

# LTspice 電路模擬

林致翰

clin@ltl.iam.s.sinica.edu.tw

March 13, 2010

## Contents

<b>1</b>	<b>LTspice</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>安裝 LTspice</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>LTspice 基本操作</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>常用元件的參數設定</b>	<b>5</b>
4.1	voltage . . . . .	6
4.2	被動元件 RCL . . . . .	6
<b>5</b>	<b>電路模擬</b>	<b>6</b>
5.1	DC 分析 . . . . .	6
5.2	暫態響應 . . . . .	7
5.3	頻率響應 . . . . .	8
5.4	直流掃描 . . . . .	10
<b>6</b>	<b>進階操作</b>	<b>10</b>
6.1	計算波形的平均值與 rms 值 . . . . .	10
6.2	顯示某元件的跨壓 . . . . .	11
6.3	改變波形圖的橫軸 . . . . .	12
6.4	輸出波形圖節點數據 . . . . .	15
6.5	改變波形圖背景色 . . . . .	15
6.6	SPICE 指令 . . . . .	15
6.6.1	改變模擬溫度 . . . . .	16
6.6.2	變動參數 . . . . .	16
6.6.3	製作變壓器元件 . . . . .	17
6.6.4	頻譜分析 . . . . .	18

6.7 輸入變動分析 . . . . .	20
<b>7 音源分析</b>	<b>21</b>
7.1 以 wav 檔作為電壓源 . . . . .	21
7.2 以 wav 檔作為電壓源 . . . . .	21
7.3 放大電路失真模擬 . . . . .	21
<b>8 實戰演練</b>	<b>23</b>

SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) 語言是由 UC Berkley 發展的一種類比電路模擬程式語言，允許使用者建立各類電路模型並進行頻率響應分析 (frequency response) 暫態響應分析 (transient response) 或是直流掃描 (DC sweep) 等等各類型的電路計算工作。近代電路設計動輒包含數十個獨立的主被動電路元件，對於初學者，非電子科系主修的學生而言要手算分析這類複雜的電路實非易事。附帶優秀 GUI 介面且具備完整資料庫的 SPICE 套裝程式可以幫助使用在極短時間檢驗自行設計的電路是否能正常工作，配合接近真實的電路模型，透過模擬可修正細部參數，節省繁瑣的計算，大幅提昇實作時成功機率。因此，學習使用電路模擬軟體也是實驗室電子學不可或區的一環。

## 1 LTspice

市面上有許多 SPICE 套裝軟體，需付費的商業版本有 Orcad 的 Pspice 與 ADS 的 HSPICE。前者的優勢在於龐大且完整的資料庫，也整合了 PCB Layout 功能，GUI 介面也易於使用，後者則是以高頻類比電路模擬見長。

免費且附加 GUI 介面的 SPICE 版本則有 Orcad 的 Pspice student，德州儀器的 TiNA 與 Linear Tech. 的 LTspice。Pspice student 為功能受限制的 pspice (電路結點數量不能超過 64 個)，雖然具備正式版的優秀 GUI 介面，礙於使用限制只能模擬極簡單的電路。TiNA 的優勢在於電路繪製介面漂亮精緻，但缺點在於內建元件庫不夠完整，過份美化的介面反而不易操作。LTspice 則具備簡潔易用的 GUI 與波型檢視介面，也有熱心的使用者額外建立了實用元件庫提供眾人使用。LTspice 也提供 Linear Tech. 生產之元件最詳細的資料庫，使許多電源電路設計的下游工程師選用 LTspice 作為主要的電路模擬軟體。

## 2 安裝 LTspice

請從 <http://ltspice.linear.com/software/> 找尋最新版的 LTspice 進行安裝。然後你可以從 Yahoo group <http://tech.groups.yahoo.com/group/LTspice/> 或是 LT Wiki [http://ltwiki.org/index.php5?title=Components\\_Library](http://ltwiki.org/index.php5?title=Components_Library) 找到擴充元件庫的安裝檔 LtSpiceIV.Plus.12.2009 以及 LTspicePlus.10.08，裡面有一些寫好的 OP IC 與 74 系列邏輯電路元件可使用。或者你也可以從 FTP server 的 [課程資料]->[電路模擬軟體] 中找到相關的安裝檔。

## 3 LTspice 基本操作

開啟 Spice 以後可以看到命令列，操作快捷列與下方的電路放置區。

若要放置主動元件如電源，放大器或者 BJT 等等可以從 [Editor]->[Component] 或使用快捷鍵 [F2] 調出元件選單。

## 快捷鍵與功能列

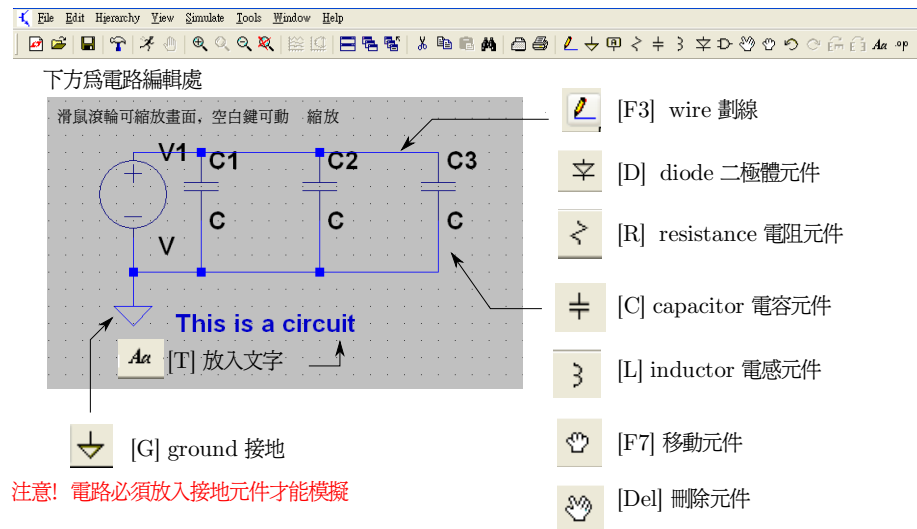
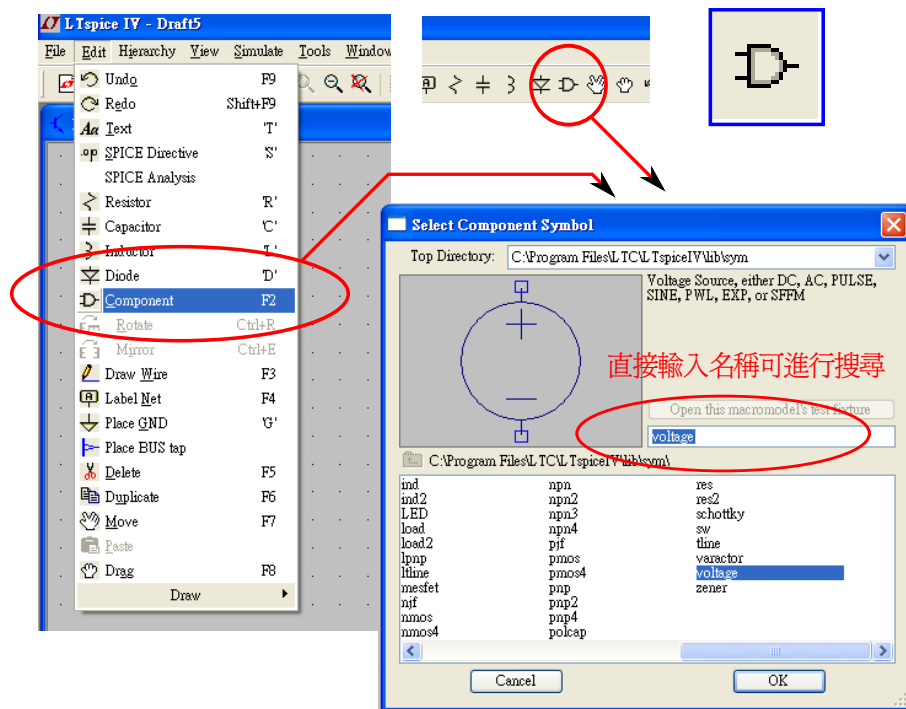


Figure 1: 基本操作與快捷鍵表



以 [ ] 標示者代表目錄，可點擊進入子目錄

Figure 2: 從元件庫中選取元件

常用的元件有這些，大部分的元件都可以透過縮寫來搜尋元件庫中是否有相對應的元件：

- `voltage`，可加入 DC, AC 與 Pulse 電壓源。
- `current`，類似 `source`，只不過形成電流源。
- `nnp`, `pnp`，理想的 BJT 元件，點擊該元件可調出進階選單呼叫實際的 BJT 元件，比方說 2N2222 與 2N3055
- `nmos`, `pmos` 理想的 MOS 元件，用法同 BJT。
- `diode` 與 BJT 元件相同，不從進階選單選取零件型號就代表理想的二極體模型，換言之順向導通電壓為零，無崩潰電壓。
- `zener` 使用 `zener` 必須選取 `type` 標示為 `zener` 的二極體元件才行，否則在模擬上就算圖案是 `zener` 二極體，結果還是當作理想二極體做計算。請依照需要的崩潰電壓（`Vbrkdn`）值選擇元件。
- `e` 這是壓控電壓源（`voltage control voltage source`），一般來說可以當成一個有增益（`gain`）的 `stage` 或是隔離驅動的 `source`，在電力電子電路或是隔離雜訊的電路中常出現。`g2` 則是壓控電流源。
- `xfmr`, `xfmr2` 理想變壓器，請參考 Sec. 6.6.3。
- `transformer2` 真實變壓器，透過更改兩邊的電感值可以改變輸出輸入電壓比，`K` 值則跟耗損有關。變壓比例與  $\sqrt{L}$  有關，若要製造 1:3 的變壓比，電感要設定成 1H:3H。你可以利用 `trans` 搜尋到其他種類的變壓器（中央抽頭，多線圈式等等）。請參考 Sec. 6.6.3。
- `1pole`, `opamp` 理想放大器，你可以簡單修改開路增益（`Avol`），增益頻寬積（`GBW`）與輸入阻抗（`Rin`）等參數。

## 4 常用元件的參數設定

預設元件上通常有編號與屬性兩個文字標籤。前者為該元件進行模擬時的正式編號，像是 `v1`, `v2`, `R3`, `R3` 等等，不可重複也不能空白。後者通常代表該元件的特性，比方說電阻若將預設屬性標籤 `R` 修改為 `12 meg` 即代表電阻值  $12\text{ M}\Omega$ 。在 `spice` 語言中輸入數值不需要帶有物理單位，不同的數量級則可以使用不同的縮寫來簡化輸入過程。

想要編輯元件進階屬性可以游標移至元件圖案上，出現手指圖案再點擊右鍵即可呼叫設定選單。

數量級	$10^9$	$10^6$	$10^3$	$10^{-3}$	$10^{-6}$	$10^{-9}$	$10^{-12}$	$10^{-15}$
縮寫	G	meg	k	m	u	n	p	f

Figure 3: 數量級縮寫對照表

#### 4.1 voltage

使用 `voltage` 可以製造 DC , AC 與 PULSE 等等常用的電壓波形。不等週期的脈衝電源則可利用進階選單中的 PWL 選項生成, EXP 則是指數衰減波形。製造 PULSE 波形時要注意 Tdelay、Ton、Trise 與 Tfall 的和一定要等於 Tperiod , 否則計算會發生錯誤。這五樣與週期相關的參數可以只輸入四項, 最後一項 spice 會自動幫你計算。若想要模擬理想的脈衝源, 使用者很可能會將 Tfall 與 Trise 設為 0, 但輸入 0 很容易造成電腦計算出無限大的情況 ( 在暫態響應分析的時候特別容易出現 )。因此我們最好把這些你希望為零的值設為極小的數如 1u 或 1n ( 比電路中可能出現的最小週期小十至百倍即可 )。current 的設定大致上與 voltage 一樣。

#### 4.2 被動元件 RCL

### 5 電路模擬

常用的電路分析有 DC 偏壓分析 ( DC bias )、頻率響應分析 ( frequency response )、暫態響應分析 ( transient response ) 與 DC 掃描 ( DC sweep )。除了上述幾種常用的模擬之外, LTspice 也提供了 noise 以及小訊號分析。要啟用模擬功能, 可以由 [Simulate]->[Run] 調出選單; 另外在第一次設定參數之後, 執行 Run 指令不會重新秀出參數設定表, 只會依照之前設定的條件重新執行模擬, 要變更模擬參數請執行 [Simulate]->[Edit Simulation Cmd]。

#### 5.1 DC 分析

DC 分析將電路中所有電容視為斷路 ( open circuit ), 電感視為短路 ( short circuit )。我們可以使用 simulate 選單中的 DC op pnt 來進行模擬。以下利用簡單的電阻分壓電路來說明如何運行直流偏壓分析。要注意的地方在於: 模擬結果會以 netlist 的結果呈現 ( spice 語法定義的接腳, [View]->[SPICE Netlist] 可開啓 GUI 介面編輯完成之 netlist ), 爲了方便起見最好事先預先觀察之節點加上 label 並給予適當之名稱。label 除了標示用途以外, 也可以拿來簡化電路佈線, 所有具有相同名稱的 label 在模擬中都會接在同一點上。

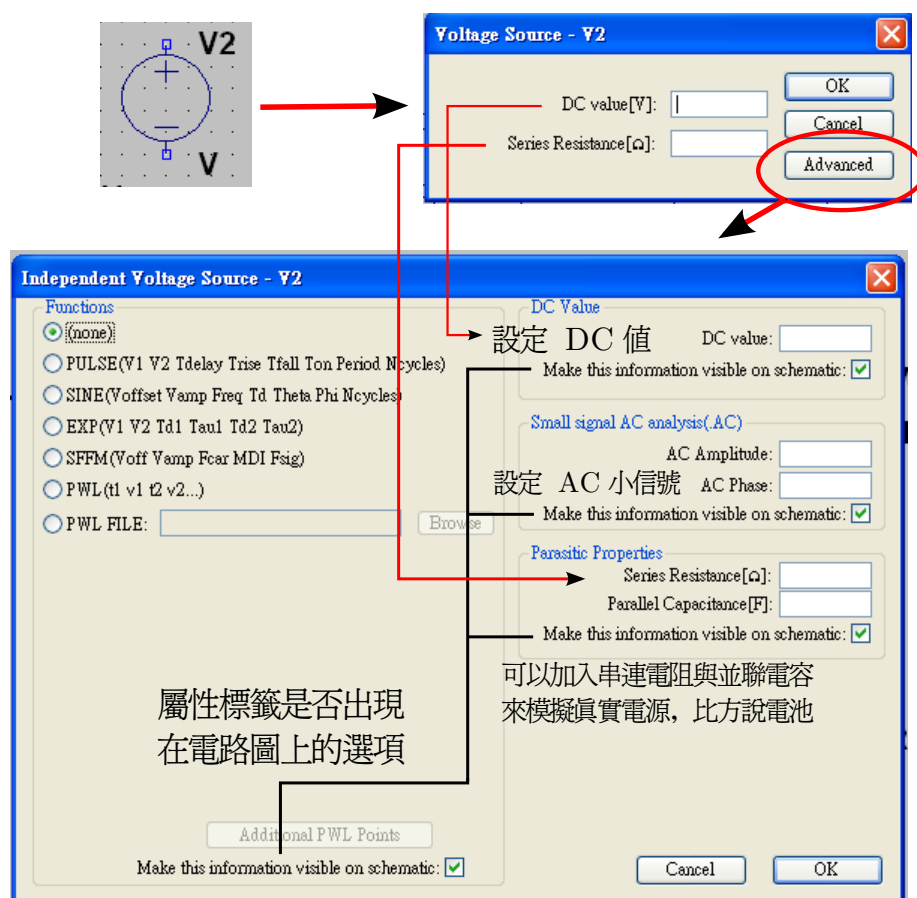


Figure 4: DC 電壓源

## 5.2 暫態響應

執行暫態響應 (transient response) 模擬可以讓我們觀察電路的時間波形。Fig. 13 利用簡單的二極體整流電路來說明如何設定模擬參數，Fig. 14, 15 說明執行後查看波形的的方法。Fig. 16 說明如何加入 cursor。要修改繪圖參數可以只要在該波形視窗下點選工具列 Plot Setting 即可：

- Add trace 加入新的波形，與游標點選電路圖功能相同。按住 ctrl 鍵可選取多的波形同時顯示
- Delete Trace 游標出現剪刀圖案，點選波形視窗內玉去除的波形之標題即可刪除
- Note & Annotations -> Label. Curs. Pos. 將當前 cursor 座標顯示至波形圖上。
- Add plot plane 在同一個波形視窗內新增多個子圖

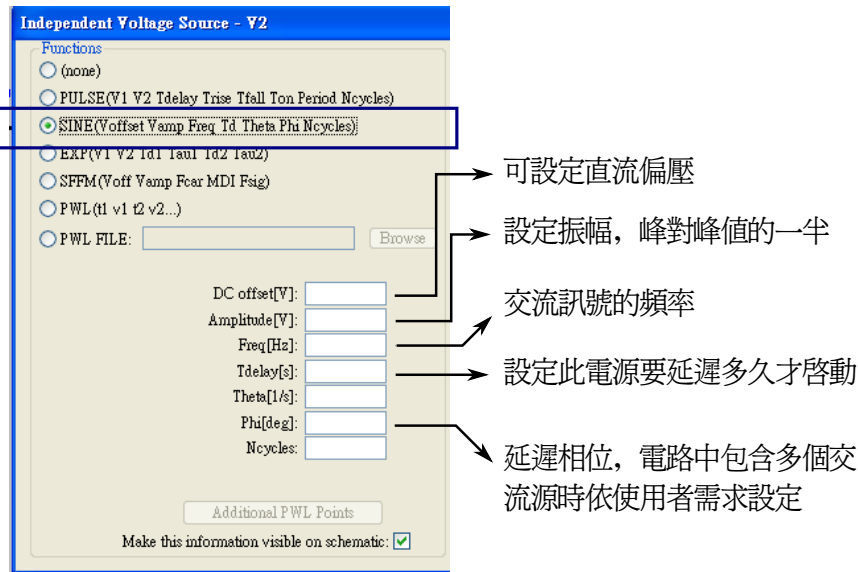


Figure 5: AC 電壓源

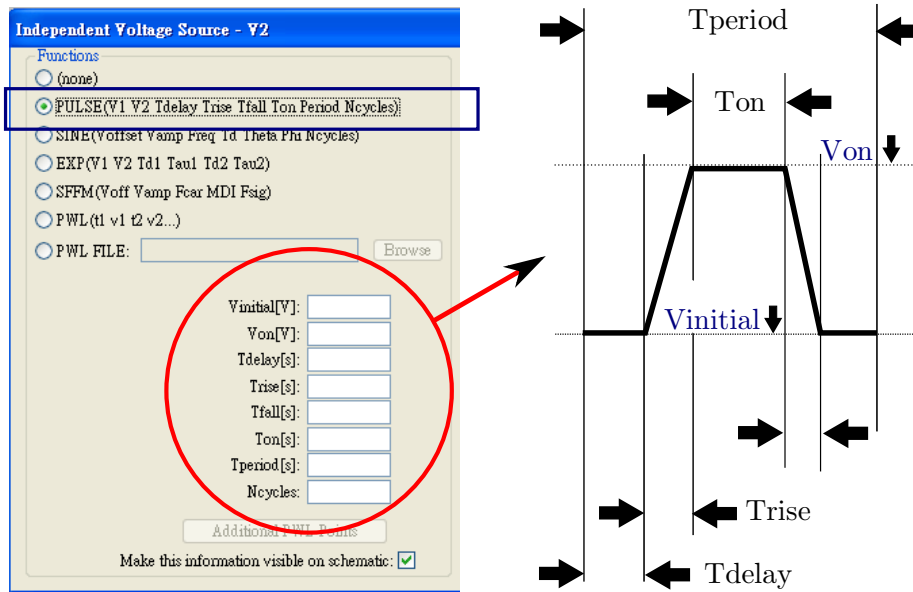


Figure 6: PULSE 電壓源

### 5.3 頻率響應

進行頻率響應分析必須在電路中置入一個 voltage 電壓源 (類型可以是 none 或 sine), 必須於進階選單中設定 Small signal analysis AC -> AC amplitude (填入不為零的值即可) 才能正確執行模擬。同樣地可藉由 add trace 觀察電路中不



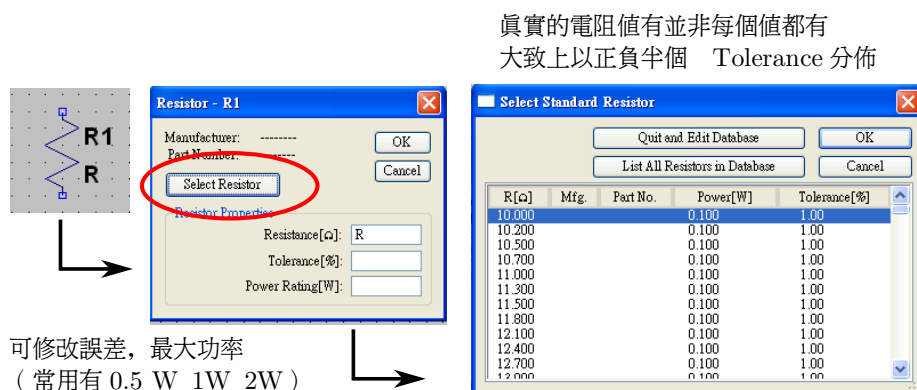


Figure 7: 電阻 resistance

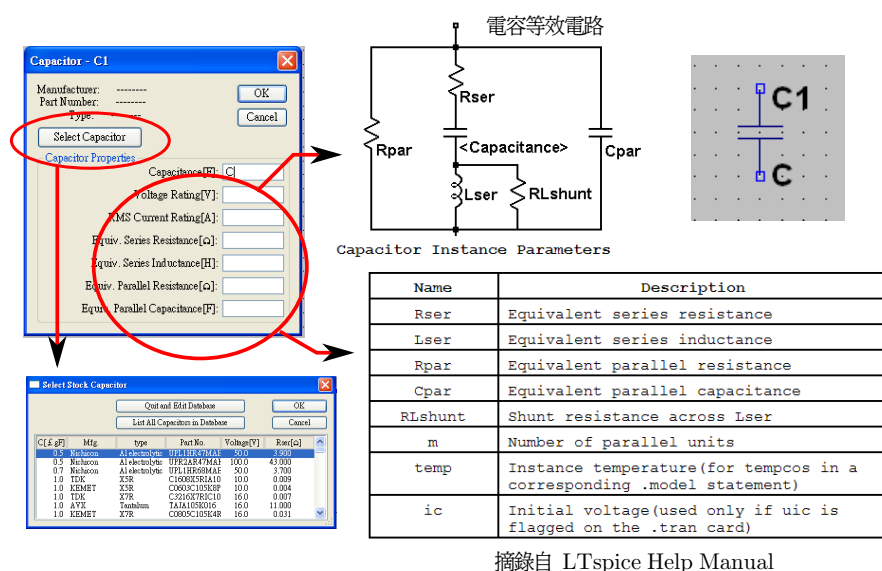


Figure 8: 電容 capacitor

同位置的頻率響應。

若要取得大範圍頻域的資訊 (比方說 1 至 10 MHz) 模擬選單中的 type of Sweep 通常選用 Octave 或是 Decade, 取樣點數可設為 10 至 100 點, 欲取得細部資訊則使用 Linear 選項。模擬範圍或精度越大, 計算的時間就越久, 模擬參數的選定必須依照使用者的要求隨時調整。

Fig. 17,18 為 LC 串聯電路頻率響應分析電路範例, 先進行大範圍模擬看出大略波形, 再縮小範圍, 提高計算精度找出細部特性。波形圖中實線代表振幅, 虛線則代表相位。

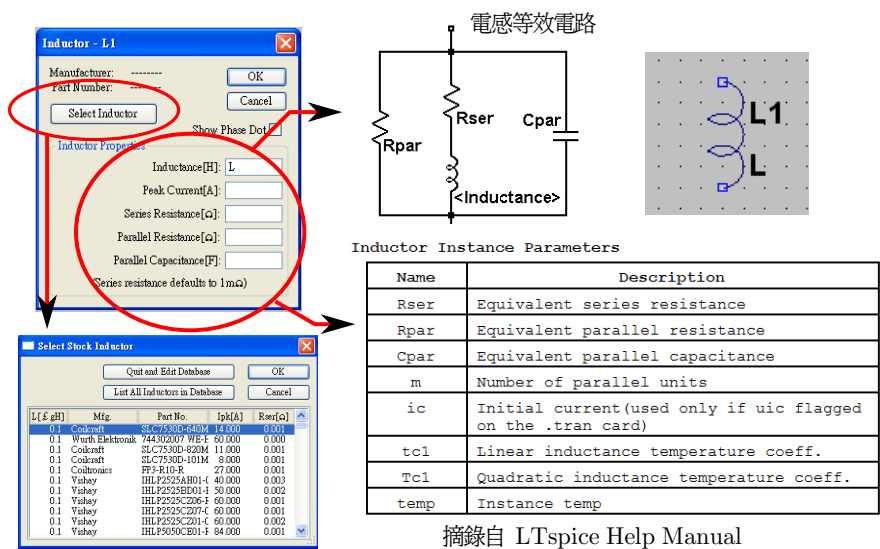


Figure 9: 電感 inductor



Figure 10: 模擬設定選單

## 5.4 直流掃描

在模擬多端半導體元件電路特性的時候常常可以利用 DC sweep 這項模擬找出這些非線性元件的工作點。Fig. 19 以二極體電路為例示範如何利用 DC sweep 找出電路特性。

## 6 進階操作

### 6.1 計算波形的平均值與 rms 值

按住 Ctrl 鍵，將游標移至波形視窗波形標題上單擊左鍵，會跳出統計視窗顯示該波形的平均值與 rms 值，積分範圍為視窗橫軸的可視範圍，積分起始點與終點位置資

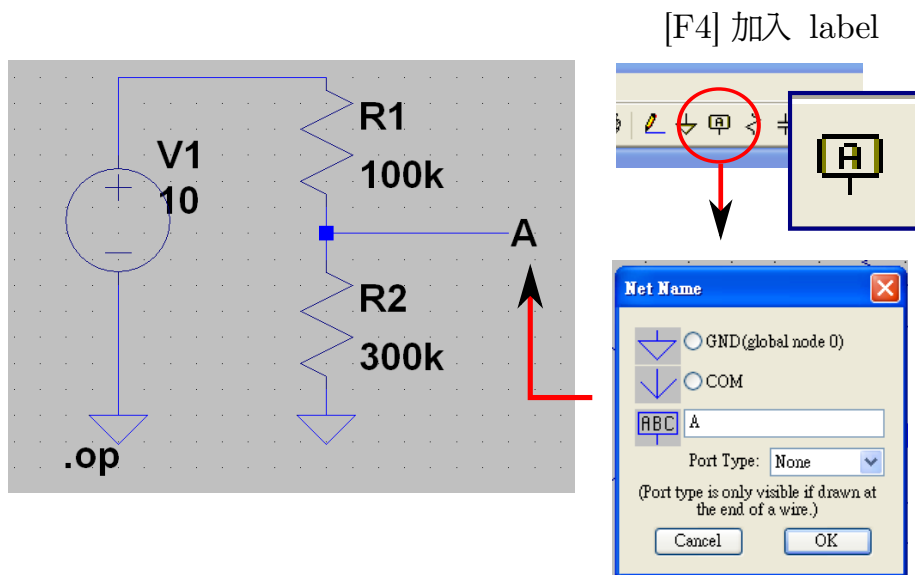


Figure 11: 簡單的分壓電路，使用 label 加入節點名稱方便之後讀取結果

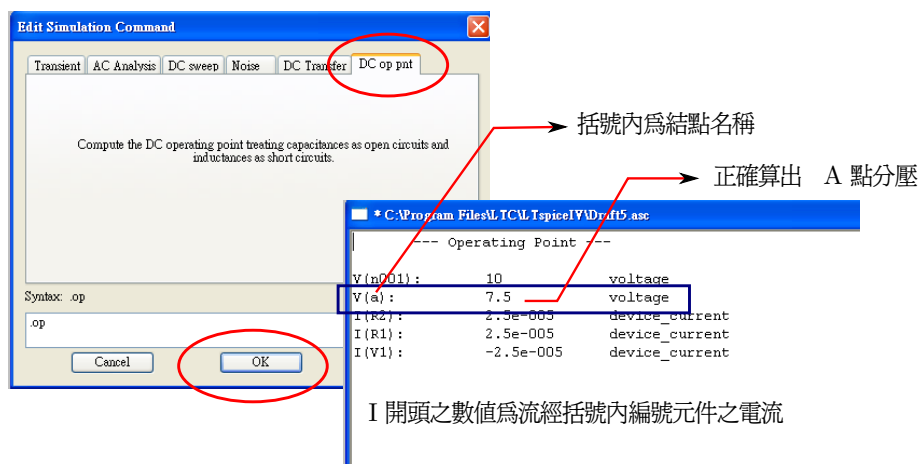


Figure 12: 選擇 DC op pnt 可得直流偏壓結果

訊同樣出現在統計視窗中。

## 6.2 顯示某元件的跨壓

要測量某兩個節點間的電壓差很簡單，在電路圖上先在你視為正端的節點點擊左鍵不放，你會發現游標探棒的顏色由紅轉為黑色，再移動游標至你視為負端的節點，放開左鍵即可。此時波形視窗顯示的波形即正端節點的電壓值減去負端節點的電壓值。如果要進行更複雜的運算就必須在 Add Trace 輸入節點的函數才行。

串連理想二極體與 100 歐姆之負載電阻

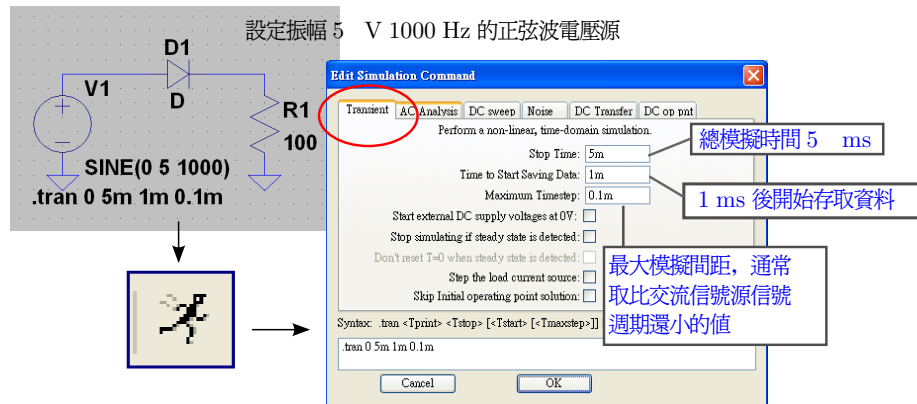


Figure 13: 電路暫態響應分析設定

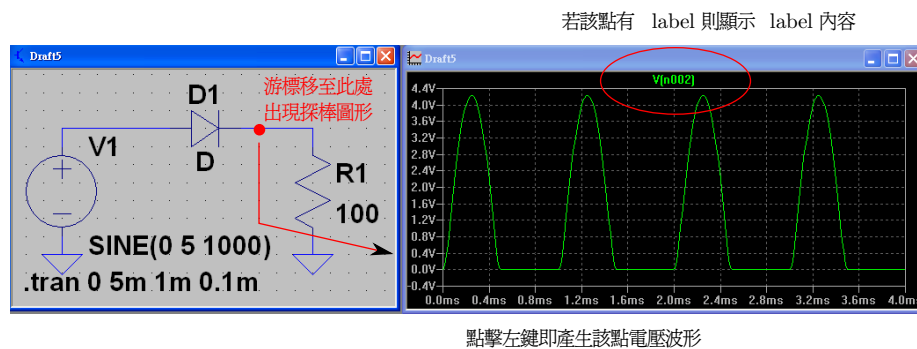


Figure 14: 查看電壓時間波形

游標移至元件出現線圈標示, 紅箭頭代表電流方向

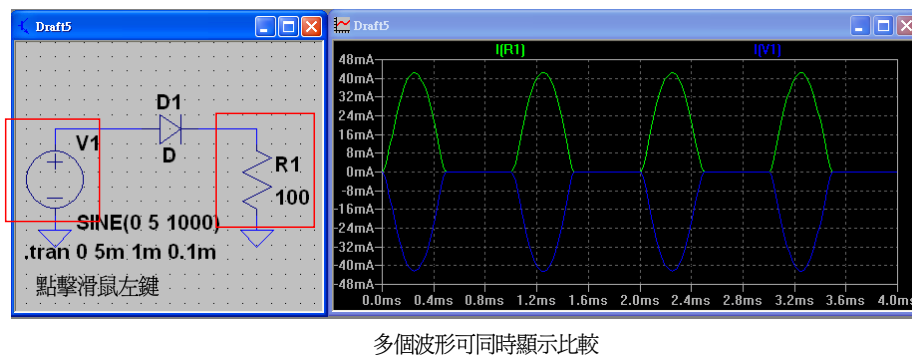


Figure 15: 查看電流時間波形

### 6.3 改變波形圖的橫軸

參考 Fig. 20 二極體 I-V curve 的例子, 執行 DC sweep 模擬後跳出波形圖視

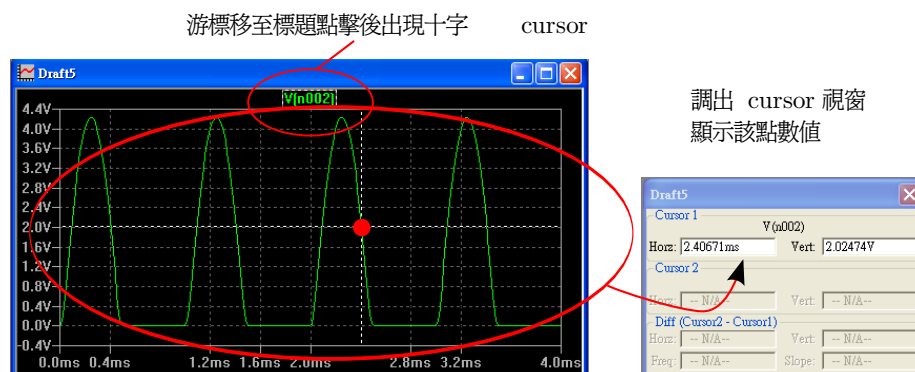


Figure 16: 利用 cursor 找出特定點之值

LC 串聯電路,  $L=10\text{ uH}$ ,  $C=10\text{ uF}$

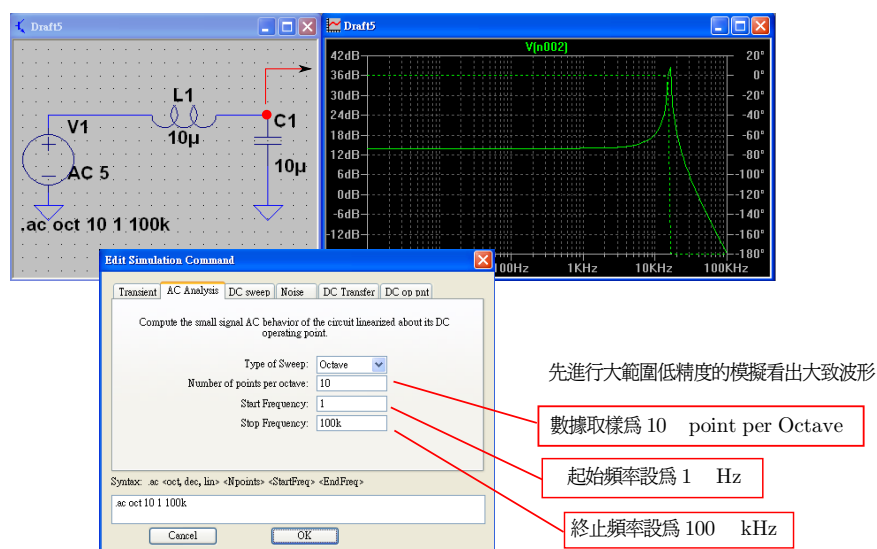


Figure 17: 頻率響應模擬設定

窗，在座標橫軸上點擊左鍵可以呼叫 Horizontal Axis 選單，在 quantity plotted 一欄填入作為橫軸變量的節點函數即可。以此例來說，二極體的電壓若以節點變量表示即  $v(a)-v(b)$ （若不事先在電路圖上設定 label 則對應到的節點名稱可能是  $v(n001)$ 、 $v(n002)$  等等較難識別的名稱，對於欲觀測的節點事先以 label 命名可以方便後續的波形圖設定）。最後再以 Add Trace 加入二極體電流  $I(D1)$  作為 y 軸即可繪出 I-v curve。y 軸變數當然也可以是節點的函數，原則上加減乘除的運算都是允許的，座標軸的單位也會自動轉換。Fig. 21即以二極體的等效電阻  $(v(a)-v(b))/I(D1)$  為縱軸，二極體電壓為橫軸繪製關係圖，並可由此估算出二極體的導通電阻約為  $100\Omega$ 。

spice 支援的 expression（加減乘除以外還包含正餘弦函數、對數運算等等常用

取 Linear 模式，於 10 k 至 40 kHz 間取 10000 point  
若再縮小模擬間距會發現此處的極值會趨近於無限大

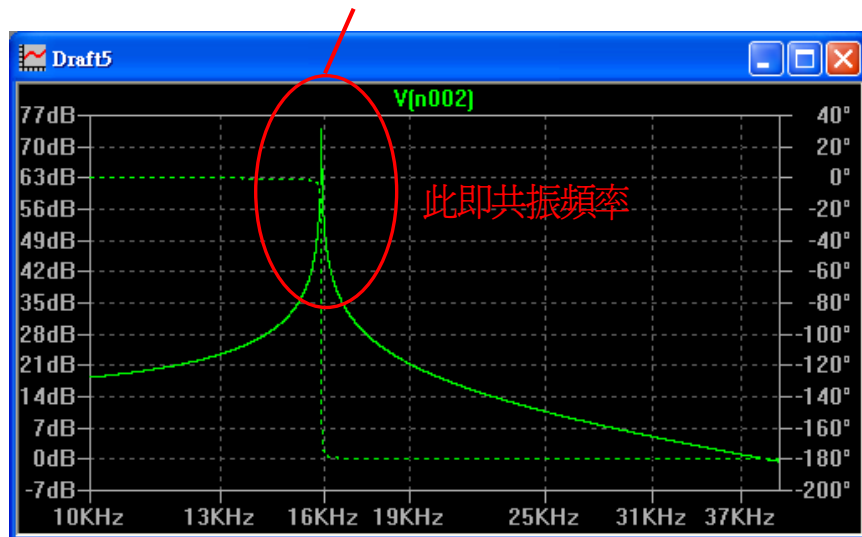


Figure 18: 細部掃描

-二極體元件串連電阻直流電路特性

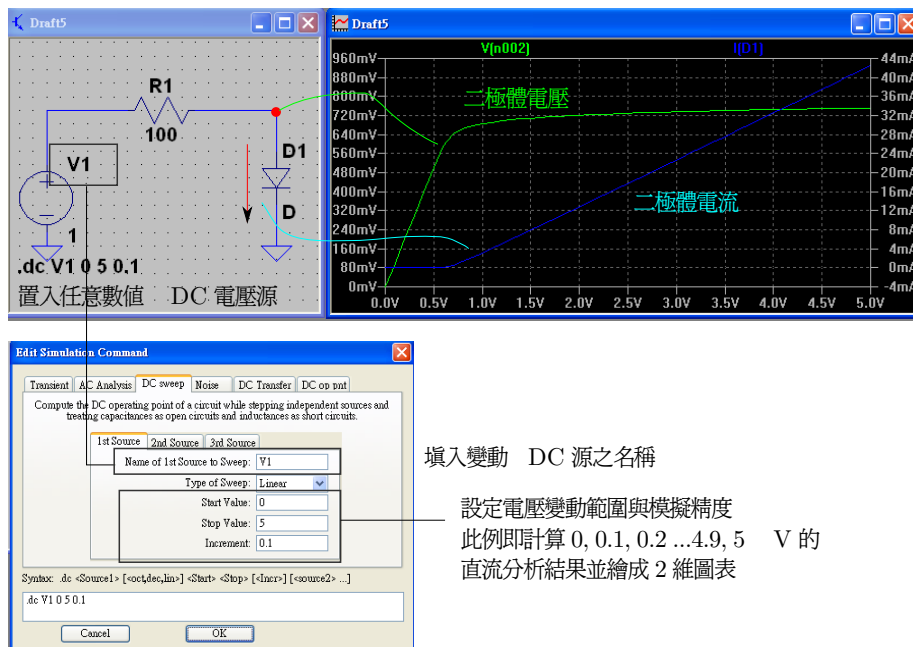


Figure 19: DC sweep

的函數) 可以參考 [http://bwrc.eecs.berkeley.edu/Classes/icbook/SPICE/UserGuide/interactive\\_fr.html](http://bwrc.eecs.berkeley.edu/Classes/icbook/SPICE/UserGuide/interactive_fr.html)。

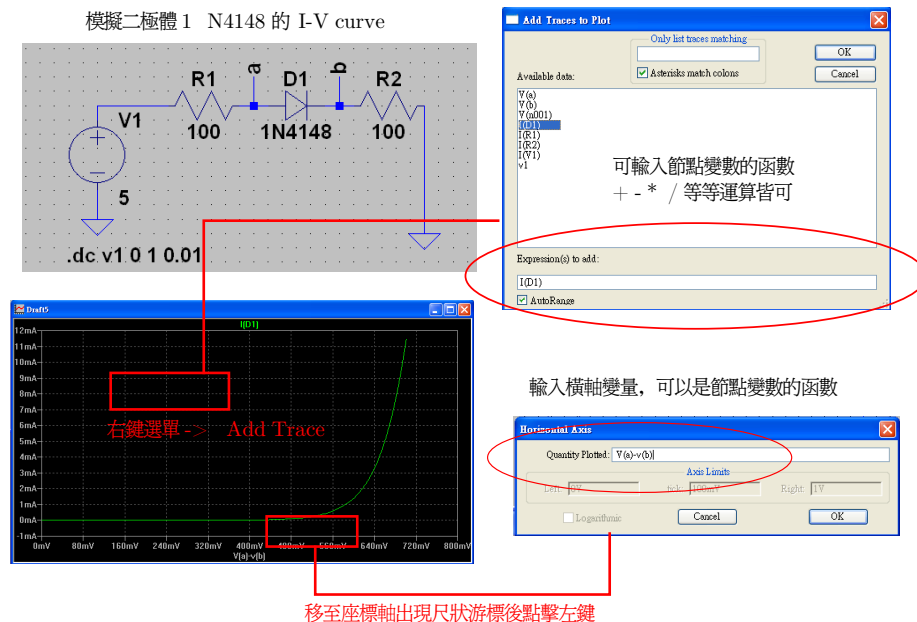


Figure 20: I-V curve

## 6.4 輸出波形圖節點數據

在波形圖子視窗時，由工具列 [File] -> [Export] 可以輸出節點數據，該數據以 txt 檔的形式儲存在 LTspice 的根目錄中，一般為 2 column 的形式 (column 1 為橫軸數據，column 2 為縱軸對應數據)。利用 Scilab 或 Excel 可以對這些數據做進一步的處理。

## 6.5 改變波形圖背景色

波形圖背景預設為黑色，若想把波形圖轉貼至投影片或報告上則需要將背景改為較清楚的白底色。參考 Fig. 22，由工具列 [Tools] -> [Preference] 可以調整波形圖的顏色參數。

## 6.6 SPICE 指令

LTspice 除了預設的 GUI 指令以外也支援 SPICE 指令的輸入，有一些實用的功能需要使用者直接鍵入簡易的 SPICE 指令來改變模擬的參數。要輸入 SPICE 指令可以點選 Text 圖示 (button 上有 Au 字樣) 或由 [Edit] -> [Text] 呼叫修改視

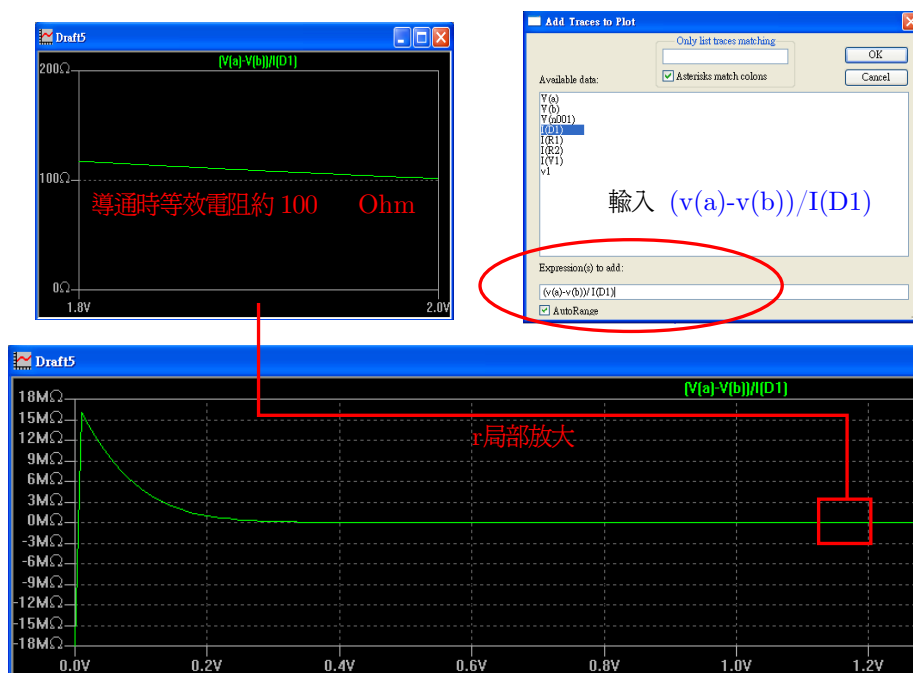


Figure 21: 估計導通等效電阻

窗，將 How to netlist this text 欄位設為 SPICE directive 即可在下方鍵入指令，完成後可將指令文字標籤上電路圖的任一處。

### 6.6.1 改變模擬溫度

輸入 `.temp [temp]` 即可，比方說 `.temp 125` 可以模擬工作溫度 125 °C 時元件的電路特性。一般 LTspice 模擬時若不利用 `.temp` 設定溫度則溫度預設值為 27 °C，即 `.temp 27`。大家可以試試看在不同溫度下模擬二極體的 I-V curve 有何變化（注意不要將溫度設定到接近絕對零度，否則模擬時間會大幅拉長也可能出現錯誤）。

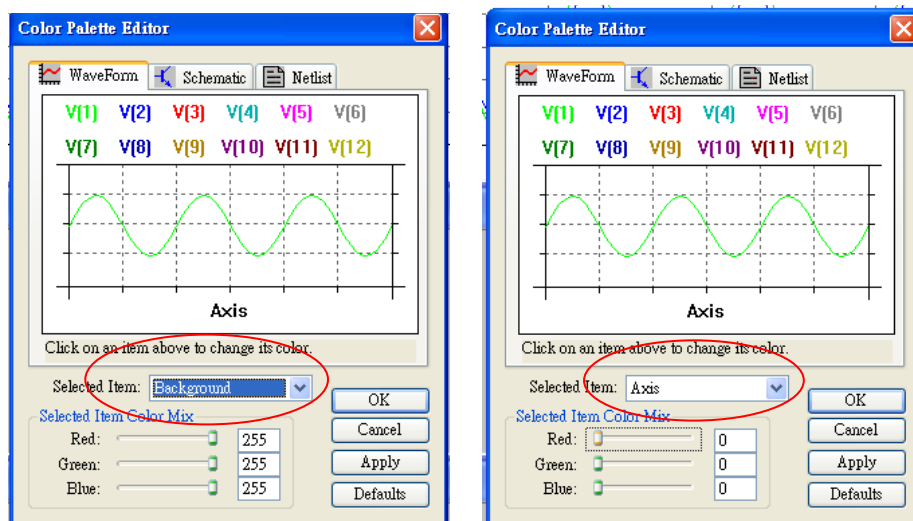
`.temp` 指令也可以模擬多個不同溫度下的模擬結果。Fig. 23 利用指令 `.temp -20 0 50 125` 模擬 -20、0、50、125 °C 下二極體的 I-V curve。右鍵選單中的 Select Steps 可以選擇波形圖上要顯示的模擬曲線。

### 6.6.2 變動參數

除了溫度可以 sweep 同時繪出波形圖外，我們也可以利用 `.STEP` 指令來變化被動元件的數值。Fig. 24以一個分壓電路為例，將其中一根電阻 R1 的值設為變數 {rstep}，變數名稱必須用一組大括號標示。如果我們想同時畫出 R1 = 1k、2k、3k、4k、5kΩ 時 R2 的分壓，我們可以使用指令 `.STEP PARAM rstep`



工具列 [ Tools]->[Color Preference]



background 設為

[Red,Green,Blue]=[255,255,255]

即為白色

axis 設為

[Red,Green,Blue]=[0,0,0]

即成較為清楚的白色

Figure 22: 將波形圖改為白色背景

1k 5k 1k。你可以把 .STEP PARAM想成一個 for 迴圈，PARAM 代表指定一個型態為參數的變數，rstep 是迴圈變數，迴圈變數由 1k 開始，5k 結束，迴圈變數增量 ( increment ) 為 1k。如果只想模擬特定幾個數值，比方說 R1 為 1k、10k、與 1 meg 的情況，可以在加上 list 到指令中： .STEP PARAM rstep list 1k 10k 1meg 。

事實上 .TEMP -20 0 50 125 可以改寫為 .STEP PARAM temp list -20 0 50 125。要切換檢視STEP 製造出來的波形同樣可以從右鍵選單調出 Select Steps 視窗即可。除了被動元件外，.STEP 也可以用來變動電壓源，Fig. 25 就是利用.STEP 來變動基極電壓繪出 BJT 2N2222 的特性曲線。絕大多數的非線性元件的端點數都在三個以上，這些元件的 I-V 特性根據觀察端點對的不同變化也較豐富，此例即使用 DC sweep 分析來找出其他電路變數對於集極 ( collector ) 變化的曲線，再透過 .STEP PARAM vb 0.5 1.2 0.1同時繪出不同基極 ( base ) 電壓下集極電流對集極電壓變化曲線。

### 6.6.3 製作變壓器元件

在 LTspice 中要製作變壓器要先在電路圖放置兩個電感器 L1 與 L2，再利用 SPICE 指令 K1 L1 L2 k=1 即完成輸入端為 L1、輸出端為 L2 且元件名稱 K1 之

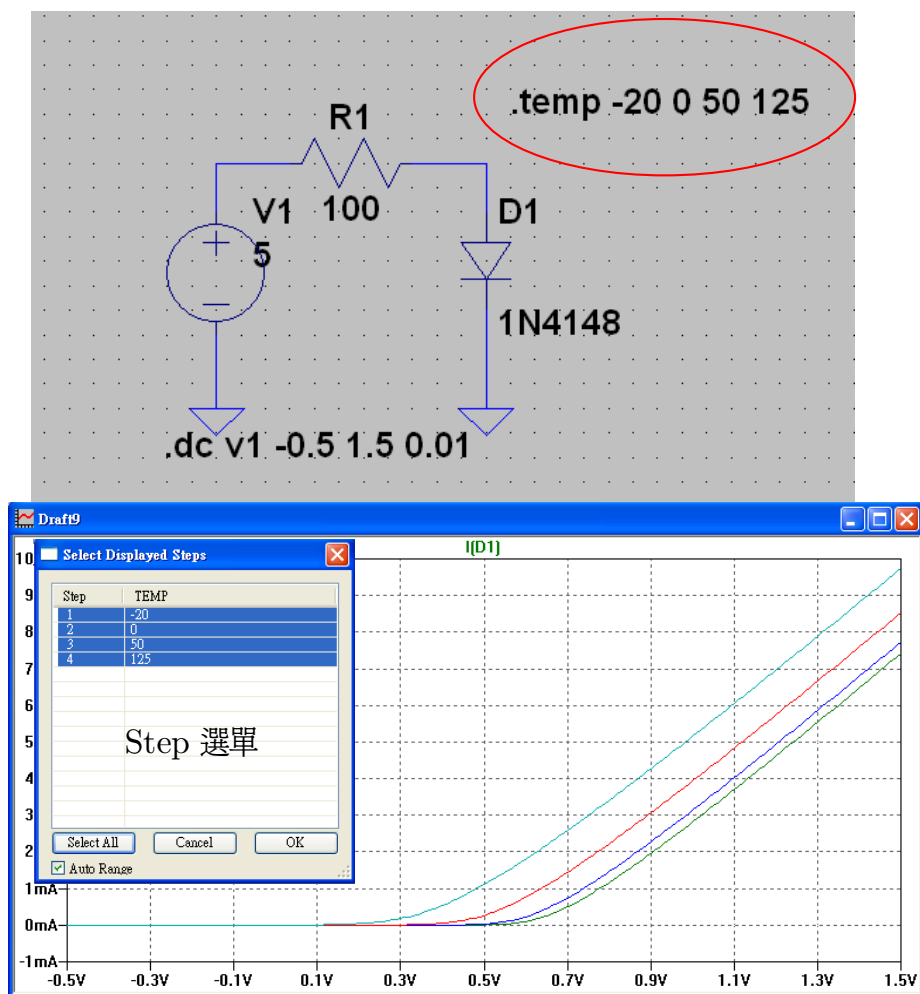


Figure 23: 1N4148 在不同溫度下的 I-V curve

變壓器元件，一般耦合參數  $k$  值設為 1 即代表無損耗之理想變壓器。Fig. 26 即變壓比 1:2 之變壓器實例，變壓比與兩邊的電感值的根號成正比，若需要 1:3 的變壓比則  $L1$ 、 $L2$  的電感值必須是 1:9。

#### 6.6.4 頻譜分析

在 transient 分析下，我們可以將橫軸切換為頻率來觀察電路節點的頻譜，spice 會將資料點做 FFT（快速傅立葉轉換）繪製成圖供使用者分析諧波失真。在波形圖上右鍵開啓選單，最下方 [view]->[FFT] 可輸出頻譜。Fig. 27 即分析 2N2222 構成之放大電路諧波失真的例子。原始信號 1 mV 1kHz 正弦波放大成 5 mV 的信號，完美的放大器應該使  $v_{out}$  也是完美的 1 kHz 弦波，但實際的情況  $v_{out}$  會包含一些高階諧波的成份。Fig. 27 圖上頻譜看似混亂，若將縱軸切換成 linear 表示可發現

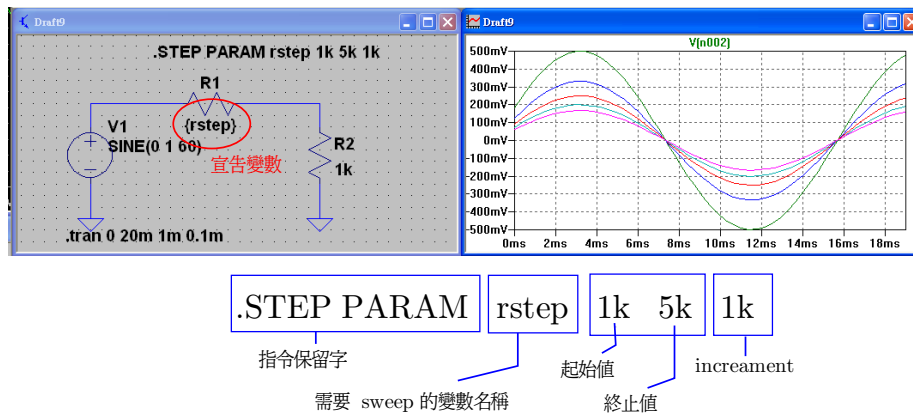


Figure 24: 分壓電路對元件參數 sweep 模擬

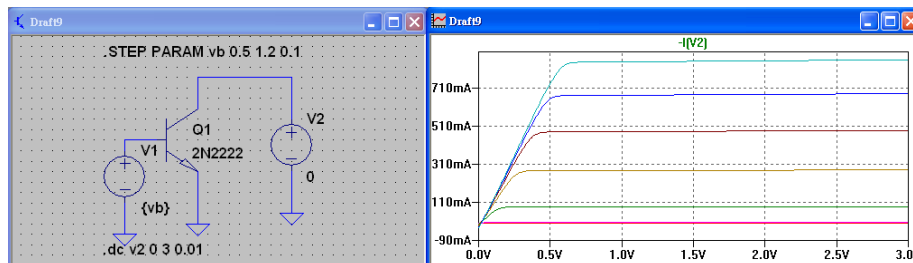


Figure 25: BJT 2N2222 sweep 模擬

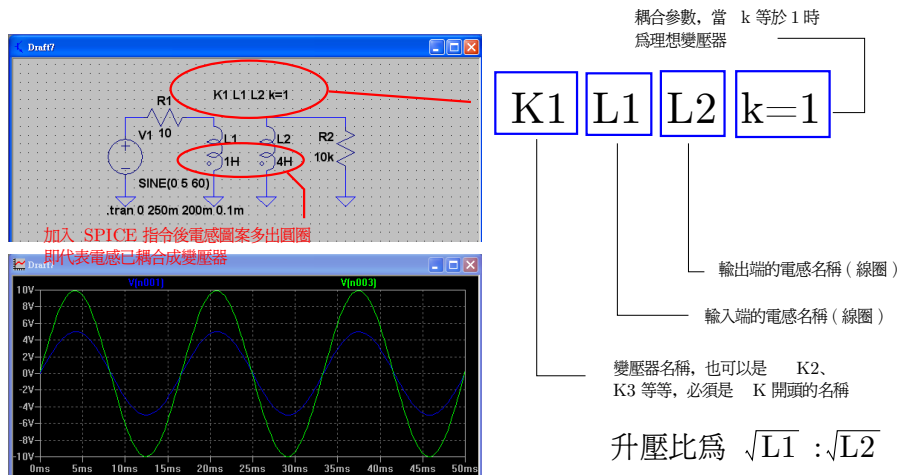


Figure 26: 製作變壓器

1kHz 分量遠大於其他諧波分量，此放大器在此頻率的表现接近理想。

若要提高 FFT 頻譜的精細度，可以增加 transient 分析的模擬時間（stop time）或是降低 maximum timestep，只要模擬取樣的點數越多，FFT 的結果也會

越準確。

波形圖右鍵選單 [ view]->[FFT]

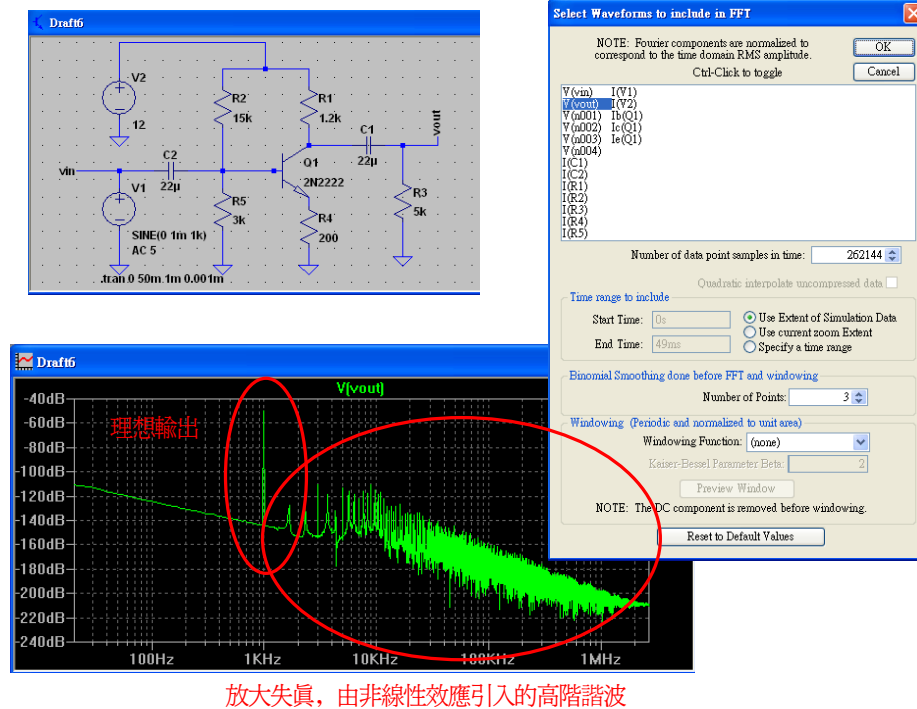
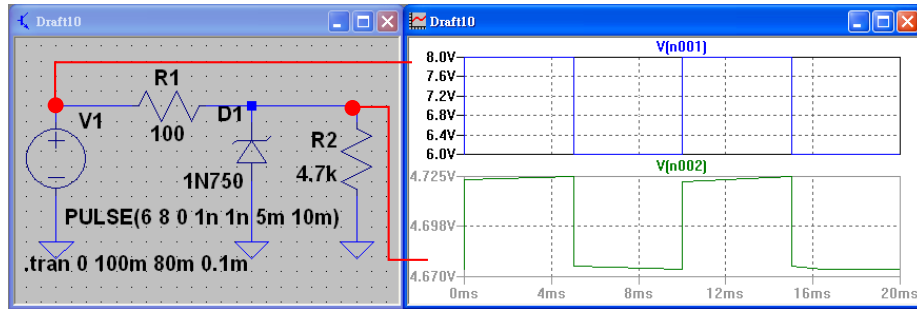


Figure 27: 頻譜分析

## 6.7 輸入變動分析

對於電力電子電路而言，輸入變動分析乃衡量電力轉換電路抗干擾能力是否足夠優秀的簡驗方式。Fig. 28 是一個由 zener 二極體 (1N750, 崩潰電壓約 4.7 V) 構成之穩壓電路，利用 zener 二極體的崩潰區，與之並聯之 4.7 kΩ 負載所感受到的電壓在 V1 大於崩潰電壓時會保持在 4.7 V 附近。利用 PULSE 將 V1 模擬成平均 7 V，振幅 1 V 的方波餵進穩壓電路，我們發現負載電阻感應到漣波 (ripple) 振幅約為 45 mV，換句話說輸入端的變動傳遞到輸出端後變為原先的  $45\text{m}/1=4.5\%$ ，配合小訊號模型的分析可推斷 zener 二極體的逆向導通等效電阻約為串聯電阻的  $4.5/(100-4.5)$ ，大約  $100 \times 4.7\% = 4.7 \Omega$ 。若以  $-I(D1) * v(n002)$  作為縱軸則可觀察 zener 二極體消耗功率的變化。

輸入  $7\text{ V} \pm 1\text{ V}$  的 voltage source



輸出端漣波振幅約為  $(4.725 - 4.680)/2 = 45\text{ mV}$

Figure 28: 穩壓電路輸入變動分析

## 7 音源分析

LTspice 的 transient 分析支援以 wav 檔作為電壓訊號源，也能將波形儲存成 wav 檔。我們可以利用這個特性來觀看聲音的頻譜，甚至可以用來模擬放大器電路的失真與等化器效果。

### 7.1 以 wav 檔作為電壓源

先在電路圖上放置一個電壓元件，再將該電壓源的名稱改為 `wavefile="D:\sound1.wav"` `chan=0`，雙引號內為 wav 檔案的絕對路徑，此例即使用 D 槽下檔名為 sound1 檔案作為電壓源，`chan=0` 代表左聲道，若使用 `chan=1` 則代表右聲道。Fig. 29 即使用預錄約十秒的口哨聲音訊號，餵入 LTspice 並使用 transient 分析時間波形，以 FFT 觀察其頻譜。

### 7.2 以 wav 檔作為電壓源

使用 text 的 spice directive 模式鍵入以下指令：`.wav "D:\centralc.wave"` `16 44100 soundout`。雙引號內為 wav 儲存路徑，將 soundout 節點的資料存到 centralc.wave 之中，bit rate 設為 16 bit，sampling frequency 取為 44100。Fig. 30 中利用 SINE 電壓源製造一個 264 Hz 中央 C 的正弦波，transient 分析取十秒的數據並利用 .wav 指令儲存至 centralc.wave。

### 7.3 放大電路失真模擬

利用先前章節頻譜分析介紹過的信號放大電路（2N2222），將電壓源改為一段十餘秒的 wav 檔（test.wav），並使用 transient 分析將放大後的信號 vout 儲存至 testout.wav 中。Fig. 31 為電路架構，Fig. 32 為輸入信號與輸出信號的頻譜。從增益頻譜上我們可以看到高頻處的雜訊有被放大的現象，實際聆聽轉換後的 wav 檔



Figure 29: 在 LTspice 中引入 wav 檔

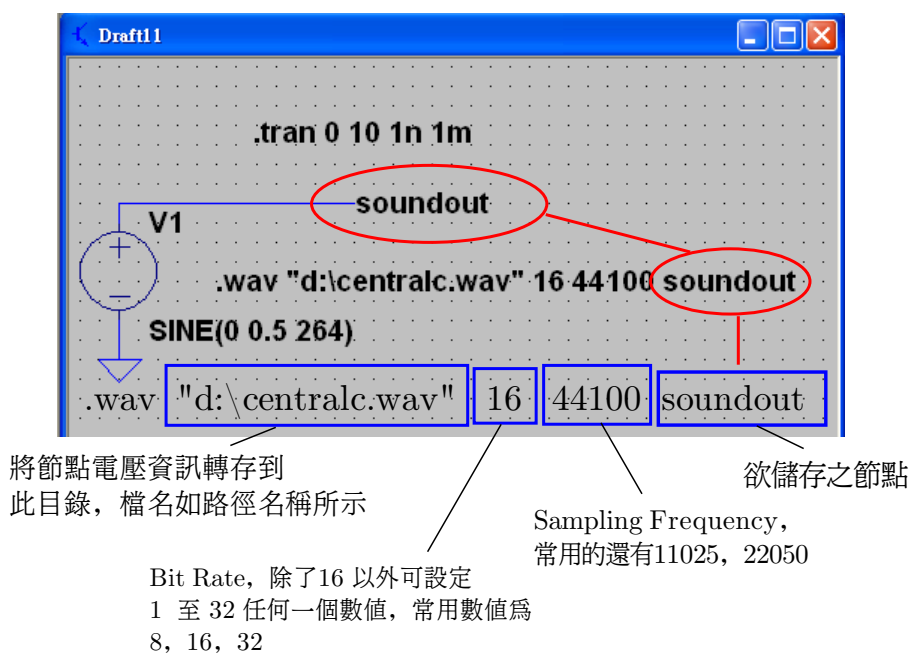


Figure 30: 在 LTspice 中輸出 wav 檔

( 置於 FTP 上與本份文件同一個資料夾, test.wav 為原始音源, testout.wav 為轉換後之檔案 ) 更能明顯聽出失真與爆音。

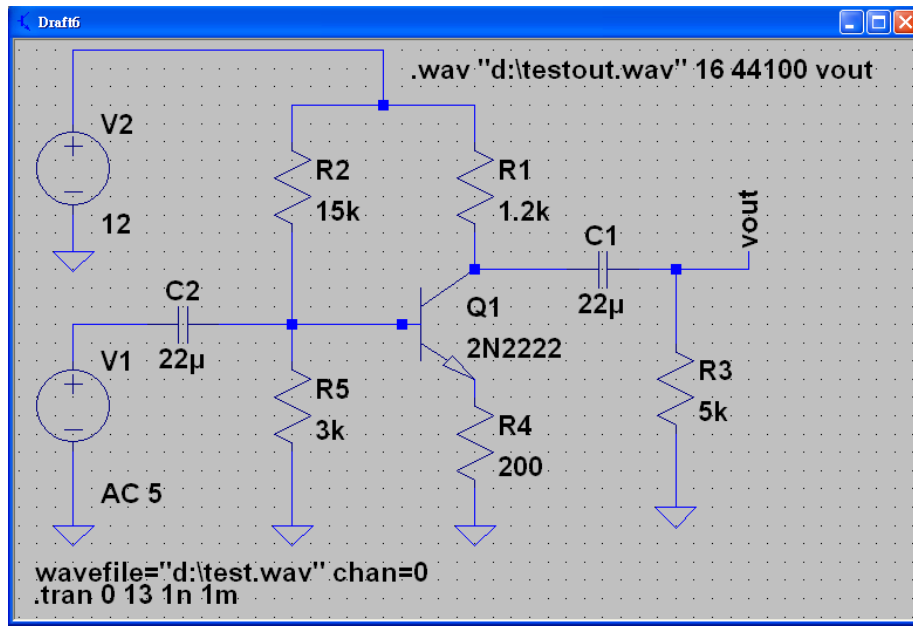


Figure 31: 以 wav 聲音信號模擬放大電路失真

藍線為 Vout 頻譜，綠線為 Vin 頻譜

gain 頻譜 ( Vout/Vin )

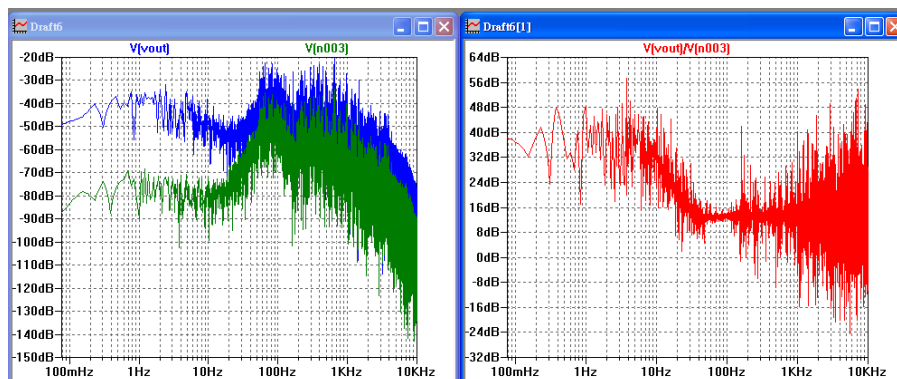


Figure 32: 輸入、輸出與增益 ( gain ) 頻譜

## 8 實戰演練

### exercise 8.1: 電阻測量

參考 Fig. 33，請問如下圖以呈正立方體排列的電阻球在 A、B 兩點間的等效電阻為何( $R=1\ \Omega$ )？若 A、B 間的電位差設為 1 V，則 B 點與 C 點的電位分別為多少？

hint:你可以加上一個 1V 的 DC voltage 在 A、B 點之間，利用 DC op pnt 找出流過節點 A 的電流值，相除即得等效電阻。

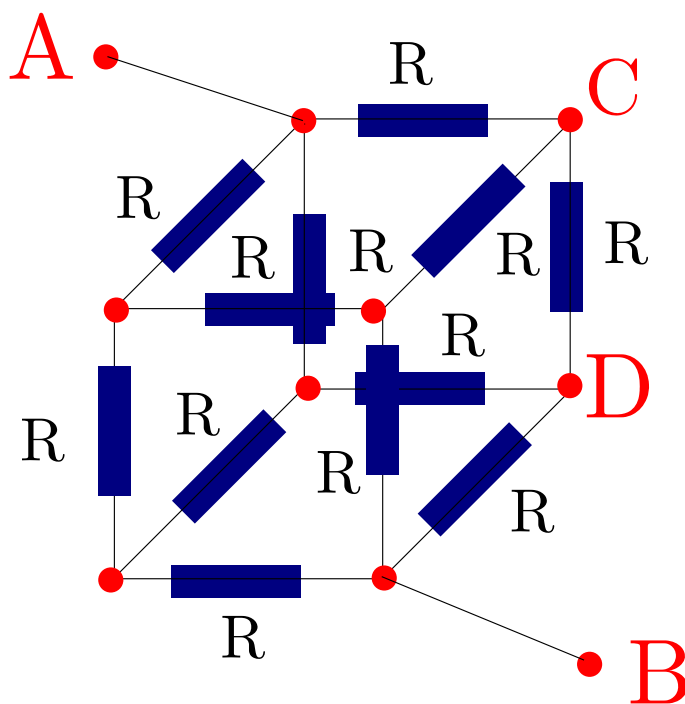


Figure 33: 電阻骰子

### exercise 8.2: 生成方波

請利用 PULSE 功能製造出一個週期為  $2\ \mu\text{s}$ ，振幅為  $2.5\ \text{V}$  無 DC 分量的方波。將這個電源接上  $4.7\ \text{k}\Omega$  的電阻負載（串聯並接地），觀察電流波形檢驗參數是否設置正確。

### exercise 8.3: 生成鋸齒波

參考 Fig. 34，請利用 PULSE 功能製造出一個週期為  $2\ \mu\text{s}$ ，振幅為  $2.5\ \text{V}$  無 DC 分量的鋸齒波。將這個電源接上  $4.7\ \text{k}\Omega$  的電阻負載（串聯並接地），觀察電流波形檢驗參數是否設置正確。



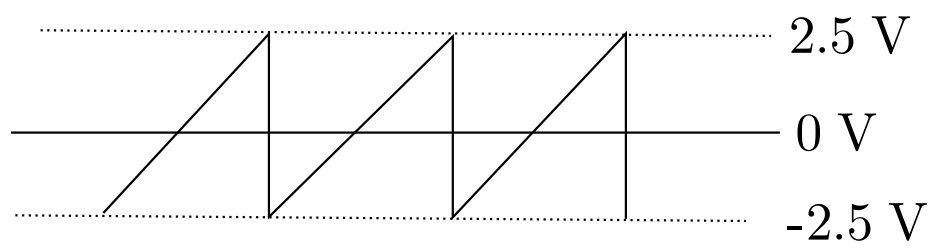


Figure 34: 鋸齒波波形