

Control System (I)

Motor Experiment Report

106030009 葉蓁

這個馬達實驗，參考老師附的兩篇論文，目的就是透過自己實作一顆 DC 直流馬達，做為受控場，並達成用電壓控制轉速，的一個回授電路。

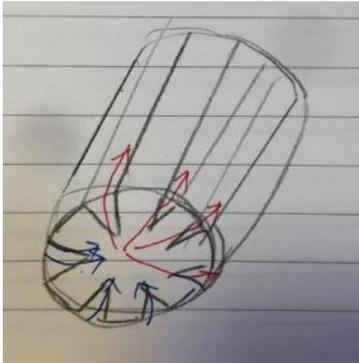
這個實驗分為三個部分：製作馬達、測量轉速、設計控制器(包含負回授實作)。

以下依照這三個部分說明。

一、製作馬達

第一部份的要求，只需要達到「給定電壓源，馬達能夠轉起來」就算通過。聽起來很簡單，但我們遇到很多困難，花了非常多時間。助教給我們一顆 3D 列印的轉子，我們自己去買漆包線等其他材料。我將製作馬達分為三個部分：繞漆包線、製作電刷、整體配置設計。

1. 繞漆包線：我們繞了兩次漆包線，因為第一次繞完之後，通電並不會轉，但有看到它再抖動，我們嚴重懷疑我們再繞線的時候，忽略走線的順序，就是倆倆之間電流進去的方向要統一，隔 180 度後才換方向，這樣才會有一個固定的方向旋轉。如下手繪圖說明：

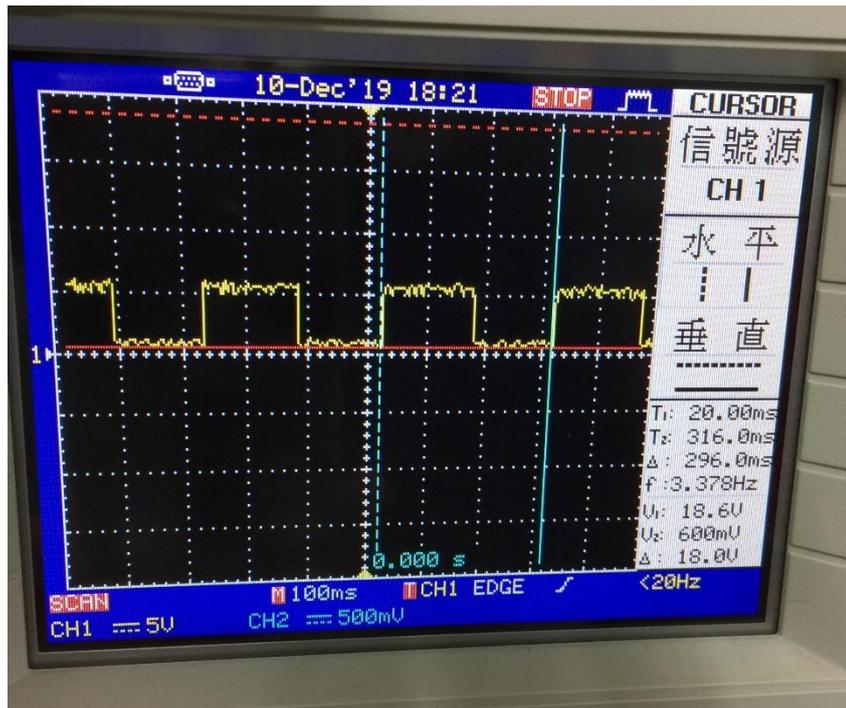


另外我們買了兩次線，第一次用比較細的，一邊繞大概 10 圈，後來換比較粗的線，想說通過的電流比較大，也是一邊繞 10 圈(兩側共 20 圈)

2. 製作電刷：第一部分最困難的就是製作電刷。因為轉子只有八個洞，若平均分配，約 45 度會碰到一次電線。馬達再旋轉時電刷與漆包線必須時刻接觸，且保持通路，否則一斷路後，沒有電流，則沒有扭矩，馬達就不會轉。除了讓馬達拉出來的線要盡量平均分配並同一條線圈要夾 180 度對角，電刷也不能因為馬達旋轉造成的力而被彈開，造成斷路。最後我們選擇用迴紋針從上面掛下來。

3. 整體配置設計：第一部分我們的馬達最終如下圖：

可以看到用保麗龍板做成一個盒子的樣子，當初目的是為了好拿，磁鐵也利用兩側吸引夾住，不必另外固定，相當方便。但我們在讓馬達轉起來前遇到很多困難。漆包線沒有用砂紙磨的夠徹底，抑或電刷一直被彈開，馬達轉速異常的低...等問題。稍微修正後總算能以正常速度旋轉，



(p. s. 這是我們還沒重繞馬達的，可以發現頻率非常的低!下面會說明原因以及我們解決的方法)

量得頻率後，利用助教發的 LM2907 這塊 IC，頻率電壓轉換器，顧名思義就是可以將頻率轉換成電壓，根據以下公式：

實驗一、轉速量測

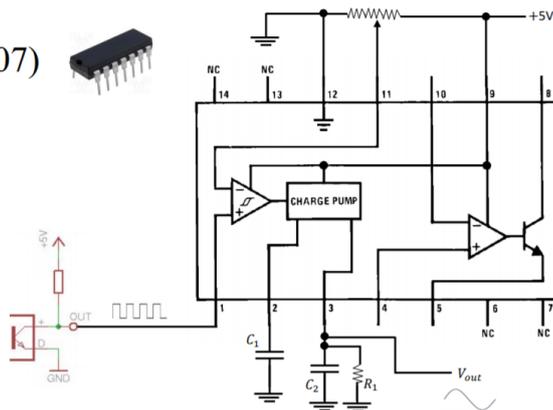
- 頻率電壓轉換器 (LM2907)



$$V_{out} = V_{CC} R_1 C_1 f_{in}$$

$$(V_{out,max} = V_{CC} R_1 C_1 f_{in,max})$$

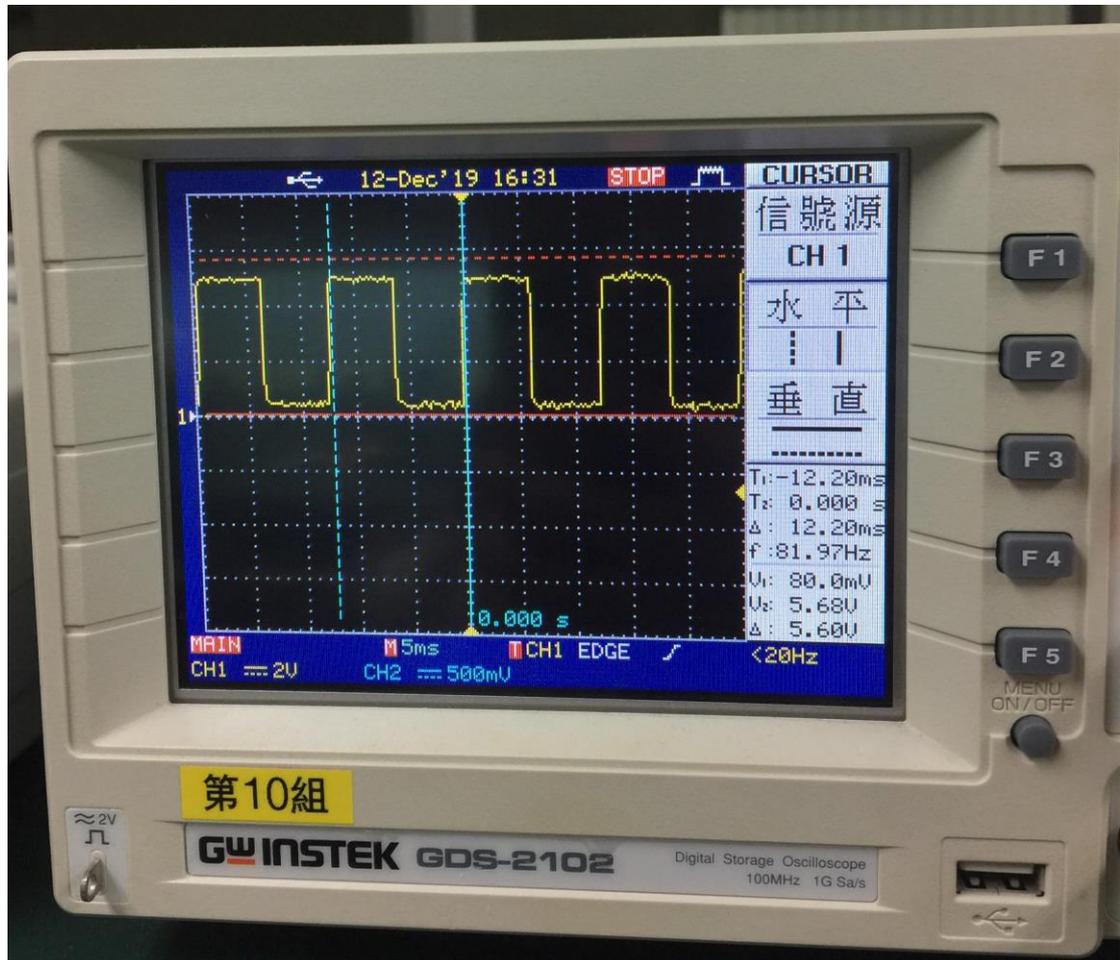
- V_{CC} : 5V
- $f_{in,max}$: 馬達 5V 下感測出之頻率
- $V_{out,max}$: 4V
- $100 \text{ pF} < C_1 < \frac{150 \mu\text{A}}{f_{in} V_{CC}}$
- $R_1 \geq \frac{V_{out,max}}{150 \mu\text{A}}$



事實上我們在這個步驟遭遇嚴重的困難：馬達轉不夠快。精確一點講，是「馬達在 0.6A 左右(或以下)的電流，轉速異常慢，頻率 f 只有 3 左右!」正常 f 為 15~20，我們的馬達怎麼樣都太慢。第一次實驗會過，大概是沒發現電流開多少。同樣 5v，也許電供給太多電流，讓我們的馬達跑很快，我們就以為成功了。思考很久後我們決定重新製作一次馬達。

主要改善馬達的問題：

1. 繞線繞太少(我們改繞一側 30 圈，總共 60 圈一組!)
2. 磁鐵距離太遠!我們拆掉盒子，直接用 L 型角鋼固定住兩側磁鐵，讓他們靠馬達非常的近!
3. 電刷改良設計，用橡皮擦黏在下面當基底，搭配膠帶穩定電刷!



(p. s. 因為葉片數量=4, f 要除以 4 所以 $81.97/4$ 約等於 20 上下!)
改良後的馬達，頻率可以到達 20Hz! 對我們來講是相當大的進步!

有了 f 後，根據上面所說的公式：可以得到 $C1, R1$ 的範圍。

$$R1 \geq 26.7 \text{ K}\Omega$$

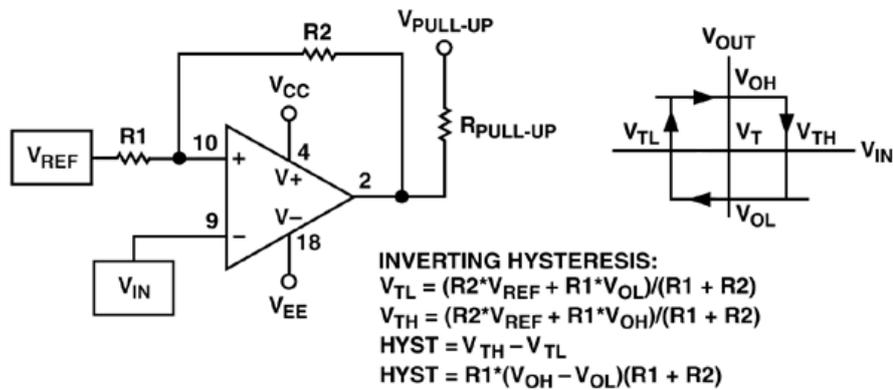
$$100\text{pF} < C1 < 2 \text{ microF}$$

我們最後挑了 $R1 = 100\text{k}\Omega$, $C1 = 0.01\text{microF}$, $C2 = 1 \text{ microF}$ 。算是有點 trial and error 的方法。

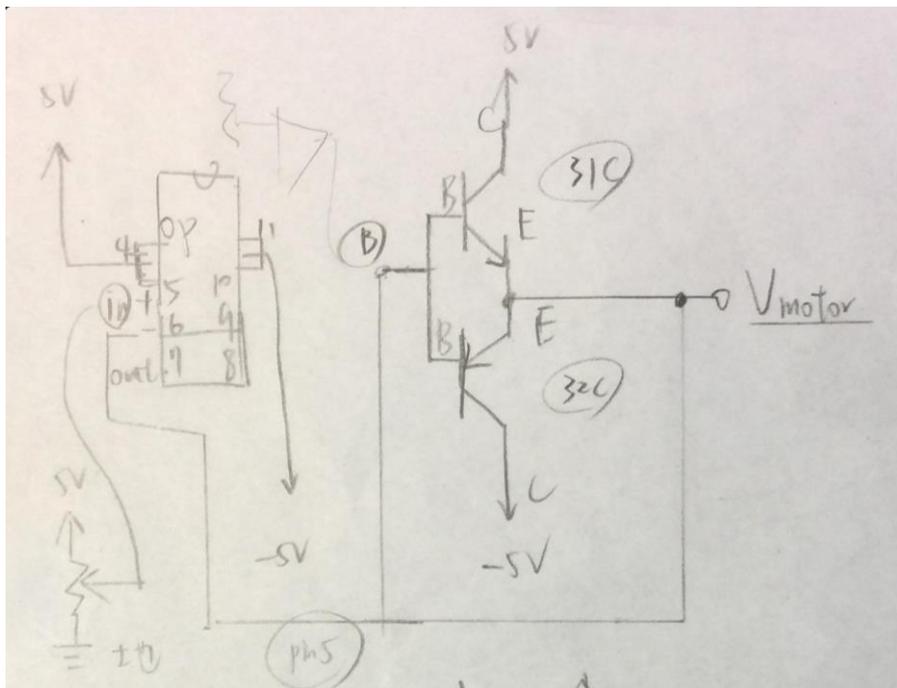
然後根據 datasheet 的接法，接上這個電路。

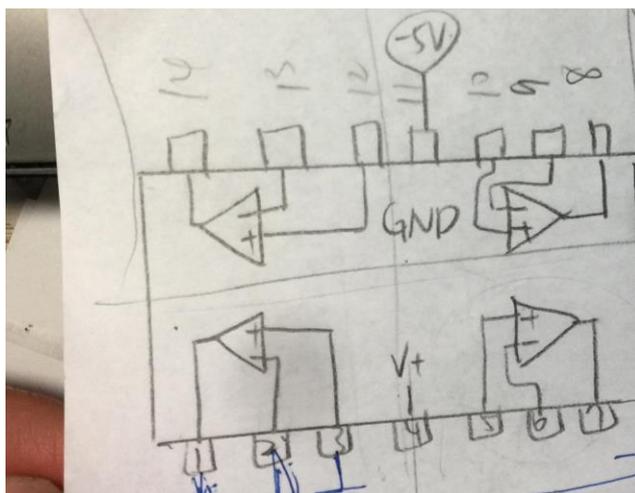
LM2907 最值得講的地方，就是第 9、11、12 接可變電阻的地方。因為這個 IC 裡面有 Hysteresis Comparator，助教讓我們自己上網查相關資料，我雖然還是沒有完全掌握，不過大概知道他的電壓必須調到在某個區間，才

能正常運作。因此可變電阻的調整相當重要，我們原本也是用常見的扭轉型可變電阻，後來發現那個不適合拿來接麵包板，常常有接觸不良的問題。因此改成用螺絲起子轉的那種，範圍是 20KOhm 大小。



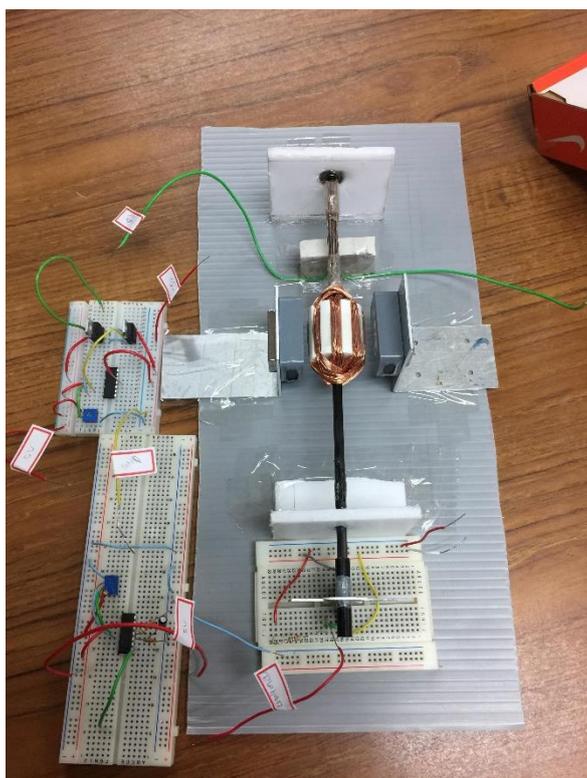
再來就是驅動電路的部分，下面附上參考電路圖後我手繪的圖型(方便自己理解接線)

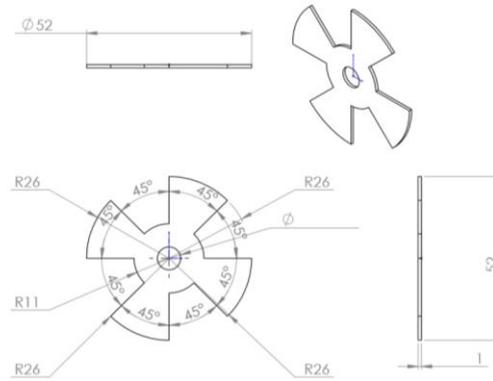
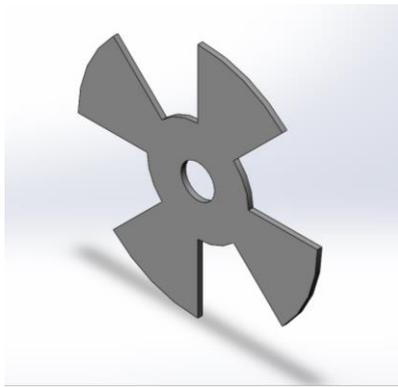




主要利用 LM324 本身有四顆 OP，我們這次只用了一顆。搭配兩顆 BJT，達到驅動電路效果。一樣藥用一個可變電阻。這次要看到的效果是：馬達要能夠隨可變電阻大小而調整速度旋轉。BJT 的目的除了放大 LM324 過來的電壓外，也接受從馬達回沖的電流。

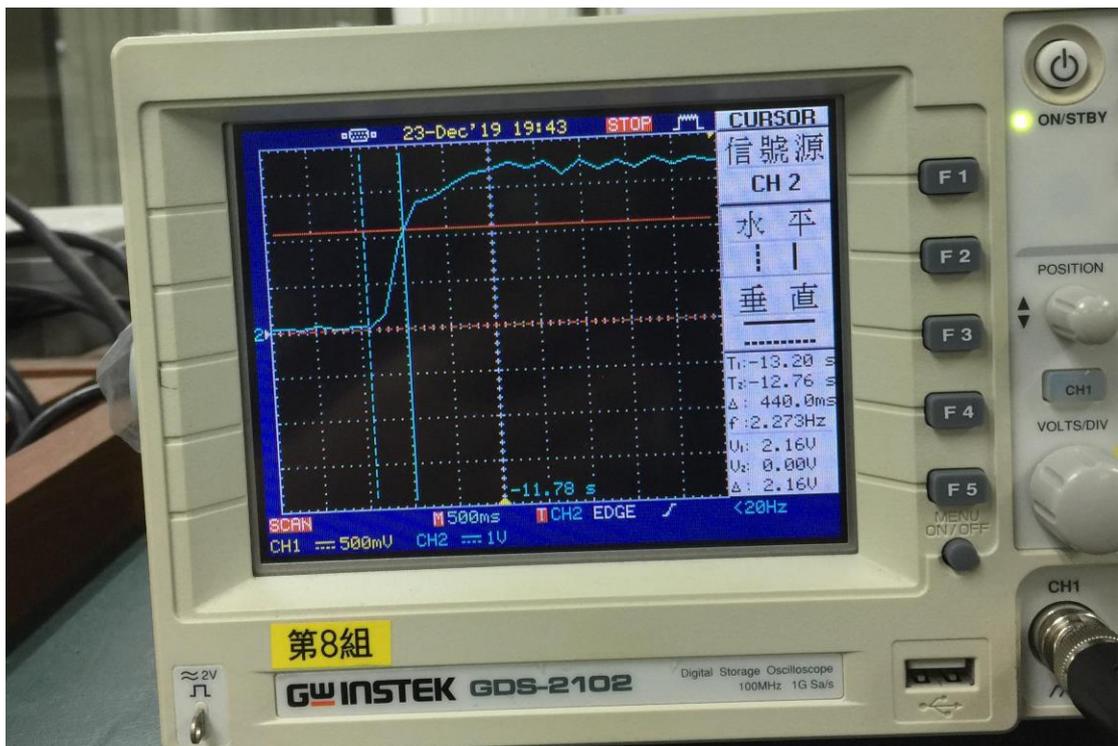
另外葉片部份我們也自己畫 CAD，送鋁片雷切加工，然後轉軸部分放置軸承，減少轉動摩擦力。





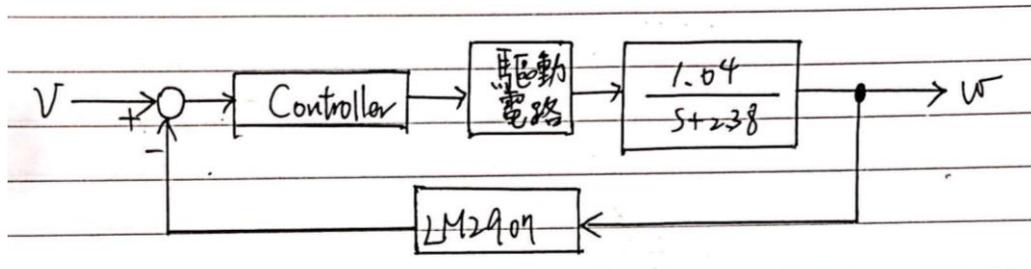
三、設計控制器

最後一步也是最重要的任務，就是控一這門課的精隨——設計控制器。這次老師的要求是做出 P control 還有 PI control，第一步我們要找出馬達的 transfer function。



利用給一個 step，看馬達的響應，藉由找出 63% 的值，可推出時間常數，以及利用助教給的公式可求出我們的 transfer function: $1.04 / (s+2.38)$

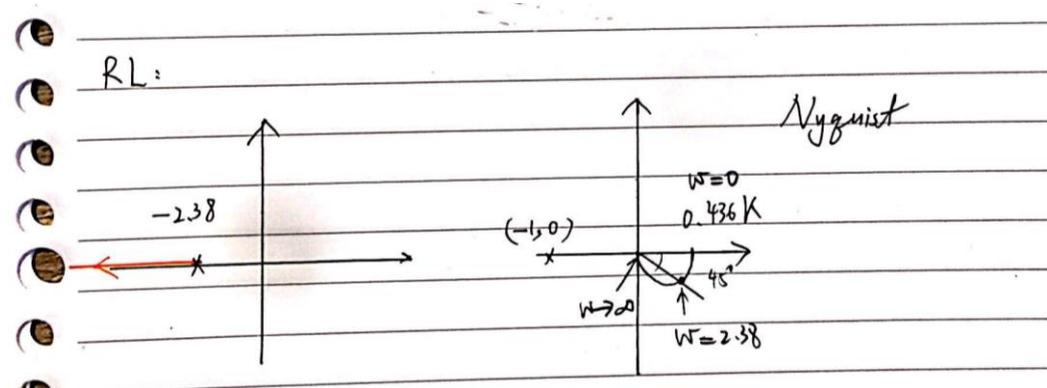
接著畫出簡易的回授圖：



明顯的馬達控制轉速，是一階的 transfer function，畫出 Root Locus 跟 Nyquist Plot，可知道：

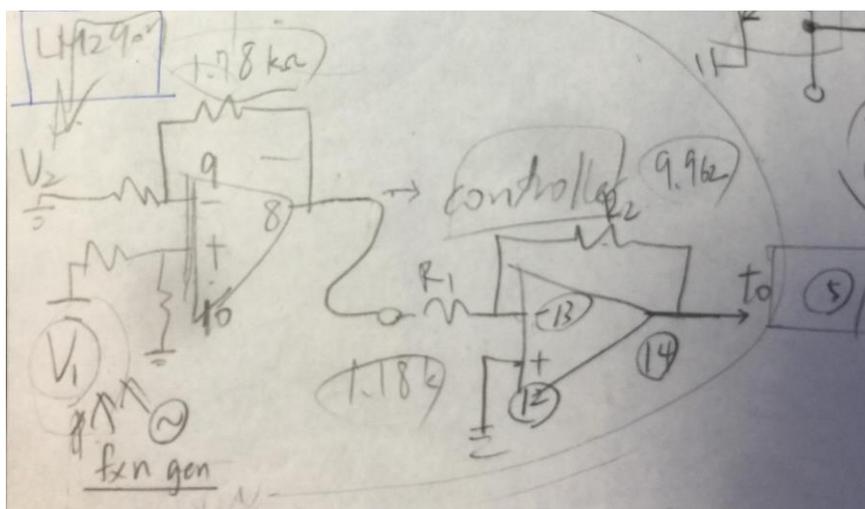
馬達的 Gain Margin 無窮大(無論 gain 調多大都穩定)

這是理論上，實際上太高頻的若 $gain > 1$ 可能會受雜訊的影響。

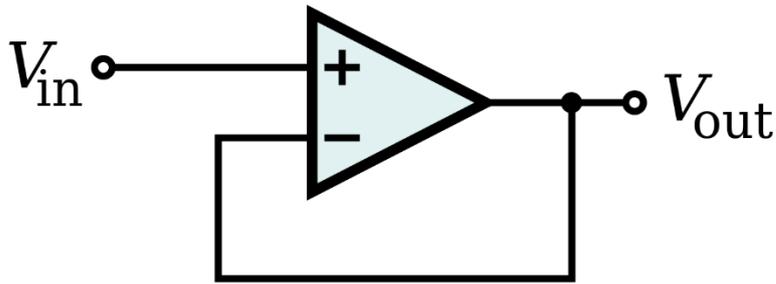


因此 p control 的部分，我們初步挑選 Gain 等於 10，挑了 R1 約等於 1K Ohm，R2 約 10K Ohm。(實際上約 1.18K 和 9.96k，比 10 小一點點)

另外我們也做了減法器，為了讓輸入減輸出得到誤差。電路圖如下：



要注意的一點是：減法器成立的條件是： $V_1 = V_2$ 也就是沒有 Loading effect，所以我們要在從 LM2907 輸入到上圖 V2 的地方加個 buffer，避免 loading effect。Buffer 電路圖如下：



LM324 共有四顆 OP，我們全部用完了。分別為：

- (1)送回受訊號的 Buffer
- (2)減法器產生 error
- (3)P gain 放大器
- (4)LM324 驅動器

這次實驗花最多時間是在調整 function generator。因為我們不知道電壓不能低於回授訊號，否則會產生 positive feedback 然後發散。花了一個多小時檢查電路有沒有錯，還有 V offset 的地方，原來要乘以 2 才是真正 dc 位準偏移。我們很幸運的做出 P control。

接著考慮 PI control，電路圖如下：

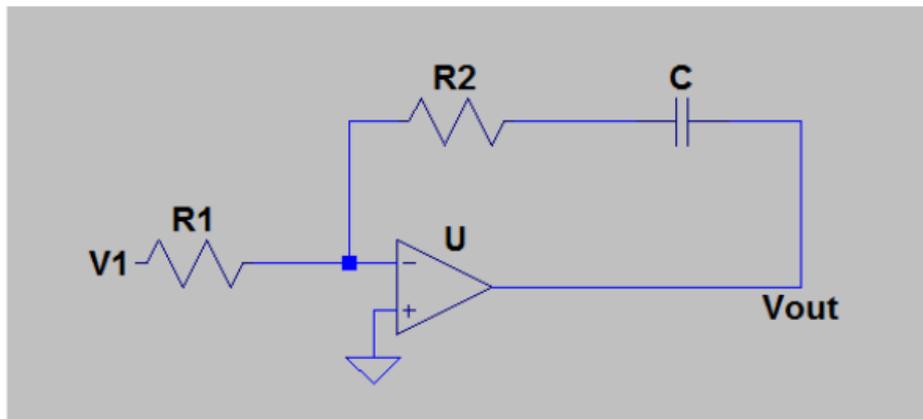


Fig. 2. PI controller circuit.

基本上就是多階一個電容。我們用 Bode plot 看，因為 PI control 加了一個積分器，system type 提高 1，所以追 step 穩態誤差要是 0。但因為在原點加了一個 pole，初始斜率也變大，我們必須設計 KI/KP 來盡可能讓 gain cross-over frequency 的斜率是 -1，才會有最佳的 Phase Margin。首先挑了 C 約 20 microF。效果不佳，後來嘗試大一點的電容，約 100microF，終於成功了！真的非常感動，因為那是 12/30 的凌晨一點

呀……。

心得：透過這次實驗，學會自己去看 datasheet，自己兜出電路，因為我沒有修過電子電路實驗，對於很多儀器都相當不熟悉，因次初始滿痛苦的。但透過不斷的努力，查資料，讀 paper，問助教同學，一步一步做出來，也不斷思考失敗的原因，電路隱含的意義，以及預期成效與實際結果的差異。這種不停的思考，並透過實作來幫助理解，真的收穫滿滿。非常謝謝老師精心設計這個專題，還有助教們辛苦陪伴我們無數個夜晚…。相信這個研究的態度與精神，在未來會不停的伴隨我們，持續受用一生。也透過這個專題，更了解控制系統到底在做甚麼，核心概念是甚麼。當然這只是一個最簡單的一階系統。如果今天是一個高階很複雜、非線性的系統，我們是否也有能力一步一步解決問題呢？最後再次謝謝老師和助教們，期待控制系統二也能夠收穫滿滿，提升自己的實力。

