

腕帶式 Real-time based 血管特性量測儀之設計

2022/03/28 開始設計

2022/04/30 完成設計

2022/11/26 完成修改

一、血管負載解耦技術(VLDT)

Real-time based 血管特性量測儀是依據工布設計有限公司申請的專利：血管負載解耦技術(*Vascular Loading Decoupling Technique, VLDT*)而設計的量測裝置。VLDT 是一種創新的、非侵入性的量測技術，可以由皮表量測橈動脈管內之真實連續血壓及動態血管順應性。

其原理主要是將橈動脈血壓分成直流壓力及交流壓力兩部分，然後控制致動器的直流位移，來維持皮表量測所得之直流壓力等於血管內脈壓之直流壓力。這個位置，稱為臨界深度，這時由皮表所量測之阻抗為血管以外周圍組織的阻抗，不含血管的阻抗。換言之，血管之周圍組織與血管呈現解耦的狀況；當致動器的直流位置，維持在臨界深度時，同時控制致動器的交流移動追蹤脈壓的交流壓力，以維持皮表量測的壓力僅為脈壓的直流壓力，沒有交流壓力如圖 1.1。這時橈動脈的運動是解耦的，也就是說，橈動脈呈現單獨運動時，其周圍組織以剛性的行為運動。換言之，皮表所得之交變位移就是橈動脈單獨脈動時的血管管徑變化。但是也因此失去了交流壓力，無法獲得血管內的連續血壓。為了克服此問題，我們以自適應控制法則及 Step-Hold 的控制手法來達成量測橈動脈管內連續血壓及動態血管順應性。在 Hold 階段，以樣條曲線擬合技術(Spline Curve Fitting)估測交流控制所需的參考壓力，計算血管的阻抗，決定控制增益；然後在 Step 階段追蹤交流壓力，量測血管管徑之位移，計算血管內之血壓；再進入 Hold-Step 等階段如圖 1.2 所示，重覆運作即可獲得連續血壓及動態順應性。

為了簡化血管特性量測儀的製作，使用一個致動器、一個位移感測器及一個壓力感測器，因此 Real-time based 血管特性量測儀的操作步驟如下：

【步驟一】進行壓振法，紀錄脈壓與位置之關係，搜尋臨界位置，並建立直

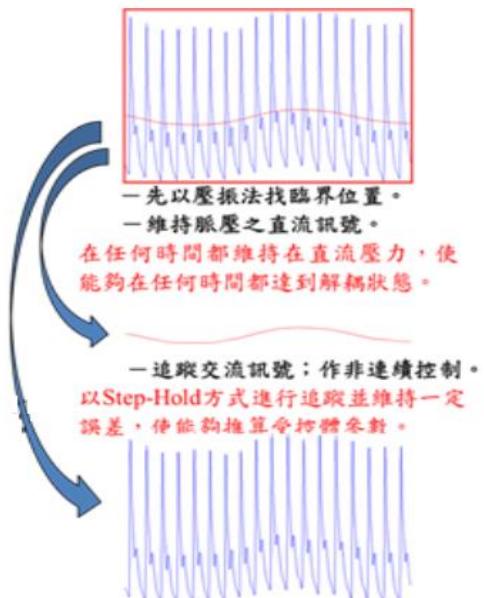


圖 1.1 血管特性量測儀的解耦理論

流壓力與位置之數學關係式。

【步驟二】 感測頭下壓到臨界深度並停留在臨界深度數秒鐘，估測直流壓力且觀察交流壓力的變化。

【步驟三】 在舒張壓段且交流血壓過零時啟動血管特性量測的程序：

- ◎ 在直流控制部分，以連續自適性控制法則，維持血管的脈動在臨界位置上。採用動態平均值法則或 EMD 法則估測新的平均壓力，藉由直流壓力與位置之數學關係式，得到新的臨界位置及周圍組織之阻抗，使能夠在任何時間都保持在臨界條件。
- ◎ 在交流控制部分，以估測參考壓力、識別血管特性及追蹤交變血壓等步驟進行一連串的 Step-Hold 控制循環。

【Hold-1】採用樣條曲線擬合技術估測參考壓力。

【Hold-2】識別並聯阻抗及計算血管阻抗。

【Hold-3】計算直流及交流控制增益。

【Step-1】追蹤交流壓力及維持直流壓力。

【Step-2】從位移感測信號扣除臨界位置，量取交流位移。

【Step-3】計算血管連續血壓。

【重覆 Hold-Step 步驟】。

【步驟四】 識別橈動脈動態順應性 C_3 。

圖 1.2 中所示之 $170 \mu\text{m}$ 為最大位移量之示意，實際情況則是每一步都是變化的。

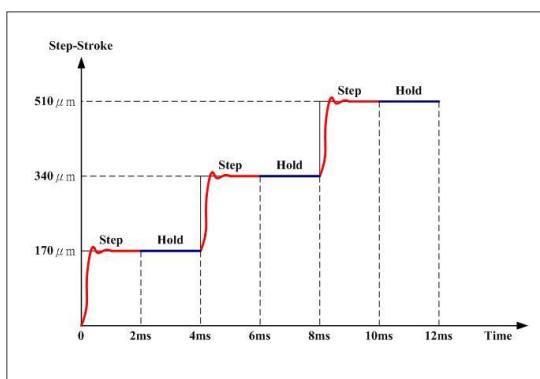


圖 1.2 致動器交流位移的 Step-Hold 控制示意圖

二、腕帶式致動機構之結構與工程規範

1 結構考量

因此根據 VLDT 的操作原理，腕帶式 Real-time based 血管特性量測儀的感測頭 (Detection Head) 需要有一組致動器及其驅動單元、一組位移感測器及其信號調適器、一組壓力感測器及其信號調適器以及控制單元；並且還需要一組 500Hz 頻率的鎖定裝置，以確保 Step-Hold 控制之運行(暫時先不設計)。

壓力感測器的使用要引用壓張計(Tonometer)的原理，因此需要一個 8 mm 直徑的壓力接觸器，中間置放一組直徑 1 mm 的壓力感測器，長度為 15 mm。位移感測器採用 Potentialmeter，其行程為 7 mm，長度為 10mm，直徑 2.3 mm。因為空間及精度要求，將 LVDT 位移感測器動軸的兩端分別連結致動器的動軸，以感測致動器的位移，另一端則連結壓力接觸器，以量測血管的血壓。

基本上先應用壓振法，啟動致動器，紀錄脈壓與位置的關係，搜尋臨界位置如圖 2.1~2.2 所示。然後用同樣的致動器，在臨界位置上做交流動作，以維持壓力感測器壓力在平均脈壓(MBP)。至於平均脈壓有所變動時，可以採取軟體計算動態平均脈壓，再用脈壓-位置圖，調整致動器的臨界位置，同時也執行交流追蹤控制，如此可以減少 Z 軸致動器及位置感測器，以實現腕帶式血管特性量測儀之設計。

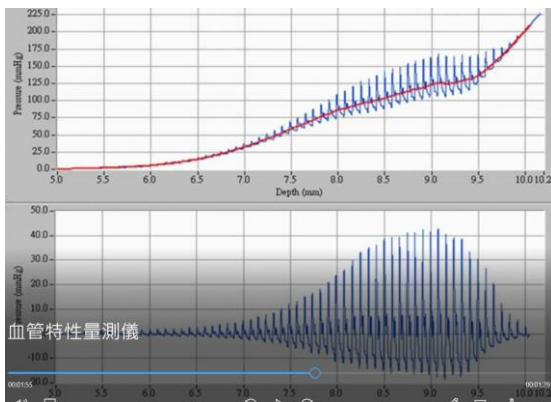


圖 2.1 壓振法之平均血壓與交流血壓之量測

圖 2.1 及圖 2.2 說明壓振法之量測過程：(a)將壓力感測頭下壓血管至 8 mm(沒有振幅的位置)，(b)計算平均血壓(Mean Blood Presssure，MBP)如圖 2.2 上圖紅線部分，(c)建立平均血壓與位移關係式。(d)將壓力感測頭量測之血壓扣除平均血壓，獲得圖 2.1 下圖之交流血壓。

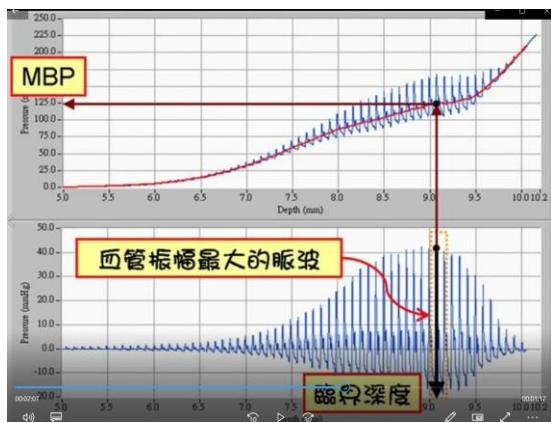


圖 2.2 壓振法取得臨界位置及平均血壓之方法

(e)從交流血壓圖中搜尋血管振幅最大的脈波，找出臨界位置及其平均血壓(MDP)如圖 2.2，(d)將感測頭下壓至臨界位置，再進行交流致動的 Step-Hold 控制以維持平均血壓的不變。

由於前段壓振法是以緩慢的速度下壓，約 30~50 秒下壓 10 mm，其加速度遠低於交流致動控制的加速度 178 mm/s^2 ，以 300 mmHg 作用於直徑 8 mm 的壓力接觸面，所需的最大力量約為 0.8 N ，低於交流追蹤控制所需之推力約 $5\sim8 \text{ N}$ ，因此下列只要考慮交流致動部份的設計即可。

2 工程規範

Detection Head

Size: $37 \times 28.4 \times 6.4 \text{ mm}$ with flexible cylinder contact head

Moving axis:

1. *Travel range:* = 7 mm

2. *Transient response:*

Step Stroke $\geq 170 \mu\text{m}$ @ 500 Hz ;

Settle Time $\leq 2\text{ms}$ @ 500 Hz

3. *External load:* $\leq 10 \text{ g}$ ($\leq 1.02 \text{ N}$)

4. *Control Type :* Pressure control & Step-Hold Position Control

Pressure contact & pressure sensor

1. *Pressure contact:* $8 \times 5 \text{ mm}$ (outside); *sensing:* $\varphi 1 \text{ mm}$ (inside)

2. *Pressure sensor(tonometer)*

Pressure Range : $0 \sim 300 \text{ mmHg}$

Proof Pressure : 500 mmHg

Accuracy : $\pm 1 \text{ mmHg}$

Frequency Response : 1000 Hz

Position sensor

1. *Position sensor*

2. *Stroke range:* = 7 mm

3. *Accuracy:* $2 \mu\text{m}$

4. *Resolution:* $\pm 0.1 \mu\text{m}$

三、結構設計考量及步驟

3.1 音圈馬達致動器之結構

由於交流致動器設計的重點在於快速(在 2 ms 內位移 $170 \mu\text{m}$)及長行程($\geq 10 \text{ mm}$)，一般壓電致動器均無法滿足這些需求，但音圈馬達(Voice Coil Motor)致動器具有長行程及快速反應的特性，是比較合適的選擇。線性音圈馬達將採用

$Nd_2Fe_{14}B$ 類的永久磁鐵，可以獲得比較良好的剩磁或矯磁力的 BH 曲線。

截至目前為止，相關的設計規範訂定如下：

Travel range=7 mm

Step Stroke $\geq 170 \mu\text{m}$ @ 500 Hz;

Settle Time $\leq 2\text{ms}$ @ 500 Hz

External load+Mass of moving part of actuator $\leq 10 \text{ g}$

Device size $< 37 \times 28.8 \times 5.8 \text{ mm}$

扁平動軸式結構

異於往常動軸式音圈馬達，採用兩段線圈如圖 3.1 所示。兩段線圈的電流方向相反，其目的在於兩組線圈流過電流所產生的感應磁場互相消磁，如此可以獲得極小的電感，可以降低電氣時間常數，以符合規格快速反應之要求。為減輕動軸的重量，動軸為薄板鐵心 2.0 mm 厚的方塊，使用 4 組迴路 8 個凹型永久磁鐵，置於內外層形成閉合磁路；並將纏繞好的線圈固定於永久磁鐵之 8 個缺口上。線圈中間通過動軸。動軸與定部之間的氣隙設定為 0.20 mm，有 8 處。動軸之支撐可固定於兩側，或中間之永久磁鐵空白處，3 mm 寬，相關的尺寸設計如下：

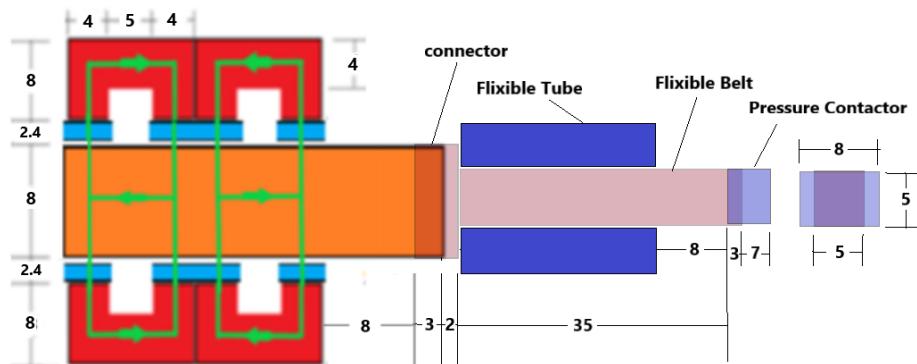


圖 3.1 厚度 1.0 mm 扁平動軸式感測頭剖面及磁路圖

由於設計規範長度須小於 37 mm，設定線圈切割磁力線的長度為 $L_c = 4 \times 4 = 16 \text{ mm}$ 。由於寬度須小於 28.8 mm，每個迴路上下兩組凹型永久磁鐵(紅色)的寬度取 4.0 mm，長度為 13 mm，深度為 1.0 mm，永久磁鐵與線圈結合形成定部，定部與動軸的間隙設為 0.2 mm，則線圈之高度約為 $8 + 2.2 \times 2 + 0.2 \times 2 = 12.8 \text{ mm}$ ，與 $8 + 0.2 \times 2 = 8.4 \text{ mm}$ 之間；中間段線圈寬度設為 0.5+8+0.5=9 mm，兩側線圈寬度設為 0.5+4+0.5=5 mm，以減少缺口漏磁；兩處中間分別有 4 mm 的空白處，可以作為支撐動軸滑動之支撐點。由於預留 7 mm 的行程，連接長度 3 mm，及裕度 1 mm。因此動軸長度約為 $(4+5+4) \times 2 + 7 + 1 + 3 = 37 \text{ mm}$ 。動軸透過連結器，連結橈性帶及壓力感觸頭，橈性帶滑動於橈性套筒，壓力感觸器為一方型 8x5 mm 接觸面，

中間放置直徑 1 mm 的壓力晶片，如圖所示，位移感測器則置於底部或側部，與動軸並聯。整組結構尺寸約束於 90x33x12 mm 之內。

3.2 致動器之設計

致動器的設計是血管特性量測儀重要的關鍵技術之一，它需要具有快速反應(在 2 ms 內位移 170 μm)及長行程($\geq 7 mm$)的特性，更重要的是，它要在 Step 階段具有快速的暫態反應，如圖 1.1 所示，非一般控制系統所強調的穩態響應。因此當線性音圈馬達的架構決定後，設計的流程將配合需求，建立合宜的馬達模式，其次決定運動輪廓(Motion Profile)來計算推力及速度；再來選擇適當的永久磁鐵，決定所需之驅動電流及電壓。如果不適合設計規範，則修改尺寸及磁路。

3.2.1 致動器電路模式

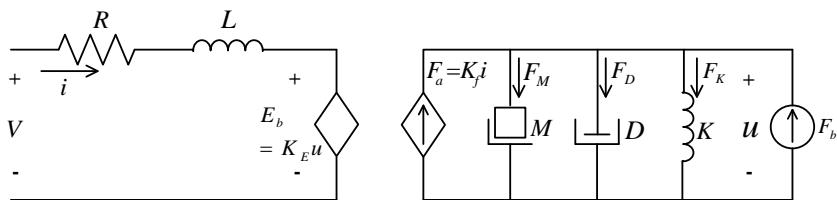


圖 3.2 線性馬達的電路模式

圖 3.2 為一般線性馬達電路模式的通式。由於是追蹤交流壓力，是隨壓力的大小移動，負載端的交流壓力是一種助力，非阻力，但在每一 Step 階級，其力量是不大的，可以忽略，另外在 Hold 階級，參考壓力有累積，有彈性的現象，因在靜止狀況，其彈性力不大，且在 Step 階級時，其彈性力有助於交流的位移，因此在 Step 階級，只要考慮質量、摩擦力及在臨界位置的平均壓力，約 110 mmH，在 8x5 mm 的接觸面，產生的力量為 $F_{mbp} = 0.014665 \times 8 \times 5 = 0.587 N$ 。這時圖 3.1 的電路模式將可簡化如圖 3.3。

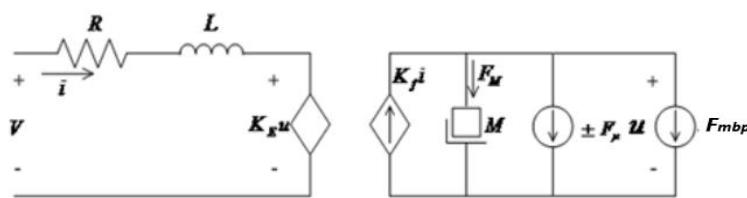


圖 3.3 簡化後之致動器電路模式

公式如下：

$$M \frac{du}{dt} + F_\mu + F_{mbp} = F_a = K_f i \quad (3.1)$$

$$L \frac{di}{dt} + Ri + K_E u = v \quad (3.2)$$

3.2.2 Step-Hold 階段的運動輪廓

截至目前為止，相關的設計規範訂定如下：

Travel range=7 mm

Step Stroke $\geq 170 \mu m$ @ 500 Hz;

Settle Time $\leq 2 ms$ @ 500 Hz

External load+Mass of moving part of actuator $\leq 10 g$

Device size < 37x28.8x5.8 mm

Sliding friction $\approx 0.003 N$

根據圖 1.1 之 Step-Hold 控制法則，W 軸的運動循環(Motion Cycle)如圖 3.4，以最高移動距離的狀況，我們可獲得速度輪廓(Velocity Profile)的速度 $U=142 mm/s$ 。其推導如下：

$$\begin{aligned} S = \int_0^2 u dt &= \frac{1}{2} U \times 0.8 + U \times 0.4 + \frac{1}{2} U \times 0.8 = 1.2U = 170 \mu m \\ \Rightarrow U &= \frac{S}{1.2} = \frac{170}{1.2} = 142 mm/s \end{aligned} \quad (3.3a)$$

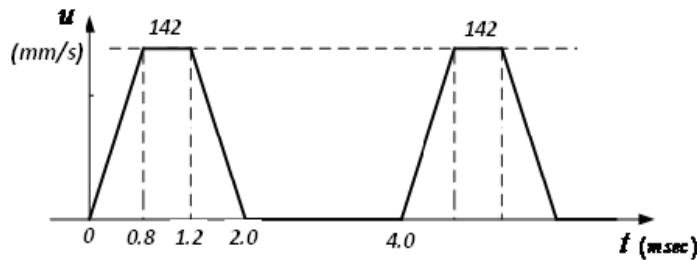


圖 3.4 致動器之速度輪廓圖

圖 3.4 顯示最大速度為 $u_{max}=142 mm/s$ ，而有效速度為 $u_{rms}=56.8 mm/s$ ，(實際有效速度約為 $19 mm/s$)，計算如下：

$$\begin{aligned} u_{rms} &= \frac{71 \times 0.8 + 142 \times 0.4 + 71 \times 0.8}{0.8 + 0.4 + 0.8 + 2} \\ &= 56.8 mm/s \end{aligned} \quad (3.3b)$$

接著依據圖 3.4 的速度輪廓及公式(3.1)可以計算相對的推力輪廓(Force Profile)如圖 3.5。各段需求之推力計算如下：

1. 加速段($0 \leq t \leq 0.8 ms$)

$$\begin{aligned} F_1 &= M \frac{du}{dt} + F_\mu + F_{mbp} \\ &= 0.010(0.00444) \times \frac{142}{0.8} + 0.003 + 0.587 = 2.37(1.38) N \end{aligned} \quad (3.4)$$

2. 等速段($0.8 \leq t \leq 1.2 \text{ ms}$)

$$F_2 = F_\mu + F_{mbp} = 0.003 + 0.587 = 0.59 \text{ N} \quad (3.5)$$

3. 減速段($1.2 \leq t \leq 2 \text{ ms}$)

$$\begin{aligned} F_3 &= M \frac{du}{dt} + F_\mu + F_{mbp} \\ &= 0.010(0.00444) \times \frac{-142}{0.8} + 0.003 + 0.587 = -1.19(-0.20) \text{ N} \end{aligned} \quad (3.6)$$

4. 等速段($2 \leq t \leq 4 \text{ ms}$)

$$F_4 = F_{mbp} = 0.587 \text{ N} \quad (3.7)$$

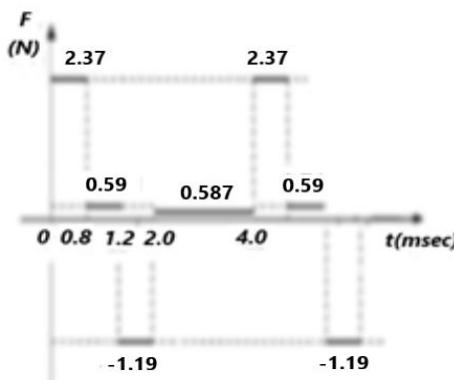


圖 3.5 負荷為 10 g 之致動器推力輪廓圖

由圖 3.5 可以得知最大推力為 **2.37N**，並可計算有效推力 F_{rms} 為

$$\begin{aligned} F_{rms} &= \sqrt{\frac{2.37(1.38)^2 \times 0.8 + 0.59^2 \times 0.4 + 1.19(0.54)^2 \times 0.8 + 0.587^2 \times 2}{0.8 + 0.4 + 0.8 + 2}} \\ &= \mathbf{1.27(0.60) N} \end{aligned} \quad (3.8)$$

為安全考量，我們設定致動器最大推力為 **2.37(1.38) N**，選擇 $F_{max}=2.37(1.38) \text{ N}$ ；有效推力為 **1.27(0.60) N**，選擇 $F_{rms}=0.42(0.27) \text{ N}$ 。事實上上述之最大推力及有效推力均比實際值為小，原因是採用最大位移的假設計算得知之實際位移都隨脈壓有變化，只在射血時才有最大之位移，選擇 1/3 的有效推力。

因此相關的設計規範修正增加為

Travel range=7 mm

Step Stroke $\geq 170 \mu\text{m}$ @ 500 Hz;

Settle Time $\leq 2\text{ms}$ @ 500 Hz

External load & Mass of moving part of W-axis actuator $\leq 10 \text{ g}$

Device size <37x28.8x5.8 mm

Sliding friction ≈ 0.003N

Maximum velocity=142 mm/s

Average velocity=56.8 mm/s(19 mm/s)

Maximum applied force=2.37(1.38) N

Applied RMS force=0.42(0.27) N

3.2.3 決定驅動電流及電壓

前段的推導決定了致動器機械部分所需之推力及速度，再來就要決定所電路部分的電壓及電流。由公式(3.1)中所需之有效電流 i_{rms} 可由下列公式求得

$$i_{rms} = \frac{F_{rms}}{K_f} \quad (3.9a)$$

公式(3.9a)說明需要先決定機械常數 K_f 。若為扁平式致動器，其關係為

$$K_f = 2NBL_c \quad (3.9b)$$

這裏有許多設計的考慮，原則上我們希望在操作範圍，磁通密度 B 不要有太大的變化，因此選擇永久磁鐵時，其 BH 曲線要如圖 3.6 般的肥胖。

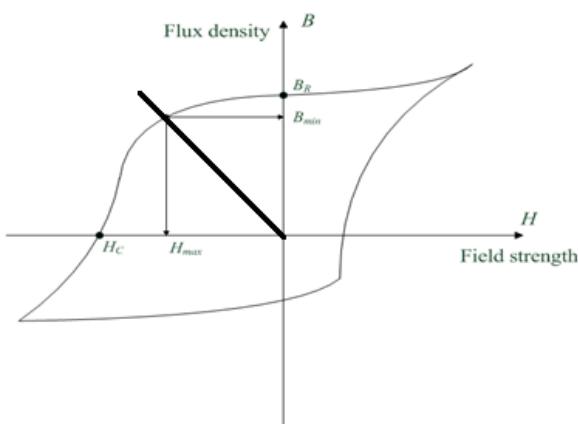


圖 3.6 永久磁鐵之 BH 曲線

從圖 3.6 可以以 B 的變化最小來設定 H_{max} 及 B_{min} 。公式(3.9b)中的 B 就可以代入 B_{min} ；根據亞洲磁材(Asia Magnets Co.)燒結釹鐵硼磁材等級 N54 如下表：

燒結釹鐵硼性能等級表 Sintered NdFeB Magnetic Properties

類別 Item	牌號 Grade	剩磁 Remanence(Br)		剩磁矯頑力 (Hcb)		內秉矯頑力 (Hcj)		最大磁能積 (BH)max		工作溫度 Temperature L/D≥0.5(°C)
		kGs	T	kOe	kA/m	kOe	kA/m	MGOe	KJ/m³	
	N54	14.5-15.0	1.45-1.50	≥11.0	≥876	≥11	≥876	52-55	414-438	≤70
	N52	14.3-14.8	1.43-1.48	≥11.0	≥876	≥11	≥876	50-53	398-422	≤80
	N50	14.0-14.5	1.40-1.45	≥12.0	≥955	≥11	≥876	48-51	382-406	≤80
	N48	13.8-14.2	1.38-1.42	≥11.6	≥923	≥12	≥955	46-49	366-390	≤80
	52M	14.3-14.8	1.43-1.48	≥13.1	≥1043	≥14	≥1114	50-53	398-422	≤100
	50M	14.0-14.5	1.40-1.45	≥13.0	≥1033	≥14	≥1114	48-51	382-406	≤100
	48M	13.7-14.3	1.37-1.43	≥12.9	≥1027	≥14	≥1114	46-49	366-390	≤100

$$N54 \quad B_{max}=15.0 \text{ KGs}, B_{min}=14.5 \text{ KGs}$$

$$Hcb \geq 11 \text{ KOe}; Hcj=11 \text{ KOe}$$

$$BH_{max}=55 \text{ MGoe}; BH_{min}=52 \text{ MGoe}$$

根據上述之規格，燒結釤鐵硼磁材等級 N54 的 B-H 特性曲線可以表示如圖 3.6。

依單位轉換公式： $1 \text{ T} = 10^4 \text{ Gs}$ ； $1 \text{ A-t/m} = 4\pi \times 10^{-3} \text{ Oe}$ 。若負載磁通密度為 $B_{min}=1.45 \text{ T}$ ，永久磁鐵的最大的磁場強度為 $H_{max}=(52/14.5)/(4\pi) \times 10^3 = 285 \text{ A-t/mm}$ 。

其次假設流過線圈的有效電流為 $i_{rms}=0.10 \text{ A}$ ，依公式(3.9a)得 $K_f=4.2 \text{ N/A}$ 如下：

$$K_f = \frac{F_{rms}}{i_{rms}} = \frac{0.42}{0.10} = 4.2$$

設定線圈切割磁力線的深度為 $L_c=16 \text{ mm}$ ，再依公式(3.14)及通過的有效磁通密度， $B=1.45 \text{ T}$ ¹，可計算出所需之纏繞圈數 $N=91$ 。

$$N = \frac{K_f}{2BL_c} = \frac{4.2}{2 \times 1.45 \times 16 \times 10^{-3}} \approx 91$$

選擇 $N=91 \times 1.1=100 \text{ turns}$ ，取 200 turns。

依據漆包線線徑的選擇及電流密度範圍 $\rho \doteq 5 \sim 11 \text{ A/mm}^2$ ，設定電流密度為 $\rho=9$ ，依公式(3.10)，可得扁平線圈面積 $A_w \doteq 0.089 \text{ mm}^2$ 。

$$\rho = \frac{i_{max}}{A_w} \approx 9 \Rightarrow A_w = \frac{i_{max}}{\rho} = \frac{0.8}{9} \approx 0.089 \text{ mm}^2 \quad (3.10)$$

依據太平洋電線電纜公司之扁平漆包線規格如下表：

尺寸規格表																					
單位:mm	導體寬度	0.70	0.80	1.00	1.20	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.20	寬度(單側)
導體厚度	導體公差	± 0.05																	Min.漆膜厚度		
0.07																					
0.08																					
0.09																					
0.10																					
0.15																					

選取扁平線 $1.0 \pm 0.05 \times 0.1 \pm 0.01 \text{ mm} = 0.10 \text{ mm}^2 > 0.089 \text{ mm}^2$

OK!

由圖 3.1 觀之，實際有二組線圈，兩側線圈與中間線圈通的電流需相反，才能產生一致的推力，設定兩側線圈上方通過磁力線的長度為 $4+0.5 \times 2=5 \text{ mm}$ ，中間線圈的長度為 $8+0.5 \times 2=9 \text{ mm}$ ，因此 2 段線圈總長為 $9+5 \times 2=19 \text{ mm}$ 。因此每段線圈採用 22 層繞線，每層需繞 19 圈，2 段總長度約為 $1.0 \times 19=19 \text{ mm}$ ；總高約 $0.1 \times 22=2.2 \text{ mm}$ 。並將兩段線圈固定於永久磁鐵的缺口上，如此則有作用的線圈有 $22 \times 16=352 \text{ turns} > 200 \text{ turns}$ OK!

¹沒有考慮漏磁、磁力消耗的問題。

採用亞洲磁材(Asia Magnets Co.)燒結釤鐵硼磁材等級 N54，凹型具方向性之永久磁鐵，兩組分別置於上下外層；由於氣隙之深度為 **0.2 mm**。左上半磁迴路的氣隙及線圈共 2 處共為 **(2.2+0.2)×2=4.8 mm**。所需的磁動勢如下列公式：

$$H_o l_o = \frac{B_{min}}{\mu_0} l_o = \frac{1.45}{4\pi \times 10^{-7}} \times 4.8 \times 10^{-3} = 5539 A - t$$

帶入公式(3.16)，可求得永久磁鐵所需之長度為 $l_{pm}=5539/285=19.43 \text{ mm}$ 。
左上半磁迴路之永久磁鐵長 **21 mm>19.43 mm** **OK!**

由圖 3.1 的磁力線迴路圖，可以分為上下左右對稱的迴路，因為路線通過的面積為均為 **4×1.0 mm**，若通過的磁通密度為 **$B_{pm}=1.45 T$** ，則氣隙及鐵心通過的磁通密度均為 **$B_a=B_{co}=1.45 T$** 。

假設上下組凹型永久磁鐵的間距為 **4+2.2=6.2 mm**，中間為 **5 mm** 間距。相關線圈、永久磁鐵及鐵心的尺寸可以得知如下：

動軸尺寸

方形動軸 **37×8×1 mm**

橈性帶連結塊 **5×8×5-3×8×1 mm**

橈性帶扁平形 **38×8×5 mm**

壓力感測頭 方形 **10×8×5-3×5×5 mm**

線圈尺寸

方形線圈的尺寸，兩側：**10×12.8×5.8-10×8.4×1.4 mm**

中間：**9×12.8×5.8-9×8.4×1.4 mm**

永久磁鐵尺寸

上下左右層的凹型永久磁鐵尺寸分別為 **13×8×1-5×4×1 mm**。

外型尺寸

整體音圈馬達的外型尺寸(含上下氣隙為 0.2 mm)**37×28.8×5.8 mm** **OK!**

Check-動軸機構的重量是否合宜？

動軸為鐵心，鐵心的密度約為 $\rho_{co}=7.85 \text{ g/cm}^3$ ，鐵心的體積 $V_{co}=37\times8\times1\times10^{-3}=0.296 \text{ cm}^3$ ，重量為 $W_{cu}=2.32 \text{ g}$ ；連結、橈性帶及接觸頭之材質為 PEEK，密度為 $\rho_{peek}=1.32 \text{ g/cm}^3$ ，連結塊的體積 $V_c=(5\times8\times5-3\times8\times1)\times10^{-3}=0.176 \text{ cm}^3$ ，橈性帶的體積 $V_b=38\times5\times5\times10^{-3}=0.95 \text{ cm}^3$ ，接觸頭體積為 $V_p=(10\times8\times5-3\times5\times5)\times10^{-3}=0.325 \text{ cm}^3$ ，總體機為 $V_{peek}=0.176+0.95+0.325=1.451 \text{ cm}^3$ ，重量為 $W_{peek}=1.92 \text{ g}$ ；預設位移感測器重量為 $W_{ps}=0.20 \text{ g}$ ；所以動軸總重 $W_{mv}=2.32+1.92+0.20=4.44 \text{ g}<10 \text{ g}$ **OK!**

◆ 再次深入檢查，依據公式(3.9)在實際 **22×16=352 turns** 圈下，實際的機

械常數 K_f 應為 $K_f=2\times 352\times 1.45\times 16\times 10^{-3}=16.33 > 4.2 N/A$ 。依據公式 (3.9a)，有效推力 $F_{rms}=16.33\times 0.1=1.633 N > 0.42 N$ 。 **OK!**

若是以實際的 $F_{rms}=0.42(0.27) N$ ，所需的電流 $i_{rms}=0.42(0.27)/16.33 \doteq 0.0257(0.0165) A$ ，選取 $i_{rms}=0.026(0.017) A < 0.1 A$ 。 **OK!**

- ◆ 依據公式(3.8)，在最大推力 $F_{max}=2.37(1.38) N$ 下，所需的最大電流為 $i_{max}=2.37(1.38)/16.33 \doteq 0.145(0.085) A < 0.8 A$ **OK!**
檢視電流密度 $0.145/0.10=1.45 < 8$ **OK!**

上下左右層：永久磁鐵的體積 $V_{pm}=(4\times 8\times 2+5\times 4)\times 1.0\times 4\times 10^{-3}=0.336 cm^3$ ，密度約為 $\rho_{pm}=8.4 g/cm^3$ ，重量為 $W_{pm} \doteq 2.82 g$ 。2 組線圈，銅的密度約為 $\rho_{cu}=8.94 g/cm^3$ ，線圈機構的體積 $V_{cu}=(12.8\times 5.8-8.4\times 1.4)\times 19\times 10^{-3}=1.187 cm^3$ ，重量為 $W_{cu}=10.61 g$ 。
因此定部總重量為 **13.43 g**；動部(含外部負載)重量為 **4.44 g**，共計 **17.87 g**。

Check-永久磁鐵之選擇是否適當？

如圖 3.1 之結構，其平均磁路分布表示，外層永久磁鐵所產生的磁通為 $\phi_{pm}=B_{min}\times A_{pm}=1.45\times 4\times 1\times 10^{-6}=0.0058 mW_b$ 。這磁通將流過在線圈及氣隙，造成磁動勢的消耗。這些消耗的磁動勢轉換為等效的供給的磁場強度 H_d 應小於永久磁鐵的 H_{pm} 。也就是

$$H_{pm}l_{pm} > H_a l_a + H_{co} l_{co} \quad (3.16)$$

其中下標為 pm 、 o 及 a 分別代表永久磁鐵、鐵心、線圈及氣隙之磁場強度或平均磁路徑。計算如下：

鐵心部分：

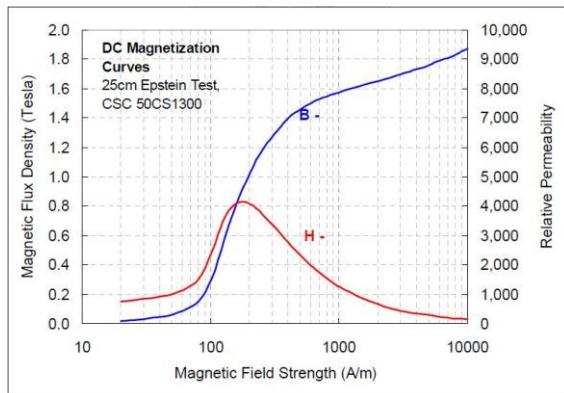


圖 3.7 50CS1300 直流充磁曲線

根據圖 3.7 鐵心材料 50CS1300 的直流 B-H 曲線， $B_I=1.45 T \rightarrow H_I \doteq 500 A-t/m$ ，而左上半迴路鐵心的平均磁路徑約 $l_I=9+2+2=13 mm$ 。鐵心部分所耗的總磁動勢為 $500\times 13\times 10^{-3} \doteq 6.5 A-t$ 。

氣隙及線圈部分：

上半磁迴路氣隙及線圈所需的磁動勢如下列公式：

$$H_o l_o = \frac{B_o}{\mu_o} l_o = \frac{1.45}{4\pi \times 10^{-7}} \times (2.2 + 0.2) \times 2 \times 10^{-3} = 5539 A - t$$

上半迴路所需的磁動勢為 $5539 + 6.5 = 5546 A - t$ 。帶入公式(3.16)，而永久磁鐵的磁動勢為 $285 \times 21 = 5985 A - t > 5546 A - t$ **OK!**

以圖 3.6 觀之，兩者平衡應該是永久磁鐵的 $H_{pm} \approx 275 A-t/m$ ， $B_{pm} \approx 1.450 T$ 。由此看來通過的氣隙及線圈的實際磁通密度應該接近 **1.45 T**。

Check-暫態響應是否合宜？

由於音圈馬達的設計在暫態響應方面的要求也是非常重要的。音圈馬達在線圈通電後，切割磁力線產生驅動力，而驅動力克服慣性及阻尼而產生移動，因此線圈的電阻與電感所組成的電氣常數 $\tau_e = L/R$ 及質量與阻尼構成的機械常數 $\tau_M = m/c$ 或是檢驗加速度， $F_{rms}/m > du/dt$ 都需要檢視是否合宜。

圖 3.1 採用雙線圈的重點是，兩個線圈通過的電流正好相反，因此電感值極小，可以忽略。

Check-加速度是否合宜？

一般而言，檢驗機械常數要在完成原型機製作後經實驗後得知，現在在設計階段，會採用加速度檢驗的方式。驗證計算如下：

$$a = \frac{F_{max}}{m_{mv}} = \frac{2.37 - 0.59}{0.00444} = 401 m/s^2 > \frac{U_{max}}{\Delta t} = \frac{142 \times 10^{-3}}{0.8 \times 10^{-3}} = 178 m/s^2$$

以質量 **4.44 g** 而言，需要 **1.38 N** 的推力才可獲得 **178 m/s²** 的加速度，所需的電流為 **0.085 A**。驗證計算如下：

$$\begin{aligned} F_a &= M \frac{du}{dt} + F_\mu + F_{mbp} \\ &= 0.00444 \times \frac{142}{0.8} + 0.003 + 0.288 = 1.38 N \end{aligned}$$

$$i_a = \frac{F_a}{K_f} = \frac{1.38}{16.33} = 0.085 A$$

Check-線圈電組及電感之是否合宜？

電氣常數(串聯)：

2 段線圈，每段共繞 22 層，兩側段每層 10 圈，中間段每層 9 圈，每圈平均長 $(15.6 + 3.6) \times 2 = 38.4 mm$ ，共長 $22 \times 9.5 \times 38.4 = 8,025.6 mm$ ；截面積 $A_{cu} = 1.0 \times 0.1 = 0.10$

mm²; 銅線的電阻係數(resistivity)約為 $\rho_{cu}=1.68\times10^{-8}\Omega\cdot m$, 線圈電阻為 $R=1.35\Omega$ 。

$$R = \rho_{cu} \frac{l_{cu}}{A_{cu}} = 1.68 \times 10^{-8} \times \frac{8025.6 \times 10^{-3}}{0.1 \times 10^{-6}} = 1.35 \Omega$$

因為通過線圈所產生的電感 L 來自於兩段線圈通過相反的電流，以及永久磁鐵所通過的磁通變化計算而來的。不過由於通過的電流相等而相反，所產生的電感互相抵消，淨值極微，但永久磁鐵的磁通在通過電流切割磁力線，產生運動時，由於電流的變動而產生磁通的變動，是有電感的變動。假設在平均電流為 0.014 A 下，磁通密度的變化為 0.001 T，其計算如下：

$$N \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = L \frac{\Delta i}{\Delta t} \Rightarrow L = N \frac{\Delta\phi}{\Delta i} = 209 \times \frac{0.001 \times 4 \times 1 \times 10^{-6}}{0.017} = 0.0492 \text{ mH}$$

每段線圈電氣常數為 $\tau_e=L/R=0.0492/1.35 \approx 0.0364 \text{ ms}$ ， $0.0364 \times 5 \approx 0.18 \text{ ms} < 0.5 \text{ ms}$ **OK !**

驅動電流的決定

由於實際的機械常數 $K_f=16.33 \text{ N/A}$ ，流過的最大驅動電流為 $i_{max}=0.085 \text{ A}$ (4.44 g)，及有效驅動電流為 $i_{rms}=0.017 \text{ A}$ 。

驅動電壓的決定

依據公式(3.2)，兩段每段線圈的有效驅動電壓為 $v_{rms}=0.33 \text{ V}$ 。

$$\begin{aligned} v_{rms} &= L \frac{di_{rms}}{dt} + Ri_{rms} + K_E u_{rms} \\ &= 0.0492 \times 10^{-3} \times \frac{0.017}{0.8 \times 10^{-3}} + 1.35 \times 0.017 \\ &\quad + 16.33 \times 19 \times 10^{-3} \\ &= 0.33 \text{ V} \end{aligned}$$

依據公式(3.2)，線圈的最大驅動電壓為 $v_{max}=3.03 \text{ V}$ 。

$$\begin{aligned} v_{max} &= L \frac{di_{max}}{dt} + Ri_{max} + K_E u_{max} \\ &= 0.0492 \times 10^{-3} \times \frac{0.085}{0.8 \times 10^{-3}} + 1.35 \times 0.085 \\ &\quad + 16.33 \times 178 \times 10^{-3} \\ &= 3.03 \text{ V} \end{aligned}$$

負荷為 4.44 g 所需之電力：

Power supply: $(0.33V \times 0.017A = 5.61 \text{ mW}_{\text{rms}}) ; (3.03V \times 0.085A = 0.258 \text{ W}_{\text{max}})$

Driving voltage (each coil) 3.03 V(max) ; 0.33 V(rms)

$22 \times 5 \times 2 + 22 \times 9 \times 1 = 2$ set of coils are connected in opposite currents

Each set of coil current = 0.085 A(max.) ; 0.017 A(rms)

Total supplied current : 0.085 A(max.) ; 0.017 A(rms)

相關致動器的設計規範修改為

Travel range =10 mm

Step stroke $\leq 170 \mu\text{m}$ @ 500 Hz;

Settle Time $\leq 2\text{ms}$ @ 500 Hz

External load: $\approx 4.44 \text{ g} < 10 \text{ g}$

Sliding friction $\approx 0.003N$

Contact force $\approx 0.1843N$

Maximum velocity $\leq 142 \text{ mm/s}$

Average velocity = 56.8 mm/s (19 mm/s)

Maximum applied force = [1.38N @ 4.44 g, 142 mm/s]

Applied RMS force = [0.27 N @ 4.44 g, 56.8 mm/s]

The structure contains following specifications:

Dimensions: 39x28.8x5.8 mm (含 0.4 mm 氣隙)

PM sets :

四型 = (13x8x1-5x4x1) mm x 4 set

Coil = (12.8x5.8-8.4x2.4)x(9+5x2) mm 2 sets

Moving set :

方形動軸 37x8x1 mm

橈性帶連結塊 5x8x5-3x8x1 mm

橈性帶扁平形 38x8x5 mm

壓力感測頭 方形 10x8x5-3x5x5 mm

Diameter of magnetic wire = $1.00 \pm 0.05 \times 0.10 \pm 0.01 \text{ mm}^2$

Total no. of turns = 418 turns ; $22 \times (9+5 \times 2)$ coils/set with 2 set

Air gap of coil = 2.4 mm x 4

The total mass of VCM = $13.43 + 4.44 = 17.87 \text{ g}$

優異性之評估

雖然各種不同的電流切割長度的致動器設計都符合工程規範，但是如何評估那一個致動器比較優異，是一個決定取捨的重要項目。當一切都固定時，以通過 0.120A 的極限下，能夠容許更多的加速性是最重要的指標。

以本例 M7-L16-N22-T1 而言，動軸重量 $M_{mv} = 4.44 \text{ g}$ ，在 0.085A 推力為 1.38 N，其加速度 $a = (1.38 - 0.59) / 0.00444 = 178 \text{ m/s}^2$ ，百分比為 $a_I = 178 / 178 = 1.0$ ；機械常

數 $K_f=16.33\text{ N/A}$, 在 0.120 A 下推力為 1.96 N , 其加速度 $a_2=(1.96-0.59)/0.00444=308\text{ m/s}^2$, 百分比為 $a_2=308/178=1.732$; 因此在 0.120 A 下, 加速度百分比增加了 $1.732-1.0=0.732=73.2\%$, 即增加 130 m/s^2 的加速度, 達 308 m/s^2 。

另一指標則為容許漏磁的考慮, 若以 1.1 倍的加速度 196 m/s^2 , 為標準, 需要推力為 $196 \times 0.00444 + 0.59 = 1.460\text{ N}$, 機械常數需為 $1.460/0.120 = 12.17\text{ N/A}$, 其他因素不變下, 最少磁通密度為 $B_{min}=K_f/(2NL_c)=12.17/(2 \times 352 \times 16 \times 10^{-3})=1.080\text{ T}$ 。容許漏磁 $1.45 - 1.080 = 0.37\text{ T}$ 。

另一指標則為容許動軸重量的考慮, 若通以電流 0.120 A , 推力為 1.96 N , 加速度為 196 m/s^2 , 則動軸重量 $M_{max}=(1.96-0.59)/196=0.00699\text{ Kg}=6.99\text{ g}$, 容許增加的重量為 $6.99-4.44=2.55\text{ g}$, 達 6.99 g 。

型號	<i>M7-L16-N22-T1</i>
VCM 尺寸	<i>37x28.8x5.8 mm</i>
動軸重量 M_{mv}	<i>4.44 g</i>
VCM 重量 M_{VCM}	<i>17.87 g</i>
F_{max}	<i>1.38 N@85 mA</i>
F_{rms}	<i>0.27 N@17 mA</i>
機械常數 K_f	<i>16.33 N/A</i>
加速度 a_1	<i>178 m/s²</i>
加速度 $a_2@120mA$	<i>308 m/s²</i>
$B_{min}@a=196m/s^2&120mA$	<i>1.08 T</i>
$M_{max}@196m/s^2&120mA$	<i>6.99 g(2.55 g)</i>

四、致動器驅動器之設計考量

由於致動器之交流控制方式採用 Step-Hold 間斷式的移動, 不同於一般的連續性追蹤控制(Tracking control), 因此在每一 Step 階段都是一種 step 函數的控制方式, 它含有暫態及穩態的過程如圖 1.1 所示。同時每一個 Step 或 Hold 的階段只有 2 msec , 因此現行市面上的數位控制法, 每一 Step 時間大約 10 msec , 不適用, 而應用類比功率驅動的技術是可行的方法。

使用兩組 Intersil CA3094 Operational Transconductance Amplifier(OTA)做為線圈之驅動電路(Coil Driver)。

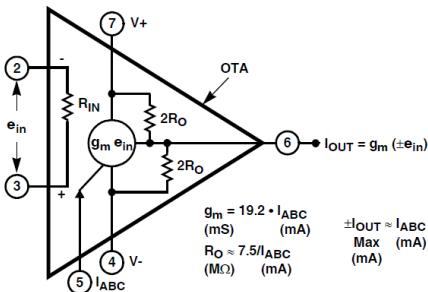


FIGURE 1. EQUIVALENT DIAGRAM OF THE OTA

CA3094, CA3094A, CA3094B**Absolute Maximum Ratings**

Supply Voltage (Between V+ and V- Terminals)	
CA3094	24V
CA3094A	36V
CA3094B	44V
Differential Input Voltage (Terminals 2 and 3, Note 1)	5V
DC Input Voltage	V+ to V-
Input Current (Terminals 2 and 3)	±1mA
Amplifier Bias Current (Terminal 5)	2mA
Average Output Current	100mA
Peak Output Current	300mA

Thermal Information

Thermal Resistance (Typical, Note 2)	θ_{JA} ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)	θ_{JC} ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)
PDIP Package	130	N/A
SOIC Package	170	N/A
Metal Can Package	175	100
Maximum Junction Temperature (Metal Can Package)	175 $^{\circ}\text{C}$	
Maximum Junction Temperature (Plastic Package)	150 $^{\circ}\text{C}$	
Maximum Storage Temperature Range	-65 $^{\circ}\text{C}$ to 150 $^{\circ}\text{C}$	
Maximum Lead Temperature (Soldering 10s)	300 $^{\circ}\text{C}$	
(SOIC - Lead Tips Only)		

Operating Conditions

Temperature Range -55 $^{\circ}\text{C}$ to 125 $^{\circ}\text{C}$

參考上圖 OTA 等效電路圖，設定 $\pm I_{out} = 120 \text{ mA} > 88 \text{ mA}$ ， $I_{ABC} = 1.5 \text{ mA}$ ， $g_m = 19.2 \times 1.5 = 28.8 \text{ mS}$ ，輸入最高電壓為 $\pm e_{in} = I_{out} / g_m = 120 / 28.8 = 4.17 \text{ V} < 5 \text{ V}$ 。

五、位移及壓力感測器之設計考量

致動器的位移需要一個行程 12 mm 的位移感測器，位移感測器將直接耦合餘音圈馬達之動軸的一端，感測器的另一端將連結一個直徑 4 mm 的壓力接觸頭，其中放置一個直徑 1 mm 的壓力晶片(pressure die)，後接信號處理器。

位移感測器有許多種類，選擇 Sense Measurement 的 SM-LVDT-SP: Micro-miniature spring-loaded LVDT，重複精度為 0.1 μm ，如下圖：

SM-LVDT-SP: Micro-miniature spring-loaded LVDT

Micro-miniature spring-loaded LVDT designed for high resolution position measurement in tight places (2.3 mm Diameter).
Measuring range: +/- 1, 2.5, 5mm.
Input voltage: 2.3 Vrms max.
Linearity deviation error: 2%.
Input Frequency: 5 kHz (nominal).
Protection against electromagnetic and electrostatic shielding.

該公司可以客製化，因此壓力感測器之選用與設計可以委託訂製。