

**前言：**回授迴路的設計需要仔細地思考與分析。未被發現的不良回授路徑很容易被忽略，並且會危害電路設計。本文將探討一種常見的回授電路，與設計人員所面臨的潛在問題，並將提出這些問題的解決方案。

### TL431 / 光耦合器回授電路

TL431 與光耦合器是電源轉換器設計人員常用的一種組合。但若不謹慎思考與設計，此組合會讓工程師感到十分棘手。本文將討論許多經驗不足甚至連部份有經驗的設計人員皆容易落入的窠臼。

圖 1 是典型電路。R1 與 R2 組成的電阻分壓器在輸出電壓達到目標值時，會讓 R1 與 R2 的接點電壓剛好等於 TL431 的內部參考電壓。電阻 R3 以及電容 C1 與 C2 提供 TL431 所需的回授迴路補償以便穩定控制迴路。迴路增益值決定後，即可計算這些元件值並將它們加在一起。

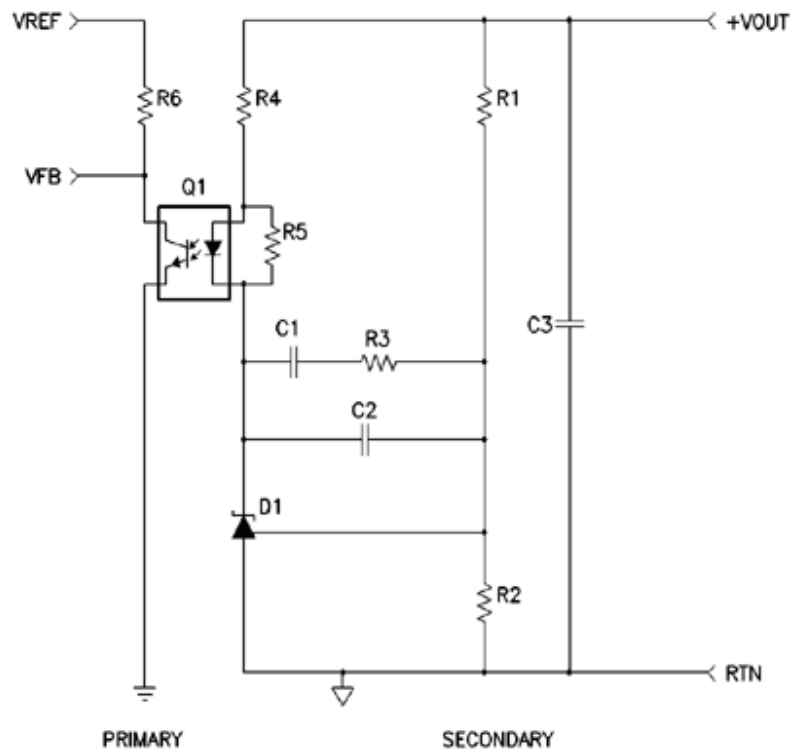


圖 1：典型的 TL431 回授電路。

圖 1 的 TL431 電路增益可由下列公式計算：

$$\text{Gain} = \frac{Z_{fb}}{R1}$$

其中  $Z_{fb}$  等於：

$$Z_{fb} = \frac{1}{\frac{1}{R3 - \frac{j}{\omega \cdot C1}} + j \cdot \omega \cdot C2}$$

$\omega$  則代表角速度 ( radians/sec )。

光耦合器迴路增益 = (  $R6/R4$  ) × 光耦合器電流轉換比 ( Current Transfer Ratio ; CTR ) ，設計人員必須知道光耦合器的電流轉換比，才能計算該增益。

$$\text{optocoupler} := \text{CTR} \cdot \frac{R6}{R4}$$

但實際轉移函數是由光耦合器的 LED 電流決定，所以圖 1 的 TL431 電路總增益還包括另一因數。該函數是 (  $V_{out} - V_{cathode}$  ) /  $R4$  ，其中  $V_{out}$  等於進入 TL431 的  $V_{sense}$  電壓，這使得 TL431 與光耦合器的「總增益方程式」等於：

$$\text{Gainsys} := \left( \frac{Z_{fb}}{R1} + 1 \right) \cdot \text{CTR} \cdot \frac{R6}{R4}$$

上式的 +1 項在本文裡代表「隱藏」的回授路徑，只要  $Z_{fb}/R1$  遠大於 1 即可忽略。在後面的示波器圖片中，將進一步解釋和顯示該項的影響，我們現在先假設這個公式是正確的。

設計人員只要將電源轉換器的各項增益元素相乘，就能得到不考慮回授電路影響下的轉換器開迴路增益。這些元素包括：變壓器圈數比；PWM 主動輸出濾波器元件效應和 TL431 增益以外的相關負載效應；以及光耦合器的影響。

轉換器會在特定的開關頻率下操作。設計人員知道開迴路總增益須在低於該頻率 6 分之 1 的某個點跨過 0dB，因此多數設計人員會留下適當的元件公差，其它人則會將跨越點設計在大約該頻率 10 分之 1 的位置。在此例中，我們假設開關頻率固定為 100kHz。

由於已知控制到輸出增益 ( control-to-output gain ) 在目標跨越頻率點的增益值，接下來只要讓 TL431 回授迴路和光耦合器的增益等於該增益值的倒數即可。

設計人員已知道要在什麼樣的頻率下，才能讓 TL431 的迴路在相位增益大於 45 度的位置跨越 0dB，因此他們現在可以選擇該迴路的零件。

如果 TL431 的電路增益必須超過 20dB，那只要選擇正確的 R3 電阻以及 C1 和 C2 電容，就能決定 TL431 增益曲線。此時設計人員可將+1 項忽略，因為它遠小於 TL431 的增益。

圖 2 是轉換器的控制到輸出增益圖，它在 10kHz 目標跨越點的增益為 0.1 或 -20dB，這表示回授迴路在零跨越點的增益必須等於+20dB 或 10 倍。

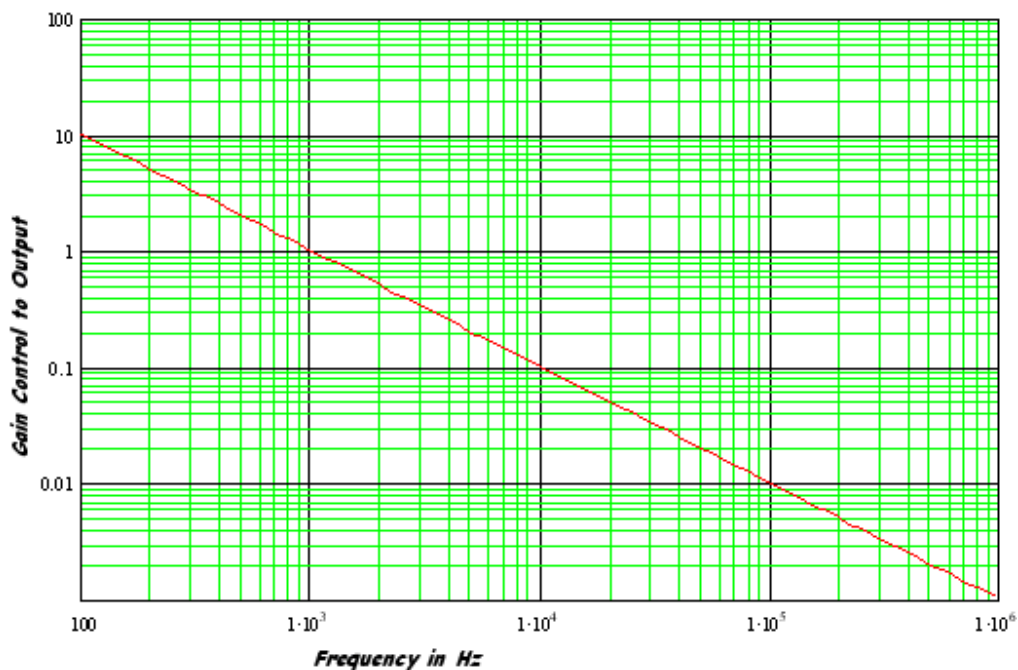


圖 2：轉換器的控制到輸出增益圖。

設計人員現能決定他們所想要的迴路響應，然後選擇適當的 R1, R2, R3, R4, R6, C1 和 C2。

為了簡化設計起見，此處讓 R4 等於 R6，同時選擇電流轉換比等於 100 的光耦合器（亦即通過 LED 的每個毫安培電流都會讓電晶體輸出 1 個毫安培電流）。

為讓 10kHz 增益值等於 10，R3 必須等於 10 倍的 R1。TL431 增益曲線在 0dB 點後應逐漸下滑，但由於設計人員仍需一定程度的相位增益，所以選擇 C2 時應令其 20kHz

阻抗值等於  $R_3$ 。設計人員要求低頻部份的增益較高，但 0dB 跨越點的相位增益要大於 45 度，所以選擇 1kHz 阻抗等  $R_3$  的  $C_1$  值。

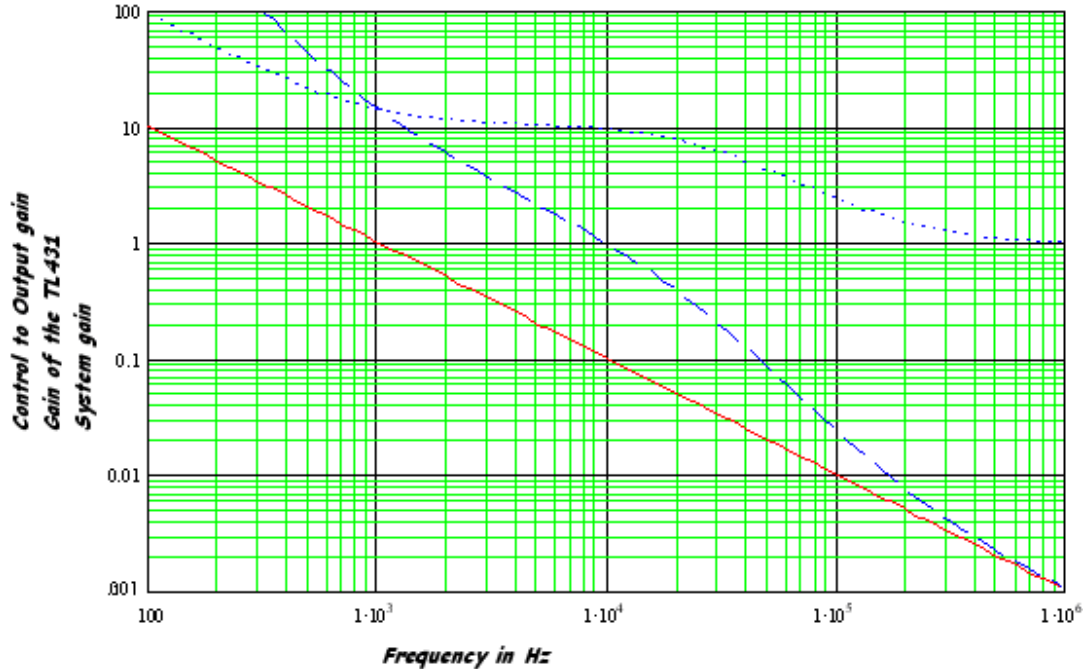


圖 3：控制到輸出、TL431 和總系統迴路增益的頻率關係圖。

圖 3 顯示控制到輸出（實線）、補償增益（點線）和系統總增益（虛線）的最初開迴路增益圖。這份設計在此例中工作很理想：總迴路增益會在 10kHz 處跨越 0dB（在圖 3 中，垂直座標值等於 1 之處），每 10 倍頻的增益斜率則為 20dB，這能提供設計人員所要的相位邊限。

然而實際應用不一定能達到這些理想條件。我們將以一個控制到輸出增益為 +20dB 的例子做為說明，發現就算遵守前面例子的同樣規則，並忽略增益方程式的 +1 項，結果卻有很大不同。

區別在於根據設計，+1 項會使 TL431 與光耦合器的增益，絕不會降到光耦合器本身增益以下。這是由於 TL431 感測的訊號，同樣會出現在提供電流給光耦合器的電壓源，這也就是所謂的「隱藏迴路」。隨著 TL431 增益值降到 0dB 以下，它會變成很穩定的電壓。然而電壓源（圖 1 的 +Vout）上的任何訊號，仍會透過光耦合器在電流上產生訊號。

對設計人員而言，選擇  $R_3$  等於  $1/10 R_1$ ，意味著圖 1 電路的 +Vout 點若出現 10kHz 100mV 弦波訊號，TL431 陰極就會產生與 +Vout 訊號反相的 10mV 訊號。這個

設計會在 R4 電阻兩端造成 110mV 訊號 ( 其中 100mV 來自電阻的 +Vout 端, 10mV 來自 TL431 陰極 )。電路需要 10mV 訊號才能在 10kHz 得到 0dB 增益值, 這使總迴路增益在所要求的 10kHz 跨越點仍為 +20dB。

隨著頻率繼續升高, 誤差放大器輸出訊號會越來越弱。但來自訊號源的訊號依然不變, 通過電阻 R4 的電流也繼續由 +Vout 電壓主導。

這表示隨著誤差放大器的增益通過 0dB, 由 TL431 和光耦合器電路組成的回授迴路增益曲線將逐漸平坦, 並如下圖 4 所示固定於 1 或 0dB ( 點線 )。

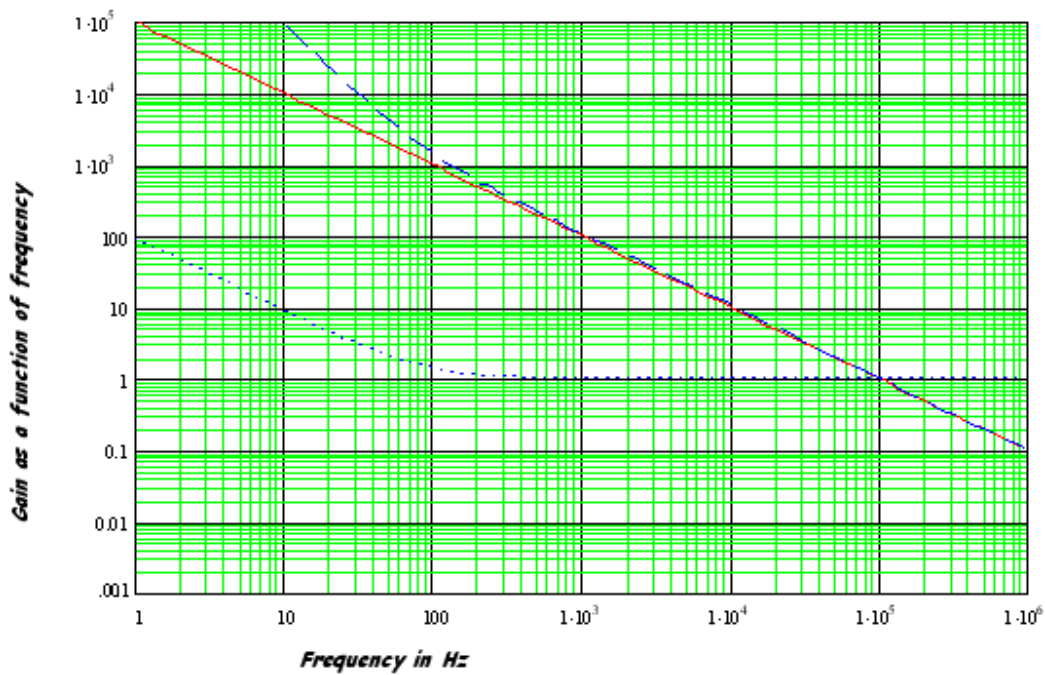


圖 4 : 增益元件控制到輸出、回授電路和總開迴路增益的增益圖。

解決此問題的方法是在 R4 與 Vout 間增加一個濾波器, 讓 R4 有穩定的電壓源。在此例中使用濾波器和串聯穩壓器的典型做法如圖 5 所示。

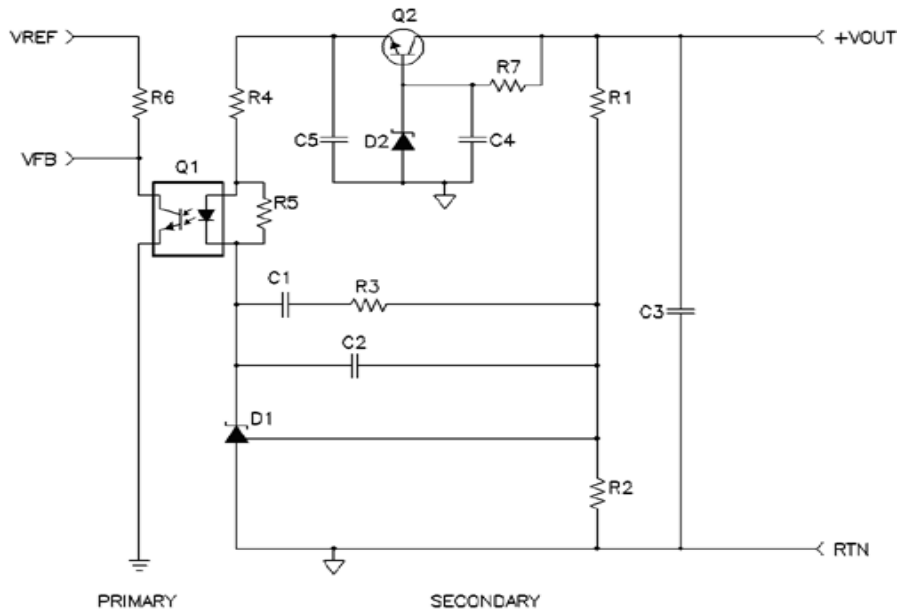


圖 5：包含濾波電路的回授迴路。

圖 6 是增加濾波電路後的增益曲線，可以看出它產生我們所要的 TL431 增益曲線

。

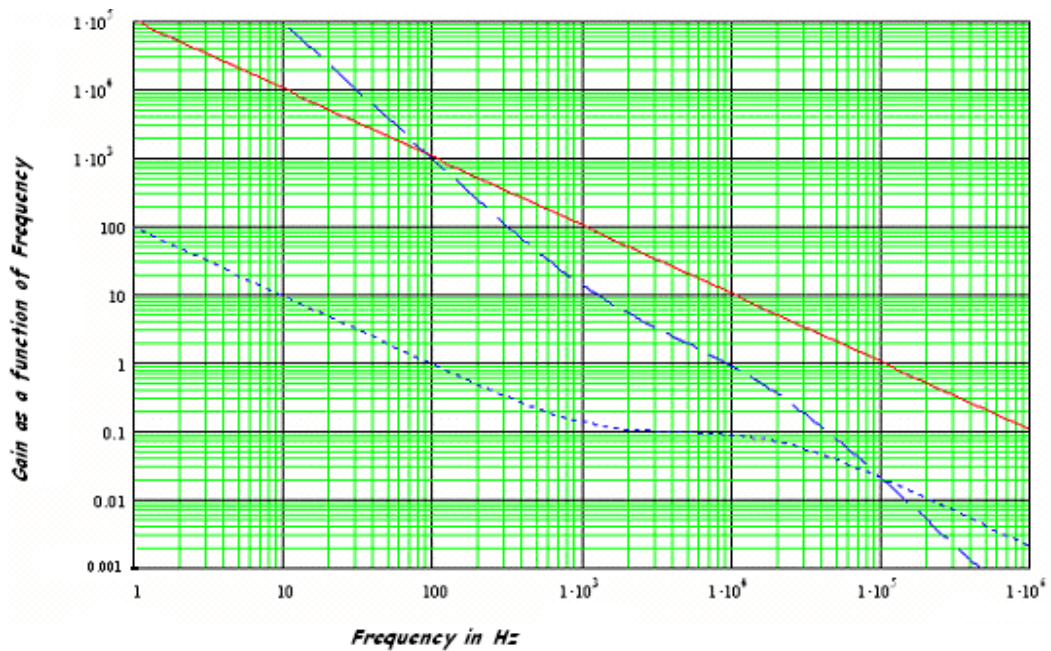


圖 6：在 R4 與 Vout 之間增加濾波器所得到的效果。

我們還建立一個電路，來展示增加濾波器的效果並進行測試。圖 7 即為測試所用的電路。

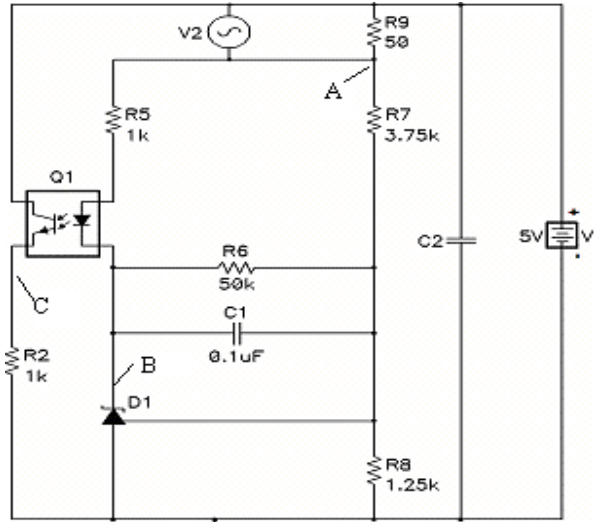


圖 7：測試電路。

為了測量電路的迴路增益，先在 R9 兩端加上一個訊號，然後測量兩個電路點之間的電壓。第一個要測量的電路點是 R9 與 R7 的接點。

第二個電路點則視測量對象為 TLV431 增益或光耦合器輸出而定。若要測量 TLV431 增益就將它接到 TLV431 的陰極，若要測量 CNY17 就連接到光電晶體的射極。

圖 8 顯示 TLV431 的增益與相位圖，圖 9 則是 CNY17 射極的增益與相位圖。

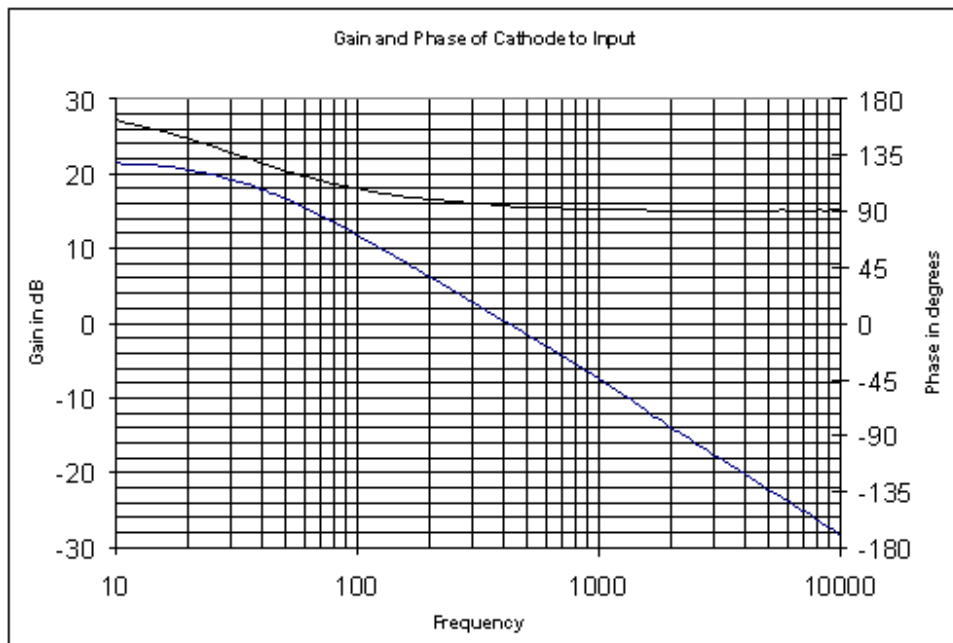


圖 8 : TLV431 的增益。

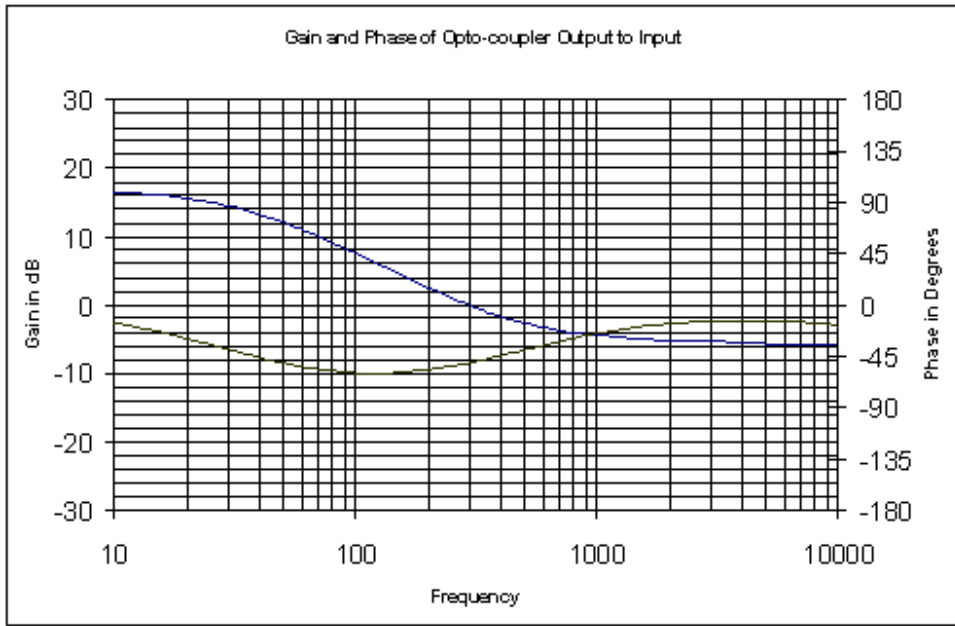


圖 9 : CNY17 的增益。

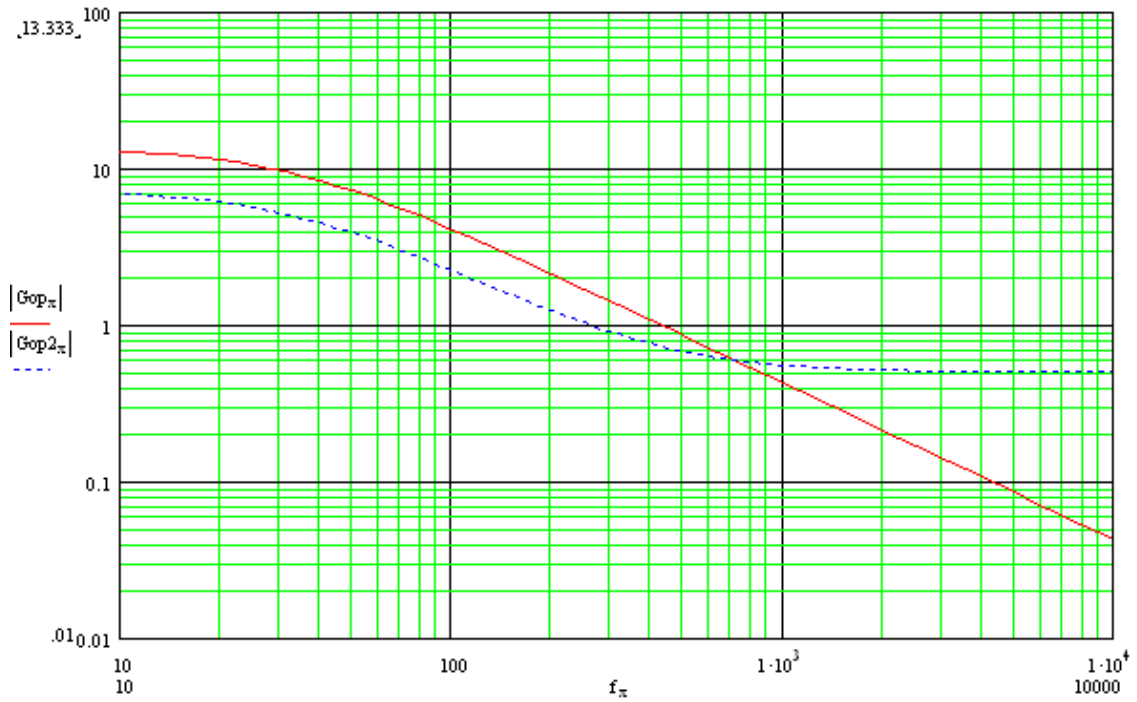




圖 10：測試電路的增益圖。

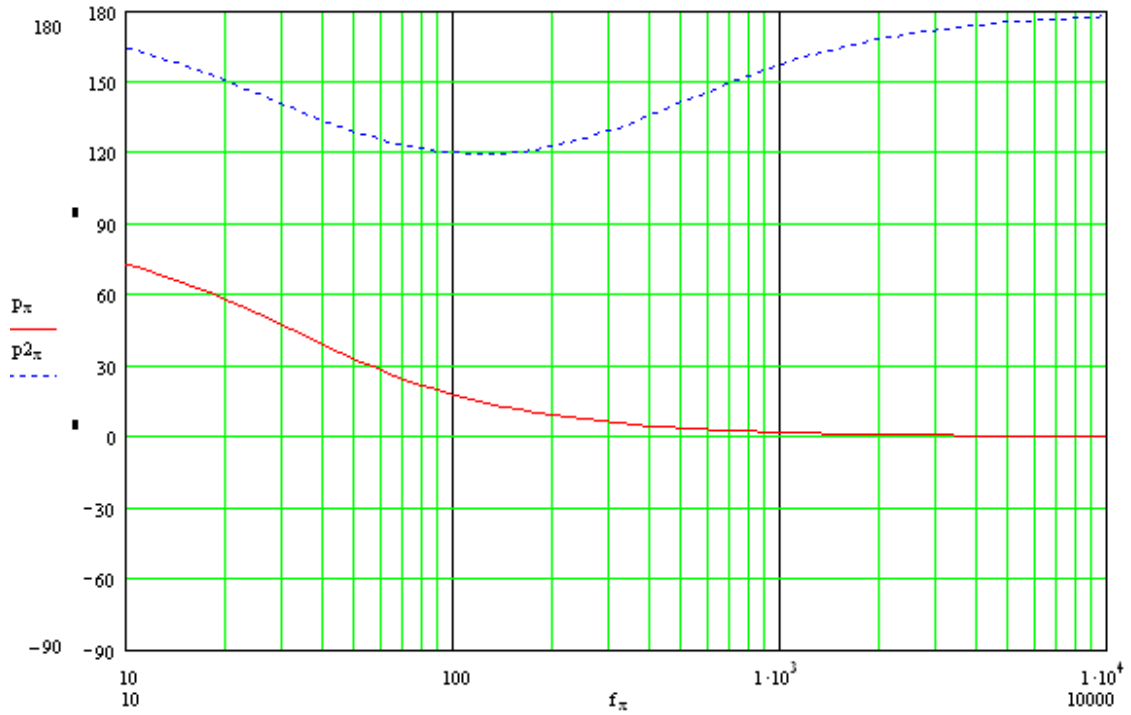


圖 11：測試電路的相位圖。

測量過程中以不同頻率得到的增益值，顯示於之後的示波器圖上。圖 12 與 13 顯示增益值的相對改變情形。

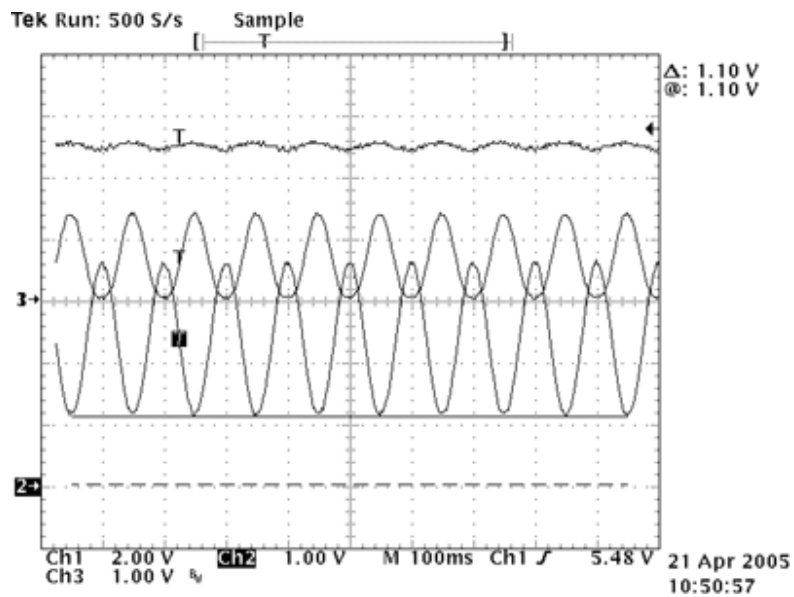


圖 12 : 10Hz 的電壓。

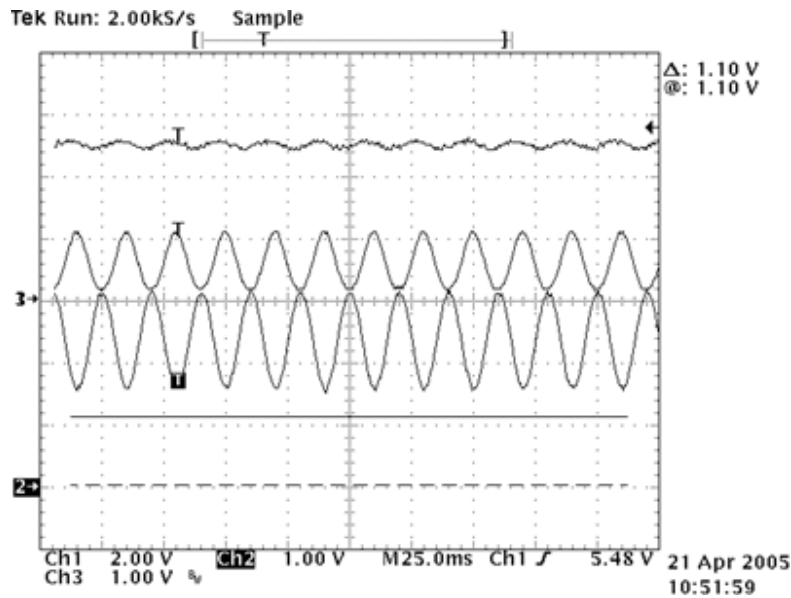


圖 13 : 50Hz 的電壓。

最上面的波形是以差動方式將訊號加到 R9 兩端 (圖 7 中的 A 點)，然後測量 R9 與 R7 的連接點所得到的波形。下面的波形是加到 TLV431 陰極的訊號 (圖 7 中的 B 點)，中間的波形則是光耦合器的射極電壓波形 (圖 7 中的 C 點)。

可以看出光耦合器射極與 TLV431 陰極的電壓相位剛好相差 180 度，TLV431 訊號振幅也略大於光耦合器的光電晶體射極，這正是電流轉換比小於 1 所造成的影響。最後，我們還看到 TLV431 與光耦合器的 50Hz 波形振幅都小於 10Hz 時的振幅。

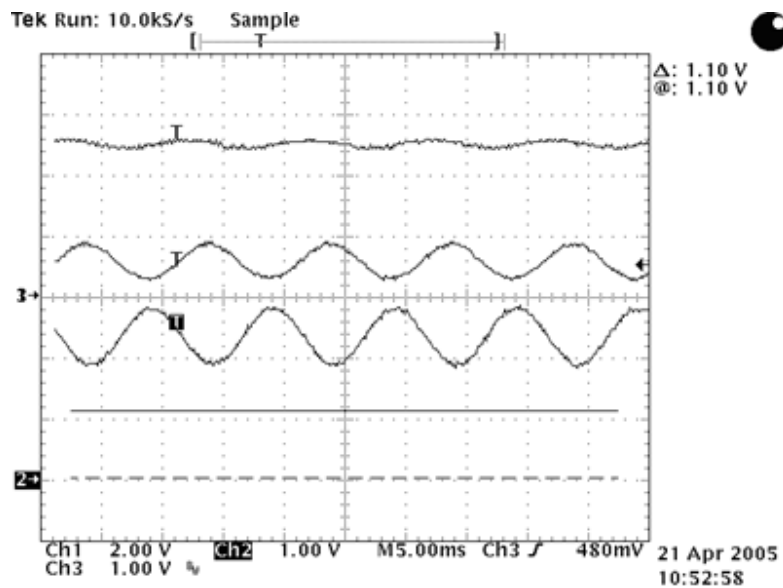


圖 14 : 100Hz 的電壓。

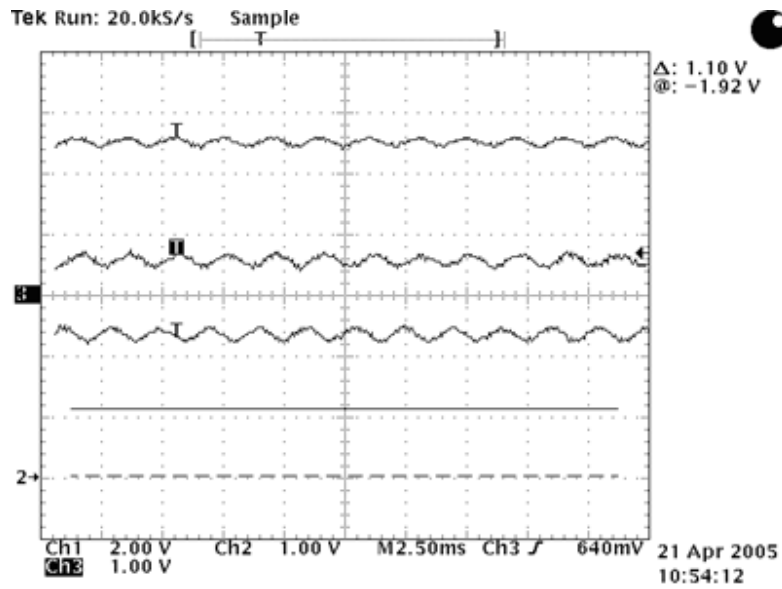


圖 15 : 500Hz 的電壓。

增益會隨著頻率升高而逐漸下降。但從迴路響應圖形可以看出光耦合器的增益或振幅會逐漸穩定，TLV431 的增益則會繼續下降。從圖 10 可以看出這應出現在 500Hz 左右。

為了更方便觀察這些效應，接下來的幾張示波器圖片都使用較大的輸入訊號。

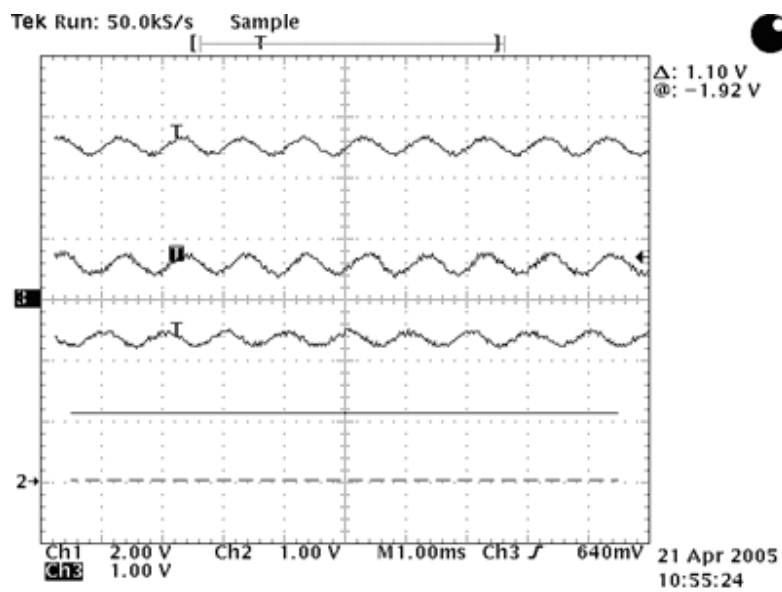


圖 16 : 1kHz 的電壓。

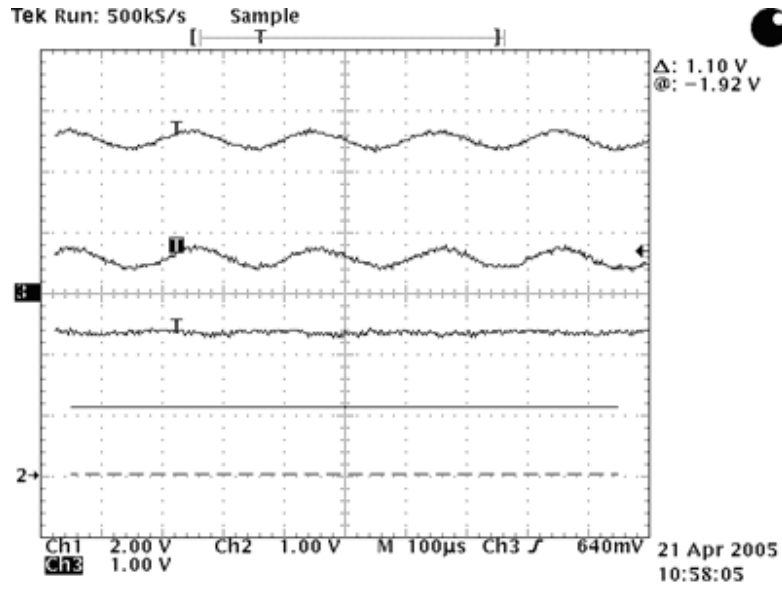


圖 17 : 5kHz 的電壓。

TLV431 的輸出會隨著頻率進一步升得更高而繼續下降。到了 5kHz 時，示波器上幾乎已看不到漣波。然而，光耦合器輸入訊號與輸出訊號則幾乎同樣大小。

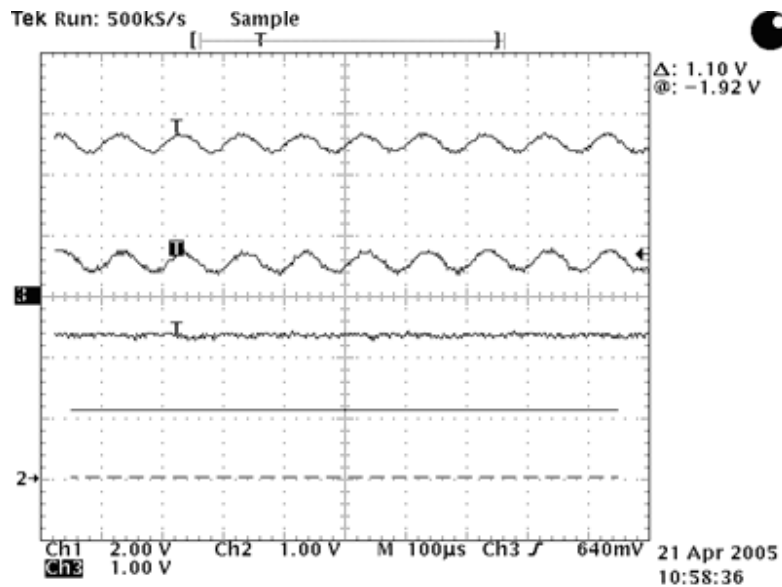


圖 18 : 10kHz 的電壓。

到了 10kHz 時，TLV431 的電壓看起來就像一條直線，光耦合器的輸出則仍可看出輸入弦波的形狀。這些結果都吻合本文前面討論的測量值與計算結果。

**結論：**直流電源轉換器採用這類回授設計時，常需對提供光耦合器電流的電壓源進行濾波。它有助於除去這個「隱藏」路徑，並利用 TL431 附近的元件控制回授迴路增益

。