



比例電磁線圈設計演進

(Design Evolution of Proportional Solenoid)

國立雲林科技大學機械工程系

任志強





Outline :

1. 前言
2. 透過Flux2D設計比例式電磁線圈
3. 比例式電磁線圈性能測試實驗台
4. 實驗結果與討論
5. 結論與未來展望





1. 前言

- **比例電磁線圈**為各式**液壓氣動比例閥**設計中之最重要的關鍵元件。本文首先將分別介紹**三種**不同結構且在不同時期出現的比例式電磁線圈設計。

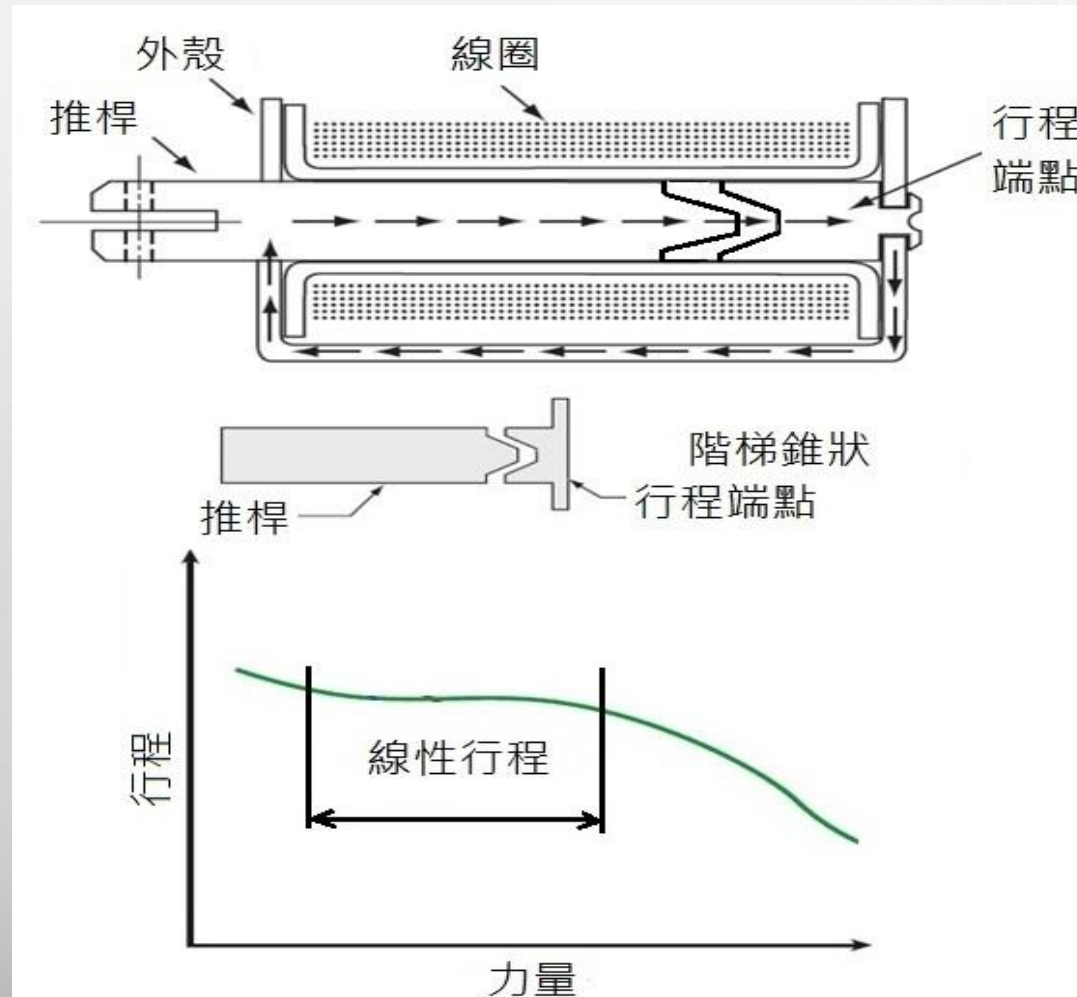
	壓電式轉換器	移動線圈	比例電磁線圈	開關電磁線圈	線性馬達	力矩馬達
種類						
特性曲線						

- 常見之第一級電氣-機械轉換器





- 第一種是最早出現的**階梯錐狀式**（Stepped Conical）比例式電磁線圈：

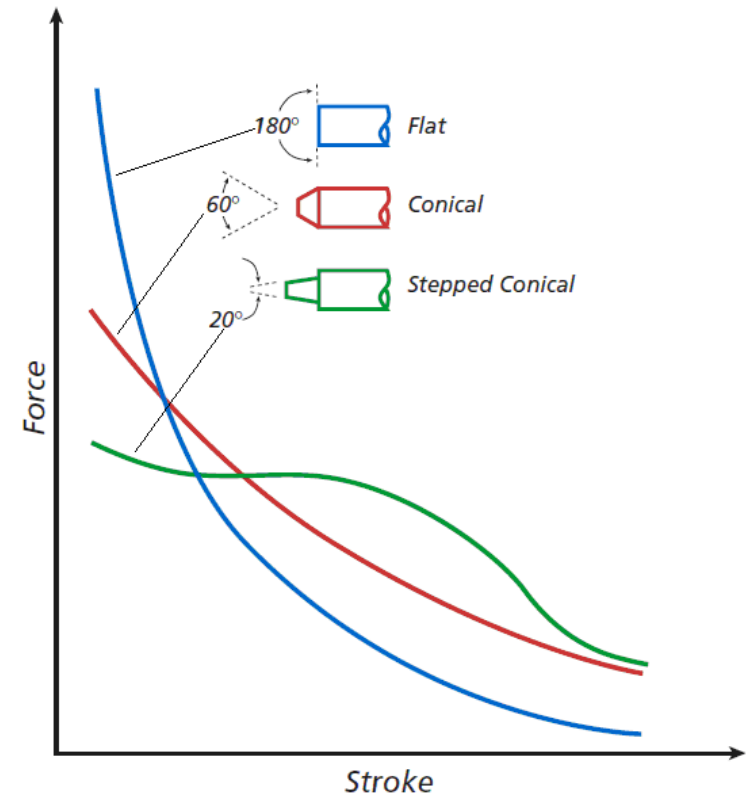
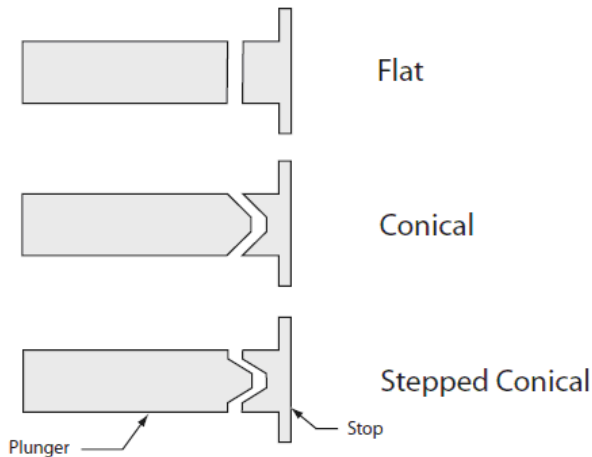
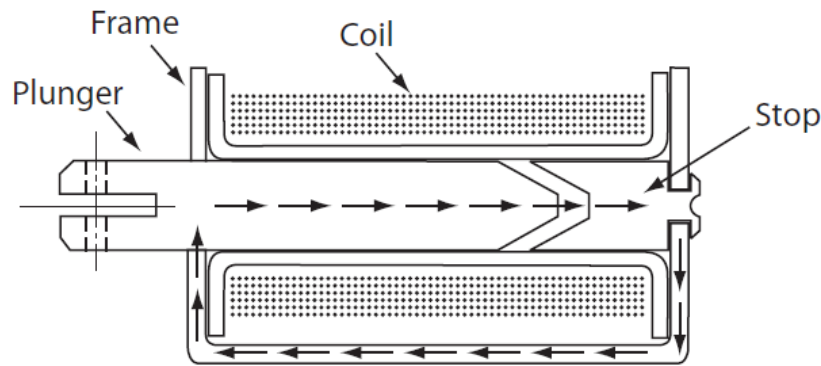


- **有限的線性出力行程**以及**較差的出力線性度**是其主要的缺點。



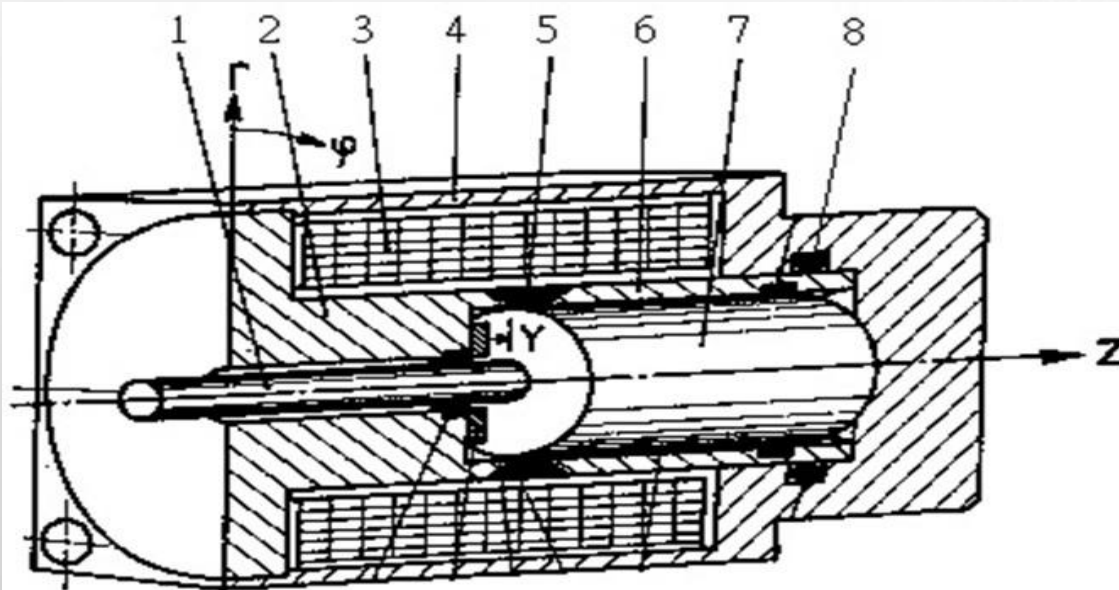


- **H.C. Rotors** 文獻中提到的三種不同外型電磁線圈 (ISBN-13: 978-0471739203) :





● **第二種**設計結構則為**傳統隔磁環式比例電磁線圈**，目前仍是液壓比例閥設計主流。其使用一特殊套筒(tube)，其由三種不同金屬環焊接而成，如圖所示，三個金屬環中夾在中間的為**非磁性銅環(編號：5)**，其前後則為導磁金屬環(編號：2、6)，此結構主要目的在於引導磁力線以便產生線性的力量/行程關係。



- | | |
|----------|----------|
| 1. 推桿 | 5. 非磁性銅環 |
| 2. 導磁性鋼環 | 6. 導磁性鋼環 |
| 3. 線圈繞組 | 7. 電樞 |
| 4. 導磁性外殼 | 8. O型環 |

(2, 5, 6三元件採焊接接合)

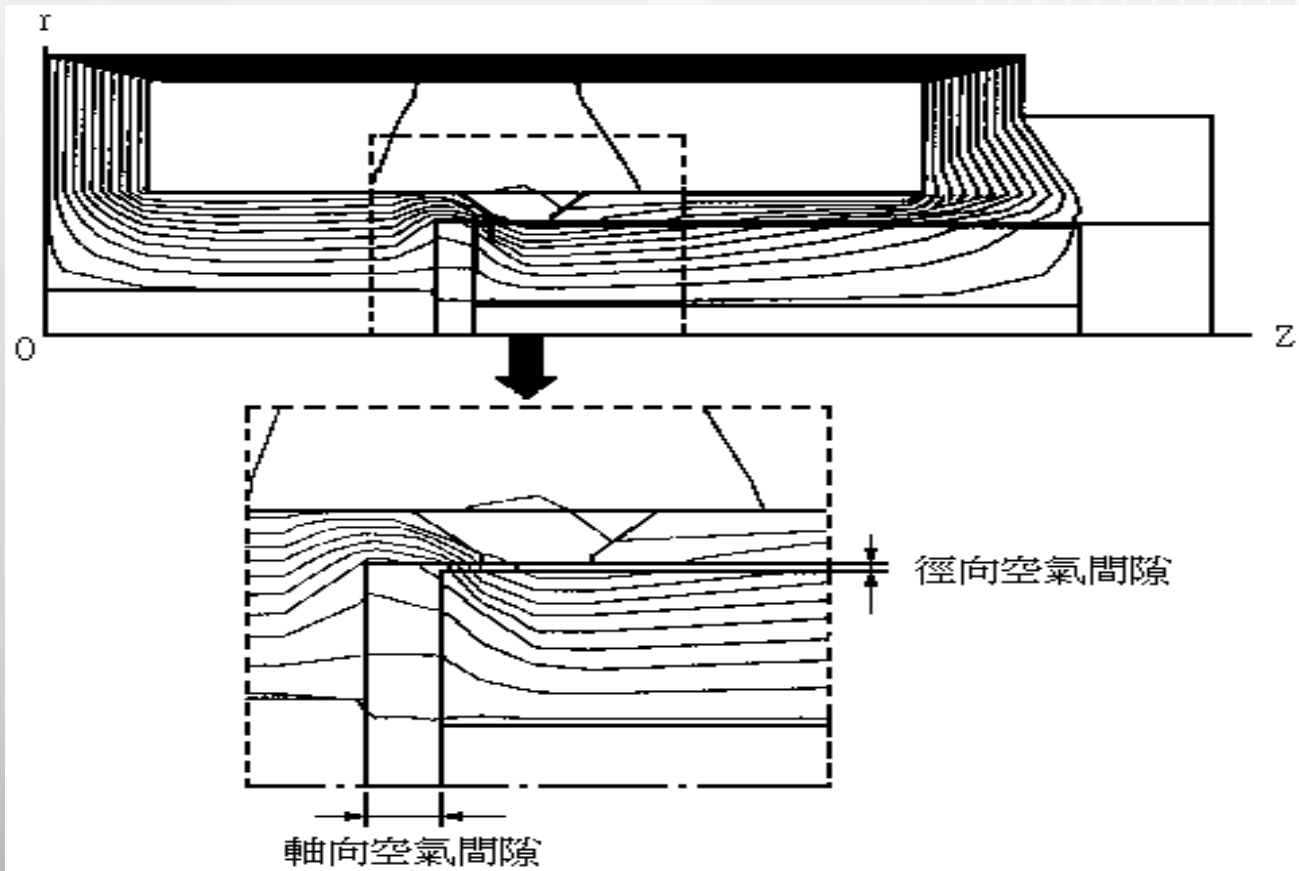
● **較高的製造成本**以及較為**複雜的焊接加工**是此種電磁線圈之**主要缺點**。





第二種比例電磁線圈之工作原理(1/2)

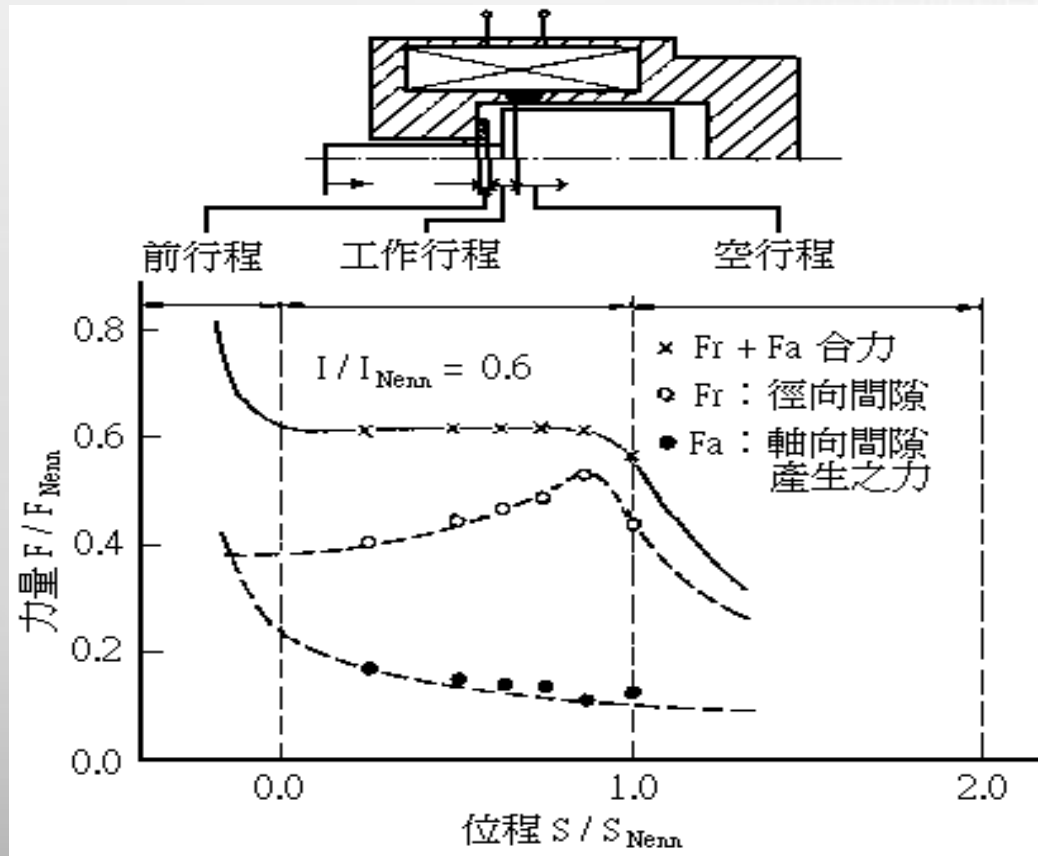
- 線圈通以電流後，會在磁極心上產生磁力線，參考圖，由於徑向空氣間隙較小，相當於阻力較小，故磁力線支流向經過非磁性中間環之阻隔後，大部分流過徑向間隙。





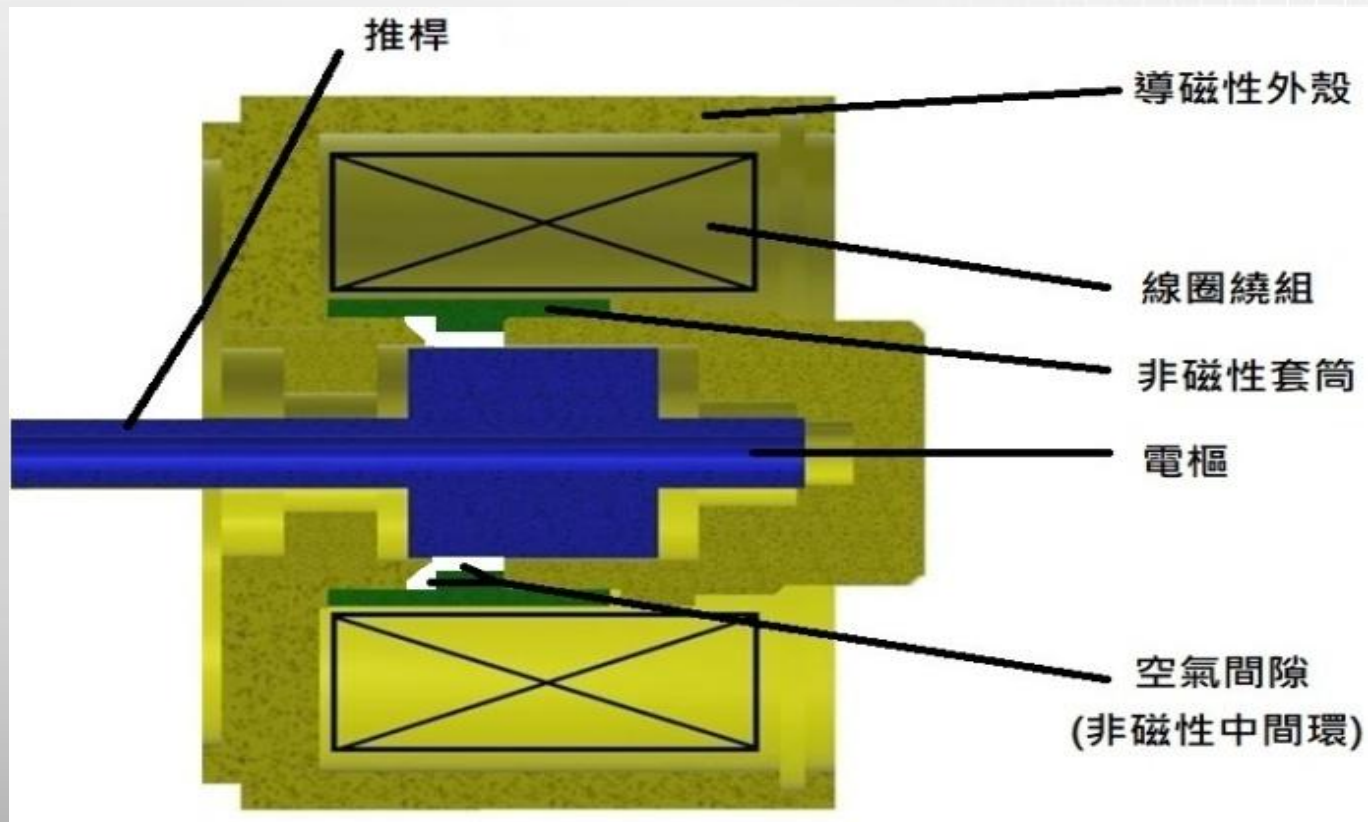
第二種比例電磁線圈之工作原理(2/2)

- 隨著行程 S 之增加(在工作行程內)，**徑向間隙產生之磁力漸增**；**軸向間隙產生之磁力漸減**，因而使其合力部分在工作行程範圍中保持**極佳之線性度**。





- **第三種**則為較新式的空氣間隙取代銅環之**組合式比例電磁線圈**，屬於第二種設計結構的簡化版。
- 組合式比例電磁線圈可由許多零件組合而成，將各個零件簡易**組裝完成**後，其內部結構將會產生一**空氣間隙用以取代隔磁銅環**。減少了隔磁銅環，將可節省隔磁銅環本身成本以及相關複雜的焊接過程。





三種不同的比例式電磁線圈比較

	傳統隔磁環式 比例電磁線圈	階梯式比例式 電磁線圈	空氣間隙取代 銅環之組合式比 例電磁線圈
性能	優	可	良
成本	高	低	中
加工 難度	高	低	低





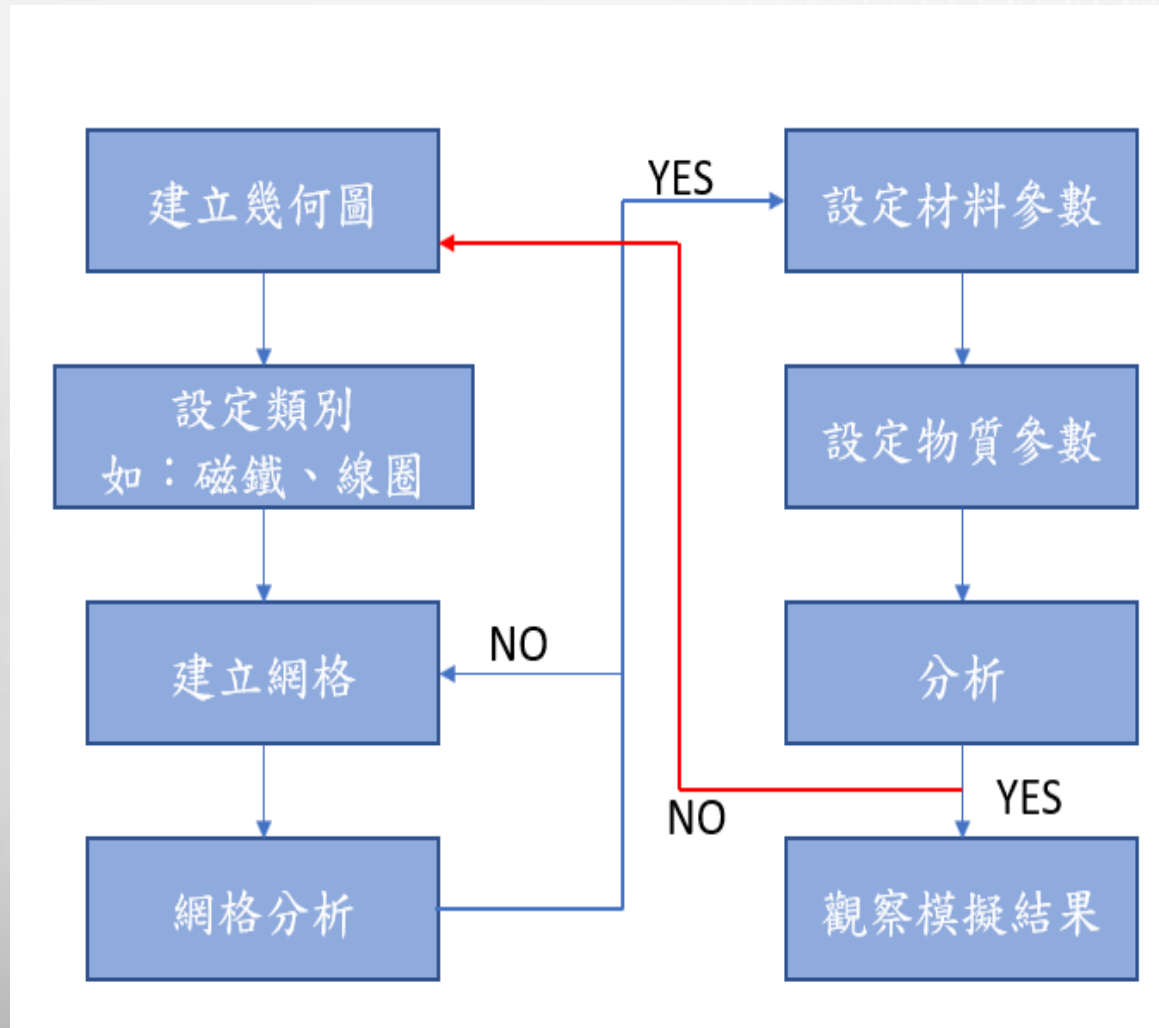
2. 透過Flux2D設計比例式電磁線圈

- 早期設計電磁線圈的方法不外乎是應用**等效電路設計**以及**試誤法**等較為**耗時**的方法。
- 採用**有限元素分析軟體**將可以實現新設計的快速驗證並能**快速地**完成**雛型設計**。可以**節省研發**所需的**時間**以及**經費**。
- Magsoft公司之**Flux2D**產品，除了可作為本文主要採用之分析工具外，亦可將完整的圖形結果(**等位線圖、電流密度、磁通密度**)進行展示，並能呈現相關數值計算結果(**轉距、力、電流計算、溫度、磁通密度**)。





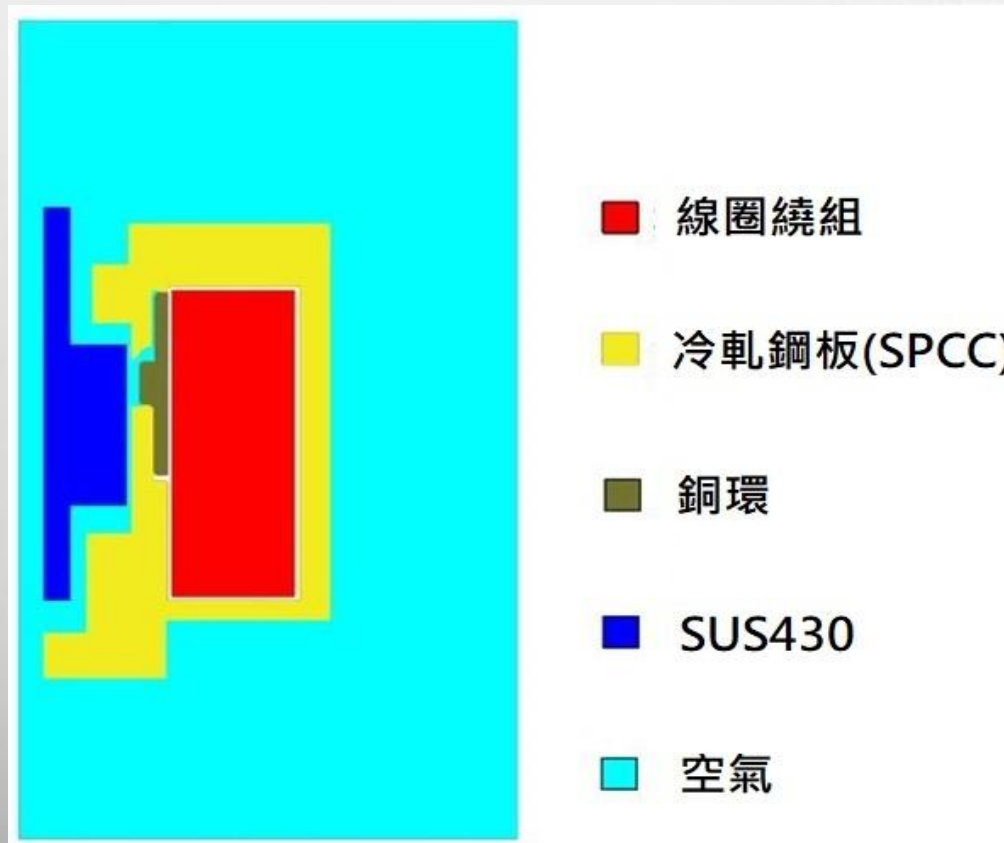
Flux2D軟體操作流程





●以第三種組合式比例電磁線圈為例之設計步驟

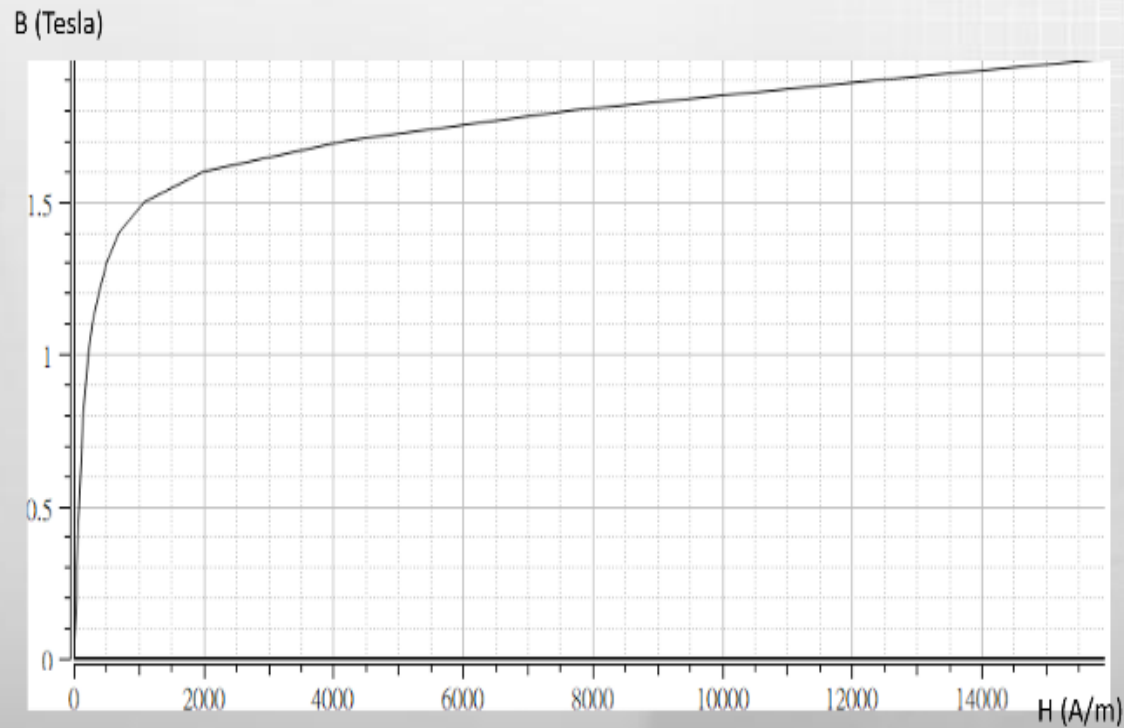
- (1) 根據實際比例式電磁線圈的設計架構再經過適當的尺寸設計，即可繪製出如圖所示之1/4模型圖(圓柱軸對稱狀)。





(2) 輸入線圈的**激磁電流值**以及不同材料的**磁飽和曲線(B-H Curve)**。

- 本文模擬分析設定電磁線圈之**線圈匝數為 500 匝**，最大激磁電流則設定為**2 A**。

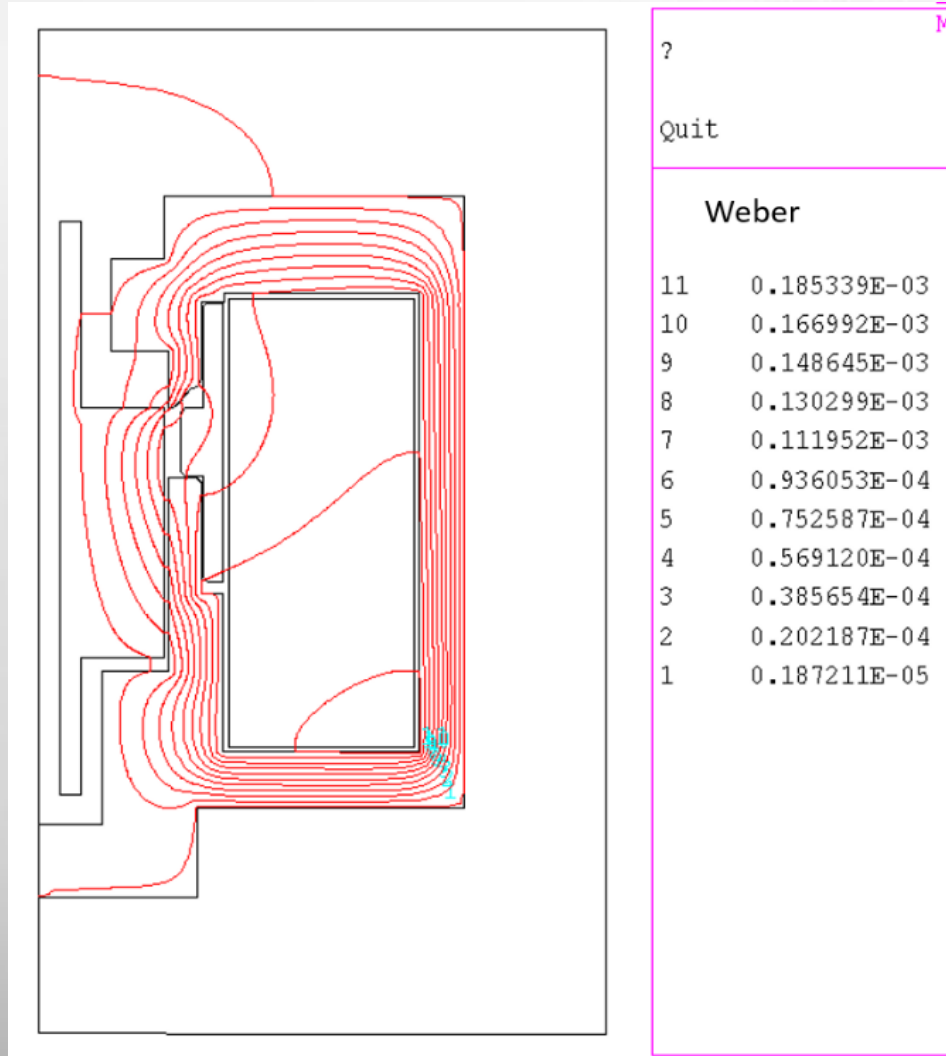


冷軋鋼板SPCC之B-H曲線



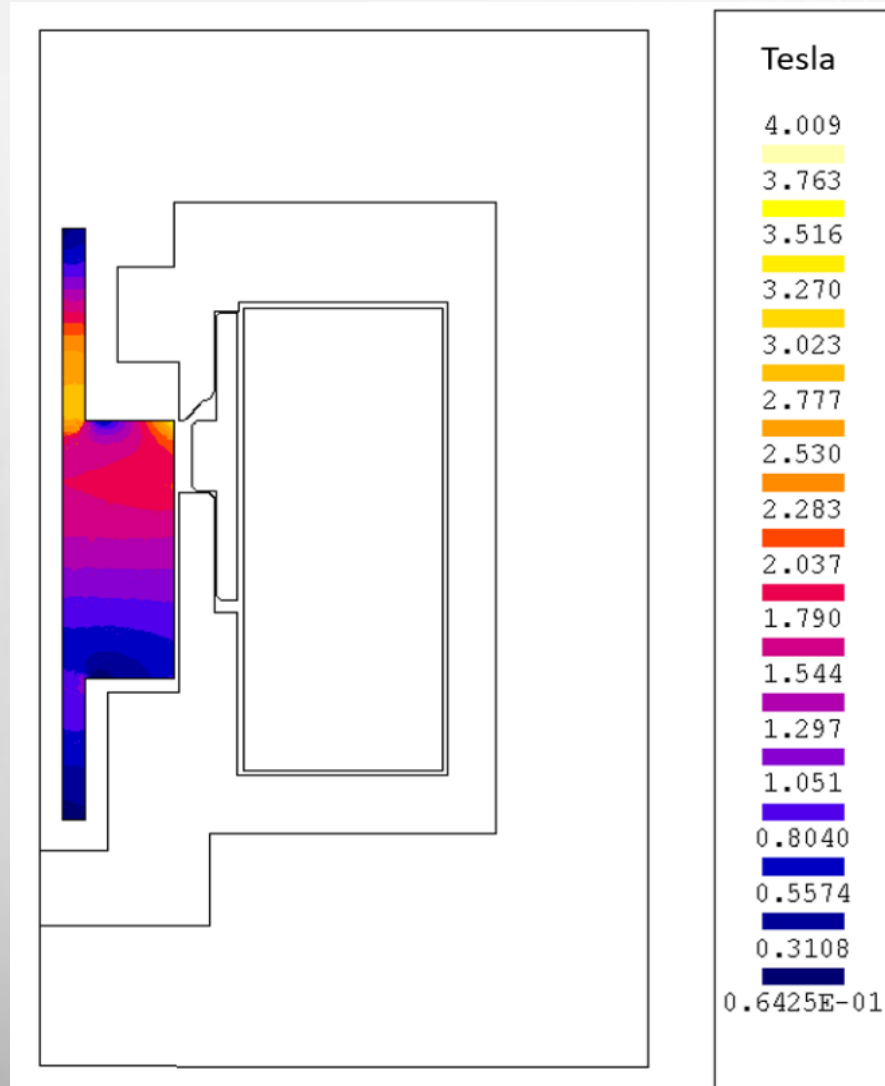


(3) 磁力線分布圖 (輸入電流 2A、位移 0.5 mm)





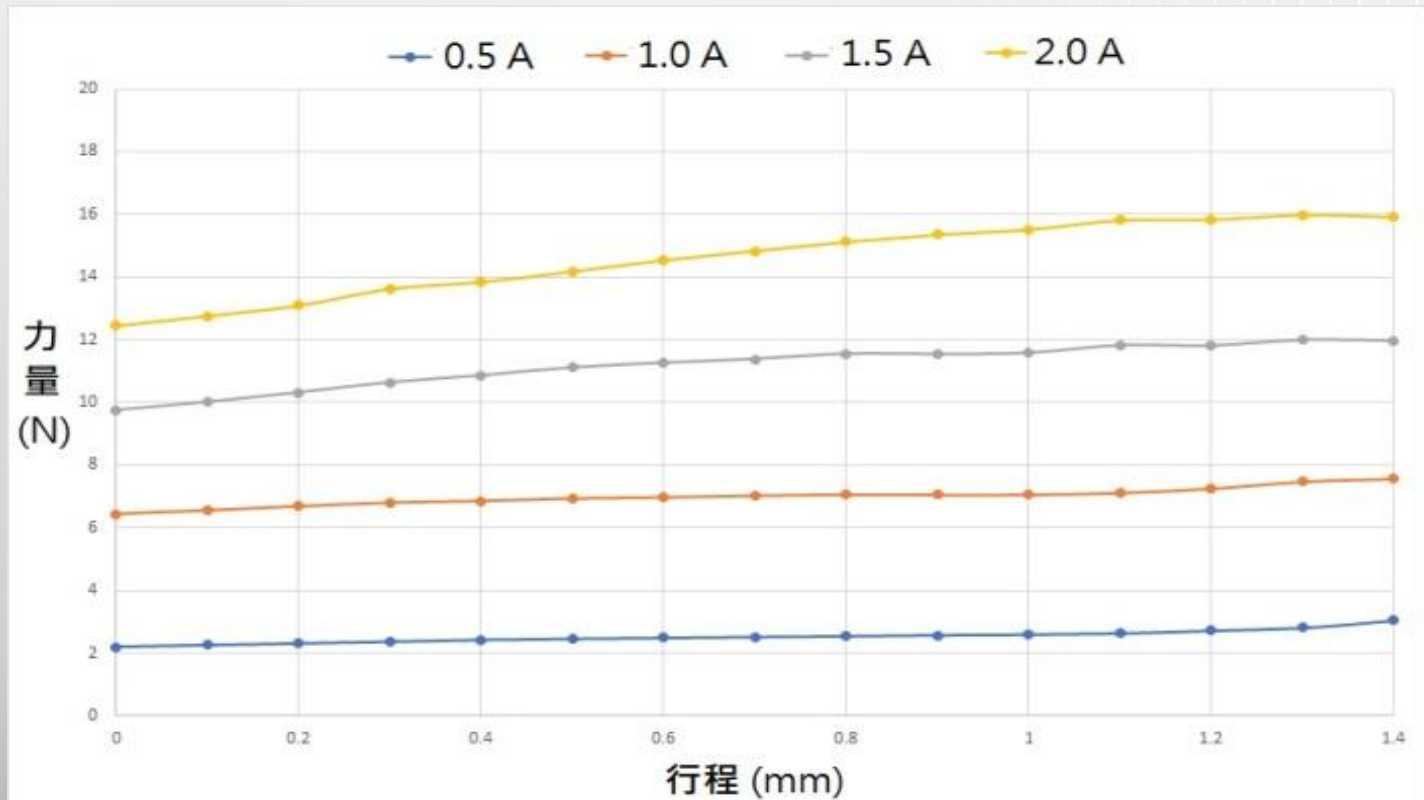
(4) 磁通密度圖 (輸入電流 2A、位移 0.5 mm)





(5) 比例式電磁線圈於四種不同激磁電流值 (0.5 A、1 A、1.5 A及2 A) 之力量/行程特性曲線

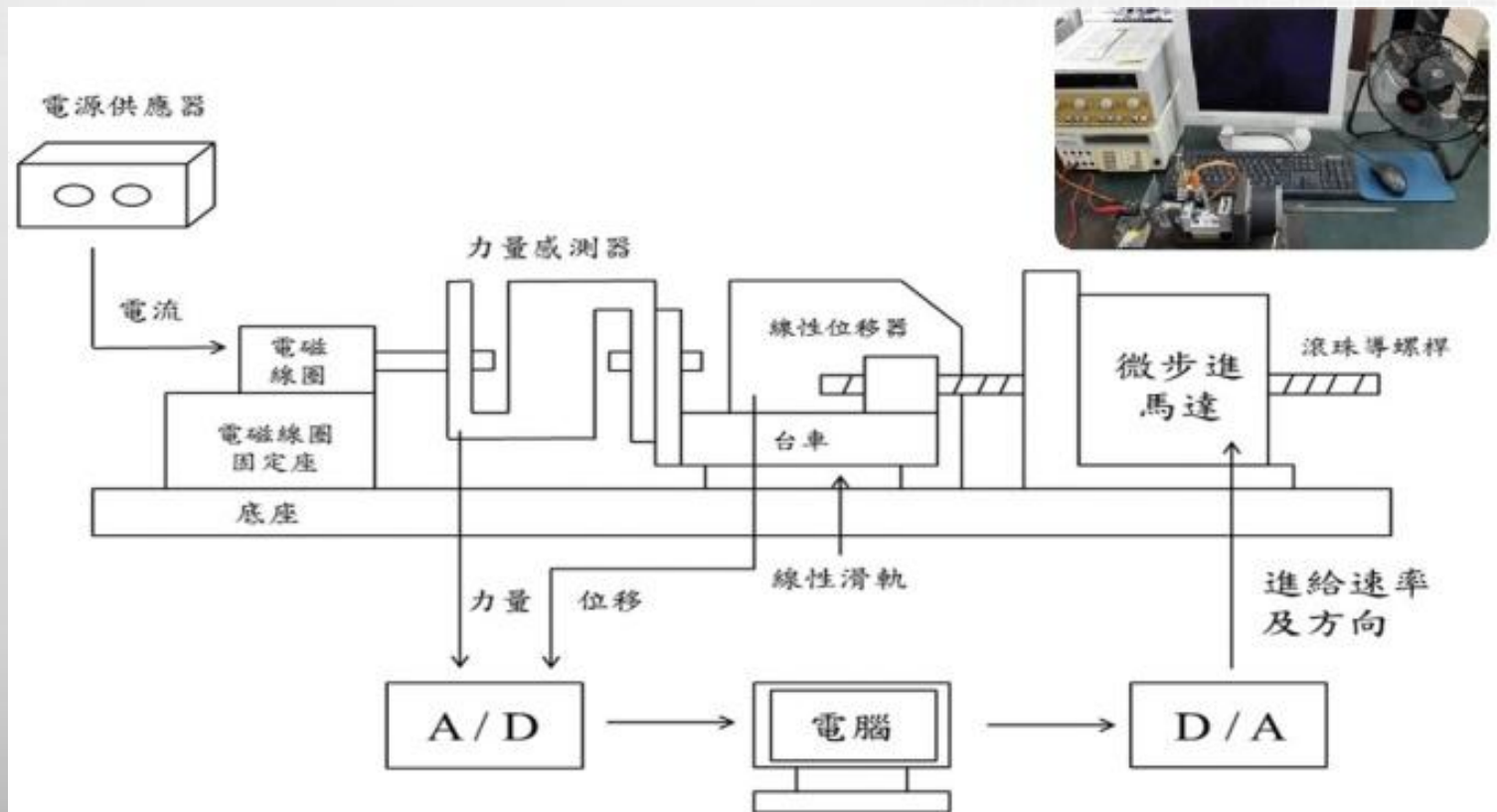
- 比例式電磁線圈之力量/行程曲線在推桿位移為**0.4 mm~1.4 mm**時，有較佳的線性關係，此即為所謂的**線性行程**。





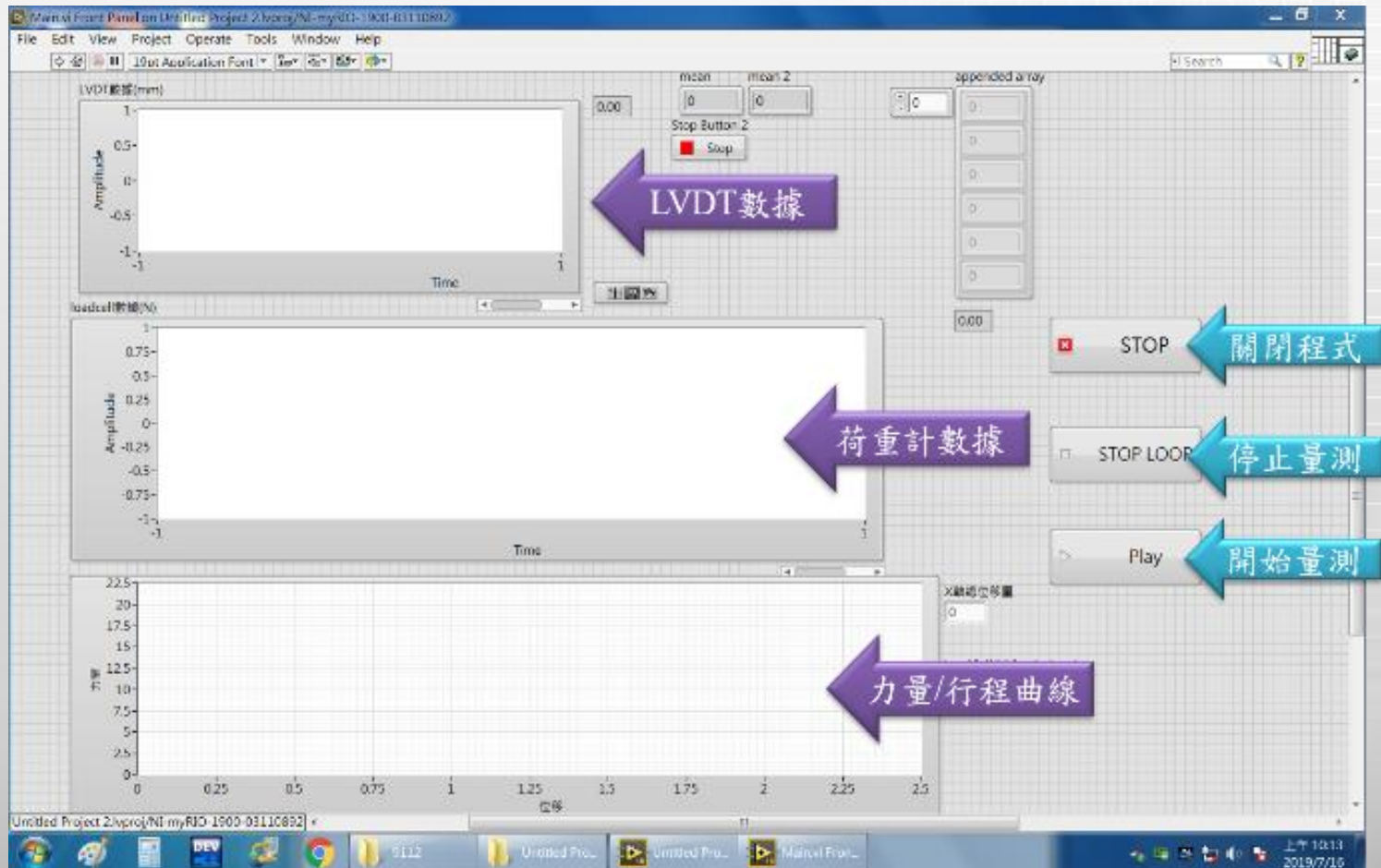
3. 比例式電磁線圈性能測試實驗台

- 實驗台主體主要包含：底座、**微步進馬達**(Micro-step Motor)、滾珠導螺桿、**線性滑軌**、台車、**力量感測器**(Load Cell)、**線性位移感測器**(LVDT) 及電磁線圈固定座。





- 本文所用之**LabVIEW**操作人機介面系統。





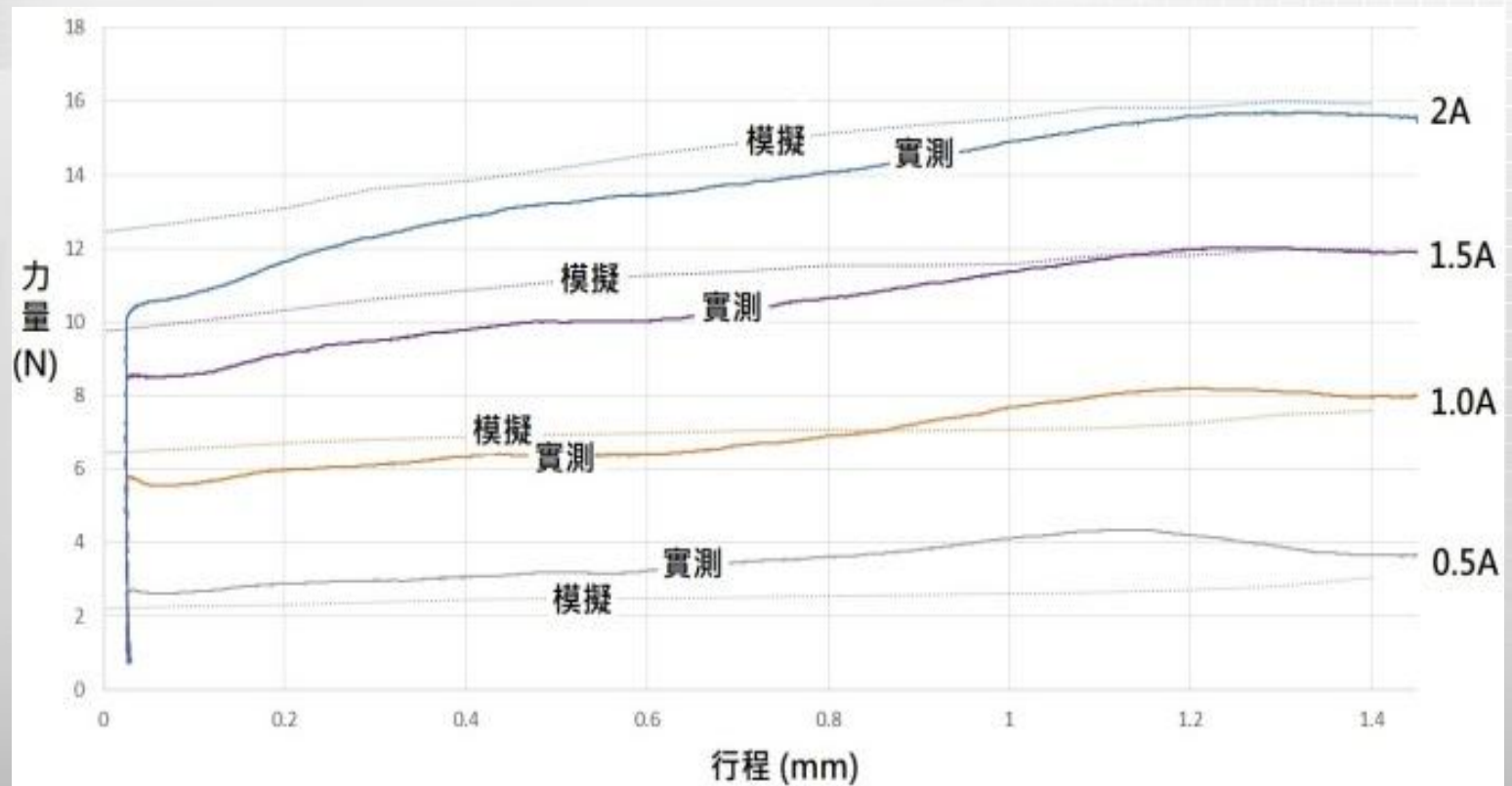
- 製作加工出之**組合式**比例電磁線圈**雛形實體圖**。





4. 實驗結果與討論

- **線性行程**定義於0.4 mm至1.4 mm之間，總計有**1.0 mm**。
- 理論模擬與實驗所得曲線間不但**趨勢一致**而且**誤差值**均落在**10 %**以內。





5. 結論與未來展望

本研究成功設計並製作出一個組合式比例式電磁線圈雛型，根據模擬及實驗所得結果，可以得到以下**二項結論**：

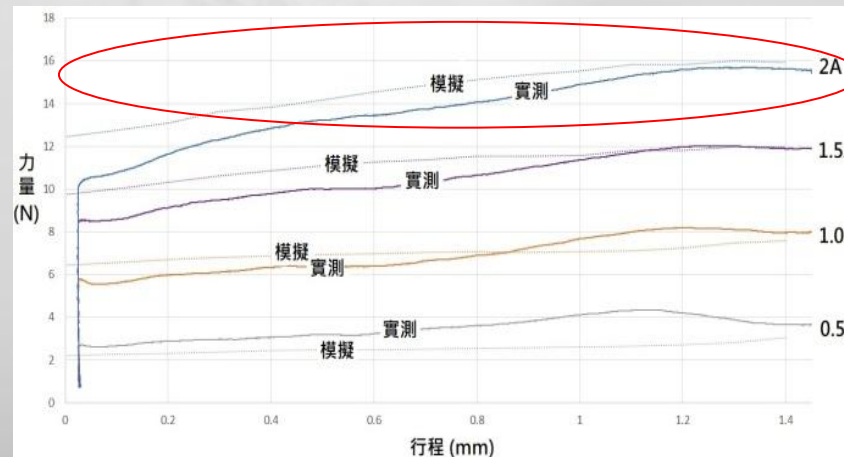
- (1) 由實驗量測結果可以得知，**理論計算值非常接近於實際測試結果值**。整體來說，理論計算值與實際測試結果值間的**最大誤差值僅約為10 %**。
- (2) 本文所設計之組合式比例式電磁線圈線性行程約為 **1.0 mm**，對應輸入電流**2 A**之最大磁推力接近**14 N**，已達到應用於液壓氣動比例閥之設計要求。





未來展望

1. 在激磁電流為最大 $2A$ 時，力量/行程曲線的線性度表現並不如其他三個較低電流輸入值時來得理想。因此未來應可再進行比例式電磁線圈的最適化設計，包含幾何外觀尺寸或是材料選擇等項目。





報告結束

謝謝

Q & A

