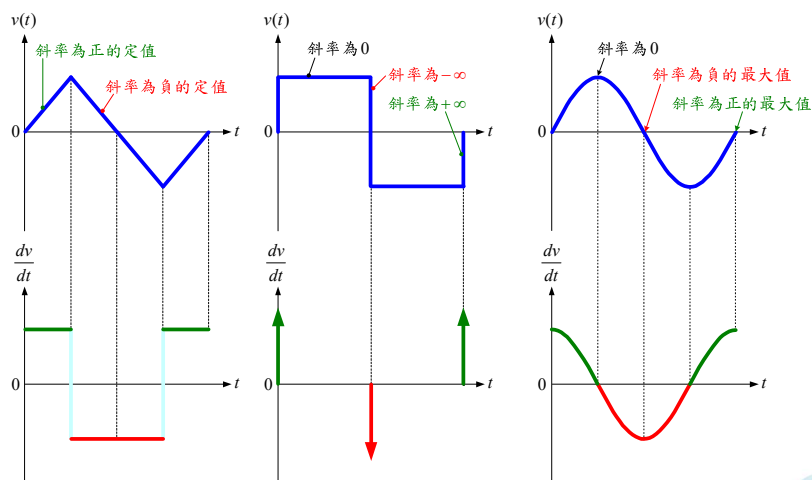
電腦、網路、電子、
你願意學習嗎？

第 10 章 運算放大器



E176B1 通用 10 - 18

常見波形與微分後的圖例



▲圖10-20 常見波形與微分後的圖例

旗立



光緒一萬年曆
你與歷史同在！

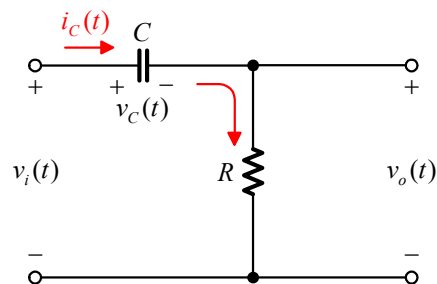
第 10 章 運算放大器



E176B1 通用 10 - 19

RC微分電路

RC串聯電路，若將其輸出電壓 v_o 從電阻 R 的兩端取出，則可形成一簡單的RC微分電路。



▲圖10-21 RC微分電路

$$v_o(t) \cong RC \frac{dv_i(t)}{dt}$$

公式10-5-1

旗立



光緒一萬年曆
你與歷史同在！

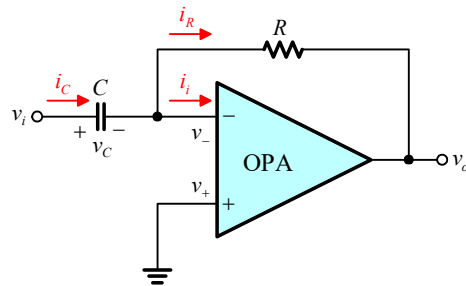
第 10 章 運算放大器



E176B1 通用 10 - 20

OPA微分電路

利用OPA組成的微分電路，其電路結構類似反相放大電路，只是將輸入元件改為電容器，並與回授電阻形成一RC電路。

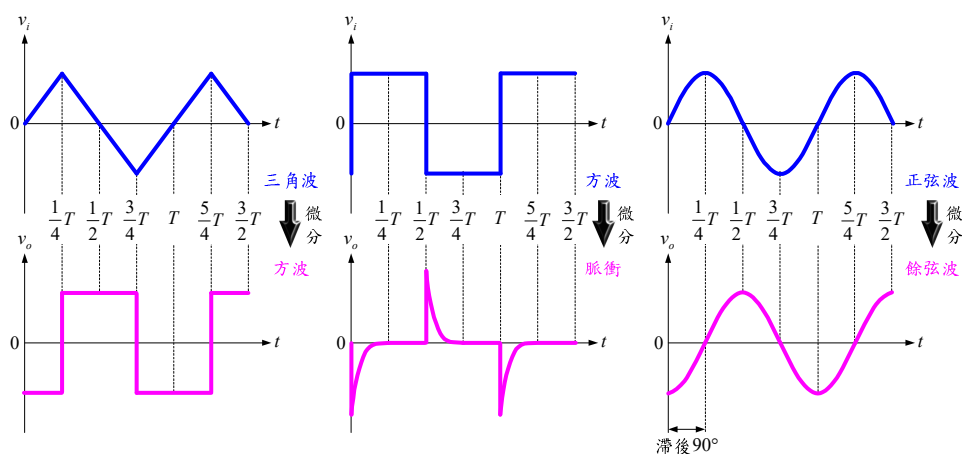


▲圖10-22 OPA微分電路

$$v_o(t) = -RC \frac{dv_i(t)}{dt}$$

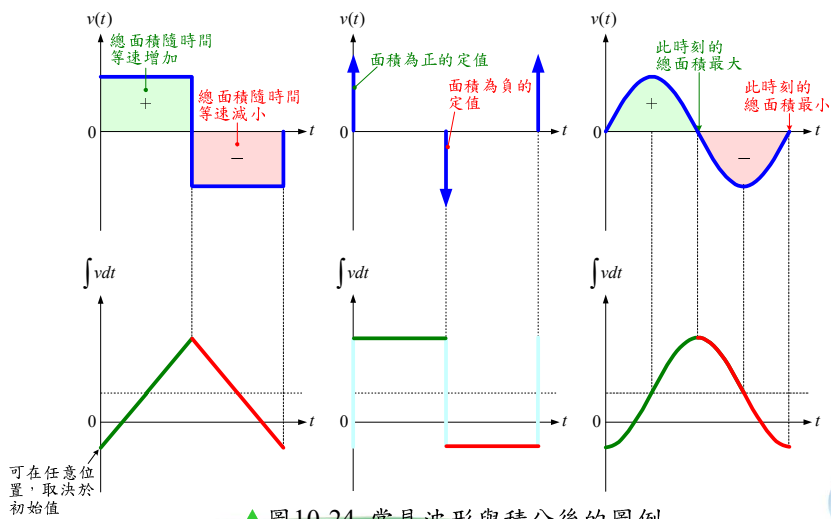
公式10-5-2

OPA微分電路的輸入與輸出波形



▲圖10-23 OPA微分電路的輸入與輸出波形

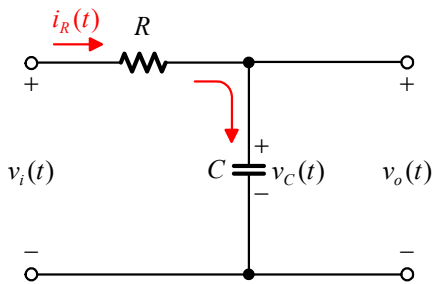
常見波形與積分後的圖例



▲圖10-24 常見波形與積分後的圖例

RC積分電路

*RC*串聯電路，若將其輸出電壓 v_o 從電容 C 的兩端取出，則可形成一簡單的*RC*積分電路。



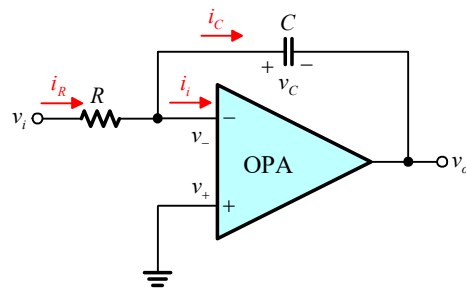
▲圖10-25 RC積分電路

$$v_o(t) \cong \frac{1}{RC} \int v_i(t) dt$$

公式10-5-3

OPA積分電路

利用OPA所組成的積分電路，其電路結構類似反相放大電路，只有將回授元件改為電容器，並與輸入電阻器形成一RC電路。



▲圖10-26 OPA積分電路

$$v_o(t) = 0 - v_c(t) = -\frac{1}{RC} \int v_i(t) dt - V_{C0}$$

公式10-5-4

旗立



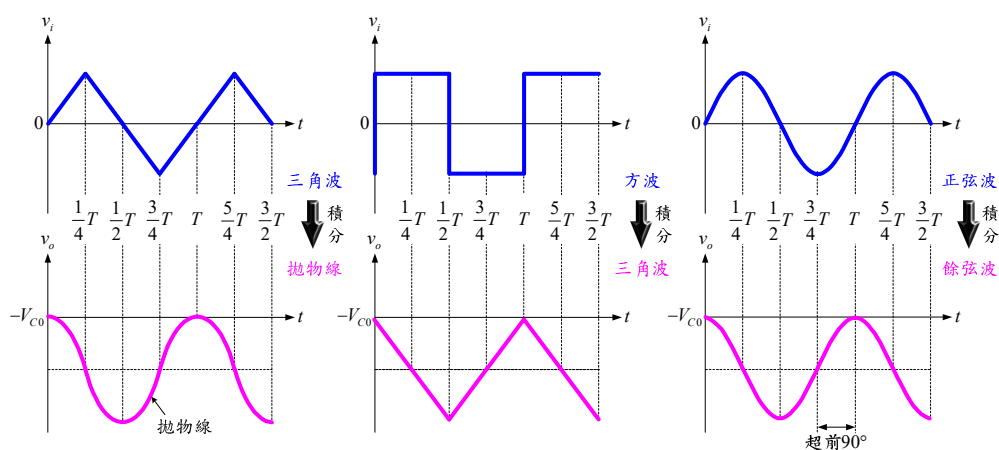
知識，從這裡開始！
你願意學習嗎？

第 10 章 運算放大器



E176B1 通用 10 - 25

OPA積分電路的輸入與輸出波形



▲圖10-27 OPA積分電路的輸入與輸出波形

旗立



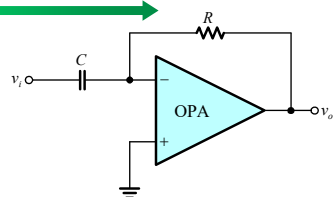
知識，從這裡開始！
你願意學習嗎？

第 10 章 運算放大器

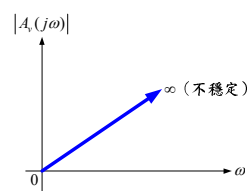


E176B1 通用 10 - 26

改良前和後的微分電路

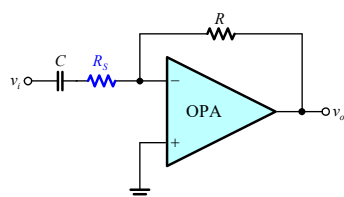


(a) 電路圖

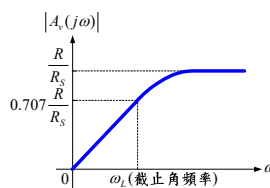


(b) 頻率響應

▲圖10-28 改良前的微分電路



(a) 電路圖



(b) 頻率響應

▲圖10-29 改良後的微分電路

旗立



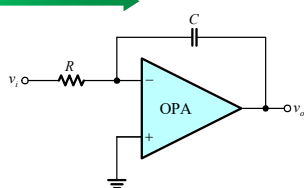
光線一點點，
世界就明亮了！

第 10 章 運算放大器

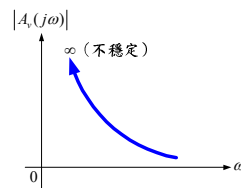
E176B1 通用

10 - 27

改良前和後的積分電路

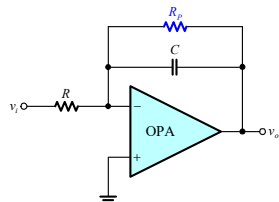


(a) 電路圖

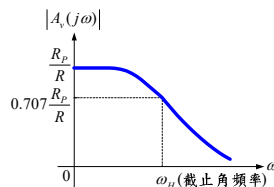


(b) 頻率響應

▲圖10-30 改良前的積分電路



(a) 電路圖



(b) 頻率響應

▲圖10-31 改良後的積分電路

旗立



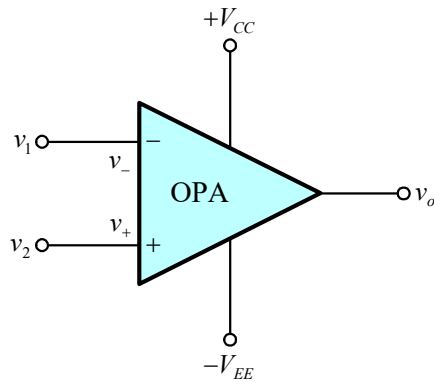
光線一點點，
世界就明亮了！

第 10 章 運算放大器

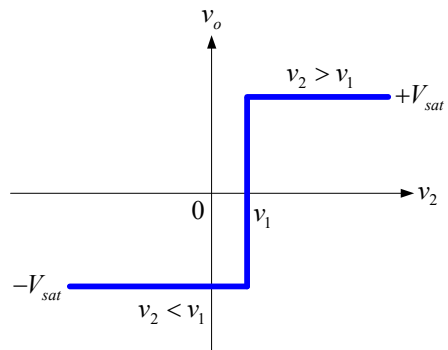
E176B1 通用

10 - 28

基本比較器



(a) 電路圖

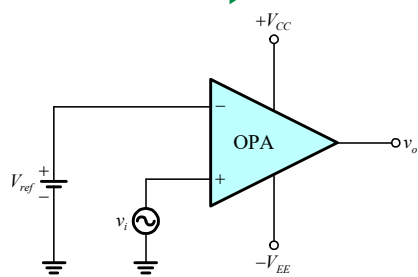


(b) 轉換特性曲線

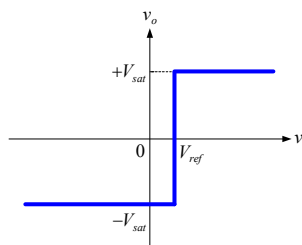
▲ 圖10-32 基本比較器



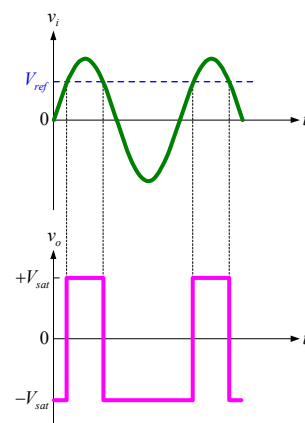
非反相輸入型比較器



(a) 電路圖



(b) 轉換特性曲線

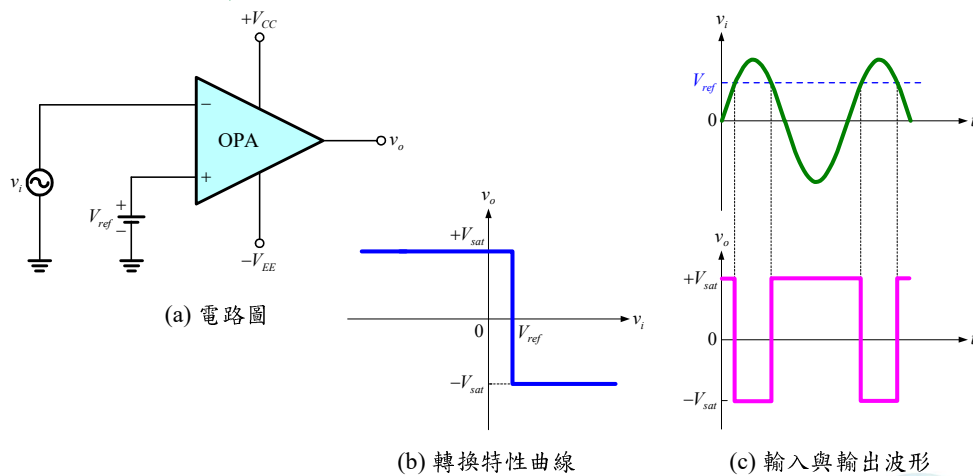


(c) 輸入與輸出波形

▲ 圖10-33 非反相輸入型比較器



反相輸入型比較器



▲圖10-34 反相輸入型比較器

旗立



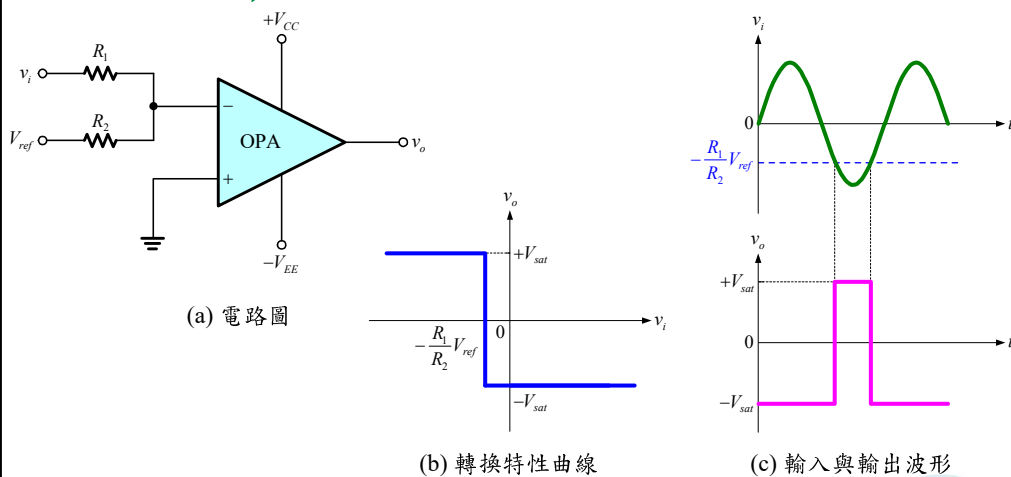
光碟、網路課程、
免費下載電子書！

第 10 章 運算放大器



E176B1 通用 10 - 31

臨界電位比較器



▲圖10-35 臨界電位比較器

旗立



光碟、網路課程、
免費下載電子書！

第 10 章 運算放大器



E176B1 通用 10 - 32

第十一章 運算放大器振盪 電路及濾波器

11-1 正弦波產生電路

11-2 施密特觸發器

11-3 方波產生電器

11-4 三角波產生電路

11-5 一階濾波器

旗立

光碟、紙張用得少，
你我讓地球更美好！

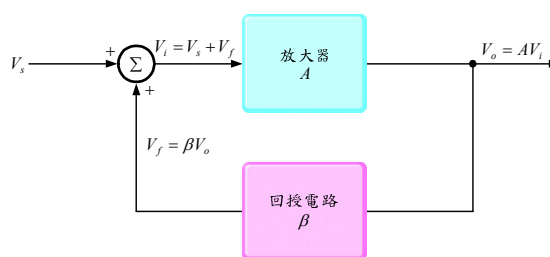


11 - 1

E176B1 適用

正回授

若回授（反饋）信號 V_f 與輸入信號 V_s 相加的結果，使輸入放大器的信號 V_i 振幅變大，則稱此為正回授（positive feedback）。



▲圖11-1 正回授電路的方塊圖

$$\text{閉迴路增益： } A_f = \frac{V_o}{V_s} = \frac{A}{1 - \beta A}$$

公式11-1-1

旗立

光碟、紙張用得少，
你我讓地球更美好！

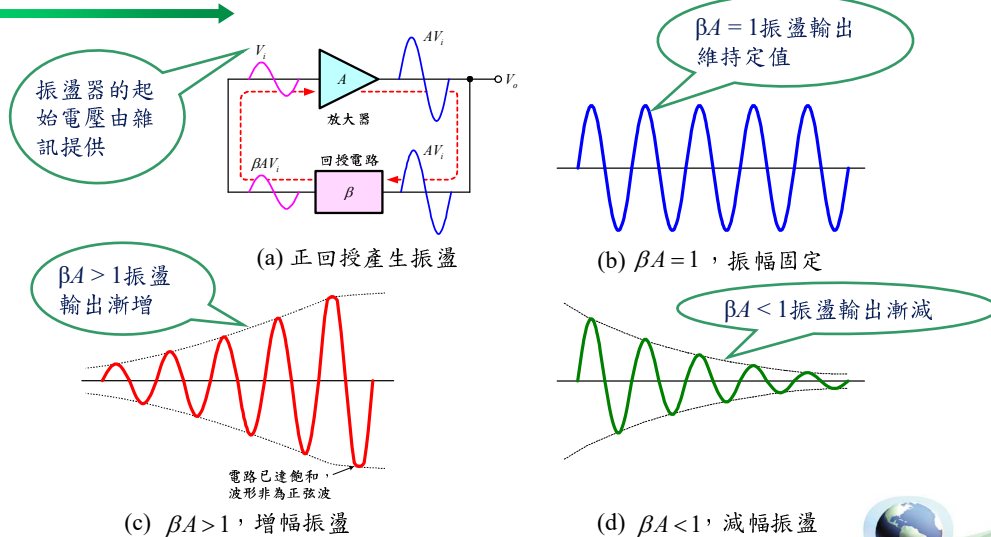
第 11 章運算放大器振盪電路及濾波器



E176B1 適用

11 - 2

正回授產生振盪的情形



▲圖11-2 正回授產生振盪的情形

旗立



光碟、網路課程
你與書的親密關係！

第 11 章運算放大器振盪電路及濾波器



E176B1 通用 11 - 3

正弦波振盪器的分類

▼表11-1 正弦波振盪器的分類

分類	低頻振盪電路	高頻振盪電路
組成元件	電阻器 R 、電容器 C	電感器 L 、電容器 C
振盪頻率	20Hz ~ 50kHz的音頻信號	50kHz ~ 300MHz的射頻信號
常見電路	RC相移振盪器、韋恩電橋振盪器	考畢子振盪器、哈特萊振盪器、石英晶體振盪器

旗立



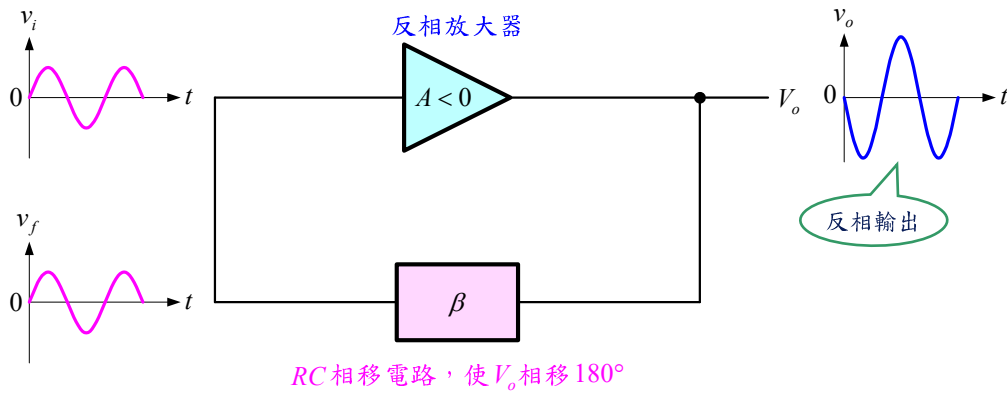
光碟、網路課程
你與書的親密關係！

第 11 章運算放大器振盪電路及濾波器



E176B1 通用 11 - 4

RC相移振盪器方塊圖



▲圖11-3 RC相移振盪器方塊圖

旗立



知識，從這裡開始！
你願意接受挑戰嗎？

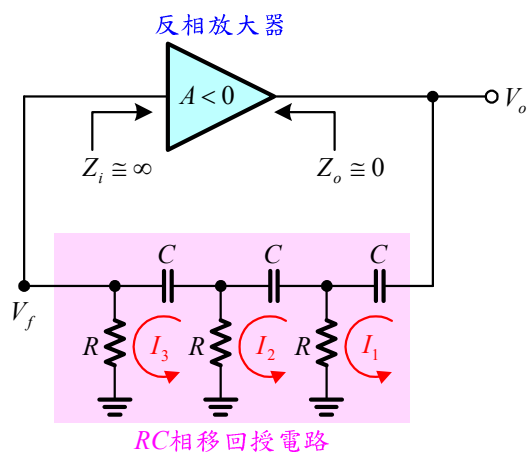
第 11 章 運算放大器振盪電路及濾波器



E176B1 通用

11 - 5

超前式RC相移振盪器



$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{6}RC}$$

公式11-1-2

$$\beta = \frac{V_f}{V_o} = -\frac{1}{29}$$

(負號的意義表示 β
回授電路相移 180°)

公式11-1-3

▲圖11-5 超前式RC相移振盪器

旗立



知識，從這裡開始！
你願意接受挑戰嗎？

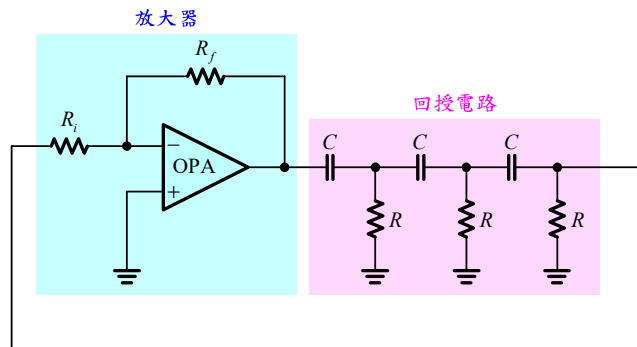
第 11 章 運算放大器振盪電路及濾波器



E176B1 通用

11 - 6

OPA RC相移振盪器



▲圖11-6 OPA RC相移振盪器

旗立



閱讀，是為了學習。
你願意學習嗎？

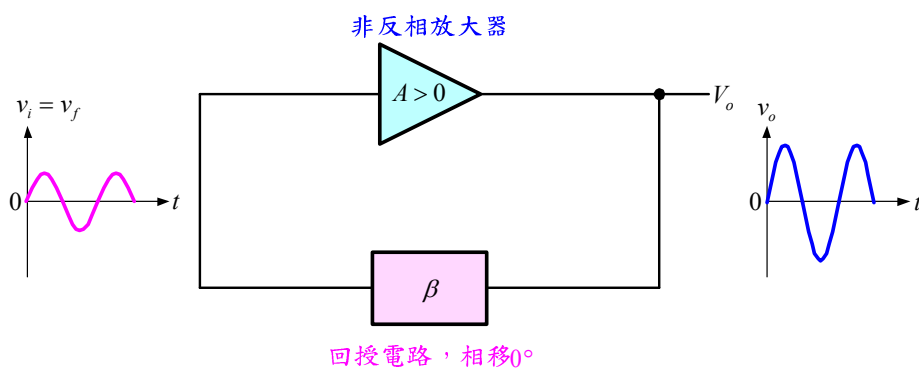
第 11 章 運算放大器振盪電路及濾波器



E176B1 通用

11 - 7

韋恩電橋振盪器 (1)



(a) 方塊圖

▲圖11-7 韋恩電橋振盪器

旗立



閱讀，是為了學習。
你願意學習嗎？

第 11 章 運算放大器振盪電路及濾波器

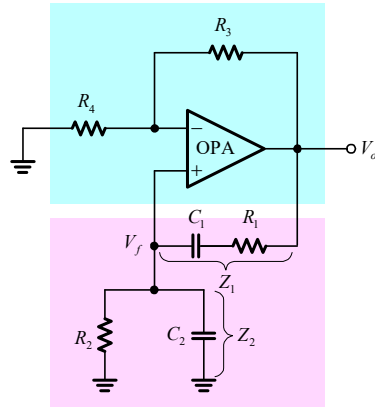


E176B1 通用

11 - 8

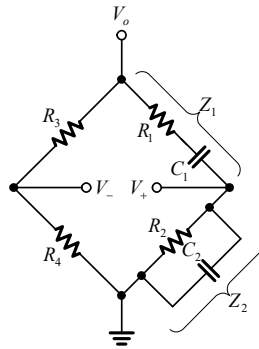
韋恩電橋振盪器 (2)

非反相放大器



回授電路

(b) 電路圖



(c) 電橋網路

▲圖11-7 韋恩電橋振盪器 (續)

旗立



電腦、網路、資訊、
你與我的世界更好！

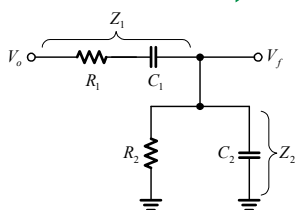
第 11 章 運算放大器振盪電路及濾波器



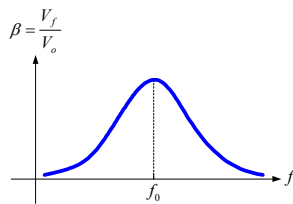
E176B1 通用

11 - 9

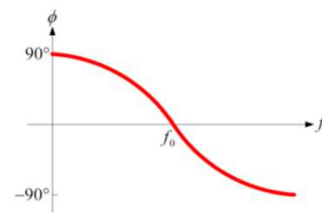
韋恩電橋振盪器 (3)



(a) 正回授電路圖



(b) 頻率 f 與 β 之響應圖



註： ϕ 代表 V_f 與 V_o 的相位差。

(c) 頻率 f 與相位 ϕ 之響應圖

▲圖11-8 正回授電路與頻率響應圖

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

公式11-1-4

$$\beta = \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{C_2}{C_1}}$$

公式11-1-5

旗立



電腦、網路、資訊、
你與我的世界更好！

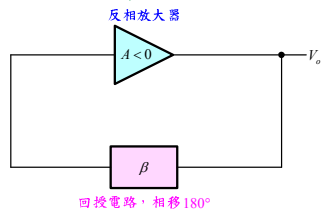
第 11 章 運算放大器振盪電路及濾波器



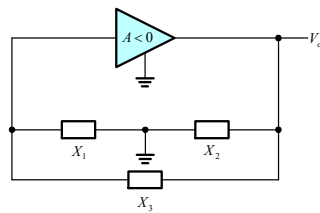
E176B1 通用

11 - 10

LC振盪器的方塊圖與組態圖

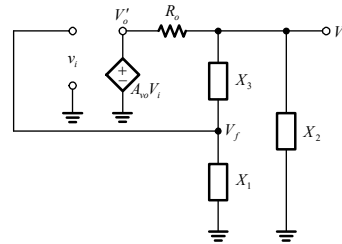


(a) 方塊圖



(b) 組態圖

▲圖11-9 LC振盪器的方塊圖與組態圖

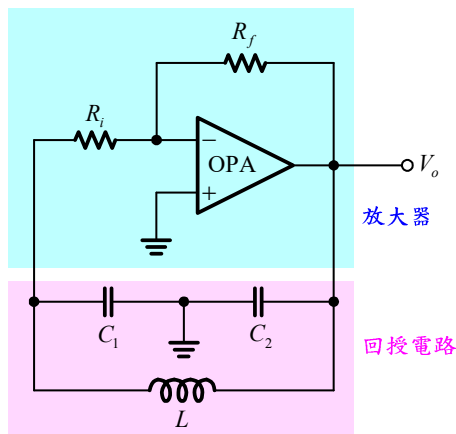


▲圖11-10 LC振盪器一般組態等效電路圖

▼表11-2 常見的LC振盪器

振盪器類型	電抗元件		
	X_1	X_2	X_3
考畢子振盪器	C	C	L
哈特萊振盪器	L	L	C

考畢子振盪器



▲圖11-11 OPA考畢子振盪器

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_{eq}}}$$

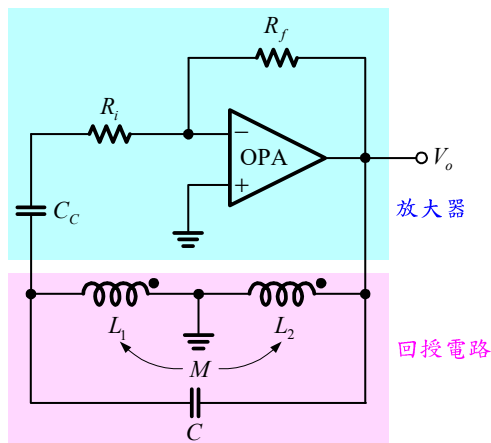
$$\left(\text{其中 } C_{eq} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \right)$$

公式11-1-12

$$\beta = -\frac{C_2}{C_1}$$

公式11-1-13

哈特萊振盪器



$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{eq}C}}$$

(其中 $L_{eq} = L_1 + L_2 + 2M$)

公式11-1-14

$$\beta = -\frac{L_1 + M}{L_2 + M} \cong -\frac{L_1}{L_2}$$

公式11-1-15

▲圖11-12 OPA哈特萊振盪器

旗立



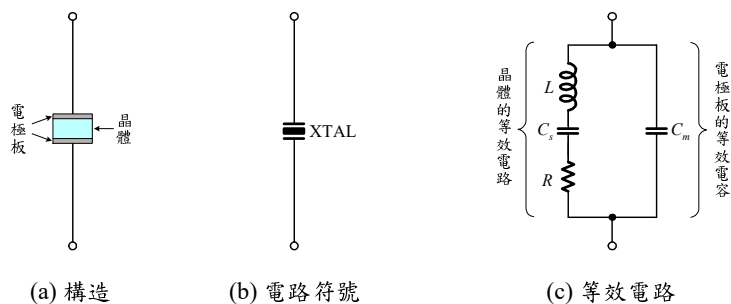
電路、電機、電子、
資訊、通訊、網路、
軟體、硬體、系統、
設計、應用、實務、
教材、參考、書籍、
歡迎、訂購、洽詢、
電話、02-2652-1234

第 11 章 運算放大器振盪電路及濾波器



E176B1 適用 11 - 13

晶體的構造、電路符號與等效電路



▲圖11-14 晶體的構造、電路符號與等效電路

$$\text{串聯諧振頻率 } f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_s}}$$

公式11-1-16

$$\text{並聯諧振頻率 } f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L\frac{C_m C_s}{C_m + C_s}}}$$

公式11-1-17

旗立



電路、電機、電子、
資訊、通訊、網路、
軟體、硬體、系統、
設計、應用、實務、
教材、參考、書籍、
歡迎、訂購、洽詢、
電話、02-2652-1234

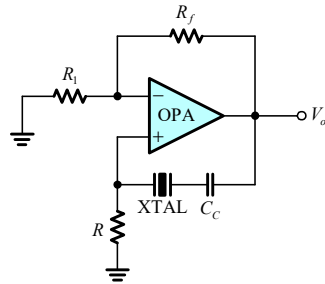
第 11 章 運算放大器振盪電路及濾波器



E176B1 適用 11 - 14

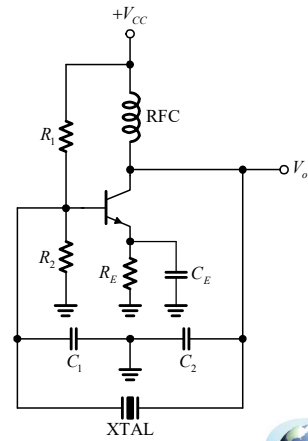
晶體振盪器

串聯諧振電路



▲圖11-16 OPA串聯諧振式晶體振盪器

並聯諧振電路



▲圖11-17 BJT並聯諧振式晶體振盪器

旗立



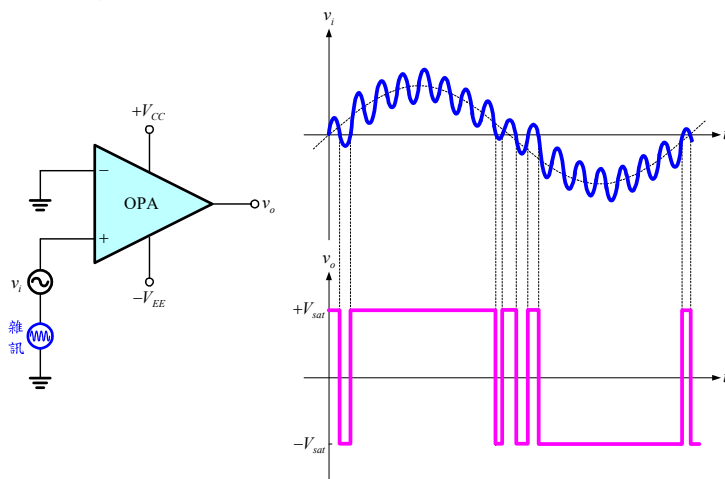
電腦、通訊、網路、
資訊、電子、電機、資訊

第 11 章 運算放大器振盪電路及濾波器

E176B1 適用

11 - 15

受雜訊干擾的比較器



▲圖11-18 比較器受雜訊干擾時的輸出

旗立



電腦、通訊、網路、
資訊、電子、電機、資訊

第 11 章 運算放大器振盪電路及濾波器

E176B1 適用

11 - 16

反相輸入型施密特觸發器

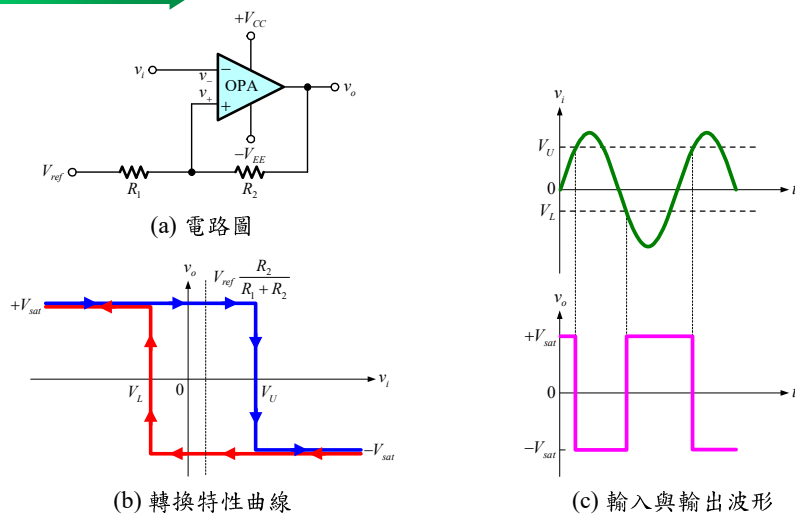


圖11-19 反相輸入型施密特觸發器

旗立



電腦、網路、資訊、
你與我的世界真好！

第 11 章 運算放大器振盪電路及濾波器



E176B1 通用 11 - 17

非反相輸入型施密特觸發器

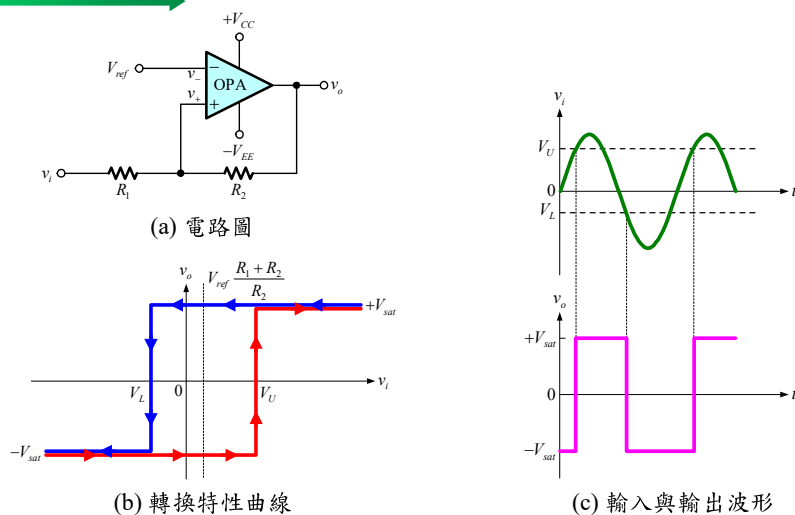


圖11-20 非反相輸入型施密特觸發器

旗立



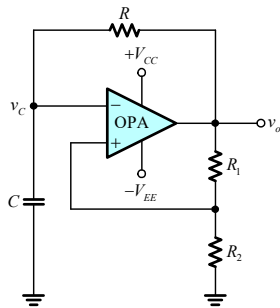
電腦、網路、資訊、
你與我的世界真好！

第 11 章 運算放大器振盪電路及濾波器

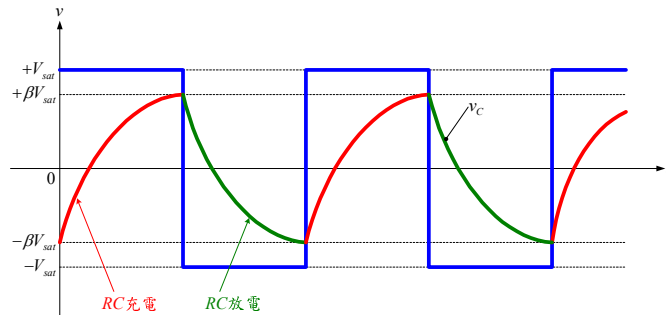


E176B1 通用 11 - 18

OPA組成之方波產生電路



▲圖 11-21 OPA組成之方波產生電路



▲圖 11-22 OPA組成之方波產生電路的輸出波形

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2RC \ln\left(\frac{1+\beta}{1-\beta}\right)} = \frac{1}{2RC \ln\left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right)}$$

公式 11-3-2

旗立

電路、電機、電子、
你與我的專業選擇！

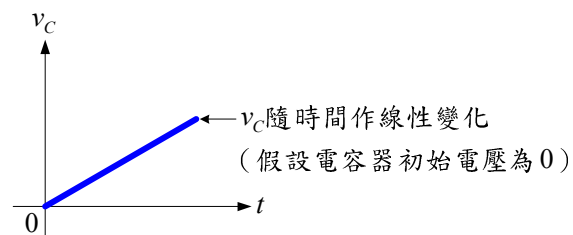
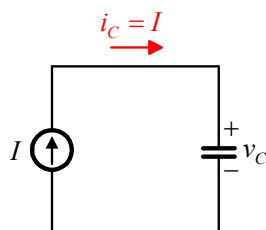
第 11 章 運算放大器振盪電路及濾波器



E176B1 通用

11 - 19

電容器電壓 v_C 在定電流時作線性變化



▲圖 11-23 電容器電壓 v_C 在定電流時作線性變化

旗立



電路、電機、電子、
你與我的專業選擇！

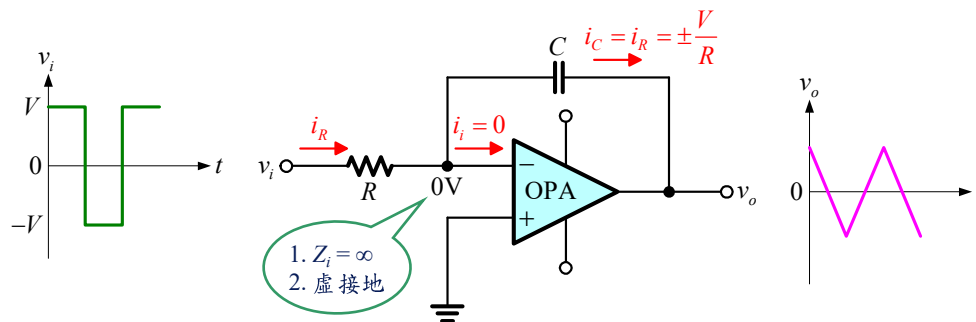
第 11 章 運算放大器振盪電路及濾波器



E176B1 通用

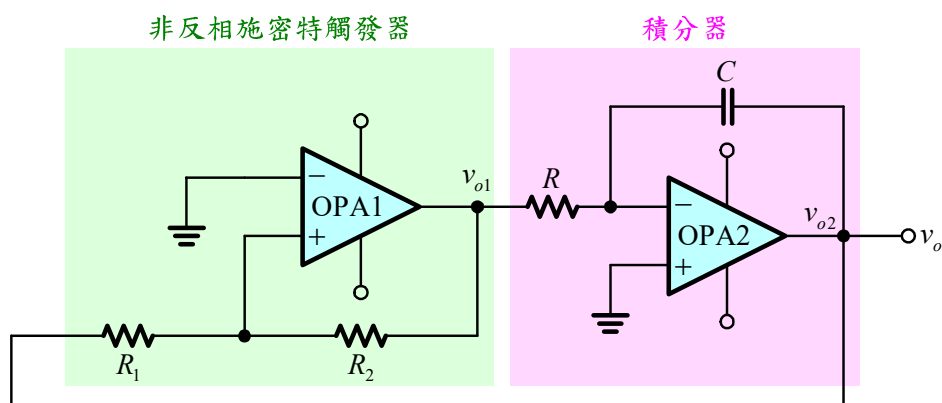
11 - 20

積分器輸出三角波

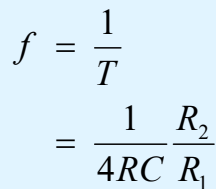


▲圖11-24 利用積分器輸出三角波

OPA組成之三角波產生電路



▲圖11-25 OPA組成之三角波產生電路



▲圖11-26 OPA組成之三角波產生電路的輸出波形



 **低通濾波器（Low-Pass Filter，簡稱LPF）：**只允許低頻信號通過的濾波器。

 **高通濾波器（High-Pass Filter，簡稱HPF）：**只允許高頻信號通過的濾波器。

 **帶通濾波器 (Band-Pass Filter, 簡稱BPF)：**只允許特定頻率範圍的信號通過的濾波器。

 **帶拒濾波器（Band-Reject Filter，簡稱BRF）：**不允許特定頻率範圍的信號通過的濾波器，。



各式濾波器(2)

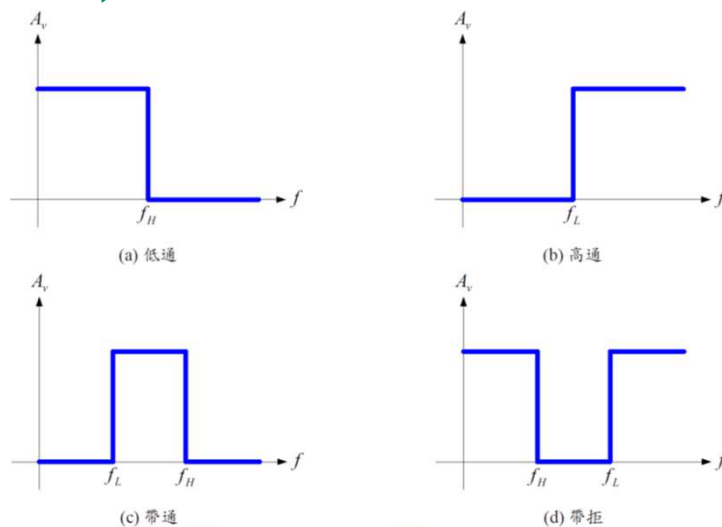


圖11-27 各式濾波器的理想頻率響應

旗立



光碟、網路與電子
你與我的世界

第 11 章運算放大器振盪電路及濾波器



E176B1 適用

11 - 25

被動濾波器(1)

表11-3 四種頻率範圍的被動濾波器介紹

電路名稱	範例電路	特徵	頻率響應
低通濾波器 (LPF)		- 輸入極低頻時 (如 $f=0$ 的直流信號), 輸出 $v_o \approx v_i$ - 輸入極高頻時 (如 $f=\infty$ 的交流信號), 輸出 $v_o \approx 0$ f_H 為高頻截止頻率, 此時電壓增益衰減至 -3dB	
高通濾波器 (HPF)		- 輸入極低頻時 (如 $f=0$ 的直流信號), 輸出 $v_o \approx 0$ - 輸入極高頻時 (如 $f=\infty$ 的交流信號), 輸出 $v_o \approx v_i$ f_L 為低頻截止頻率, 此時電壓增益衰減至 -3dB	

旗立



光碟、網路與電子
你與我的世界

第 11 章運算放大器振盪電路及濾波器



E176B1 適用

11 - 26

被動濾波器(2)

表11-3 四種頻率範圍的被動濾波器介紹 (續)

電路名稱	範例電路	特徵	頻率響應
低通濾波器 (LPF)		- 輸入極低頻時 (如 $f=0$ 的直流信號), 輸出 $v_o \cong v_i$ - 輸入極高頻時 (如 $f=\infty$ 的交流信號), 輸出 $v_o \cong 0$ f_H 為高頻截止頻率, 此時電壓增益衰減至 -3dB	
高通濾波器 (HPF)		- 輸入極低頻時 (如 $f=0$ 的直流信號), 輸出 $v_o \cong 0$ - 輸入極高頻時 (如 $f=\infty$ 的交流信號), 輸出 $v_o \cong v_i$ f_L 為低頻截止頻率, 此時電壓增益衰減至 -3dB	

旗立



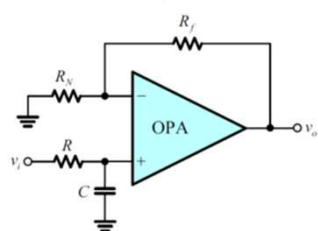
光線一照, 腦筋轉動!
你對這世界更了解!

第 11 章運算放大器振盪電路及濾波器

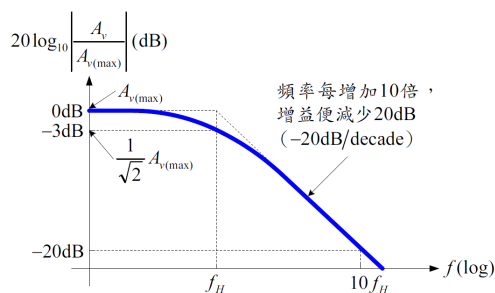
E176B1 適用

11 - 27

低通濾波器



(a) 電路圖



(b) 頻率響應

圖11-28 一階主動低通濾波器

此電路在低頻時有最大的電壓增益, 而在高頻時則增益衰減為零, 故為一低通濾波器, 且其高頻截止頻率 $f_H = \frac{1}{2\pi RC}$ 。

旗立



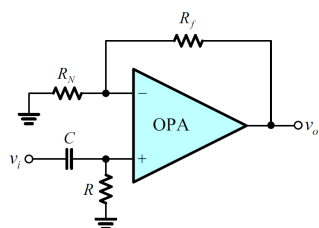
光線一照, 腦筋轉動!
你對這世界更了解!

第 11 章運算放大器振盪電路及濾波器

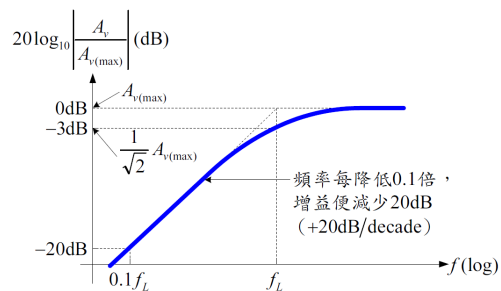
E176B1 適用

11 - 28

高通濾波器



(a) 電路圖



(b) 頻率響應

▲圖11-29 一階主動高通濾波器

此電路在高頻時有最大的電壓增益，而在低頻時則增益衰減為零，故為一高通濾波器，且其低頻截止頻率 $f_L = \frac{1}{2\pi RC}$ 。

旗立



電源、電路與電子
技術與應用

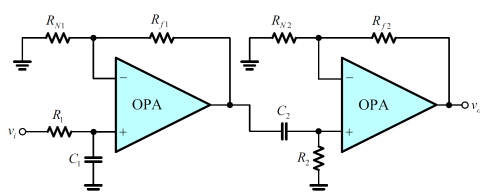
第 11 章運算放大器振盪電路及濾波器



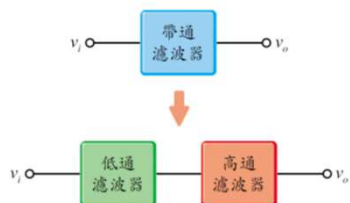
E176B1 適用

11 - 29

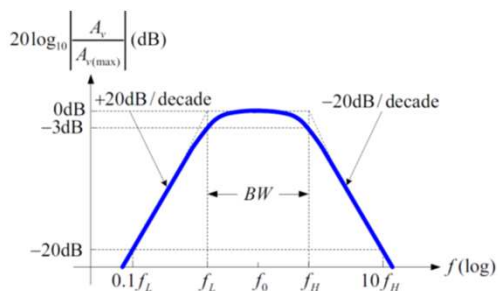
帶通濾波器(1)



(a) 電路圖



(b) 方塊圖



(c) 頻率響應

▲圖11-30 一階主動帶通濾波器

旗立



電源、電路與電子
技術與應用

第 11 章運算放大器振盪電路及濾波器



E176B1 適用

11 - 30

帶通濾波器(2)

睇 高頻截止頻率 f_H 為：

$$\text{公式11-5-6} \quad f_H = \frac{1}{2\pi R_1 C_1}$$

睇 低頻截止頻率 f_L 為：

$$\text{公式11-5-8} \quad f_L = \frac{1}{2\pi R_2 C_2}$$

睇 帶通濾波器是低通濾波器串接高通濾波器，所以在元件的選擇上必須滿足 $f_H > f_L$ 的條件，否則將無任何信號通過。

睇 最大的總增益值，即：

$$\text{公式11-5-10} \quad |A_{vT(\max)}| = |A_{cL} \cdot A_{vH}| \cong (1 + \frac{R_{f1}}{R_{N1}})(1 + \frac{R_{f2}}{R_{N2}})$$

睇 頻帶寬度的中心頻率 f_0 為截止頻率 f_H 與 f_L 幾何平均值，即：

$$\text{公式11-5-11} \quad f_0 = \sqrt{f_L \cdot f_H} = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

旗立



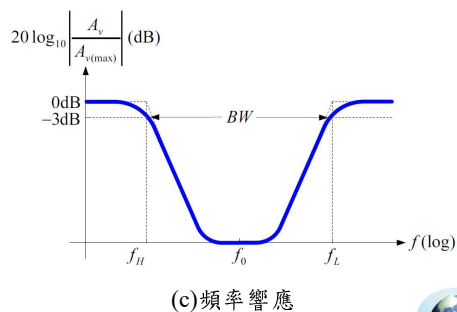
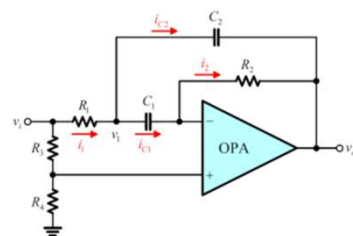
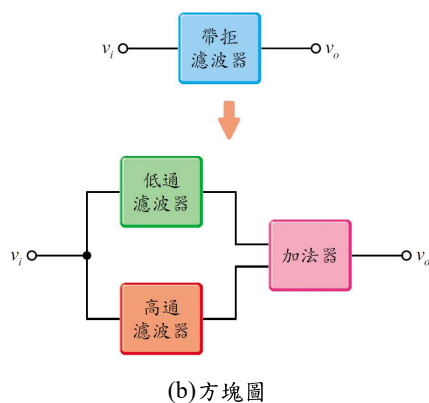
電路、電子與資訊
技術與應用

第 11 章 運算放大器振盪電路及濾波器



E176B1 通用 11 - 31

帶拒濾波器(1)



▲ 圖11-31 一階主動帶拒濾波器

旗立



電路、電子與資訊
技術與應用

第 11 章 運算放大器振盪電路及濾波器



E176B1 通用 11 - 32

帶拒濾波器(2)

帶拒濾波器的頻率響應特性恰與帶通濾波器相反，在元件的選用上必須滿足 $f_L > f_H$ 的條件，使得當輸入信號的頻率位於頻帶 $f_H < f < f_L$ 內時，電路的增益快速衰減；而當頻率超出此一範圍時，電路有定值的增益。

最大電壓增益值為：

公式11-5-13

$$|A_{v(\max)}| \cong \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

增益最小時之中心頻率 f_0 為：

公式11-5-14

$$f_0 = \sqrt{f_H \cdot f_L} = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$



第七章 直流暫態

- 7-1 電阻電容暫態電路
- 7-2 電阻電感暫態電路
- ※7-3 電阻電感電容暫態電路



旗立

光碟、紙張用得少，
你我讓地球更美好！

7 - 1

E180B1 適用

參考資料網址

1. 普通物理實驗室：
<http://experiment.phys.nchu.edu.tw/ex6.html>
2. 電容器-維基百科：
<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%94%B5%E5%AE%B9%E5%99%A8>
3. 【中央大學】物理演示實驗－電容充放電- YouTube：
<https://www.youtube.com/watch?v=xEGb0JVuNvY>
4. 電容- YouTube：
<https://www.youtube.com/watch?v=VQIDsVbIdc0>
5. 電感元件- 維基百科：
<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E7%94%B5%E6%84%9F%E5%85%83%E4%BB%B6>
6. 電感器- 台灣Wiki - TwWiki：
<http://www.twwiki.com/wiki/%E9%9B%BB%E6%84%9F%E5%99%A8>



旗立

光碟、紙張用得少，
你我讓地球更美好！

→ 第 7 章 直流暫態

E180B1 適用

7 - 2

參考資料網址

7. 電感器-YouTube：
https://www.youtube.com/watch?v=ShHrrK_v1IU
8. 法拉第電磁感應定律－維基百科：
<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E6%B3%95%E6%8B%89%E7%AC%AC%E7%94%B5%E7%A3%81%E6%84%9F%E5%BA%94%E5%AE%9A%E5%BE%8B>
9. 電磁學奇才：麥可•法拉第(Michael Faraday) - PanSci 泛科學：
<https://pansci.asia/archives/49303>
10. 5-2觀念01法拉第與電磁感應的發現- YouTube：
<https://www.youtube.com/watch?v=s4h5x5r9iD4>
11. 暫態-維基百科：
<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%9A%AB%E6%85%8B>



電阻電容暫態電路的時間常數

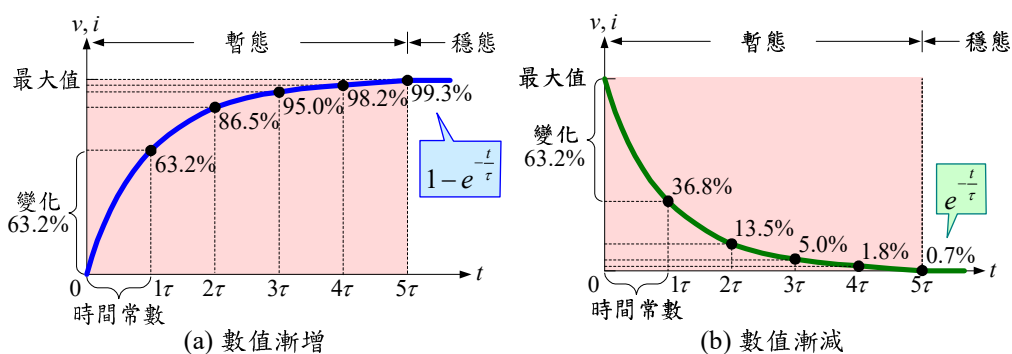


圖 7-1 時間常數的曲線圖

$$\tau = RC \text{ [s, 秒]}$$

公式 7-101



RC 電路之充電瞬間

RC 電路充電瞬間 ($t=0$, S 由“0” → “1” 瞬間) 在一開始充電瞬間，電容器尚未累積電荷，兩端的電壓 v_C 為零，電容 C 可視為**短路**。

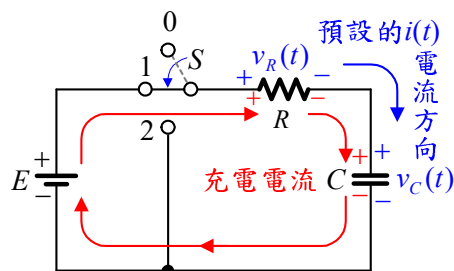


圖 7-2 RC 電路之充電暫態

$$\text{電容電壓 } v_C(0) = 0 \quad (\text{最小值})$$

$$\text{電阻電壓 } v_R(0) = E - v_C(0) = E \quad (\text{最大值})$$

$$\text{電路電流 } i(0) = \frac{E}{R} \quad (\text{最大值})$$

公式 7-102

旗立



第 7 章 直流暫態

第 7 章 直流暫態



E180B1 適用

7 - 5

RC 電路之充電穩態

RC 電路充電穩態 ($t \geq 5\tau$, $S \rightarrow$ "1" 長時間後) 電容器已充電完畢， v_C 等於電源電壓 E ，充電電流 i 降為零，電容 C 可視為**斷路**。

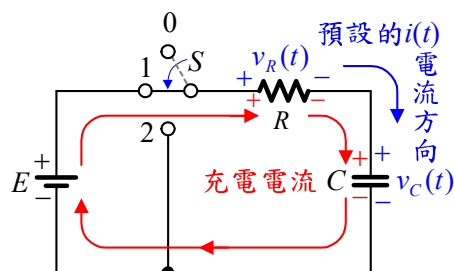


圖 7-2 RC 電路之充電暫態

$$\text{電容電壓 } v_C(5\tau) = E \quad (\text{最大值})$$

$$\text{電阻電壓 } v_R(5\tau) = E - v_C(5\tau) = 0 \quad (\text{最小值})$$

$$\text{電路電流 } i(5\tau) = \frac{E - v_C(5\tau)}{R} = 0 \quad (\text{最小值})$$

公式 7-103

旗立



第 7 章 直流暫態

第 7 章 直流暫態



E180B1 適用

7 - 6

RC 電路之充電暫態

RC 電路充電暫態 ($0 < t < 5\tau$, $S \rightarrow "1"$ 短暫時間內) 時間 $t > 0$ 時, 電源向電容器充電, 電荷 $\uparrow$, 電容電壓 $v_C \uparrow$, 而電阻電壓 $v_R \downarrow$, 且充電電流 $i \downarrow$ 。

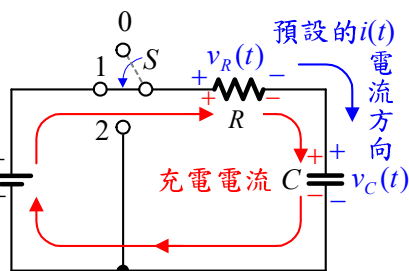


圖 7-2 RC 電路之充電暫態

$$\text{電容電壓 } v_C(t) = E(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) = E(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

$$\text{電阻電壓 } v_R(t) = E - v_C(t) = E \cdot e^{-\frac{t}{RC}} = v_R(0) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$\text{電路電流 } i(t) = \frac{E - v_C(t)}{R} = \frac{E}{R} \cdot e^{-\frac{t}{RC}} = i(0) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

公式 7-104

旗立



知識、能力、態度、價值觀

第 7 章 直流暫態

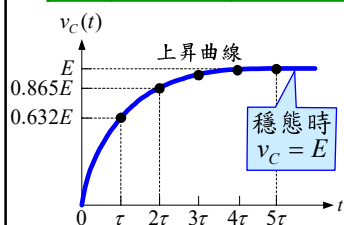
E180B1 適用

7 - 7

RC 電路的充電特性曲線

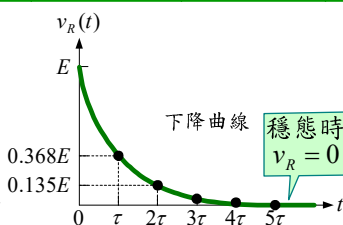
表 7-1 t 與 $e^{-\frac{t}{\tau}}$ 之對照表

t	0	1τ	2τ	3τ	4τ	5τ
$e^{-\frac{t}{\tau}}$	$e^0 = 1.0$	$e^{-1} \cong 0.368$	$e^{-2} \cong 0.135$	$e^{-3} \cong 0.050$	$e^{-4} \cong 0.018$	$e^{-5} \cong 0.007 \approx 0$



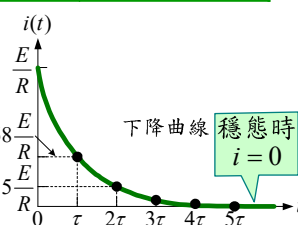
$$v_C(t) = E(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

(a) 電容電壓



$$v_R(t) = E e^{-\frac{t}{\tau}}$$

(b) 電阻電壓



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

(c) 電路電流

圖 7-3 RC 電路的充電特性曲線

旗立



知識、能力、態度、價值觀

第 7 章 直流暫態

E180B1 適用

7 - 8

RC 電路之放電瞬間

RC 電路放電瞬間 ($t = 0$, S 由 "1" → "2" 瞬間) 在一開始放電瞬間，電容器的電荷準備釋放，兩端的電壓 v_C 保持不變，並成為新的電動勢來源。

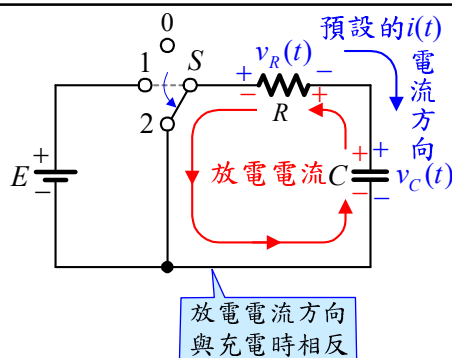


圖 7-4 RC 電路之放電暫態

電容電壓 $v_C(0) = E$

電阻電壓 $v_R(0) = -v_C(0) = -E$ (負號表示與原電阻電壓極性相反)

電路電流 $i(0) = \frac{v_R(0)}{R} = -\frac{E}{R}$ (負號表示與原電路電流方向相反)

公式 7-105

旗立

第 7 章 直流暫態

第 7 章 直流暫態

E180B1 適用

7 - 9

RC 電路之放電穩態

RC 電路放電穩態 ($t \geq 5\tau$, S → "2" 長時間後) 電容器將全部電能釋出，稱為放電完畢，電路成為穩定的狀態。

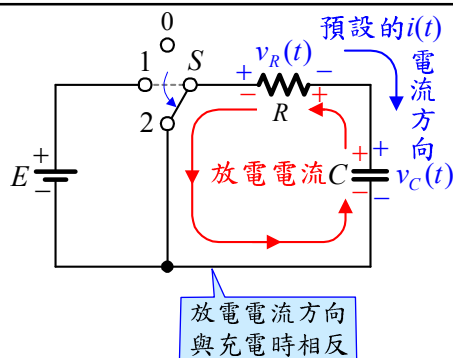


圖 7-4 RC 電路之放電暫態

電容電壓 $v_C(5\tau) = 0$

電阻電壓 $v_R(5\tau) = -v_C(5\tau) = 0$

電路電壓 $i(5\tau) = 0$

公式 7-106

旗立

第 7 章 直流暫態

第 7 章 直流暫態

E180B1 適用

7 - 10

RC 電路之放電暫態

RC 電路放電暫態 ($0 < t < 5\tau$, $S \rightarrow "2"$ 短暫時間內) 時間 $t > 0$ 時, 電容器持續放電, 電容電壓 $v_C \downarrow$, 且電阻電壓 $v_R \downarrow$, 放電電流 $i \downarrow$ 。

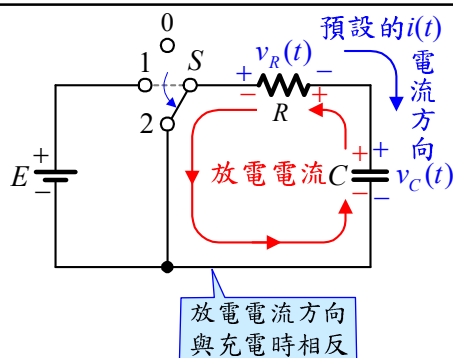


圖 7-4 RC 電路之放電暫態

$$\text{電容電壓 } v_C(t) = E \cdot e^{-\frac{t}{RC}} = v_C(0^+) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$\text{電阻電壓 } v_R(t) = -v_C(t) = -E \cdot e^{-\frac{t}{RC}} = v_R(0^+) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$\text{電路電流 } i(t) = \frac{v_R(t)}{R} = -\frac{E}{R} \cdot e^{-\frac{t}{RC}} = i(0^+) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

公式 7-107

旗立



知識一點一滴
累積就是智慧

第 7 章 直流暫態



E180B1 適用

7 - 11

RC 電路的放電特性曲線

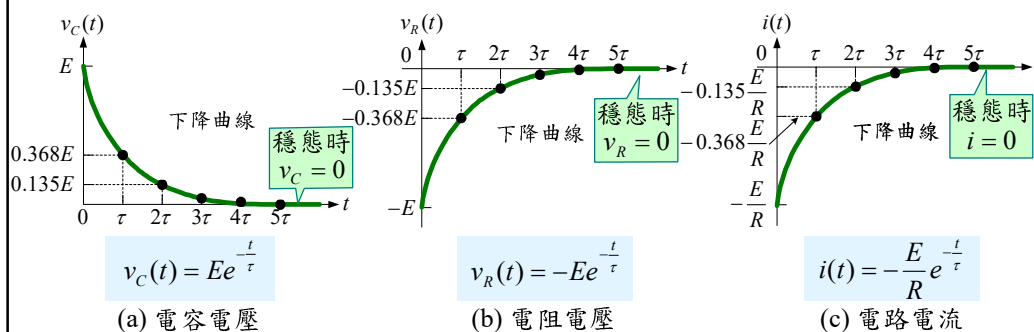


圖 7-5 RC 電路的放電特性曲線

旗立



知識一點一滴
累積就是智慧

第 7 章 直流暫態



E180B1 適用

7 - 12

複雜網路的RC暫態

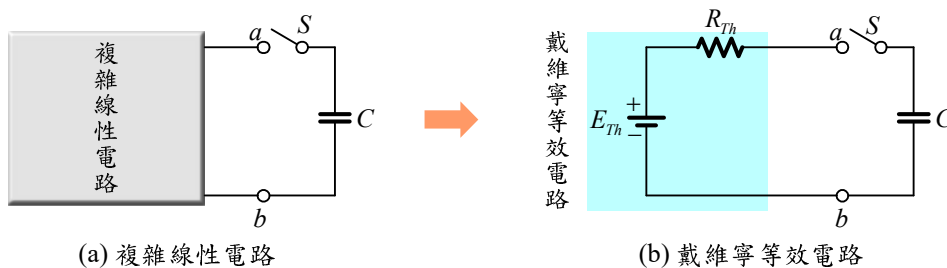


圖 7-6 複雜RC線性電路之暫態

旗立



電路、磁路與電子
你與我的專業選擇！

第 7 章 直流暫態

E180B1 適用

7 - 13

電阻電感暫態電路的時間常數

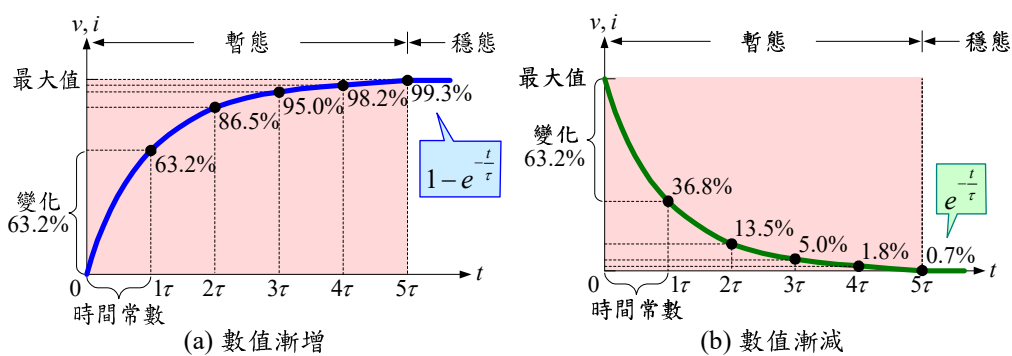


圖 7-1 時間常數的曲線圖

$$\tau = \frac{L}{R} \text{ [s, 秒]}$$

公式7-201

旗立



電路、磁路與電子
你與我的專業選擇！

第 7 章 直流暫態

E180B1 適用

7 - 14

RL 電路儲能瞬間

RL 電路儲能瞬間 ($t=0$ ， S 由“0” → “1” 瞬間) 在電路接通瞬間，電感器感應一反抗的電動勢，使電路一開始的充電電流 i 為零，電感 L 可視為**斷路**。

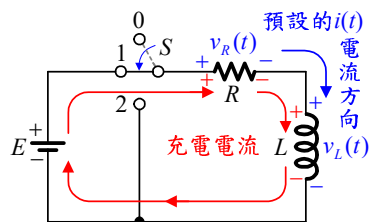


圖 7-7 RL 電路之充電暫態

$$\text{電感電壓 } v_L(0) = E \quad (\text{最大值})$$

$$\text{電阻電壓 } v_R(0) = E - v_L(0) = 0 \quad (\text{最小值})$$

$$\text{電路電流 } i(0) = \frac{E - v_L(0)}{R} = \frac{E}{R} \quad (\text{最小值})$$

公式 7-202

旗立



電路、電機、電子、資訊、通訊、控制、系統、工程、技術、學院

第 7 章 直流暫態

E180B1 適用

7 - 15

RL 電路儲能穩態

RL 電路儲能穩態 ($t \geq 5\tau$ ， $S \rightarrow "1"$ 長時間後) 電感器已儲能完畢，充電電流 i 維持穩定，電感器兩端的電壓 v_L 降為零，電感 L 可視為**短路**。

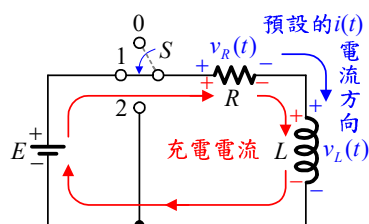


圖 7-7 RL 電路之充電暫態

$$\text{電感電壓 } v_L(5\tau) = 0 \quad (\text{最小值})$$

$$\text{電阻電壓 } v_R(5\tau) = E - v_L(5\tau) = E \quad (\text{最大值})$$

$$\text{電路電流 } i(5\tau) = \frac{E}{R} \quad (\text{最大值})$$

公式 7-203

旗立



電路、電機、電子、資訊、通訊、控制、系統、工程、技術、學院

第 7 章 直流暫態

E180B1 適用

7 - 16

RL 電路儲能暫態

RL 電路儲能暫態 ($0 < t < 5\tau$, $S \rightarrow "1"$ 短暫時間內) 時間 $t > 0$ 時, 電源向電感器充電, 電感電壓 $v_L \downarrow$, 而電流 i 與電阻電壓 $v_R \uparrow$ 。

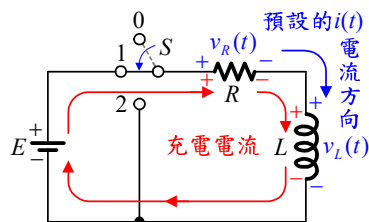


圖 7-7 RL 電路之充電暫態

$$\text{電感電壓 } v_L(t) = E \cdot e^{-\frac{t}{L/R}} = v_L(0) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$\text{電阻電壓 } v_R(t) = E - v_L(t) = E(1 - e^{-\frac{t}{L/R}}) = E(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

$$\text{電路電流 } i(t) = \frac{E - v_L(t)}{R} = \frac{E}{R}(1 - e^{-\frac{t}{L/R}}) = \frac{E}{R}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

公式 7-204

旗立



電路 - 電路暫態
分析與設計

第 7 章 直流暫態



E180B1 適用

7 - 17

RL 電路的儲能特性曲線

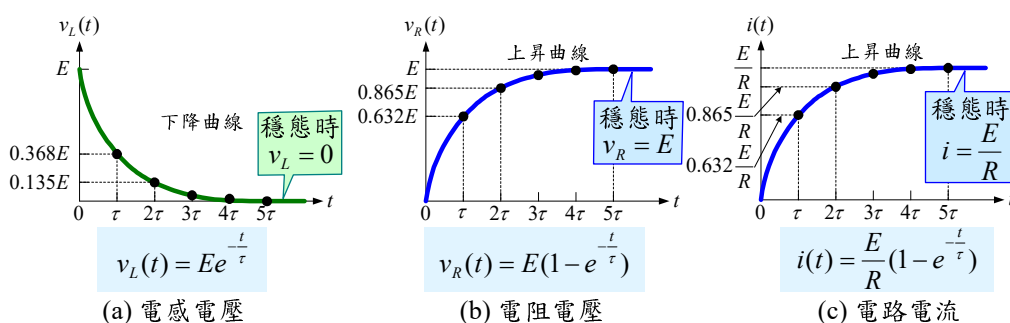


圖 7-8 RL 電路的儲能特性曲線

旗立



電路 - 電路暫態
分析與設計

第 7 章 直流暫態



E180B1 適用

7 - 18

RL 電路釋能瞬間

驟RL 電路釋能瞬間 ($t=0$ ， S 由 "1"→"2" 瞬間) 在電源移除的瞬間，電感器會反對電流的變化，而感應出與電源電壓 E 相同之電動勢。

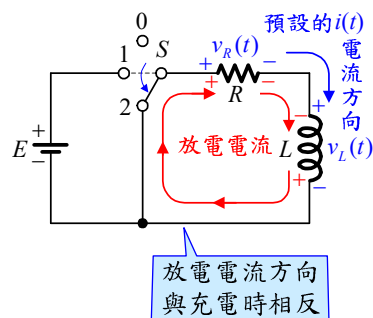


圖 7-9 RL 電路之放電暫態

電感電壓 $v_L(0) = -E$ (負號表示與原電感電壓極性相反)

電阻電壓 $v_R(0) = -v_L(0) = E$

電路電流 $i(0) = \frac{v_R(0)}{R} = \frac{E}{R}$

公式 7-205

旗立



電路、電機與電子
技術與應用

第 7 章 直流暫態

E180B1 適用

7 - 19

RL 電路釋能穩態

RL 電路釋能穩態 ($t \geq 5\tau$ ， S → "2" 長時間後) 電感器將全部磁能釋出，稱為釋能完畢，電路亦成為穩定的狀態。

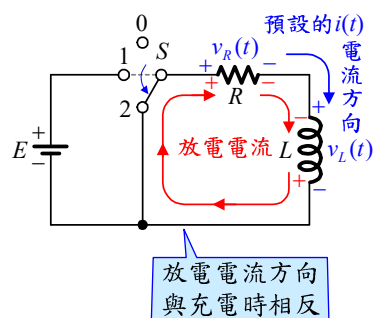


圖 7-9 RL 電路之放電暫態

電感電壓 $v_L(5\tau) = 0$

電阻電壓 $v_R(5\tau) = -v_L(5\tau) = 0$

電路電流 $i(5\tau) = 0$

公式 7-206

旗立



電路、電機與電子
技術與應用

第 7 章 直流暫態

E180B1 適用

7 - 20

RL 電路釋能暫態

RL 電路釋能暫態 ($0 < t < 5\tau$, $S \rightarrow "2"$ 短暫時間內) 時間 $t > 0$ 時，電感器持續釋能，電感電壓 $v_L \downarrow$ ，且電阻電壓 $v_R \downarrow$ ，放電電流 $i \downarrow$ 。

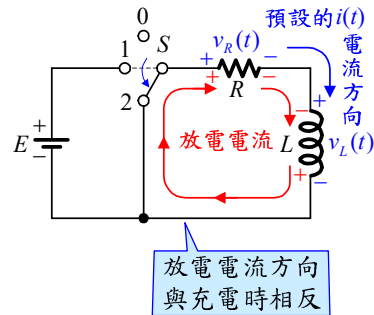


圖 7-9 RL 電路之放電暫態

$$\text{電感電壓 } v_L(t) = -E \cdot e^{-\frac{t}{L/R}} = v_L(0) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$\text{電阻電壓 } v_R(t) = -v_L(t) = E \cdot e^{-\frac{t}{L/R}} = v_R(0) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$\text{電路電流 } i(t) = \frac{v_R(t)}{R} = \frac{E}{R} \cdot e^{-\frac{t}{L/R}} = i(0) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

公式 7-207

旗立

電路一瞬間，
你也能看懂！

第 7 章 直流暫態



E180B1 適用

7 - 21

RL 電路的釋能特性曲線

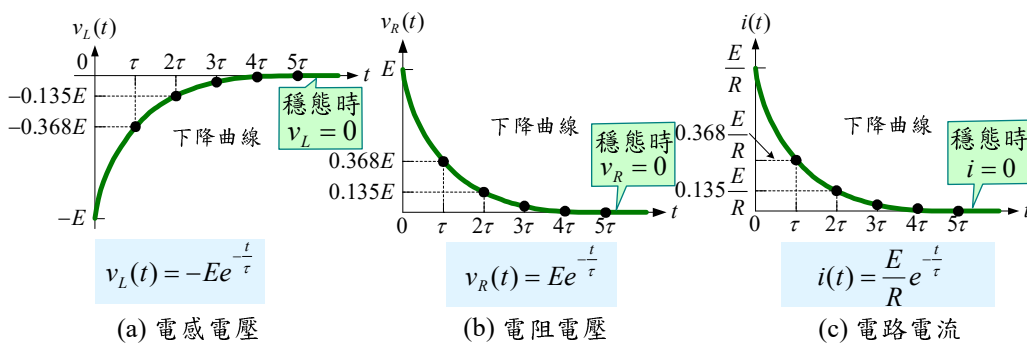


圖 7-10 RL 電路的釋能特性曲線

旗立



電路一瞬間，
你也能看懂！

第 7 章 直流暫態



E180B1 適用

7 - 22

複雜網路的 RL 暫態

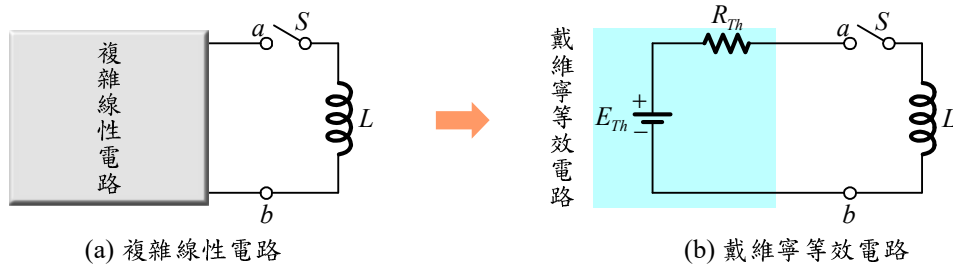


圖 7-11 複雜 RL 線性電路之暫態

電感與電容在充、放電時之電路狀態

表 7-2 電感與電容在充、放電時之電路狀態

狀態	電容器 C	電感器 L
充電開始 (瞬間) ($t = 0$)	電壓 $v_C = 0$, C 視為短路 有最大的充電電流 i_C	有最大的感應電勢 v_L 儲能電流 $i_L = 0$, L 視為斷路
充電期間 (暫態) ($0 < t < 5\tau$)	電壓 v_C 上昇 充電電流 i_C 下降	感應電勢 v_L 下降 儲能電流 i_L 上昇
充電完畢 (穩態) ($t \geq 5\tau$)	有最大的電壓 v_C 充電電流 $v_C = 0$, C 視為斷路	感應電勢 $v_L = 0$, L 視為短路 有最大的儲能電流 i_L
放電開始 (瞬間) ($t = 0$)	有最大的電壓 v_C (與充電穩態時一致) 有最大的放電電流 i_C (方向與充電時相反)	有最大的感應電勢 v_L (極性與充電時相反) 有最大的釋能電流 i_L (與充電穩態時一致)
放電期間 (暫態) ($0 < t < 5\tau$)	電壓 v_C 下降 放電電流 i_C 下降 (反方向)	感應電勢 v_L 下降 (反方向) 釋能電流 i_L 下降
放電完畢 (穩態) ($t \geq 5\tau$)	電壓 $v_C = 0$ 放電電流 $i_C = 0$	感應電勢 $v_L = 0$ 釋能電流 $i_L = 0$

第八章 交流電

- 8-1 電力系統的認識
- 8-2 波形
- 8-3 頻率及週期
- 8-4 相位
- 8-5 相量運算

旗立

光碟、紙張用得少，
你我讓地球更美好！



8 - 1

E180B1 適用

參考資料網址

1. 台灣師大物理系 交流電簡介：
<http://www.phy.ntnu.edu.tw/demolab/html.php?html=everydayPhysics/ac/index>
2. 交流發電機動畫 (youtube)：
<http://www.youtube.com/watch?v=uYfTzCa7lSE&nofeather=True>
3. 通訊博物館-高壓輸電：
http://macao.communications.museum/chi/exhibition/secondfloor/MoreInfo/243_HighVoltage.html
4. 通訊博物館-相移：
http://macao.communications.museum/chi/exhibition/secondfloor/MoreInfo/244_PhaseShift.html
5. 相量-維基百科：
<http://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E7%9B%B8%E9%87%8F#.E7.9B.B8.E9.87.8F.E5.9B.BE>
6. 交流電簡介-國立臺灣師範大學物理學系：
<http://www.phy.ntnu.edu.tw/demolab/html.php?html=everydayPhysics/ac/index>

旗立

光碟、紙張用得少，
你我讓地球更美好！

→ 第 8 章 交流電



E180B1 適用

8 - 2

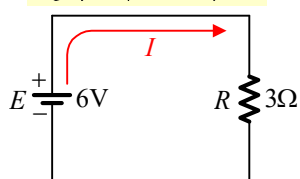
參考資料網址

7. 交流電-維基百科：
<http://www.youtube.com/watch?v=uYfTzCa71SE&nofeather=True>
8. 物理史話-赫茲的故事：
<http://macao.communications.museum/chi/exhibition/secondfloor/MoreInfo/243/HighVoltage.html>
9. 海因里希·赫茲- Wikiwand：
<http://macao.communications.museum/chi/exhibition/secondfloor/MoreInfo/244/PhaseShift.html>
10. 赫茲與電磁波：
<http://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E7%9B%B8%E9%87%8F#.E7.9B.B8.E9.87.8F.E5.9B.BE>
11. 認識電磁波-非屬原子能游離輻射管制網：
https://nonionized.epa.gov.tw/?aspxerrorpath=/KidsSiteNew/hello/hello_min.aspx
12. 電磁波譜-維基百科：
<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E6%B3%A2%E8%AD%9C>

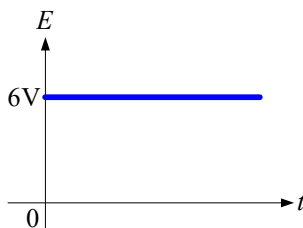


直流

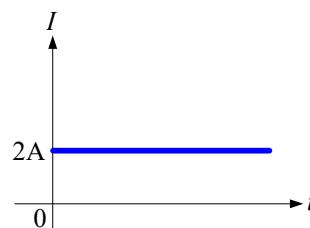
電壓與電流維持固定的大小及方向



(a) 直流電路



(b) 電壓變化



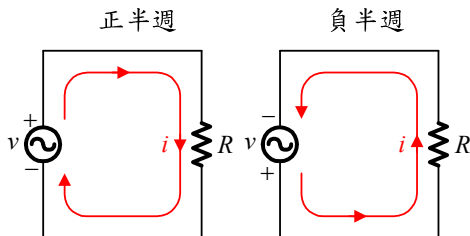
(c) 電流變化

▲圖8-1 直流電路之電壓與電流

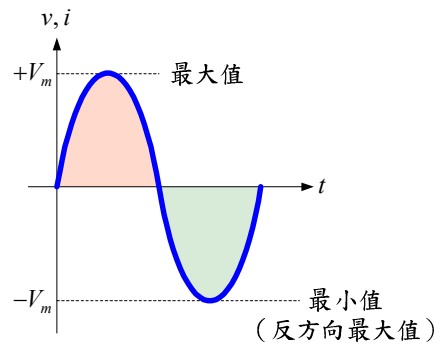


交流

電壓與電流會改變
大小及方向



(a) 交流電路



(b) 電壓或電流變化

▲圖8-2 交流電路之電壓與電流

旗立



知識、能力、態度
全面發展教育

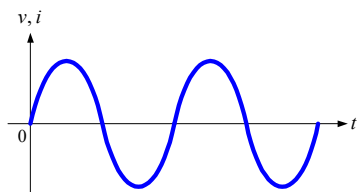
第 8 章 交流電



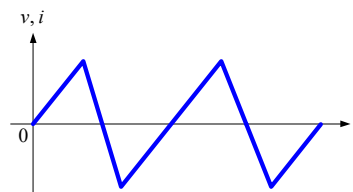
E180B1 適用

8 - 5

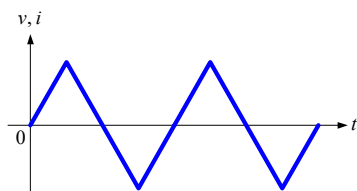
各種交流電波形



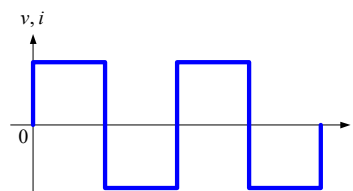
(a) 正弦波



(b) 鋸齒波



(c) 三角波



(d) 方波

▲圖8-3 各種交流電波形

旗立



知識、能力、態度
全面發展教育

第 8 章 交流電



E180B1 適用

8 - 6

交流發電機

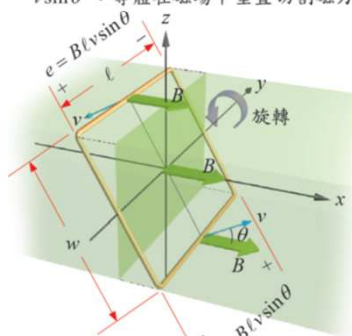
e ：感應電動勢，單位為伏特 (V)

B ：磁通密度，單位為特斯拉 (T) 或韋伯 / 平方米 (Wb/m^2)

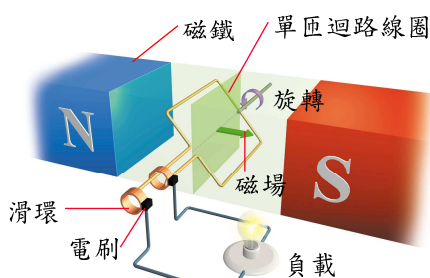
ℓ ：導體在磁場中的有效長度，單位為米 (m)

θ ：導體運動方向與磁力線方向的夾角，單位為度 ($^\circ$)

$v\sin\theta$ ：導體在磁場中垂直切割磁力線的有效速度，單位為米 / 秒 (m/s)



(a) 感應原理



(b) 構造

線圈在磁場中運動感應出電動勢

▲圖8-4 交流發電機

旗立



知識、技能與信心
你將獲得更多美好！

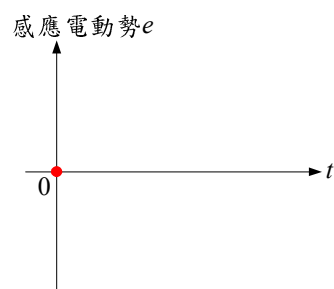
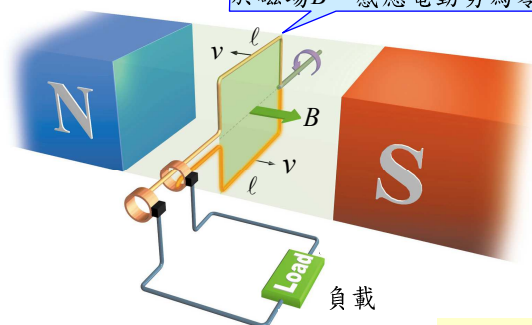
第 8 章 交流電

E180B1 適用

8 - 7

交流發電機的發電原理 (1)

ℓ 段平行運動 (瞬間移動之切線方向) 於磁場 B ，感應電動勢為零



說明： ℓ 段導線運動方向與磁場 B 平行， $\theta = 0^\circ$
 $\therefore$ 感應電動勢 $e = 2B\ell v\sin 0^\circ = 0$

(a) 初始位置 ($t=0$ 時)

▲圖8-5 線圈迴路旋轉一週產生的感應電動勢

旗立



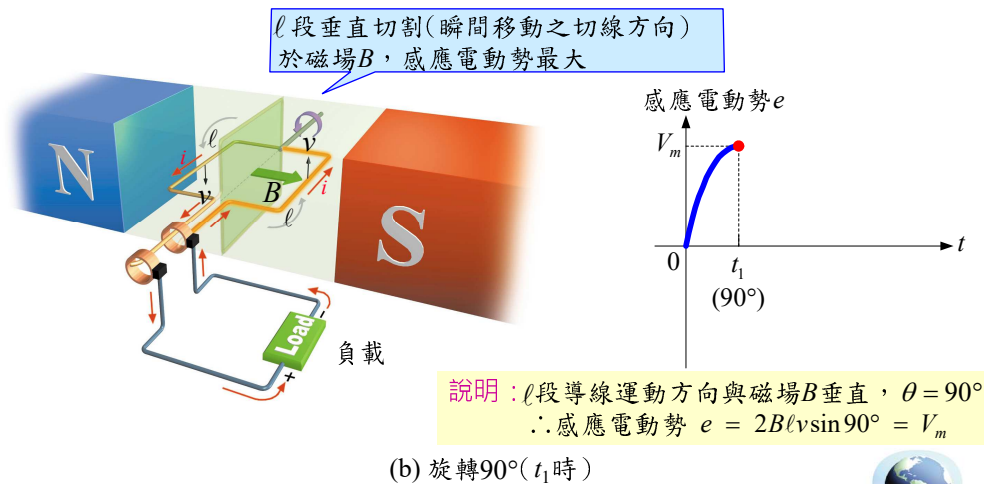
知識、技能與信心
你將獲得更多美好！

第 8 章 交流電

E180B1 適用

8 - 8

交流發電機的發電原理 (2)



(b) 旋轉 90° (t_1 時)

▲圖 8-5 線圈迴路旋轉一週產生的感應電動勢 (續)

旗立



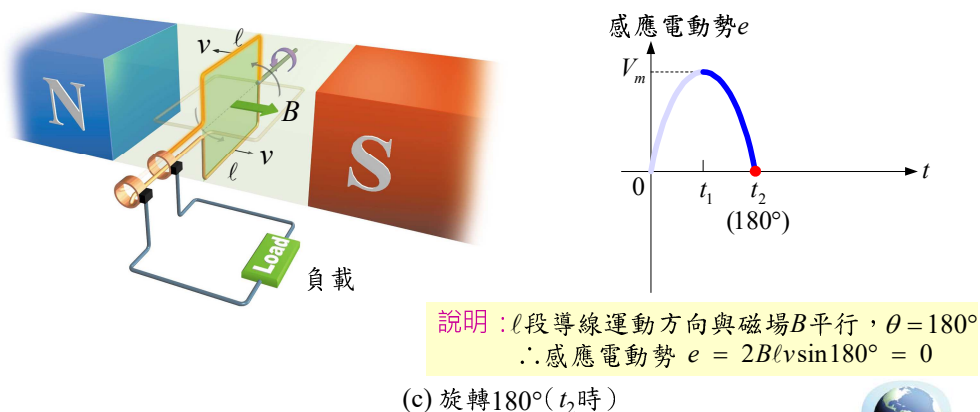
知識 · 能力 · 態度
 全面提升學習效能！

第 8 章 交流電

E180B1 適用

8 - 9

交流發電機的發電原理 (3)



▲圖8-5 線圈迴路旋轉一週產生的感應電動勢 (續)

旗立



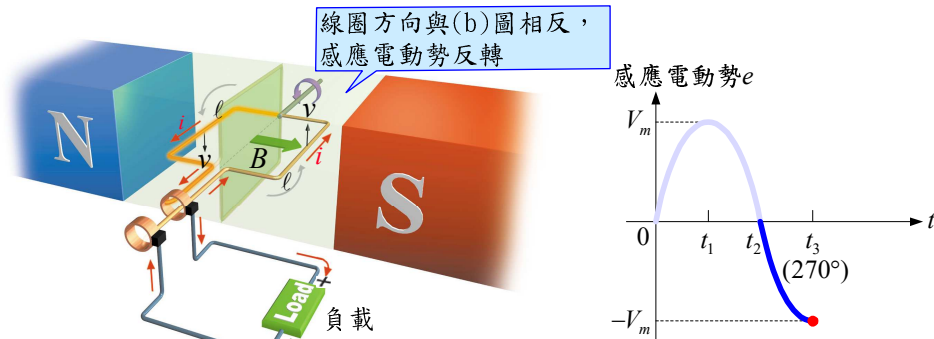
知識 · 能力 · 態度
 全面提升學習效能！

第 8 章 交流電

E180B1 適用

8 - 10

交流發電機的發電原理 (4)



說明： ℓ 段導線運動方向與磁場 B 平行， $\theta = 270^\circ$
 $\therefore$ 感應電動勢 $e = 2Bav\sin 270^\circ = -V_m$

(d) 旋轉 270° (t_3 時)

▲圖8-5 線圈迴路旋轉一週產生的感應電動勢 (續)

旗立



知識一點一滴
成就美好未來

第 8 章 交流電



E180B1 適用 8 - 11

交流發電機的發電原理 (5)



說明：位置回復到初始位置，感應電動勢 e 重新開始循環進行

(e) 旋轉 360° (0°)(t_4 時)

▲圖8-5 線圈迴路旋轉一週產生的感應電動勢 (續)

旗立



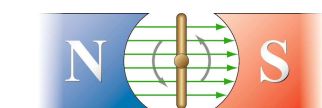
知識一點一滴
成就美好未來

第 8 章 交流電



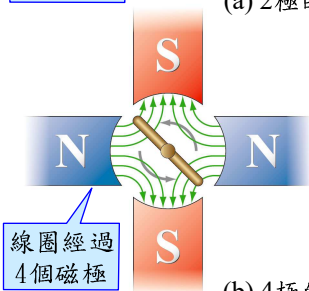
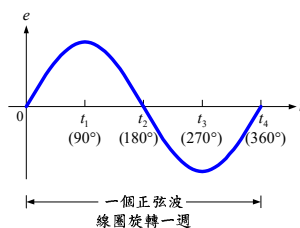
E180B1 適用 8 - 12

發電機的波形產生



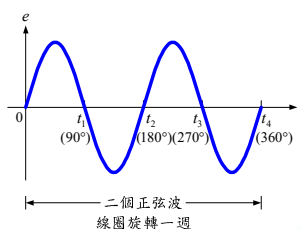
線圈經過
2個磁極

(a) 2極的發電機與輸出波形



線圈經過
4個磁極

(b) 4極的發電機與輸出波形



▲圖8-6 發電機的波形產生

旗立



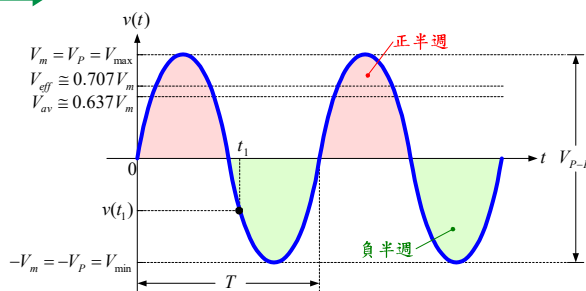
知識，就是力量！
你願意學習嗎？

第 8 章 交流電



E180B1 適用 8 - 13

正弦波之峰值與峰對峰值



▲圖8-8 正弦波的各项數值

$$V_{P-P} = V_m - (-V_m) = 2V_m = 2V_P \quad [\text{V, 伏特}]$$

$$I_{P-P} = I_m - (-I_m) = 2I_m = 2I_P \quad [\text{A, 安培}]$$

公式8-201

旗立



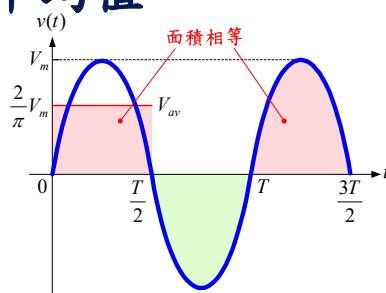
知識，就是力量！
你願意學習嗎？

第 8 章 交流電



E180B1 適用 8 - 14

正弦波之平均值



▲圖8-9 正弦波的平均值圖示

$$V_{av} = \frac{2}{\pi} V_m \cong 0.637 V_m \quad [\text{V, 伏特}]$$

$$I_{av} = \frac{2}{\pi} I_m \cong 0.637 I_m \quad [\text{A, 安培}]$$

公式8-202

旗立



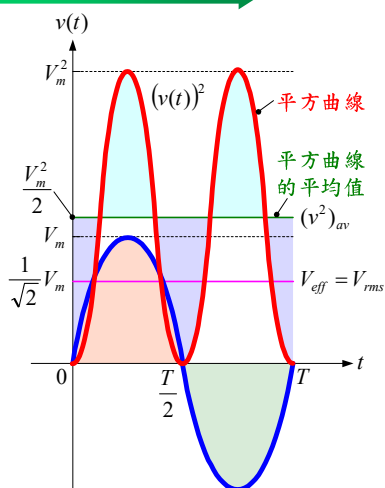
知識，改變世界！
你願意改變世界嗎？

第 8 章 交流電



E180B1 適用 8 - 15

正弦波之有效值（均方根值）



▲圖8-10 正弦波的有效值圖示

$$\begin{aligned} V &= V_{eff} = V_{rms} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} V_m \cong 0.707 V_m \quad [\text{V, 伏特}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I &= I_{eff} = I_{rms} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} I_m \cong 0.707 I_m \quad [\text{A, 安培}] \end{aligned}$$

公式8-203

旗立



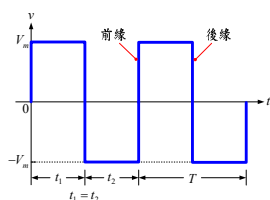
知識，改變世界！
你願意改變世界嗎？

第 8 章 交流電

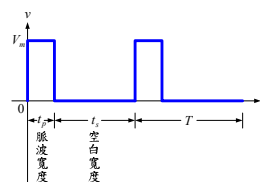


E180B1 適用 8 - 16

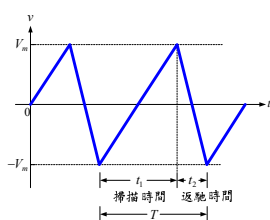
方波、脈波、三角波與鋸齒波



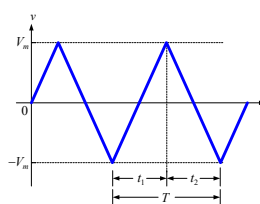
▲圖8-11 方波圖示



▲圖8-12 脈波圖示

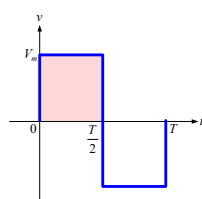


▲圖8-13 鋸齒波圖示

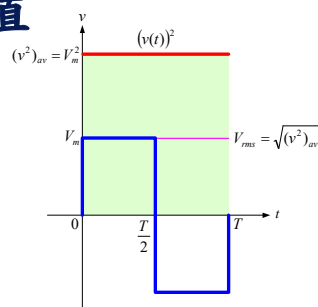


▲圖8-14 三角波圖示

方波之平均值與有效值



(a) 平均值



(b) 有效值

▲圖8-15 方波的平均值及有效值圖示

◆ 平均值：

$$V_{av} = \frac{\text{正半週方波之波形面積}}{\text{一半週期的時間}} = \frac{V_m \cdot (T/2)}{T/2} = V_m$$

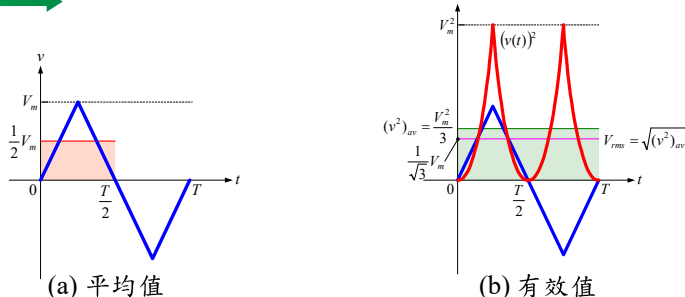
公式8-204

◆ 有效值：

$$V_{eff} = \sqrt{\frac{\text{一週期之方波平方曲線所涵蓋的面積}}{\text{一週期的時間}}} = \sqrt{\frac{(V_m)^2 \cdot T}{T}} = V_m$$

公式8-205

三角波之平均值與有效值



▲圖8-16 三角波的平均值及有效值圖示

◆ 平均值：
$$V_{av} = \frac{\text{正半週三角波之波形面積}}{\text{一半週期的時間}} = \frac{(1/2) \cdot V_m \cdot (T/2)}{T/2} = \frac{1}{2} V_m$$
 公式8-206

◆ 有效值：
$$V_{eff} = \sqrt{\frac{\text{一週期之三角波平方曲線所涵蓋的面積}}{\text{一週期的時間}}} = \sqrt{\frac{\int_0^T (v(t))^2 dt}{T}} = \frac{1}{\sqrt{3}} V_m$$
 公式8-207

旗立



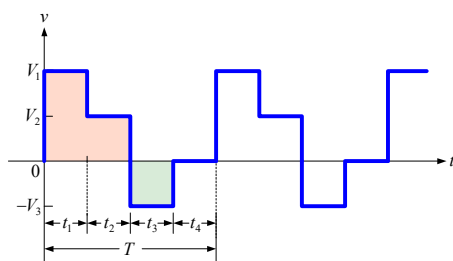
知識·能力·技巧
自我測試與練習

第 8 章 交流電

E180B1 適用 8 - 19

特殊波形之平均值與有效值

◆ 平均值：



▲圖8-17 特殊波形圖示

$$V_{av} = \frac{\text{一週期之波形曲線所涵蓋的面積}}{\text{一週期的時間}} = \frac{V_1 \cdot t_1 + V_2 \cdot t_2 + (-V_3) \cdot t_3 + 0 \cdot t_4}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}$$
 公式8-208

◆ 有效值：

$$V_{eff} = \sqrt{\frac{\text{一週期之波形平方曲線所涵蓋的面積}}{\text{一週期的時間}}} = \sqrt{\frac{V_1^2 \cdot t_1 + V_2^2 \cdot t_2 + (-V_3)^2 \cdot t_3 + 0^2 \cdot t_4}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}}$$
 公式8-209

旗立



知識·能力·技巧
自我測試與練習

第 8 章 交流電

E180B1 適用 8 - 20

波形因數與波峰因數

◆ 波形因數：

$$FF = \frac{\text{有效值}}{\text{平均值}} = \frac{V_{eff}}{V_{av}} \quad \text{或} \quad \frac{V_{rms}}{V_{av}}$$

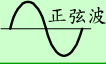
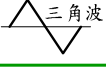
公式8-210

◆ 波峰因數：

$$CF = \frac{\text{最大值}}{\text{有效值}} = \frac{V_m}{V_{eff}} \quad \text{或} \quad \frac{V_m}{V_{rms}}$$

公式8-211

▼ 表8-1 常見波形的波形因數與波峰因數

波形	最大值 V_m	有效值 V_{eff} 、 V_{rms}	平均值 V_{av}	波形因數 FF	波峰因數 CF
 方波	V_m	V_m	V_m	1	1
 正弦波	V_m	$\frac{V_m}{\sqrt{2}}$	$\frac{2V_m}{\pi}$	$\frac{\pi}{2\sqrt{2}} \approx 1.111$	$\sqrt{2} \approx 1.414$
 三角波	V_m	$\frac{V_m}{\sqrt{3}}$	$\frac{V_m}{2}$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \approx 1.155$	$\sqrt{3} \approx 1.732$

旗立



知識、技能與信心
你與我們共同成长！

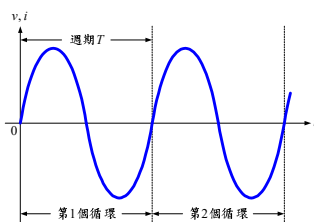
第 8 章 交流電

E180B1 適用

8 - 21

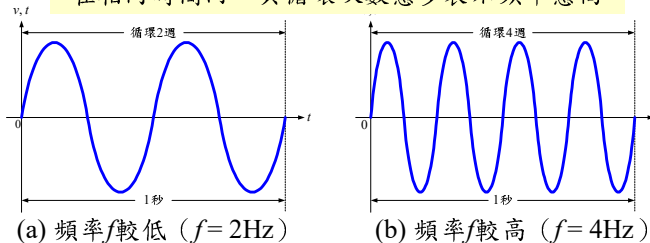
頻率及週期

週期為波形在重複變化時
循環一週所花費的時間



▲ 圖8-18 正弦波的週期

在相同時間內，其循環次數愈多表示頻率愈高



▲ 圖8-19 正弦波的頻率

旗立



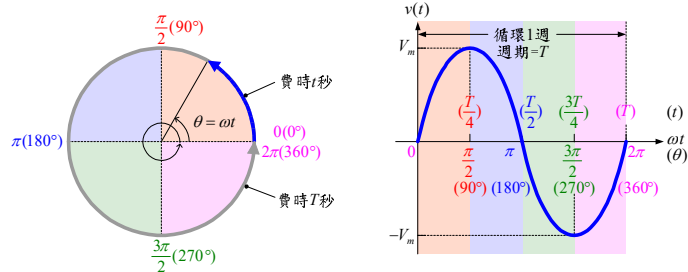
知識、技能與信心
你與我們共同成长！

第 8 章 交流電

E180B1 適用

8 - 22

角速度



交流發電機（2極）的線圈旋轉一週時，所產生的正弦波交流電也正好循環一個週期

▲圖8-20 正弦波形與旋轉角度的關係

$$\omega = \frac{\theta}{t} = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad [\text{rad/s, 徑/秒}]$$

公式8-30
換

$$v(t) = V_m \sin \theta = V_m \sin \omega t = V_m \sin 2\pi f t \quad [\text{V, 伏特}]$$

公式8-305

旗立



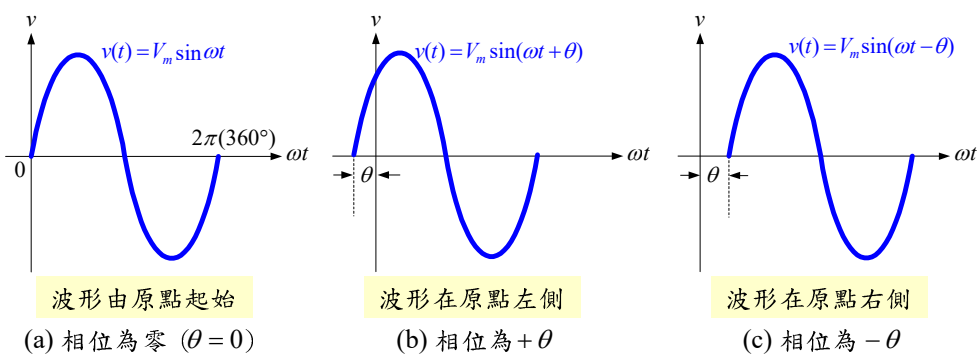
知識 · 能力 · 技巧
你願意接受挑戰嗎？

第 8 章 交流電



E180B1 適用 8 - 23

正弦波的相位



▲圖8-21 正弦波的相位

旗立



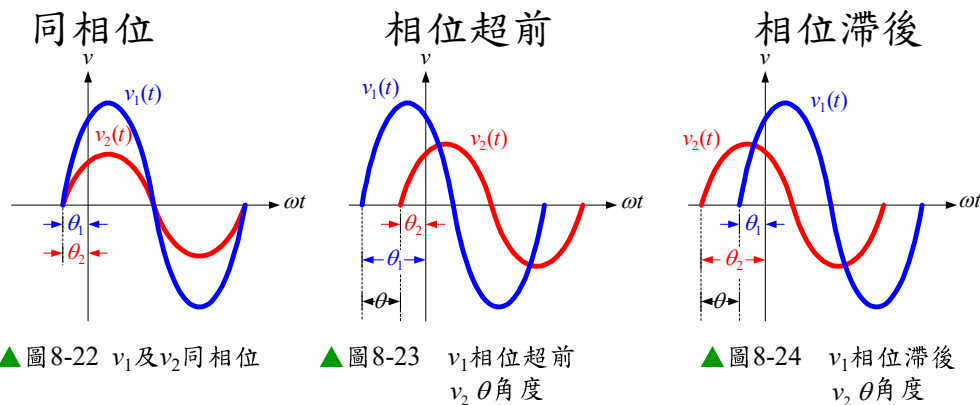
知識 · 能力 · 技巧
你願意接受挑戰嗎？

第 8 章 交流電



E180B1 適用 8 - 24

相位的超前與滯後



旗立



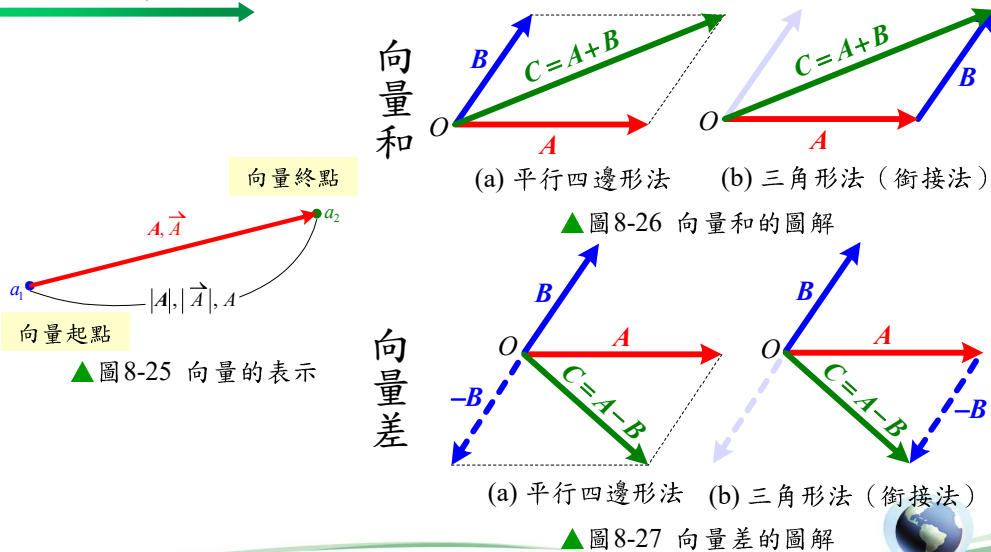
知識，從這裡開始！
你願意接受挑戰嗎？

第 8 章 交流電



E180B1 適用 8 - 25

向量



旗立



知識，從這裡開始！
你願意接受挑戰嗎？

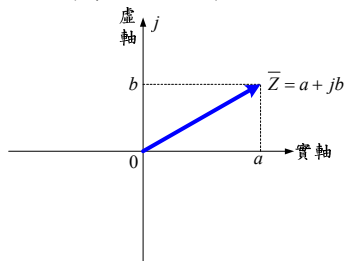
第 8 章 交流電



E180B1 適用 8 - 26

複數平面的座標系統

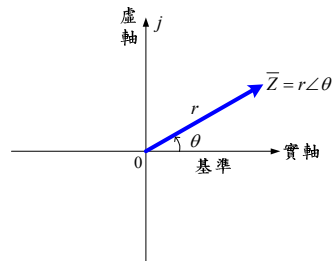
◆ 直角座標系統



▲ 圖8-30 直角座標表示法

$$\bar{Z} = a + jb$$

公式8-501



▲ 圖8-32 極座標表示法

$$\bar{Z} = r\angle\theta$$

公式8-502

旗立



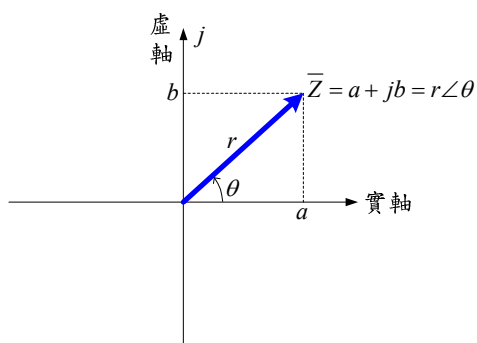
知識、經驗與信心
你與讀者都滿意！

第 8 章 交流電



E180B1 適用 8 - 27

直角座標與極座標的轉換



▲ 圖8-34 直角座標與極座標的轉換

$$r = \sqrt{a^2 + b^2} = |\bar{Z}|$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{b}{a}$$

公式8-503

$$a = r \cos \theta$$

$$b = r \sin \theta$$

公式8-504

旗立



知識、經驗與信心
你與讀者都滿意！

第 8 章 交流電



E180B1 適用 8 - 28

虛數 j 的各種冪次值運算

依虛數 j 的定義可知：

$$j = \sqrt{-1}$$

$$j^2 = (\sqrt{-1})^2 = -1$$

$$j^3 = (j^2)(j) = (-1)(j) = -j$$

$$j^4 = (j^2)(j^2) = (-1)(-1) = 1$$

$$\frac{1}{j} = \frac{(1)(j^3)}{(j)(j^3)} = \frac{j^3}{j^4} = \frac{-j}{1} = -j$$

$$\begin{aligned}\overline{Z_1} \cdot \overline{Z_2} &= (a + jb) \cdot (c + jd) \\ &= ac + jad + jbc - bd \\ &= (ac - bd) + j(ad + bc)\end{aligned}$$

公式8-507

$$\begin{aligned}\frac{\overline{Z_1}}{Z_2} &= \frac{a + jb}{c + jd} = \frac{(a + jb) \cdot (c - jd)}{(c + jd) \cdot (c - jd)} \\ &= \frac{ac - jad + jbc + bd}{c^2 - jcd + jcd + d^2} \\ &= \frac{ac + bd}{c^2 + d^2} - j \frac{ad - bc}{c^2 + d^2}\end{aligned}$$

公式8-508

旗立

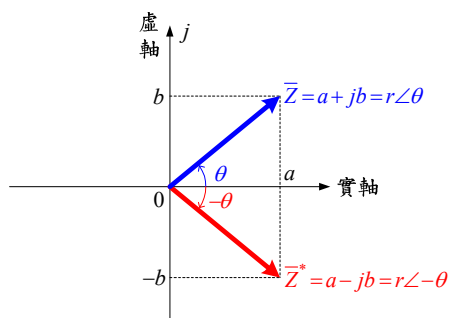


知識 · 能力 · 態度
你與書是好朋友！

第 8 章 交流電

E180B1 適用 8 - 29

共軛複數



▲圖8-35 共軛複數的圖示

$$\overline{Z}^* = a - jb = r\angle -\theta$$

公式8-511

$$\begin{aligned}\overline{Z} \cdot \overline{Z}^* &= (a + jb) \cdot (a - jb) \\ &= a^2 + b^2 = |\overline{Z}|^2 \\ &= (r\angle\theta) \cdot (r\angle-\theta) \\ &= r^2\end{aligned}$$

公式8-512

旗立

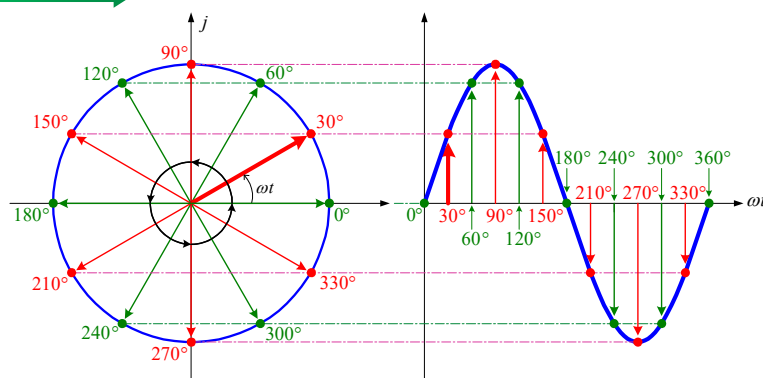


知識 · 能力 · 態度
你與書是好朋友！

第 8 章 交流電

E180B1 適用 8 - 30

正弦波的相量表示法 (1)

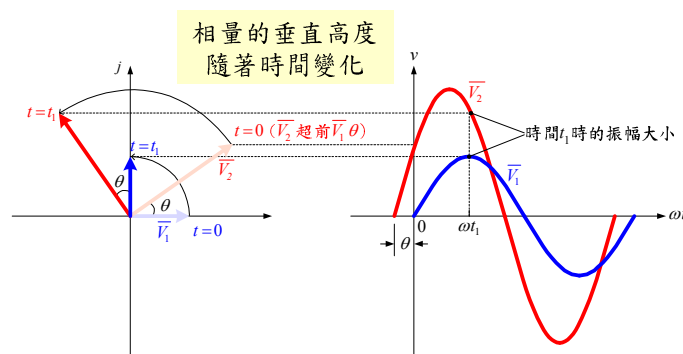


相量為一旋轉的向量，其在每個旋轉角度上的縱軸分量，皆可與正弦波上的各瞬間值相對應

▲圖8-36 利用相量圖描述正弦波



正弦波的相量表示法 (2)



▲圖8-36 不同時間下的相量圖示

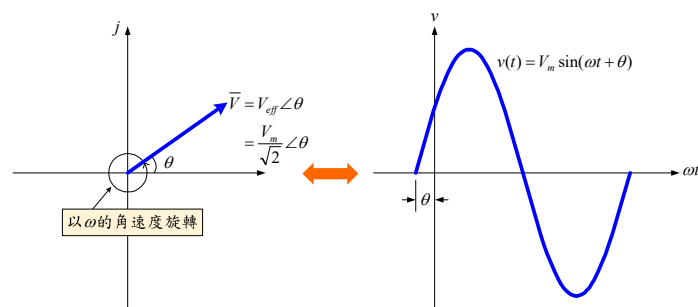
$$v(t) = V_m \sin(\omega t + \theta) = \sqrt{2}V_{eff} \sin(\omega t + \theta)$$

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \theta) = \sqrt{2}I_{eff} \sin(\omega t + \theta)$$

公式8-516



正弦波的相量表示法 (3)



▲ 圖8-38 相量圖與波形圖

$$\bar{V} = V_{\text{eff}} \angle \theta = V \angle \theta$$

$$\bar{I} = I_{\text{eff}} \angle \theta = I \angle \theta$$

公式8-517

旗立



電腦·網路·資訊
你與書是最佳夥伴！



第 8 章 交流電



E180B1 適用

8 - 33

第九章 基本交流電路

- 9-1 基本元件組成之交流電路
- 9-2 電阻電容串聯電路
- 9-3 電阻電感串聯電路
- 9-4 電阻電感電容串聯電路
- 9-5 電阻電容並聯電路
- 9-6 電阻電感並聯電路
- 9-7 電阻電感電容並聯電路
- 9-8 電阻電感電容串並聯電路

旗立

光碟、紙張用得少，
你我讓地球更美好！



9 - 1

E180B1 適用

參考資料網址

1. 基本電學-維基百科：
<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E5%9F%BA%E6%9C%AC%E9%9B%BB%E5%AD%B8>
2. [台大普物實驗下] RC RL 交流電路實驗講解- YouTube：
https://www.youtube.com/watch?v=uai_KHwbAwY
3. RC, RL, LCR 電路講義：
<http://phy.ntnu.edu.tw/~chiact/ElectricCir/RLCcircuit/RC.htm>

旗立

光碟、紙張用得少，
你我讓地球更美好！

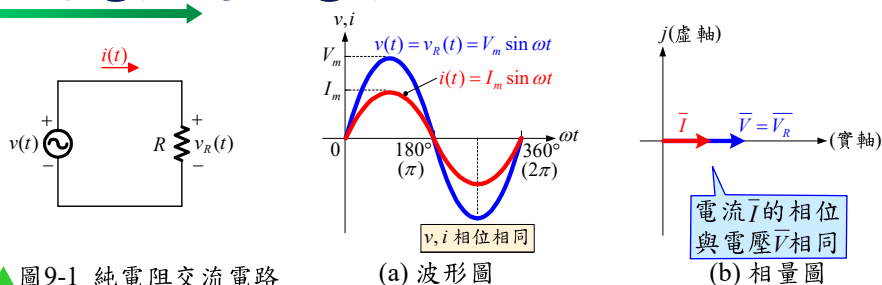
第 9 章 基本交流電路



E180B1 適用

9 - 2

純電阻交流電路



▲圖9-1 純電阻交流電路

(a) 波形圖

(b) 相量圖

▲圖9-2 純電阻交流電路電壓與電流的相位關係

電壓： $\vec{V}_R = \vec{V} = V \angle 0^\circ$ [V, 伏特] 公式9-101b

電流： $\vec{I} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \angle 0^\circ = I \angle 0^\circ = \frac{V}{R} \angle 0^\circ$ [A, 安培] 公式9-102b

相角： $\theta = 0^\circ$ [度] 公式9-103

阻抗： $\vec{Z} = \vec{R} = \frac{\vec{V}}{\vec{I}} = \frac{V \angle 0^\circ}{I \angle 0^\circ} = \frac{V}{I} \angle 0^\circ = R \angle 0^\circ = R$ [Ω , 歐姆] 公式9-104

旗立

知識，從這裡開始！
你願意接受挑戰嗎？

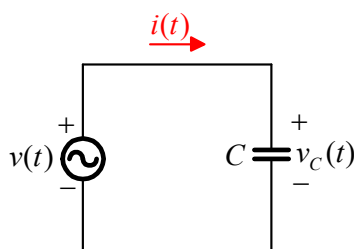
第 9 章 基本交流電路



E180B1 適用

9 - 3

純電容交流電路(1)



▲圖9-4 純電容交流電路

電壓： $\vec{V}_C = \vec{V} = V \angle 0^\circ$ [V, 伏特] 公式9-105b

電流： $\vec{I} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \angle 90^\circ = I \angle 90^\circ$ [A, 安培] 公式9-106b

相角： $\theta = 90^\circ$ [度] 公式9-107

阻抗： $X_C = \frac{V}{I} = \frac{V_m}{I_m} = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$ [Ω , 歐姆] 公式9-109

旗立

知識，從這裡開始！
你願意接受挑戰嗎？

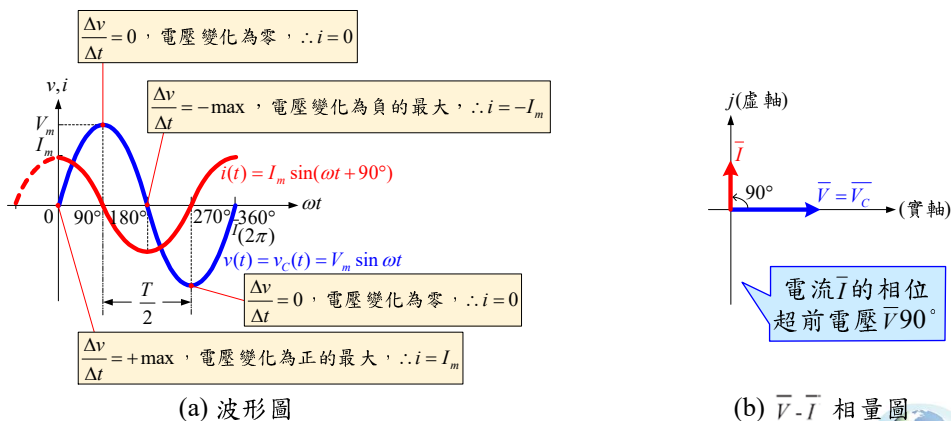
第 9 章 基本交流電路



E180B1 適用

9 - 4

純電容交流電路(2)



▲圖9-5 純電容交流電路電壓與電流的相位關係

旗立

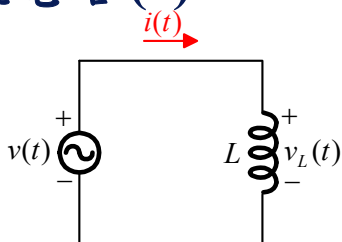
知識 · 能力 · 信心
你與進步無間！

第 9 章 基本交流電路

E180B1 適用

9 - 5

純電感交流電路(1)



▲圖9-7 純電感交流電路

電壓： $\bar{V}_L = \bar{V} = V \angle 0^\circ$

[V, 伏特] 公式9-110b

電流： $\bar{I} = \frac{\bar{I}_m}{\sqrt{2}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \angle -90^\circ = I \angle -90^\circ$

[A, 安培] 公式9-111b

相角： $\theta = -90^\circ$

[度] 公式9-112

阻抗： $\bar{X}_L = \frac{\bar{V}}{\bar{I}} = \frac{V_m}{I_m} = \omega L = 2\pi fL$

[Ω, 歐姆] 公式9-114

旗立



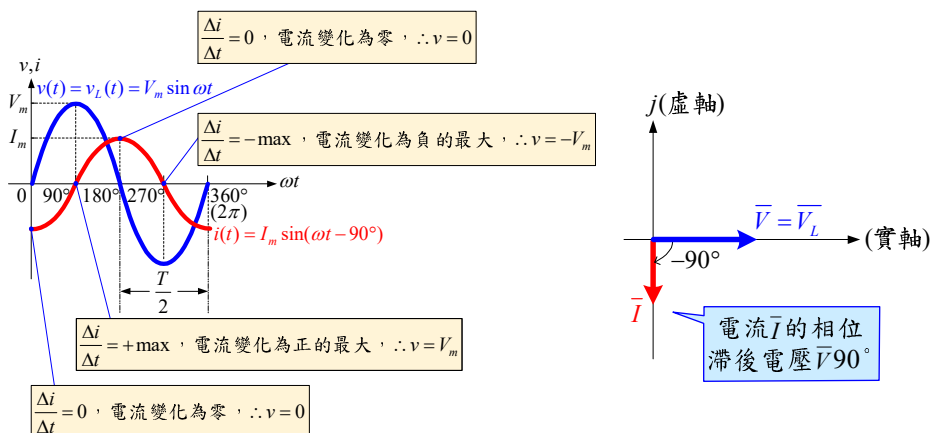
知識 · 能力 · 信心
你與進步無間！

第 9 章 基本交流電路

E180B1 適用

9 - 6

純電感交流電路 (2)



(a) 波形圖

(b) $\bar{V}$ - $\bar{I}$ 相量圖

▲圖9-8 純電感交流電路電壓與電流的相位關係

旗立



知識、能力、素養
全面提升學習成效！

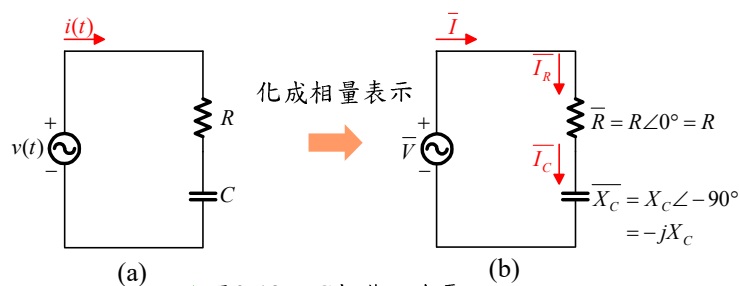
第 9 章 基本交流電路



E180B1 適用

9 - 7

電阻電容串聯電路 (1)



▲圖9-12 RC串聯交流電路

$$\bar{Z} = \bar{R} + \bar{X}_C = R \angle 0^\circ + X_C \angle -90^\circ = R - jX_C$$

$$= \sqrt{R^2 + X_C^2} \angle -\tan^{-1} \frac{X_C}{R} = Z \angle \theta_Z$$

[Ω, 歐姆] 公式9-201

$$\bar{I} = \bar{I}_R = \bar{I}_C$$

[A, 安培] 公式9-203

$$\bar{V} = \bar{V}_R + \bar{V}_C = \bar{I}R + \bar{I}(-jX_C) = \bar{I}(R - jX_C) = \bar{I}\bar{Z} = \bar{I} \cdot Z \angle \theta_Z$$

[V, 伏特] 公式9-206

旗立



知識、能力、素養
全面提升學習成效！

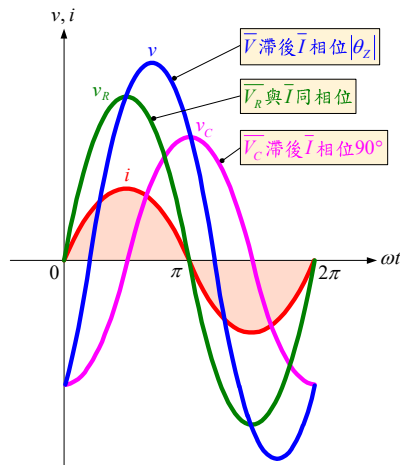
第 9 章 基本交流電路



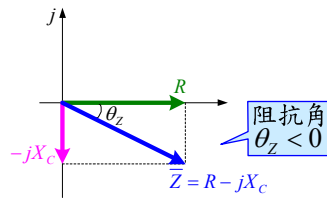
E180B1 適用

9 - 8

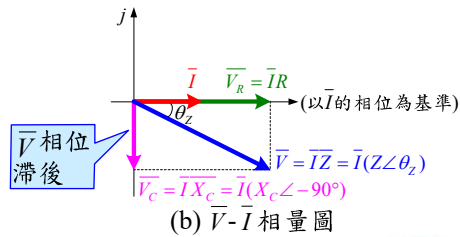
電阻電容串聯電路 (2)



▲圖9-13 RC串聯交流電路的波形圖



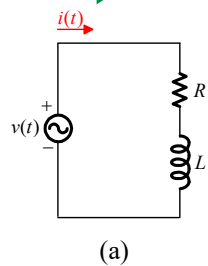
(a) 阻抗相量圖



(b) $\bar{V}$ - $\bar{I}$ 相量圖

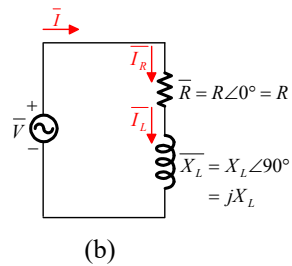
▲圖9-14 RC串聯交流電路的相量圖

電阻電感串聯電路 (1)



(a)

化成相量表示



(b)

▲圖9-15 RL串聯交流電路

$$\bar{Z} = \bar{R} + \bar{X}_L = R \angle 0^\circ + X_L \angle 90^\circ = R + jX_L$$

$$= \sqrt{R^2 + X_L^2} \angle \tan^{-1} \frac{X_L}{R} = Z \angle \theta_Z$$

[Ω, 歐姆] 公式9-301

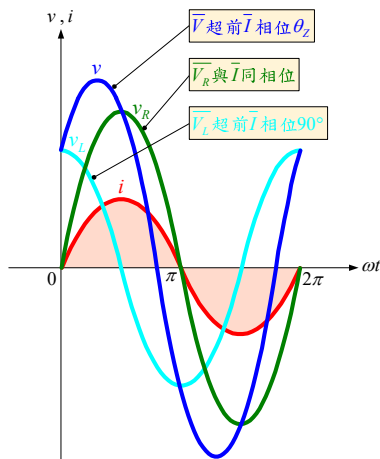
$$\bar{I} = \bar{I}_R = \bar{I}_L$$

[A, 安培] 公式9-303

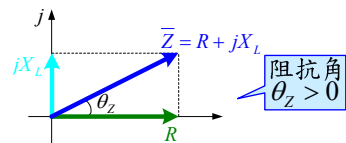
$$\bar{V} = \bar{V}_R + \bar{V}_L = \bar{I}R + \bar{I}(jX_L) = \bar{I}(R + jX_L) = \bar{I}\bar{Z} = \bar{I} \cdot Z \angle \theta_Z$$

[V, 伏特] 公式9-306

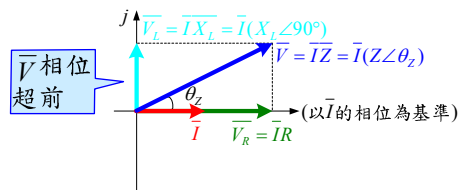
電阻電感串聯電路 (2)



▲ 圖9-16 RL串聯交流電路的波形圖



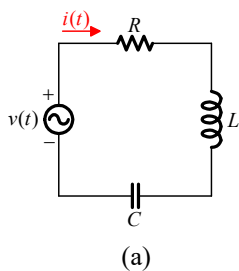
(a) 阻抗相量圖



(b) $\bar{V}$ - $\bar{I}$ 相量圖

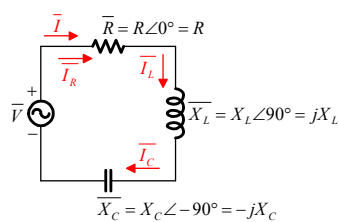
▲ 圖9-17 RL串聯交流電路的相量圖

電阻電感電容串聯電路 (1)



(a)

化成相量表示



(b)

▲ 圖9-18 RLC串聯交流電路

$$\begin{aligned}\bar{Z} &= \bar{R} + \bar{X}_L + \bar{X}_C = R \angle 0^\circ + X_L \angle 90^\circ + X_C \angle -90^\circ = R + jX_L - jX_C = R + j(X_L - X_C) \\ &= \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \angle \tan^{-1} \frac{X_L - X_C}{R} = Z \angle \theta_Z\end{aligned}$$

[Ω, 歐姆] 公式9-401

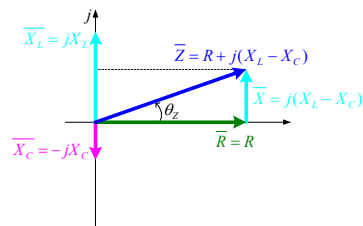
$$\bar{I} = \bar{I}_R = \bar{I}_L = \bar{I}_C$$

[A, 安培] 公式9-403

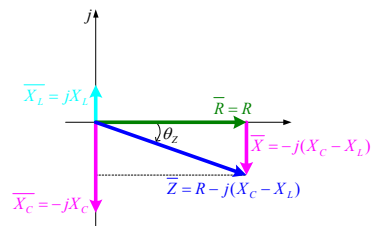
$$\begin{aligned}\bar{V} &= \bar{V}_R + \bar{V}_L + \bar{V}_C = \bar{I}R + \bar{I}(jX_L) + \bar{I}(-jX_C) \\ &= \bar{I}[(R + j(X_L - X_C))] = \bar{I}\bar{Z} = \bar{I} \cdot Z \angle \theta_Z\end{aligned}$$

[V, 伏特] 公式9-404

電阻電感電容串聯電路 (2)



(a) $X_L > X_C$ 的情況 (θ_Z 為正)



(b) $X_C > X_L$ 的情況 (θ_Z 為負)

▲圖9-19 RLC串聯交流電路的阻抗圖

$$\begin{aligned}\bar{Z} &= \bar{R} + \bar{X}_L + \bar{X}_C = R\angle 0^\circ + X_L\angle 90^\circ + X_C\angle -90^\circ = R + jX_L - jX_C = R + j(X_L - X_C) \\ &= \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \angle \tan^{-1} \frac{X_L - X_C}{R} = Z\angle \theta_Z\end{aligned}$$

[Ω, 歐姆] 公式9-401

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

[Ω, 歐姆] 公式9-402

$$\theta_Z = \tan^{-1} \frac{X}{R} = \tan^{-1} \frac{X_L - X_C}{R}$$

[°, 度]

旗立



知識 · 能力 · 技巧
你願意去學習嗎？

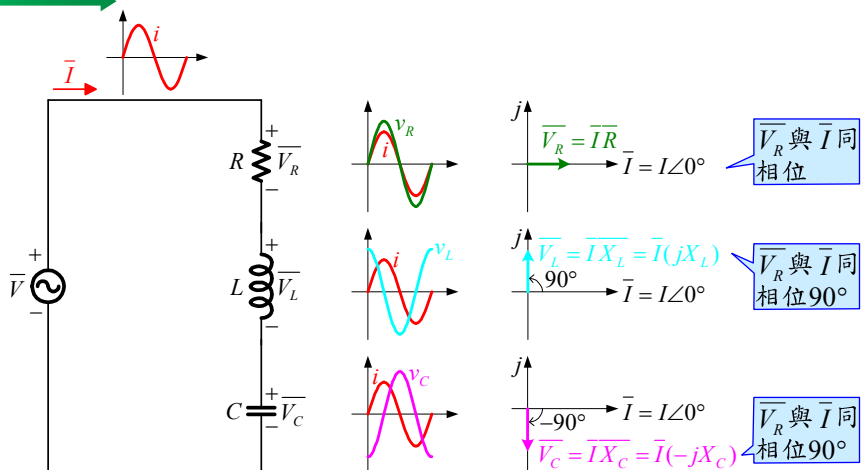
第 9 章 基本交流電路



E180B1 適用

9 - 13

電阻電感電容串聯電路 (3)



▲圖9-20 RLC串聯電路中各元件電壓的相量圖

旗立



知識 · 能力 · 技巧
你願意去學習嗎？

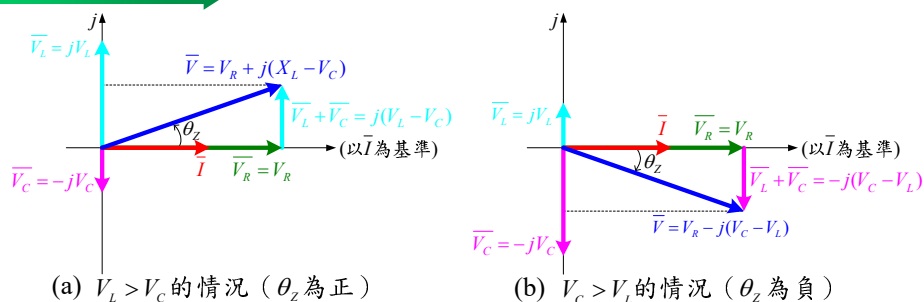
第 9 章 基本交流電路



E180B1 適用

9 - 14

電阻電感電容串聯電路 (4)



▲圖9-21 RLC串聯交流電路的 $\bar{V}$ - $\bar{I}$ 相量圖

$$\bar{V} = \bar{V}_R + \bar{V}_L + \bar{V}_C = V_R + jV_L + (-jV_C) = V_R + j(V_L - V_C) = V \angle \theta_Z \quad [\text{V, 伏特}] \quad \text{公式9-406}$$

$$V = \sqrt{V_R^2 + (V_L - V_C)^2} \quad [\text{V, 伏特}] \quad \text{公式9-407}$$

$$\theta_Z = \theta_v - \theta_i = \tan^{-1} \frac{V_L - V_C}{V_R} \quad [^\circ, \text{度}] \quad (\text{以 } \bar{I} \text{ 為基準})$$

旗立



知識 · 能力 · 素養
你與未來的約定

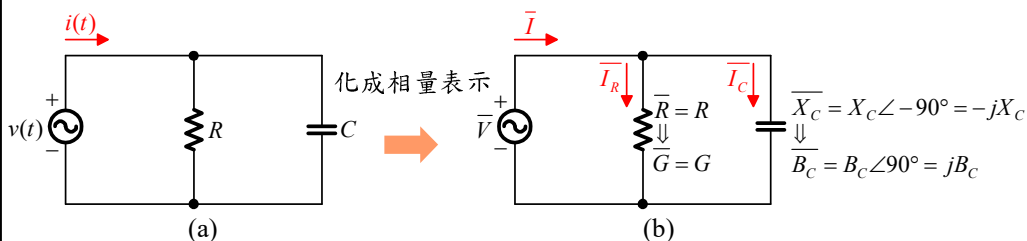
第 9 章 基本交流電路



E180B1 適用

9 - 15

電阻電容並聯電路 (1)



▲圖9-24 RC並聯交流電路

$$\bar{Y} = \bar{G} + \bar{B}_C = G \angle 0^\circ + B_C \angle 90^\circ = G + jB_C$$

$$= \sqrt{G^2 + B_C^2} \angle \tan^{-1} \frac{B_C}{G} = Y \angle \theta_Y \quad [\text{S, 西門子}] \quad \text{公式9-502}$$

$$\bar{V} = \bar{V}_R = \bar{V}_C \quad [\text{V, 伏特}] \quad \text{公式9-505}$$

$$\bar{I} = \bar{I}_R + \bar{I}_C = \bar{V}G + \bar{V}(jB_C) = \bar{V}(G + jB_C) = \bar{V}\bar{Y} = \bar{V} \cdot Y \angle \theta_Y \quad [\text{A, 安培}] \quad \text{公式9-508}$$

旗立



知識 · 能力 · 素養
你與未來的約定

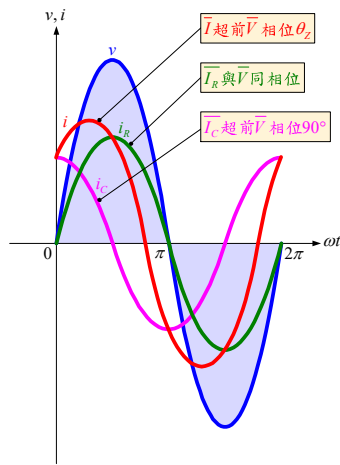
第 9 章 基本交流電路



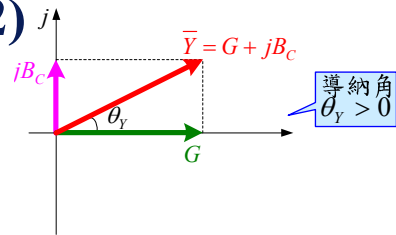
E180B1 適用

9 - 16

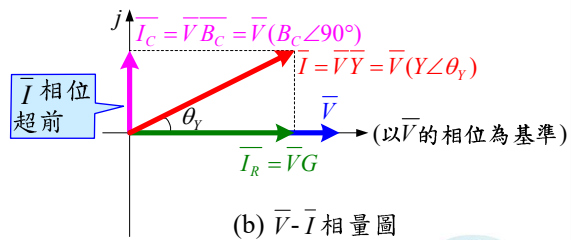
電阻電容並聯電路 (2)



▲圖9-25 RC並聯交流電路的波形圖



(a) 導納相量圖



(b) $\bar{V}$ - $\bar{I}$ 相量圖

▲圖9-26 RC並聯交流電路的相量圖

旗立



知識 · 應用 · 創新
你與世界無間對話！

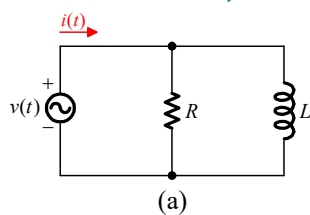
第 9 章 基本交流電路



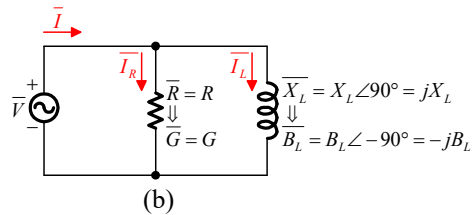
E180B1 適用

9 - 17

電阻電感並聯電路 (1)



化成相量表示



▲圖9-27 RL並聯交流電路

$$\begin{aligned}\bar{Y} &= \bar{G} + \bar{B}_L = G \angle 0^\circ + B_L \angle -90^\circ = G - jB_L \\ &= \sqrt{G^2 + B_L^2} \angle -\tan^{-1} \frac{B_L}{G} = Y \angle \theta_Y\end{aligned}$$

[S, 西門子]

公式9-602

$$\bar{V} = \bar{V}_R = \bar{V}_L$$

[V, 伏特]

公式9-605

$$\bar{I} = \bar{I}_R + \bar{I}_L = \bar{V}G + \bar{V}(-jB_L) = \bar{V}(G - jB_L) = \bar{V}\bar{Y} = \bar{V} \cdot Y \angle \theta_Y$$

[A, 安培] 公式9-608

旗立



知識 · 應用 · 創新
你與世界無間對話！

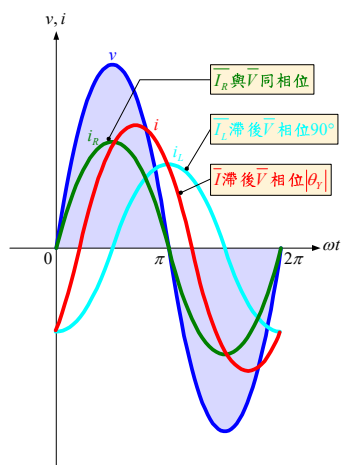
第 9 章 基本交流電路



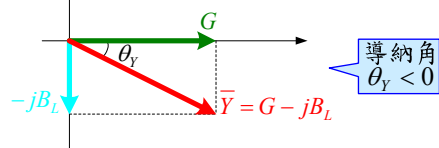
E180B1 適用

9 - 18

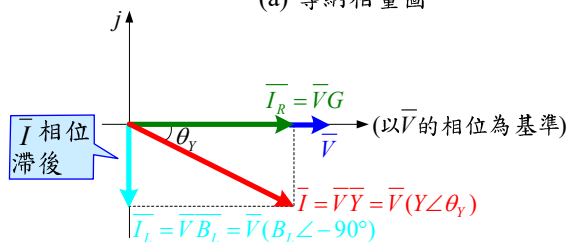
電阻電感並聯電路 (2)



▲圖9-28 RL並聯交流電路的波形圖



(a) 導納相量圖



(b) $\bar{V}$ - $\bar{I}$ 相量圖

▲圖9-29 RL並聯交流電路的相量圖

旗立



知識 改變 命運
你改變世界 世界也改變你

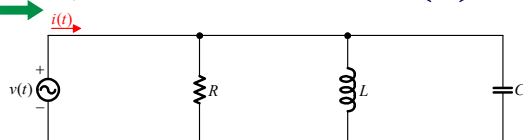
第 9 章 基本交流電路



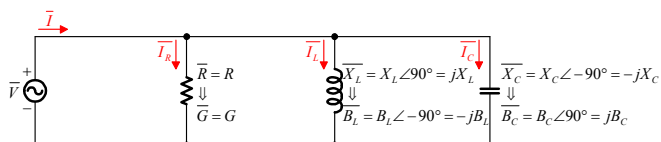
E180B1 適用

9 - 19

電阻電感電容並聯電路 (1)



化成相量表示



▲圖9-30 RLC並聯交流電路

$$\bar{Y} = \bar{G} + \bar{B}_L + \bar{B}_C = G \angle 0^\circ + B_L \angle -90^\circ + B_C \angle 90^\circ = G + (-jB_L) + jB_C = G + j(B_C - B_L)$$

$$= \sqrt{G^2 + (B_C - B_L)^2} \angle \tan^{-1} \frac{B_C - B_L}{G} = Y \angle \theta_Y$$

[S, 西門子] 公式9-701

$$\bar{V} = \bar{V}_R + \bar{V}_L + \bar{V}_C$$

[V, 伏特] 公式9-704

$$\bar{I} = \bar{I}_R + \bar{I}_L + \bar{I}_C = \bar{V}G + \bar{V}(-jB_L) + \bar{V}(jB_C) = \bar{V}[G + j(B_C - B_L)] = \bar{V}\bar{Y} = \bar{V} \cdot Y \angle \theta_Y$$

[A, 安培] 公式9-705

旗立



知識 改變 命運
你改變世界 世界也改變你

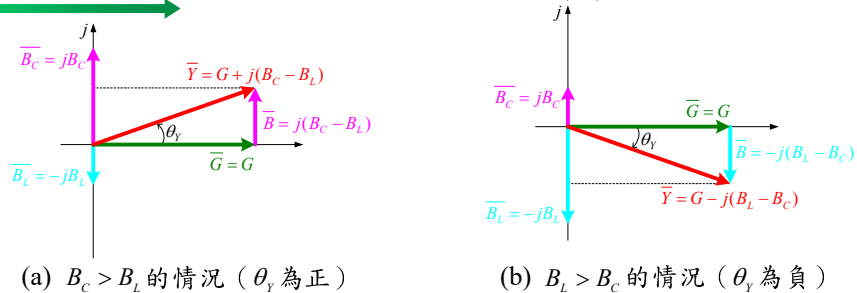
第 9 章 基本交流電路



E180B1 適用

9 - 20

電阻電感電容並聯電路 (2)



▲圖9-31 RLC並聯交流電路的導納圖

$$\begin{aligned}\bar{Y} &= \bar{G} + \bar{B}_L + \bar{B}_C = G\angle 0^\circ + B_L\angle -90^\circ + B_C\angle 90^\circ = G + (-jB_L) + jB_C \\ &= G + j(B_C - B_L) = \sqrt{G^2 + (B_C - B_L)^2} \angle \tan^{-1} \frac{B_C - B_L}{G} = Y\angle \theta_Y\end{aligned}$$

[S, 西門子] 公式9-701

$$Y = \sqrt{G^2 + B^2} = \sqrt{G^2 + (B_C - B_L)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2}$$

[S, 西門子] 公式9-702

$$\theta_Y = \tan^{-1} \frac{B}{G} = \tan^{-1} \frac{B_C - B_L}{G}$$

[°, 度]

旗立



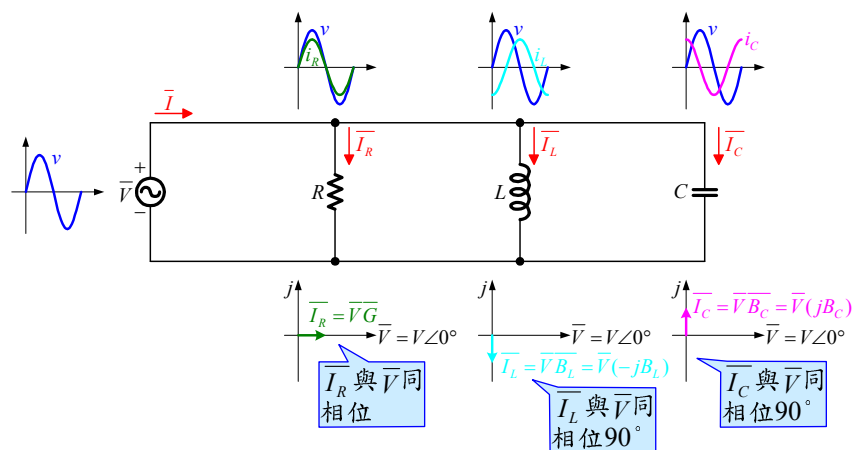
知識 · 應用 · 創新
你與未來的距離

第 9 章 基本交流電路



E180B1 適用 9 - 21

電阻電感電容並聯電路 (3)



▲圖9-32 RLC並聯交流電路中各元件電流的相量圖

旗立



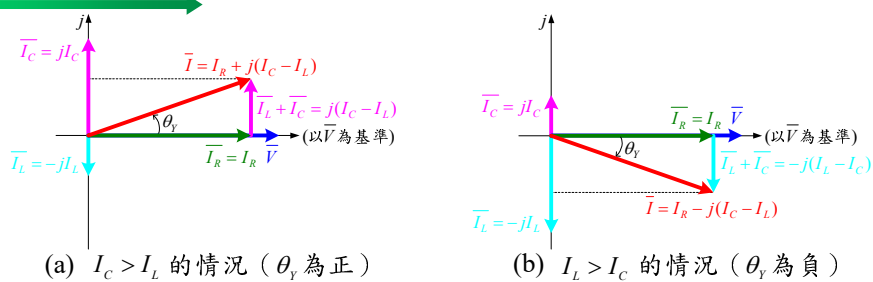
知識 · 應用 · 創新
你與未來的距離

第 9 章 基本交流電路



E180B1 適用 9 - 22

電阻電感電容並聯電路 (4)



▲圖9-33 RLC並聯交流電路的 $\bar{V}$ - $\bar{I}$ 相量圖

$$\bar{I} = \bar{I}_R + \bar{I}_L + \bar{I}_C = I_R + (-jI_L) + jI_C = I_R + j(I_C - I_L) = I \angle \theta_v \quad [\text{A, 安培}] \quad \text{公式9-707}$$

$$I = \sqrt{I_R^2 + (I_C - I_L)^2} \quad [\text{A, 安培}] \quad \text{公式9-708}$$

$$\theta_v = \theta_i - \theta_v = \tan^{-1} \frac{I_C - I_L}{I_R} \quad [^\circ, \text{度}] \quad (\text{以 } \bar{V} \text{ 為基準})$$

第十章 交流電功率

- 10-1 瞬間功率
- 10-2 平均功率
- 10-3 虛功率
- 10-4 視在功率
- 10-5 功率因數

旗立

光碟、紙張用得少，
你我讓地球更美好！



10 - 1

E180B1 適用

參考資料網址

1. 台灣綠色生產力基金會：
<https://www.ecct.org.tw/?aspxerrorpath=/print/42-5.htm#d1>

旗立

光碟、紙張用得少，
你我讓地球更美好！



第 10 章 交流電功率



E180B1 適用

10 - 2

瞬間功率

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) \quad [\text{W, 瓦特}]$$

公式 10-102

$$p(t) = VI \cos \theta_p - VI \cos(2\omega t + \theta_v + \theta_i)$$

公式 10-103

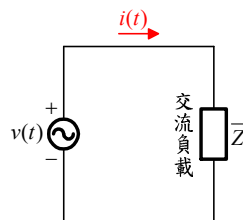
$$p(t) = VI \cos \theta_p - VI \cos(2\omega t + \theta_p)$$

公式 10-104

$$\text{最大瞬間功率: } P_{\max} = VI \cos \theta_p + VI$$

$$\text{最小瞬間功率: } P_{\min} = VI \cos \theta_p - VI$$

公式 10-105



▲圖10-1 基本的交流電路

旗立



知識、能力與信心
你願意接受挑戰嗎？

第 10 章 交流電功率



E180B1 適用

10 - 3

瞬間功率的波形

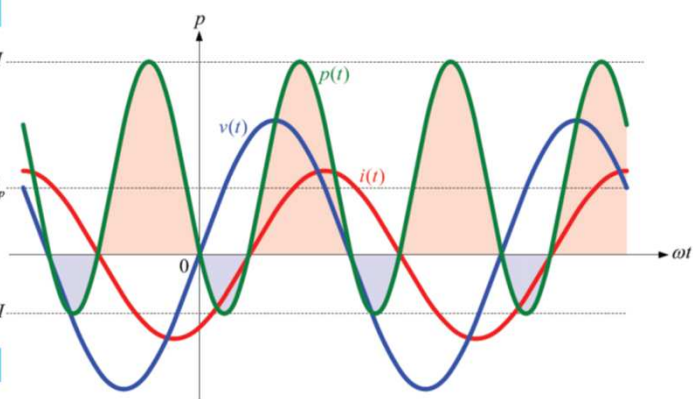
最大瞬間功率

$$VI \cos \theta_p + VI$$

$$VI \cos \theta_p$$

$$VI \cos \theta_p - VI$$

最小瞬間功率



瞬間功率 $p(t)$ 介於 $VI \cos \theta_p + VI$ 與 $VI \cos \theta_p - VI$ 之間

▲圖10-2 瞬間功率的波形

旗立



知識、能力與信心
你願意接受挑戰嗎？

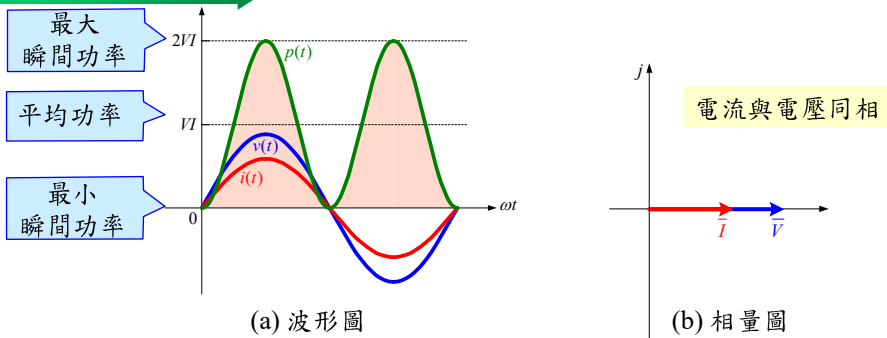
第 10 章 交流電功率



E180B1 適用

10 - 4

純電阻交流電路的平均功率



▲圖10-3 純電阻交流電路中電壓、電流與功率的波形及 $\bar{V}$ - $\bar{I}$ 相量圖

◆平均功率

$$P = VI \cos \theta_p = VI = I^2 R = \frac{V^2}{R}$$

公式 10-202

旗立



知識、技能與信心
你與國家同步前行！

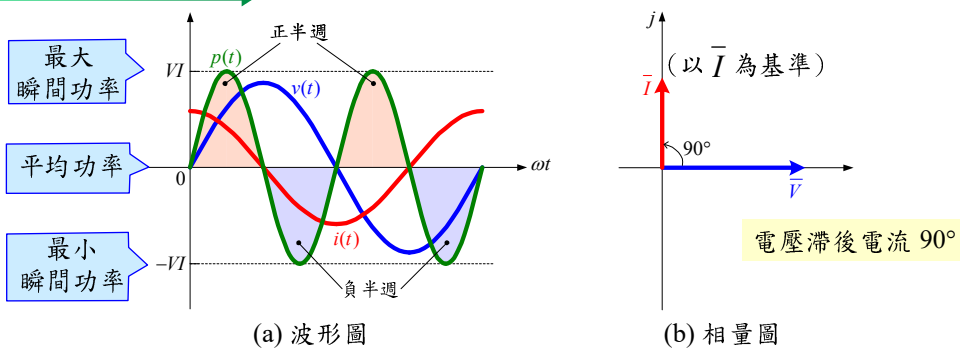
第 10 章 交流電功率



E180B1 適用

10 - 5

純電容交流電路的平均功率



▲圖10-4 純電容交流電路中電壓、電流與功率的波形及 $\bar{V}$ - $\bar{I}$ 相量圖

◆平均功率

$$P = VI \cos \theta_p = 0$$

公式 10-203

旗立



知識、技能與信心
你與國家同步前行！

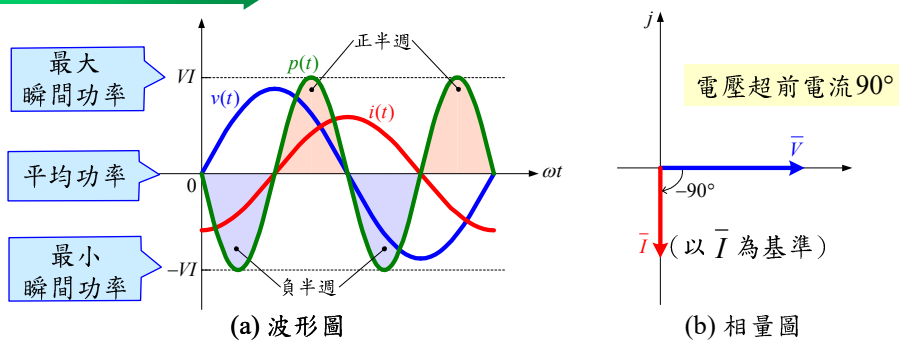
第 10 章 交流電功率



E180B1 適用

10 - 6

純電感交流電路的平均功率



▲圖10-5 純電感交流電路中電壓、電流與功率的波形及 $\bar{V}$ - $\bar{I}$ 相量圖

◆平均功率

$$P = VI \cos \theta_p = 0$$

公式 10-204

旗立



電學、電機與電子
你與我的學習夥伴！

第 10 章 交流電功率



E180B1 適用

10 - 7

平均功率的計算

◆串聯交流電路：

$$P = VI \cos \theta_p = (V \cos \theta_p) I = (V_R) I = (IR) I = I^2 R$$

公式 10-205

◆並聯交流電路：

$$P = VI \cos \theta_p = V(I \cos \theta_p) = V(I_R) = V\left(\frac{V}{R}\right) = \frac{V^2}{R} = V^2 G$$

公式 10-206

旗立



電學、電機與電子
你與我的學習夥伴！

第 10 章 交流電功率



E180B1 適用

10 - 8

虛功率的計算

$$Q = VI \sin \theta_p$$

(式中 $\theta_p = \theta_v - \theta_i$)

$$= Q_L - Q_C$$

(式中 Q_L : 電感器電抗功率, Q_C : 電容器電抗功率)

$$= I^2(X_L - X_C) = I^2X$$

(串聯電路適用, $\because$ 串聯電路之電流相等)

(並聯電路適用, $\because$ 並聯電路之電壓相等)

$$= V^2(B_L - B_C) = V^2(-B)$$

公式 10-304

旗立



知識、能力、素養
你我都該擁有！

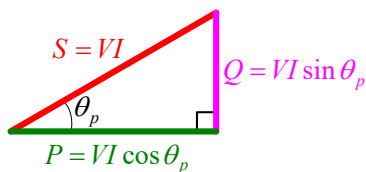
第 10 章 交流電功率



E180B1 適用

10 - 9

功率三角形



▲圖10-6 功率三角形

$$S = VI = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad [VA, \text{伏安}]$$

$$P = S \cos \theta_p = \sqrt{S^2 - Q^2} \quad [W, \text{瓦特}]$$

$$Q = S \sin \theta_p = \sqrt{S^2 - P^2} \quad [VAR, \text{乏}]$$

公式 10-403

旗立



知識、能力、素養
你我都該擁有！

第 10 章 交流電功率

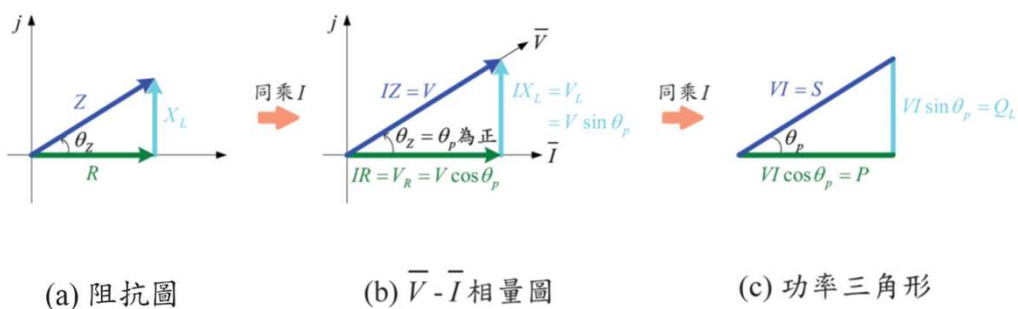


E180B1 適用

10 - 10

相量圖與功率三角形 (2)

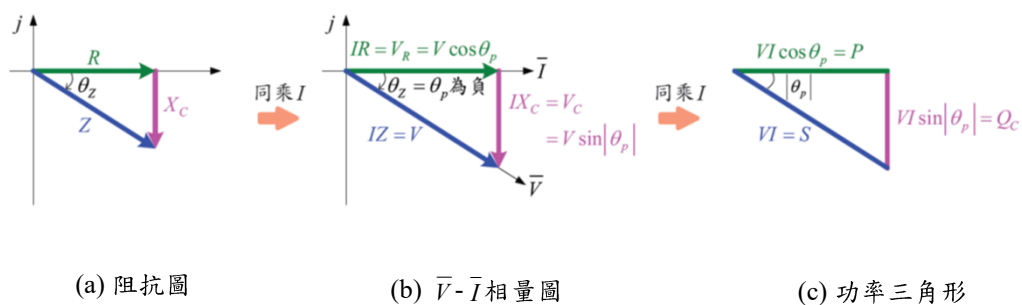
電感性電路



▲圖10-7 電感性電路的相量圖與功率三角形

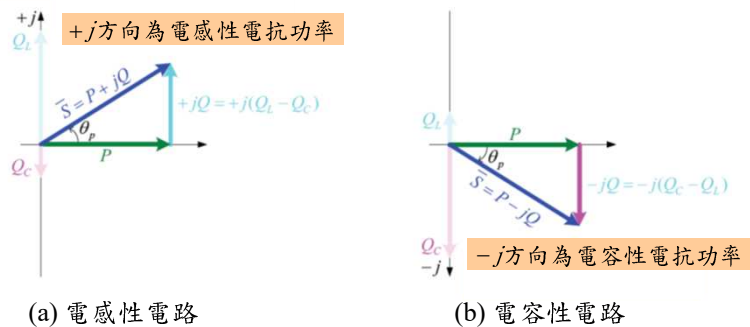
相量圖與功率三角形 (1)

電容性電路



▲圖10-8 電容性電路的相量圖與功率三角形

複數功率



▲圖10-9 複數表示的功率三角形

$$\bar{S} = P + jQ$$

(電感性電路)

公式 10-405

$$\bar{S} = P - jQ$$

(電容性電路)

$$\bar{S} = \bar{V} \bar{I}^*$$

(式中 $\bar{I}^*$ 為 $\bar{I}$ 之共軛複數)

公式 10-406

旗立



電學、電機、電子、
資訊、通訊、控制、
系統、工程、設計、
與、應用、技術、

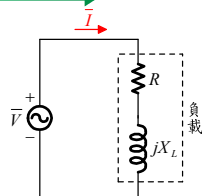
第 10 章 交流電功率



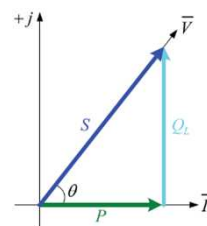
E180B1 適用

10 - 13

功率因數的改善

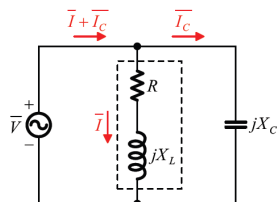


(a) 等效電路



(b) 功率三角形

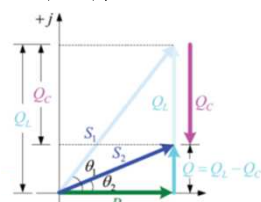
▲圖10-10 電感性負載的等效電路與功率三角形



(a) 等效電路

並聯電容來產生一個相位超前的電流 $\bar{I}_C$

虛功率 Q 抵銷後使功率因數提高



(b) 功率三角形

▲圖10-11 電感性負載並聯電容器後的等效電路與功率三角形

旗立



電學、電機、電子、
資訊、通訊、控制、
系統、工程、設計、
與、應用、技術、

第 10 章 交流電功率



E180B1 適用

10 - 14

第十一章 諧振電路

- 11-1 串聯諧振電路
- 11-2 並聯諧振電路
- 11-3 串並聯諧振電路



11 - 1

E180B1 適用

旗立



光碟、紙張用得少，
你我讓地球更美好！

參考資料網址

1. 通訊博物館-諧振電路：
http://macao.communications.museum/chi/exhibition/secondfloor/MoreInfo/2_4_5_OscillationResonance.html
2. 礦石收音機- 維基百科：
<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E7%9F%BF%E7%9F%B3%E6%94%B6%E9%9F%B3%E6%9C%BA>
3. Billy 's DIY Crystal Radio 礦石收音機：
<https://www.youtube.com/watch?v=7Q1WKKGRsjI>



E180B1 適用

11 - 2

旗立

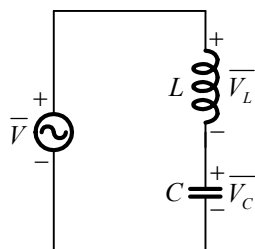


光碟、紙張用得少，
你我讓地球更美好！



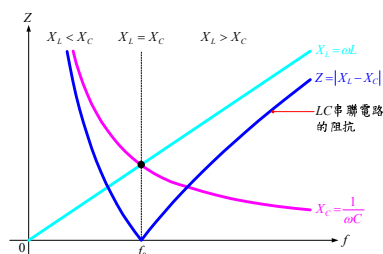
第 11 章 諧振電路

LC 串聯諧振電路



▲圖 11-1 LC 串聯電路

諧振時 ($f = f_0$)，阻抗 $Z_0 = 0$



▲圖 11-2 LC 串聯電路的阻抗-頻率曲線圖

$$Z = \sqrt{(X_L - X_C)^2}$$

$$= |X_L - X_C| \quad [\Omega, \text{歐姆}]$$

公式 11-101

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad [\text{Hz}, \text{赫茲}]$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad [\text{rad/s}, \text{徑/秒}]$$

公式 11-102

旗立



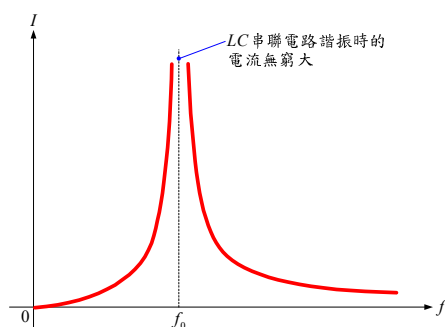
知識，從這裡開始！
你願意學習嗎？

第 11 章 諧振電路



E180B1 適用 11 - 3

LC 串聯諧振電路-電流



諧振時 ($f = f_0$)，阻抗 $I_0 = \infty$

▲圖 11-3 LC 串聯電路的電流-頻率曲線圖

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{V}{|X_L - X_C|} \quad [\text{A}, \text{安培}]$$

公式 11-103

旗立



知識，從這裡開始！
你願意學習嗎？

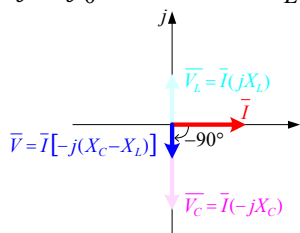
第 11 章 諧振電路



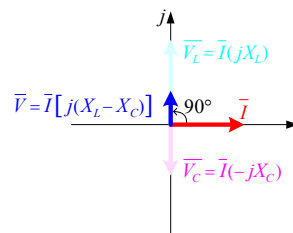
E180B1 適用 11 - 4

LC 串聯諧振電路-特性

- ◆ 當 $f < f_0$ 時，電抗 $X_L < X_C$ ，電路呈電容性。
- ◆ 當 $f = f_0$ 時，電抗 $X_L = X_C$ ，電路呈諧振現象。
- ◆ 當 $f > f_0$ 時，電抗 $X_L > X_C$ ，電路呈電感性。



電路呈電容性



電路呈電感性

註：當 $f = f_0$ 時，由於電流 I 極大，則 $V_L = IX_L$ 、 $V_C = IX_C$ 會遠大於電源電壓 V 。

(a) $f < f_0$

▲ 圖11-4 LC串聯電路的相量圖

(b) $f > f_0$

旗立



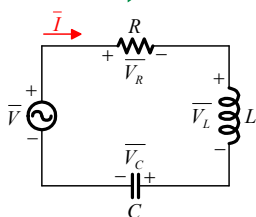
知識、能力、素養
全面提升學習成效！

第 11 章 諧振電路

E180B1 適用

11 - 5

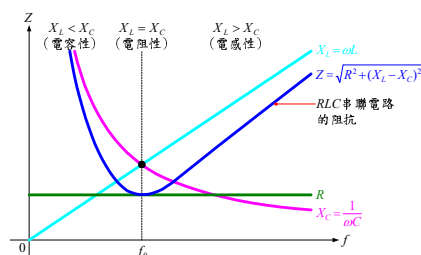
RLC 串聯諧振電路



▲ 圖11-5 RLC串聯電路

$$\begin{aligned}\bar{Z} &= R + j(X_L - X_C) \\ &= R \quad [\Omega, \text{歐姆}]\end{aligned}$$

公式11-105



諧振時 ($f = f_0$)，阻抗 $Z_0 = R$

▲ 圖11-6 RLC串聯電路的阻抗-頻率曲線圖

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad [\text{Hz, 赫茲}]$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad [\text{rad/s, 徑/秒}]$$

公式11-106

旗立



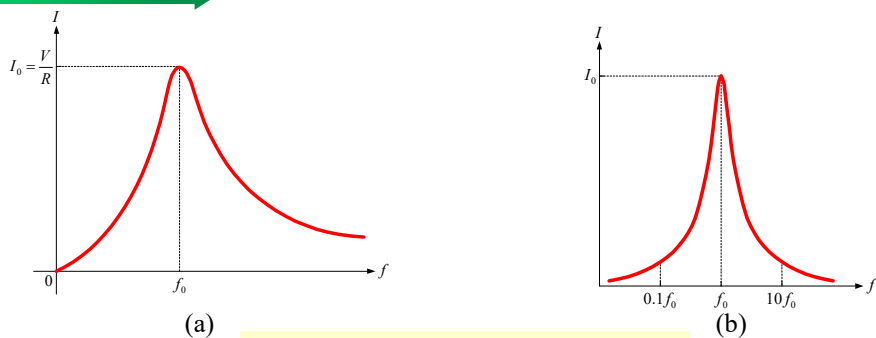
知識、能力、素養
全面提升學習成效！

第 11 章 諧振電路

E180B1 適用

11 - 6

RLC 串聯諧振電路-電流



諧振時 ($f = f_0$)，電流 I_0 為最大值

▲圖11-7 RLC串聯電路的電流-頻率曲線圖

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{V}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} \quad [\text{A, 安培}]$$

公式11-107

旗立

光線一點點，
世界就明亮了！

第 11 章 諧振電路

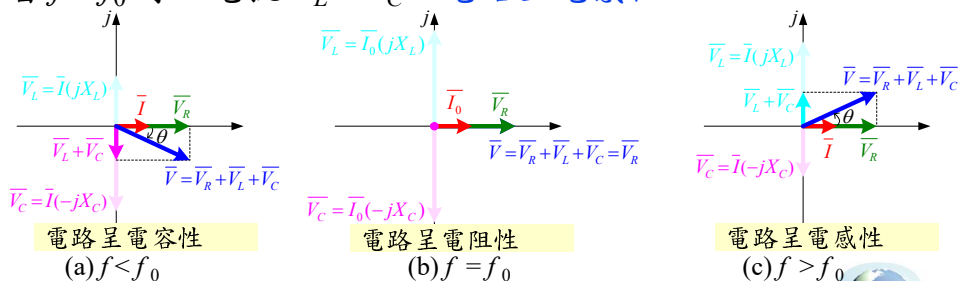


E180B1 適用

11 - 7

RLC 串聯諧振電路-特性

- ◆ 當 $f < f_0$ 時，電抗 $X_L < X_C$ ，電路呈電容性。
- ◆ 當 $f = f_0$ 時，電抗 $X_L = X_C$ ，電路呈電阻性。諧振時，電路阻抗 $Z_0 = R$ 為最小，產生最大的電流 $I_0 = \frac{V}{R}$ 。
- ◆ 當 $f > f_0$ 時，電抗 $X_L > X_C$ ，電路呈電感性。



▲圖11-8 RLC串聯電路的相量圖

旗立



光線一點點，
世界就明亮了！

第 11 章 諧振電路

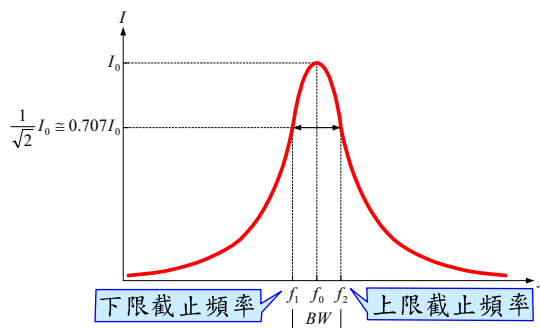


E180B1 適用

11 - 8

RLC 串聯諧振電路-頻帶寬度

定義電流值在大於或等於 $\frac{1}{\sqrt{2}} I_0$ (約 $0.707 I_0$) 所對應的頻率區段為**頻帶寬度**。



▲圖 11-9 RLC 串聯電路的電流對應的頻帶寬度

$$BW = f_2 - f_1 \quad [\text{Hz, 赫茲}]$$

公式 11-110

旗立



知識、能力、素養
全面提升學習成效！

第 11 章 諧振電路



E180B1 適用

11 - 9

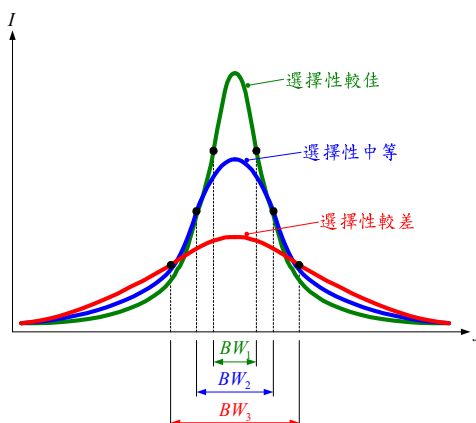
RLC 串聯諧振電路-選擇性

◆ 頻帶寬度 (BW) 愈窄，表示諧振電路的選擇性愈好，可以輕易篩選出所要的訊號；反之，頻帶寬度愈寬，則選擇性愈差。

◆ 品質因數：

$$Q = \frac{f_0}{BW}$$

公式 11-115



▲圖 11-10 不同頻寬的選擇性曲線

旗立



知識、能力、素養
全面提升學習成效！

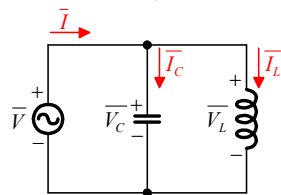
第 11 章 諧振電路



E180B1 適用

11 - 10

LC 並聯諧振電路

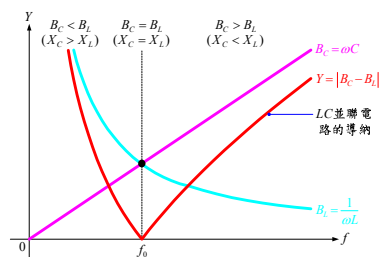


▲圖 11-11 LC 並聯電路

$$Y = \sqrt{(B_C - B_L)^2}$$

$$= |B_C - B_L| \quad [\text{S, 西門子}]$$

公式 11-201



諧振時 ($f = f_0$)，導納 $Y_0 = 0$

▲圖 11-12 LC 並聯電路的導納-頻率曲線圖

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad [\text{Hz, 赫茲}]$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad [\text{rad/s, 徑/秒}]$$

公式 11-202

旗立



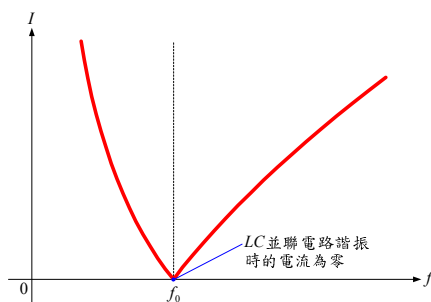
知識，是成功的基礎！
你願意學習嗎？

第 11 章 諧振電路



E180B1 適用 11 - 11

LC 並聯諧振電路-電流



諧振時 ($f = f_0$)，電流 $I_0 = 0$

▲圖 11-13 LC 並聯電路的電流-頻率曲線圖

$$I = \frac{V}{Z} = VY = V|B_C - B_L| \quad [\text{A, 安培}]$$

公式 11-203

旗立



知識，是成功的基礎！
你願意學習嗎？

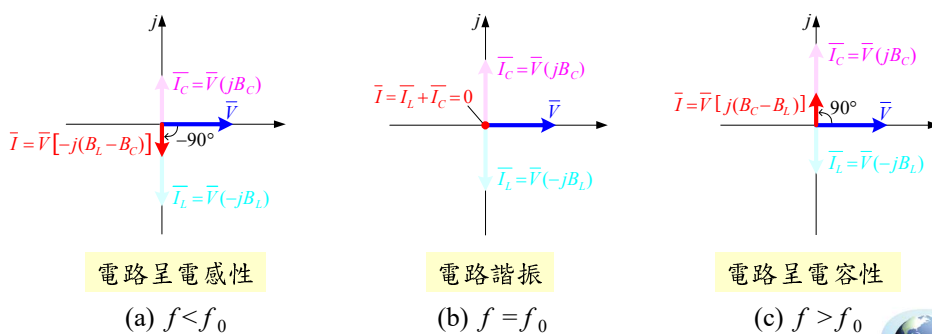
第 11 章 諧振電路



E180B1 適用 11 - 12

LC 並聯諧振電路-特性

- 當 $f < f_0$ 時，電納 $B_C < B_L$ ，電路呈電感性。
- 當 $f = f_0$ 時，電納 $B_C = B_L$ ，電路呈諧振現象。
- 當 $f > f_0$ 時，電納 $B_C > B_L$ ，電路呈電容性。



▲圖11-14 LC並聯電路的相量圖

旗立



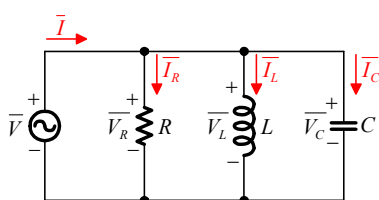
知識、能力、素養
全面提升學習成效！

第 11 章 諧振電路

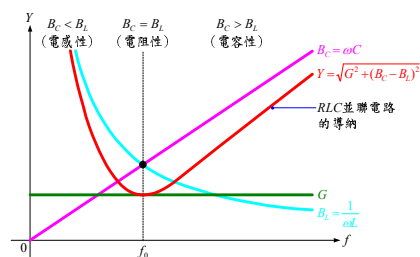
E180B1 適用

11 - 13

RLC 並聯諧振電路



▲圖11-15 RLC並聯電路



諧振時 ($f = f_0$)，導納 $Y_0 = G$

▲圖11-16 RLC並聯電路的導納-頻率曲線圖

$$\bar{Y} = G + j(B_C - B_L)$$

$$= G \quad [\text{S, 西門子}]$$

公式11-205

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad [\text{Hz, 赫茲}]$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad [\text{rad/s, 徑/秒}]$$

公式11-206

旗立



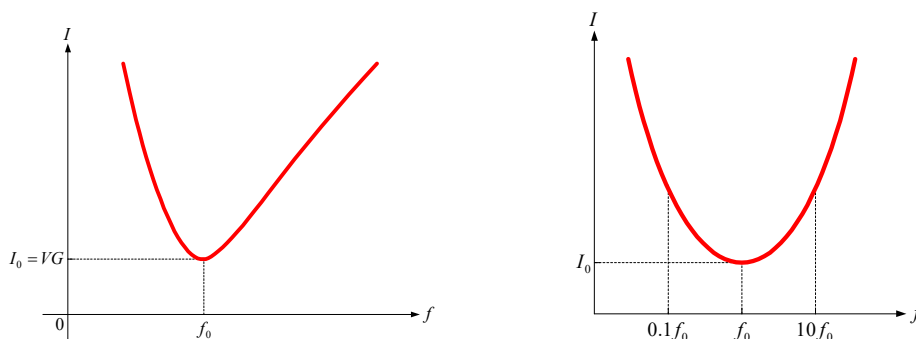
知識、能力、素養
全面提升學習成效！

第 11 章 諧振電路

E180B1 適用

11 - 14

RLC 並聯諧振電路-電流



(a) 諧振時 ($f = f_0$)，電流 I_0 為最小值 (b)

▲圖11-17 RLC並聯電路的電流-頻率曲線圖

$$I = VY = V\sqrt{G^2 + (B_C - B_L)^2} \quad [\text{A, 安培}]$$

公式11-207

旗立



知識、能力、態度
全面發展教育

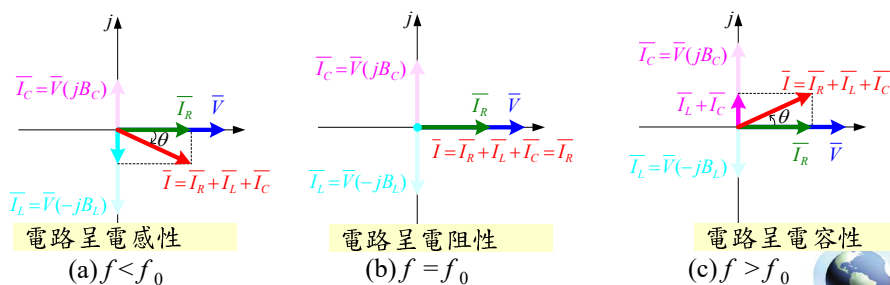
第 11 章 諧振電路



E180B1 適用 11 - 15

RLC並聯諧振電路-特性

- ◆ 當 $f < f_0$ 時，電納 $B_C < B_L$ ，電路呈電感性。
- ◆ 當 $f = f_0$ 時，電納 $B_C = B_L$ ，電路呈電阻性。諧振時，電路導納 $Y_0 = G$ 為最小，產生最小的電流 $I_0 = VG$ 。
- ◆ 當 $f > f_0$ 時，電納 $B_C > B_L$ ，電路呈電容性。



▲圖11-18 RLC並聯電路的相量圖

旗立



知識、能力、態度
全面發展教育

第 11 章 諧振電路



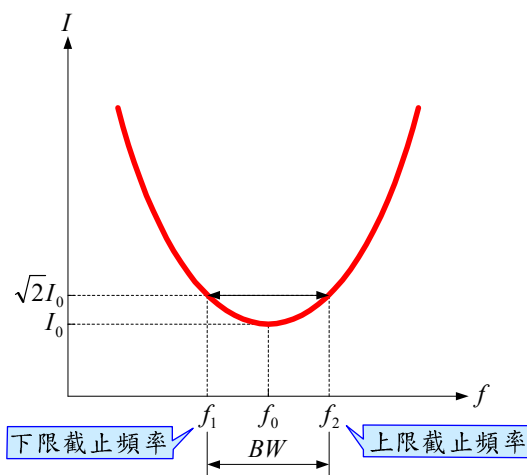
E180B1 適用 11 - 16

RLC並聯諧振電路-頻帶寬度

定義電流值在小於或等於 $\sqrt{2}I_0$ 所對應的頻率區段為**頻帶寬度**。

$$BW = f_2 - f_1 \quad [\text{Hz, 赫茲}]$$

公式11-210



▲圖11-19 RLC並聯電路電流對應的頻帶寬度

旗立



光碟、網路課程
你讀書我讀書最好！

第 11 章 諧振電路

E180B1 適用 11 - 17

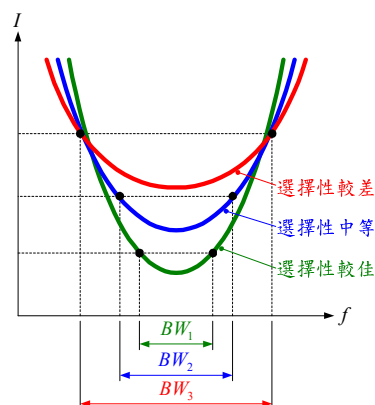
RLC 並聯諧振電路-選擇性

品質因數：

$$Q = \frac{f_0}{BW}$$

公式11-215

頻寬愈窄，選擇性愈好。



▲圖11-20 不同頻寬的選擇性曲線

旗立

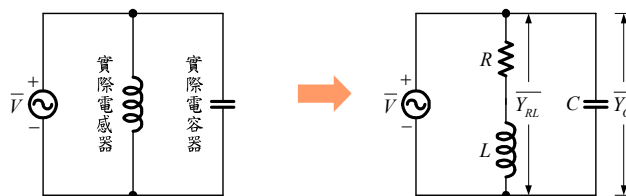


光碟、網路課程
你讀書我讀書最好！

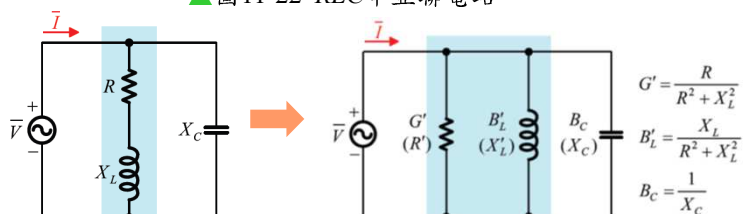
第 11 章 諧振電路

E180B1 適用 11 - 18

RLC串並聯諧振電路



▲圖 11-22 RLC串並聯電路



▲圖 11-23 等效之實際LC並聯電路

RLC串並聯諧振電路-電路特性與諧振條件

- ◆當 $f < f_0$ 時，電路為電感性電路，電流相位滯後電壓相位。
- ◆當 $f = f_0$ 時，電路為電阻性電路，電流與電壓同相位。
- ◆當 $f > f_0$ 時，電路為電容性電路，電流相位超前電壓相位。

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{1 - \frac{R^2 C}{L}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{Q^2}{1 + Q^2}} \quad [\text{Hz, 赫茲}]$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{1 - \frac{R^2 C}{L}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{Q^2}{1 + Q^2}} \quad [\text{rad/s, 徑/秒}]$$

公式11-311

第十二章 交流電源

- 12-1 單相電源
- 12-2 三相電源
- 12-3 電源使用安全

旗立

光碟、紙張用得少，
你我讓地球更美好！



12 - 1

E180B1 適用

參考資料網址

1. 三相交流電-維基百科：
<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%89%E7%9B%B8%E9%9B%BB>

旗立

光碟、紙張用得少，
你我讓地球更美好！

→ 第 12 章 交流電源

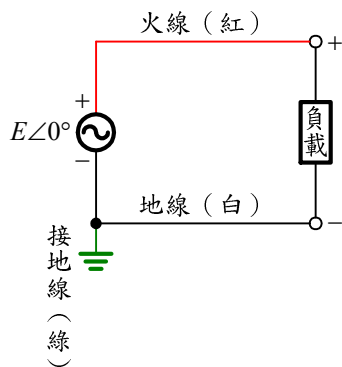


E180B1 適用

12 - 2

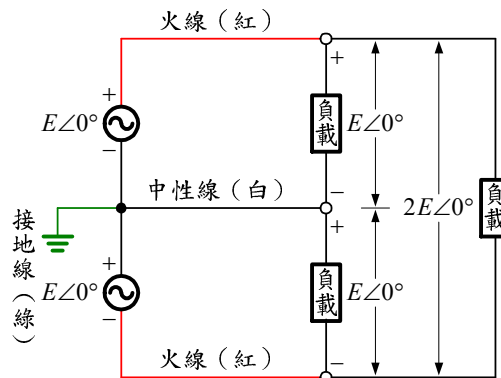
單相電源的種類

◆ 1 ϕ 2W



▲ 圖12-1 單相二線式

◆ 1 ϕ 3W



▲ 圖12-2 單相三線式

旗立



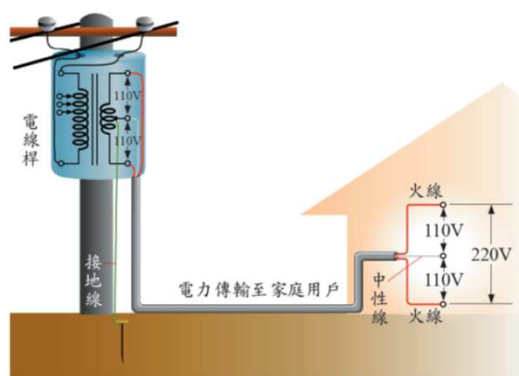
能源、電機與電子
你與我的共同美好！

第 12 章 交流電源

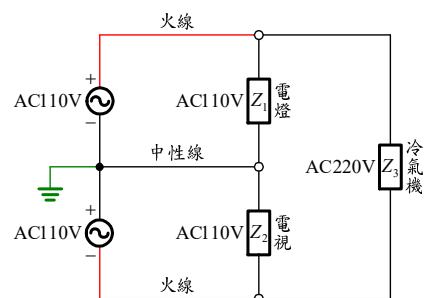
E180B1 適用

12 - 3

單相三線式電源系統



(a) 電源系統



(b) 電路圖

▲ 圖12-3 單相三線式電源系統

旗立



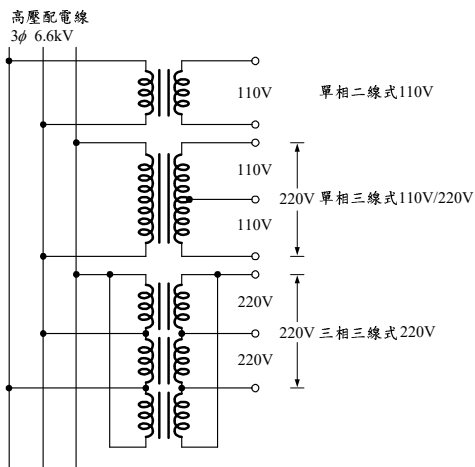
能源、電機與電子
你與我的共同美好！

第 12 章 交流電源

E180B1 適用

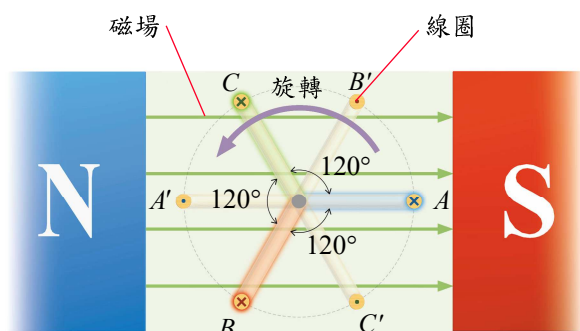
12 - 4

三相交流與單相交流電源系統



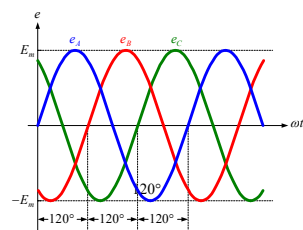
▲圖12-4 三相交流與單相交流電源系統

三相電源系統與電壓波形

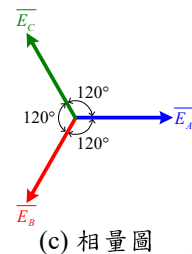


(a) 三相發電機示意圖

三相電源提供三組頻率、振幅一樣，但相位各差 120° 的電壓波形



(b) 三相電壓之瞬間值

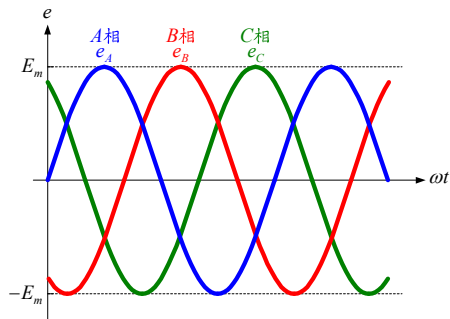


(c) 相量圖

▲圖12-5 三相電源系統與電壓波形

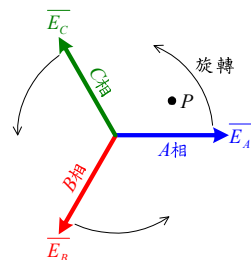
相序 (1)

正相序



電壓到達峰值的順序
依次是 $e_A \rightarrow e_B \rightarrow e_C$

(a) 波形圖



相量逆時針旋轉通過
定點P的順序依次是
 $E_A \rightarrow E_B \rightarrow E_C$

(b) 相量圖

▲ 圖12-6 正相序的三相波形

旗立



知識，是改變命運的
力量，是改變命運的
力量！

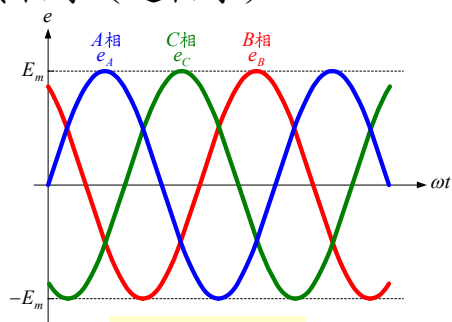
第 12 章 交流電源

E180B1 適用

12 - 7

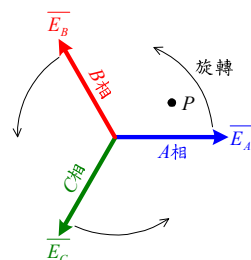
相序 (2)

負相序 (逆相序)



電壓到達峰值
的順序依次是
 $e_A \rightarrow e_C \rightarrow e_B$

(a) 波形圖



相量逆時針旋
轉通過定點P
的順序依次是
 $E_A \rightarrow E_C \rightarrow E_B$

(b) 相量圖

▲ 圖12-7 負相序的三相波形

旗立



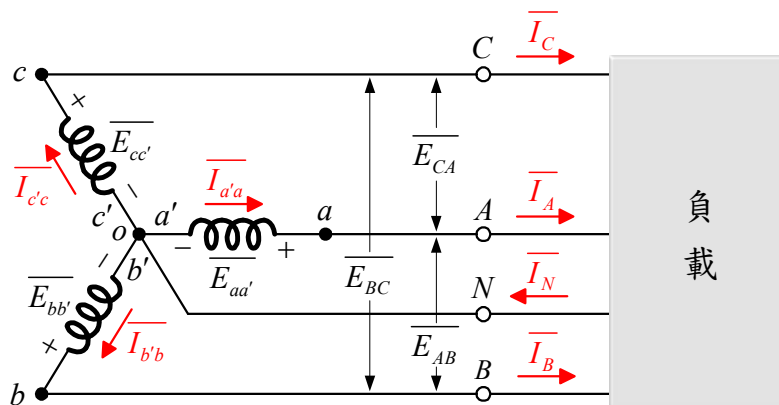
知識，是改變命運的
力量，是改變命運的
力量！

第 12 章 交流電源

E180B1 適用

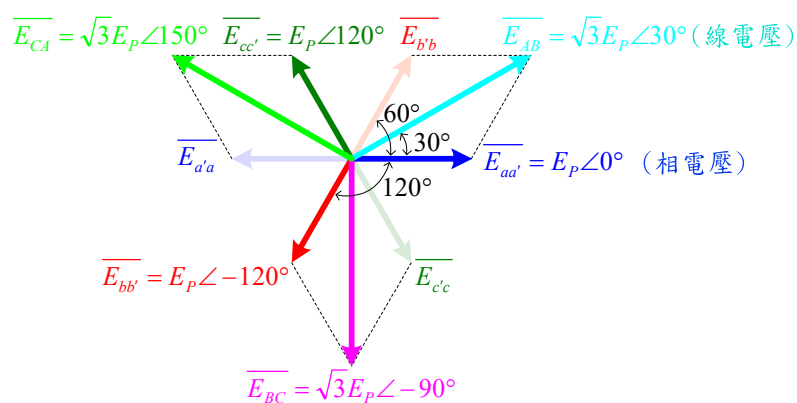
12 - 8

三相發電機的Y型連接 (1)



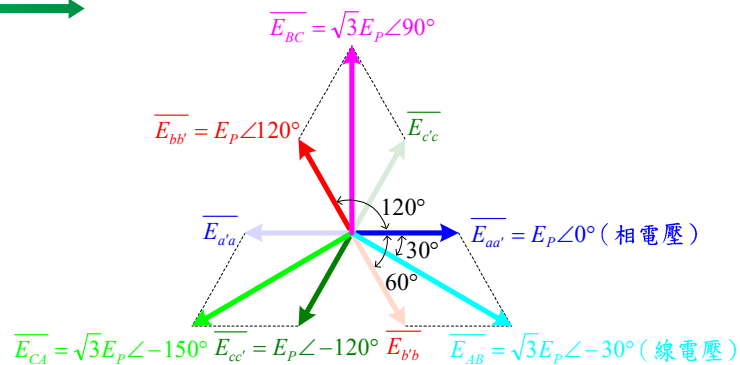
▲圖12-8 三相Y型連接

三相發電機的Y型連接 (2)



▲圖12-9 三相Y型連接正相序的電壓相量圖

三相發電機的Y型連接 (3)



▲圖12-10 三相Y型連接負相序的電壓相量圖

$$E_\ell = \sqrt{3}E_p \begin{cases} \text{(正相序：線電壓超前對應之相電壓 } 30^\circ) \\ \text{(負相序：線電壓滯後對應之相電壓 } 30^\circ) \end{cases}$$

$$I_\ell = I_p \quad \text{(線電流等於相電流)}$$

公式12-203

旗立



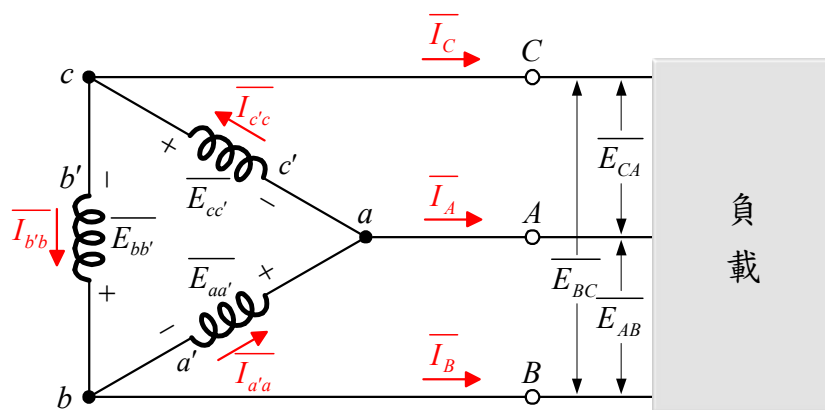
知識，從這裡開始！
你願意接受挑戰嗎？

第 12 章 交流電源



E180B1 適用 12 - 11

三相發電機的Δ型連接 (1)



▲圖12-11 三相Δ型連接

旗立



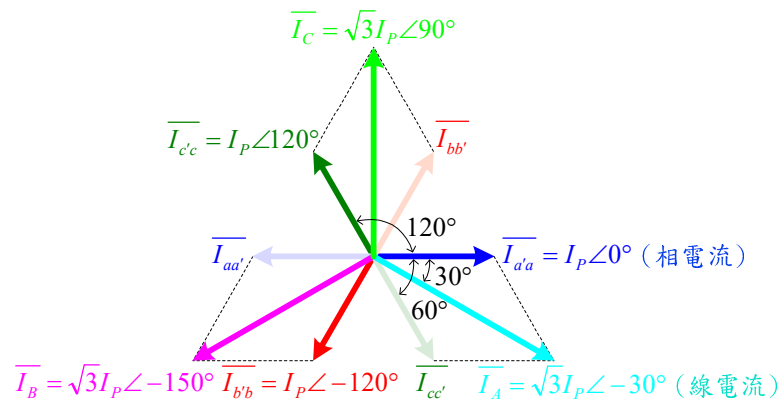
知識，從這裡開始！
你願意接受挑戰嗎？

第 12 章 交流電源



E180B1 適用 12 - 12

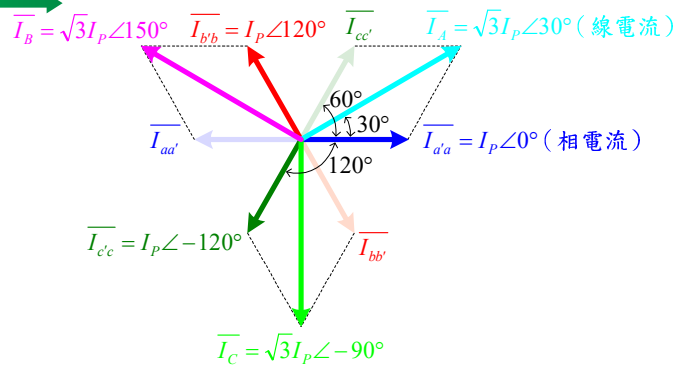
三相發電機的Δ型連接 (2)



▲ 圖12-12 三相Δ型連接正相序的電流相量圖



三相發電機的Δ型連接 (3)



▲ 圖12-13 三相Δ型連接逆相序的電流相量圖

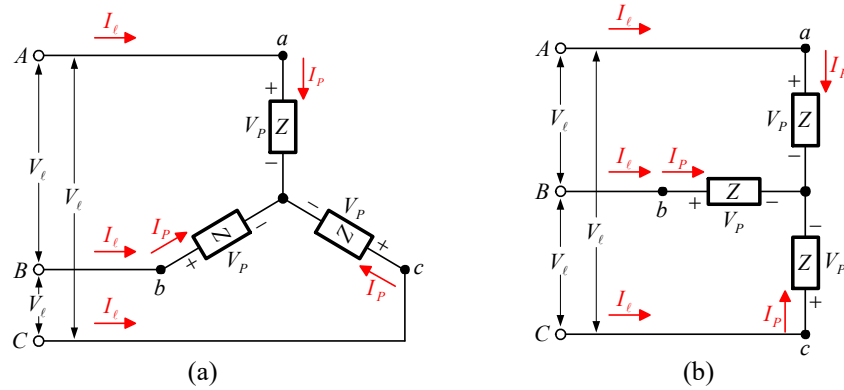
$$E_\ell = E_p \quad (\text{線電壓等於相電壓})$$

$$I_\ell = \sqrt{3} I_p \quad \begin{cases} (\text{正相序：線電流滯後對應之相電流 } 30^\circ) \\ (\text{負相序：線電流超前對應之相電流 } 30^\circ) \end{cases}$$

公式12-204

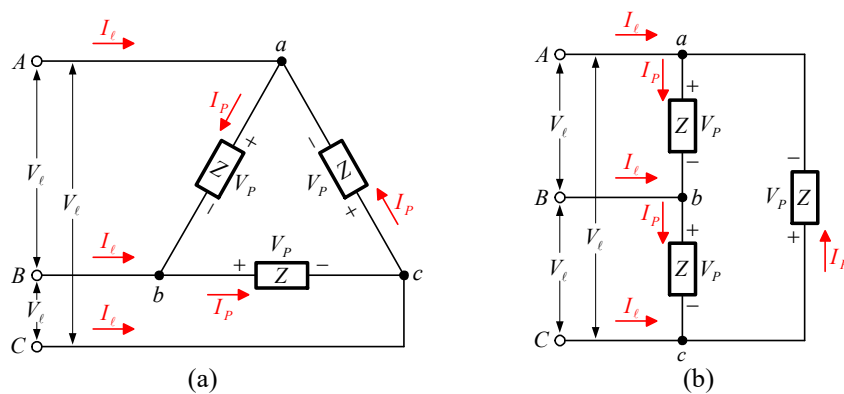


平衡Y型連接負載



▲圖12-14 平衡Y型連接負載

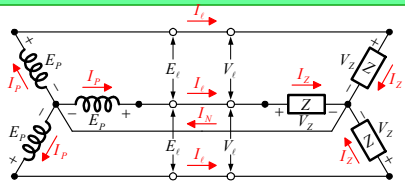
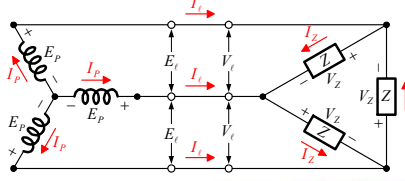
平衡Δ型連接負載



▲圖12-15 平衡Δ型連接負載

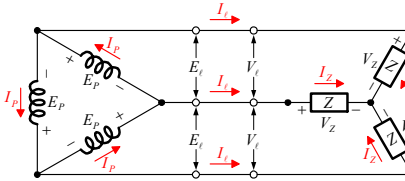
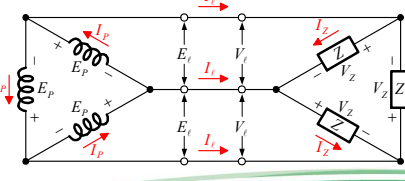
三相平衡電路 (1)

▼表12-1 三相平衡電路

Y-Y連接	電壓與電流特性
	$E_\ell = \sqrt{3}E_p = V_\ell = \sqrt{3}V_Z$ $I_\ell = I_p = I_Z$ $I_N = 0$
Y-Δ連接	電壓與電流特性
	$E_\ell = \sqrt{3}E_p = V_\ell = V_Z$ $I_\ell = I_p = \sqrt{3}I_Z$

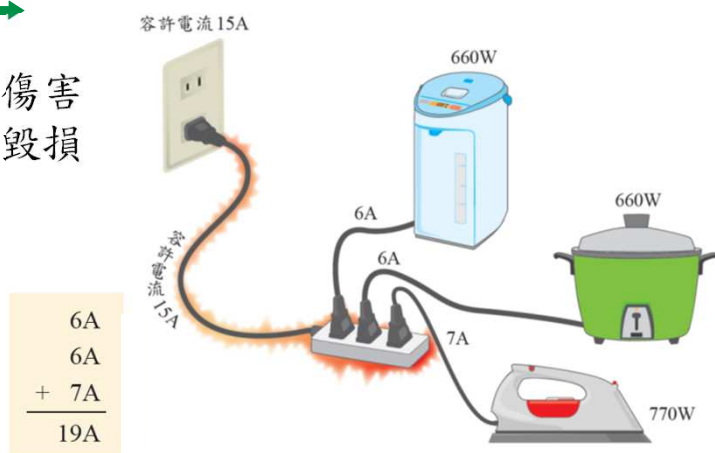
三相平衡電路 (2)

▼表12-1 三相平衡電路

Δ-Y連接	電壓與電流特性
	$E_\ell = E_p = V_\ell = \sqrt{3}V_Z$ $I_\ell = \sqrt{3}I_p = I_Z$
Δ-Δ連接	電壓與電流特性
	$E_\ell = E_p = V_\ell = V_Z$ $I_\ell = \sqrt{3}I_p = \sqrt{3}I_Z$

用電的危害

- (1)人員感電傷害
- (2)電器設備毀損
- (3)引發火災
- (4)爆炸意外



▲圖12-16 用電不當超過負載能力 (19A>15A)

感電電流對人體的影響

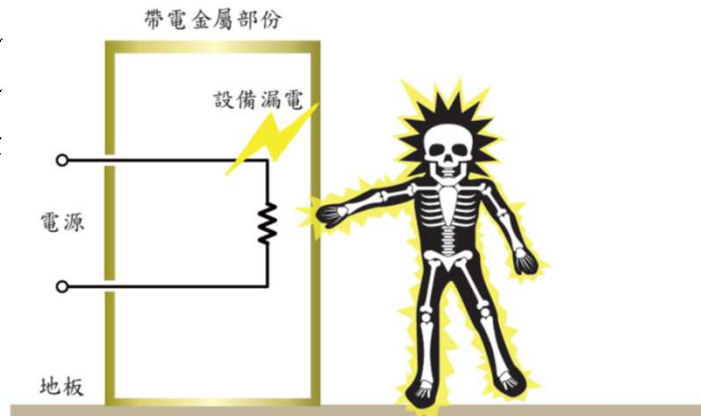
▼表12-2 感電電流對人體的影響

感電電流	交流60Hz (mA)		直流 (mA)		身體反應
	男	女	男	女	
感知電流	1.1	0.7	5.2	3.5	身體稍有刺激感 (電擊)
可脫離電流	9	6	62	41	肌肉有疼痛感，仍能自由活動
無法脫離電流	16	10.5	74	50	肌肉痙攣，無法自由活動
休克電流	23	15	90	60	肌肉僵硬、呼吸困難
心臟麻痺電流	100	100	500	500	心室顫動、呼吸停止

註：國內的安全電壓標準為24V。人體在潮濕的環境下，身體的電阻值很低，若接觸25V以上的電壓，很可能造成致命的危險。

造成感電傷害的原因

1. 不安全的場所
2. 不安全的設備
3. 不安全的操作



▲圖12-17 設備故障漏電造成間接觸電

旗立

光碟、網路線、
你身邊的電氣安全！

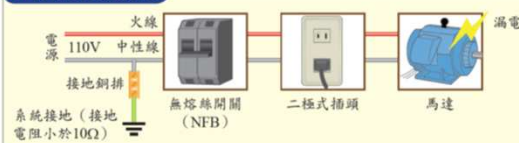
第 12 章 交流電源



E180B1 適用 12 - 21

電器設備的接地(1)

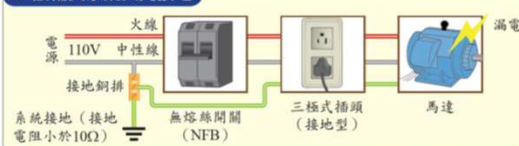
1. 設備未實施接地



2. 設備未單獨接地 (設備與系統分開接地)



3. 設備與系統共同接地



危險



旗立

光碟、網路線、
你身邊的電氣安全！

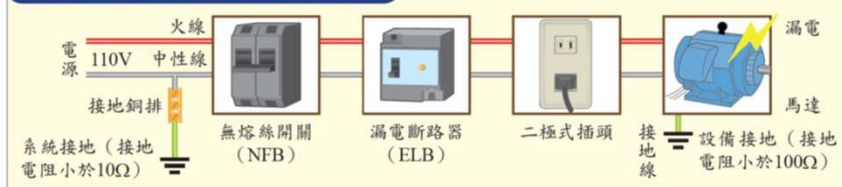
第 12 章 交流電源



E180B1 適用 12 - 22

電器設備的接地(2)

4. 設備單獨接地，且加裝漏電斷路器



5. 設備與系統共同接地，且加裝漏電斷路器



▲圖12-19 電器設備的接地

安全

旗立

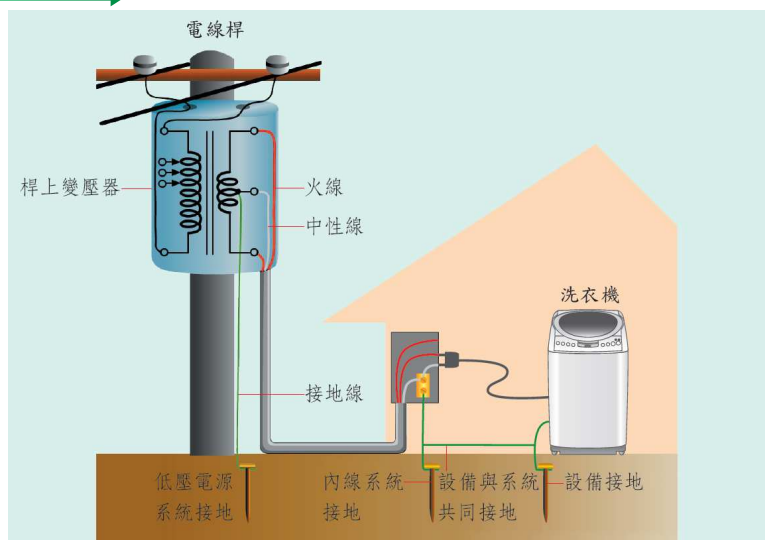


電線、電路圖解
你讀懂了嗎？

第 12 章 交流電源

E180B1 適用 12 - 23

接地方式的類型



旗立



電線、電路圖解
你讀懂了嗎？

第 12 章 交流電源

E180B1 適用 12 - 24