

草上飛輕功行者

磁浮與線形非接觸式直流電動推進器

【續電磁應用的研究與實作】

國中組應用科學科第二名

台北市立天母國民中學

作者：朱承啟

指導教師：劉錦修、李奕宏

一、研究動機

人類自發明車、船、航空器等交通工具以來，雖已大大的縮短了空間上的距離，但始終未曾滿足仍不斷的向速度和時間挑戰，我們都知道陸地上交通工具一車輛的速度，除了受到驅動力的限制外，最大的障礙就是地摩擦力和空氣阻力這兩個搞怪的「魔力」，為了減低摩擦力人們發明了輪子，還配上了各式各樣的氣墊鞋一輪胎，鐵路系統則採用了鋼輪，難道這是一成不變的方式嗎？有沒有更好更低摩擦力的輪子呢？有的！就是磁浮系統，這是本文所要研究的主要課題。

二、研究目的

去（八十六）年三月二十五日我以「#####」為題材，探研電磁原理互為生成的相關性和電磁應用例實作—發電、變電、電力傳輸至捷運系統的運轉，代表XX市參加全國第三十七屆中小學科學展覽，獲得國中組應用科學科的第二名，這項榮譽給了我極大的鼓勵和再接再勵的動能，對於前述的動機，更增加了我鑽研的興趣，於是從去年三月底起，就開始了磁浮的探討，期望在電磁領域的研究得以繼續並廣為應用。

當有了磁浮無接觸摩擦（空氣摩擦不在本文研討範圍）的輪子後，要如何的讓懸浮於空中的車體行進呢？所以本文的另一項非常重要的課題，就是要研究一種推進裝置，讓磁浮車體行走，為了達到完全不接觸的目的，因此將嚐試非傳統式旋轉電動機的研究—線形非接觸式直流電動驅動器。

三、研究設備與器材

（一）車體部份

1. 巴沙木板

2. 永久磁鐵

(二) 導軌及線形驅動器部份

- 1. 木心板
- 2. 永久磁鐵
- 3. 感應線圈
- 4. 霍耳效應感測元件

(三) 驅動器控制電路部份

- 1. 中功率電晶體 (達靈頓晶體)
- 2. 小功率電晶體
- 3. 電阻
- 4. 可變電阻
- 5. 發光二極體
- 6. 散熱器
- 7. 端子座
- 8. 萬用印刷電路板
- 9. 電源供應器

(四) 儀表部份

- 1. 高斯計
- 2. 直流電壓計
- 3. 直流電流計
- 4. 阻抗計
- 5. 計時碼表

四、研究過程和方法

A、磁浮支持機構

(一) 磁浮支持的方式有推斥和吸引兩類，其概念如圖4-1，而推斥力與吸引力的產生方式，有永久磁鐵方式和電磁感應方式。

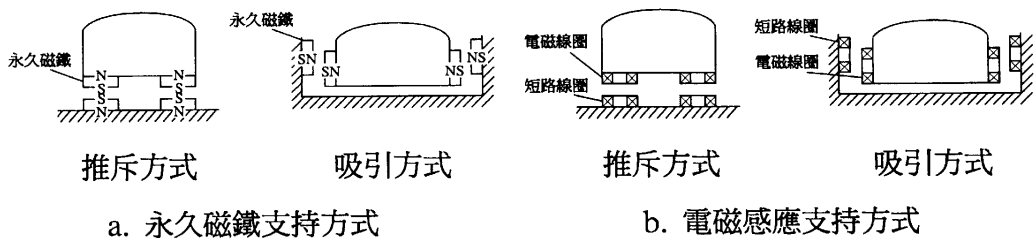


圖4-1 磁浮支持方式

(二) 在電磁感應方面，可利用直流電流通過感應線圈產生電磁推斥力，因電磁力 $f = mtBIL$ ，所以電磁力 f （牛頓）與線圈導體有效數 n 、線圈圈數 t 、磁通密度 B （高斯）、電流 I （安培）、線圈有效導體長度 L （公尺）等成正比關係，但是 t 的增加，將使得線圈增加重量，或者 I 的增加，亦增加線圈的熱損及散熱上的相關問題，使得實用性變得複雜，當然超導體的實現是解決此一問題的利器，然而這是一門極為高深的技術，目前非本文探討的範圍，為使本次實作較易實現，則採用永久磁鐵，以車體與導軌推

斥的方式來懸浮支持。

- (三) 本項研究的模型概念，如圖4-2，由於此次的實驗模型須配合參展場地作品說明板內的空間，車體和導軌的尺寸不宜過大須受到限制，因此實際的製作係將車體兩側控制間隙及方向的互斥導引機構取消，改以導輪方式引導。（請參考附件二—磁浮1號設計圖）

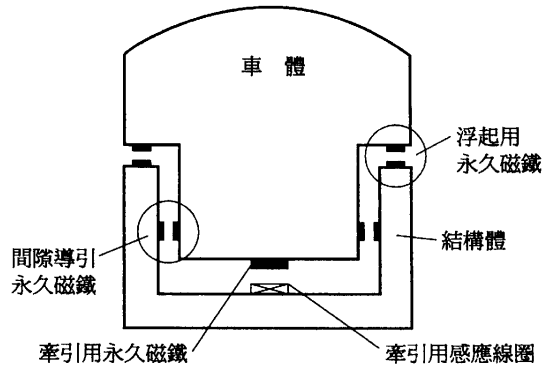


圖4-2 模型概念剖面示意

- (四) 支持車體浮起的永久磁鐵，其推斥力大小與車體重量所承載（壓下）的距離，係由實驗配合儀表量測的方法來分析推斷再予修正決定，在本次的製作中，首先假設磁浮空隙最小應維持在0.5cm的範圍，因此由磁鐵相互排斥的起始作用點，至磁浮所保留空隙0.5cm的距離，即為車體重量可壓縮的距離，車體重量不得超過此值，若車重不足時將配重平衡。

B、線形驅動器

- (一) 磁浮車體浮於空中不與陸地接觸，因此無法使用傳統式的旋轉電動機做為傳動動力，但在1840年旋轉電動機出現的時期，已有線形電動機相關的理論和技術研究，因未受到重視而式微，但做為磁浮系統的驅動動力，確實有其研究的意義且極具潛力的。
- (二) 線形電動機的概念，是將傳統旋轉式電動機的定部予以直線展開，讓轉部變成直線運動，因而旋轉動力變換成直線推力，其示意如圖4-3。

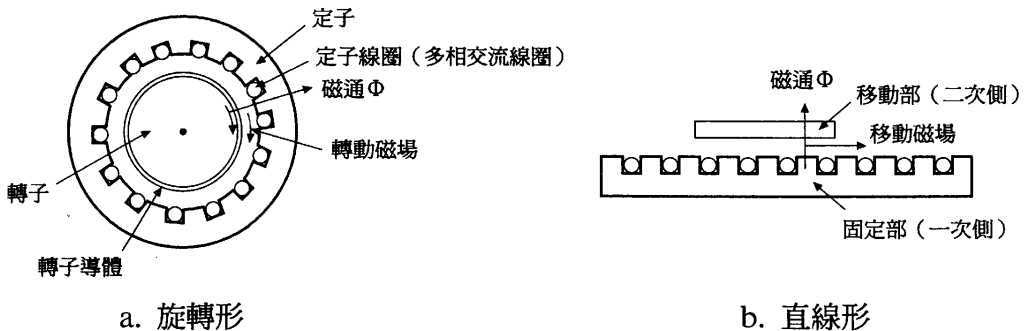


圖4-3 線形電動機概念

(三) 線形電動機的種類可概分為：

1. LIM線形感應式電動機
2. LSM線形同步式電動機
3. LPM線形脈波步進式電動機
4. LDM線形直流式電動機

本文係研究LDM的方式

(四) 在探討LDM線形直流電動機之前，應先對傳統旋轉式直流電動機的原理有充分的了解，其構造如圖4-4。

定部由永久磁鐵構成定部磁通，轉部的電樞線圈由前端整流子和電刷與電池相接而導入電流，按照弗來明左手定則圖4-5a，或右手開掌定則圖4-5b，因此產生推力（轉矩）。

(五) 旋轉式直流電動機轉部電樞線圈的激磁電流，是透過電刷與電源連接形成接觸驅動；而無接觸式的驅動，將不能使用整流子和電刷擔任換流工

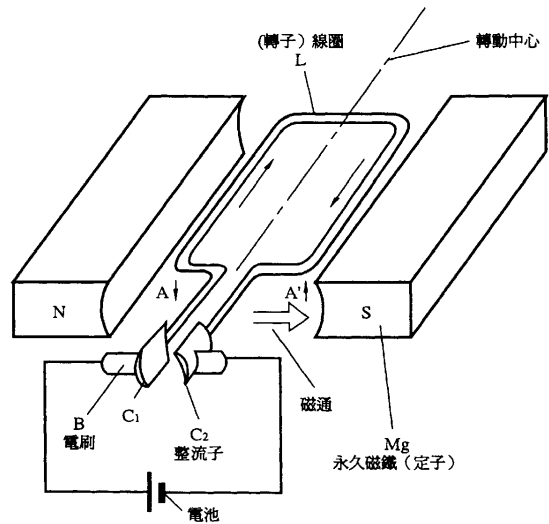


圖4-4 直流電動機的原理（樣品A-附件-照片A）

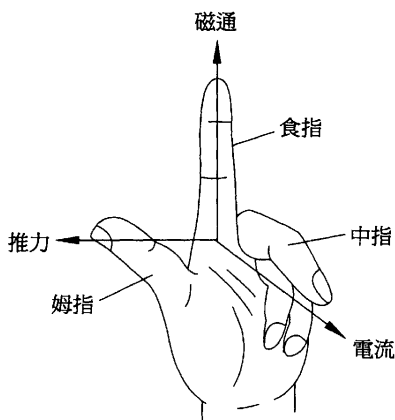


圖4-5a 弗來明左手定則

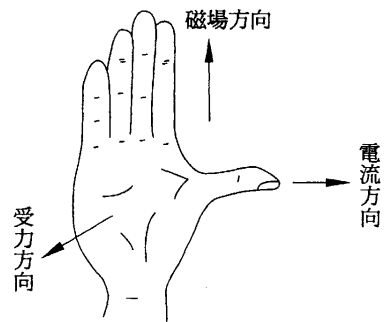


圖4-5b 右手開掌定則

作，係以電子電路來控制電晶體做為換流開關，同時將轉部的電樞線圈變成定部，而定部的永久磁鐵變成動部，其工作原理如圖4-6a，線形的方式則如圖4-6b，並利用霍耳效應感測器做為感測元件。

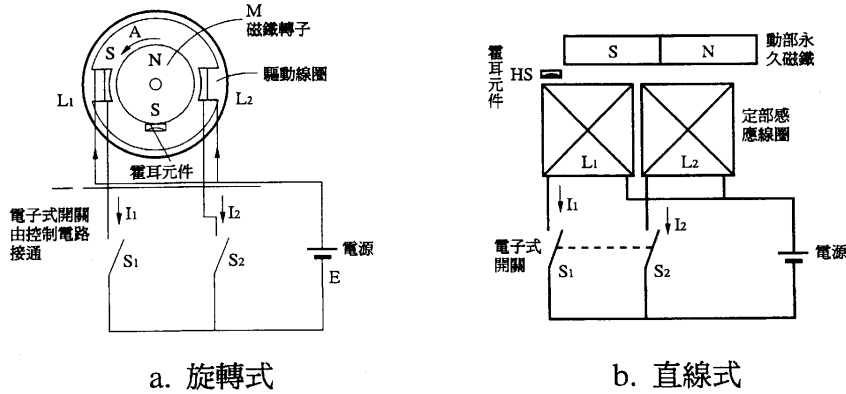


圖4-6 無接觸直流電動機原理

- (六) 霍耳效應感測器是一種半導體構造的磁電感應元件，這種磁電轉換的現象係在1879年由(Edwin Herbert Hall)霍耳先生所發現，其元件的構造如圖4-7，當輸入端 a、b 間通上電流後，在輸出端 c、d 間會呈現霍耳電壓 V_H ，而霍耳電壓的大小會依據磁極的磁通量產生變化，其輸出特性如圖4-8。
- (七) 依據圖4-6b的概念，本製作線形驅動器定部激磁線圈的設計採用兩相雙推動式單元，因此每單元使用四個線圈及二個霍耳感測器，全系統可依單元

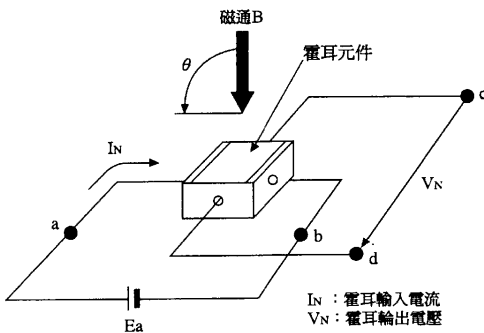


圖4-7 霍耳元件構造

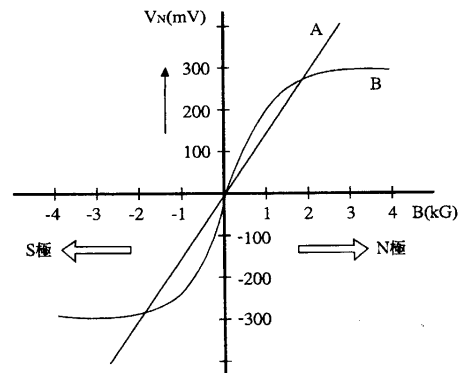


圖4-8 霍耳元件輸出特性

倍數不受限制無限延長的構成定部，車體（動部）則採用四個500高斯的永久磁鐵以N-S-N-S排列，動部磁鐵與定部間的氣隙以1mm為原則，激磁線圈的磁通量，是以動部永久磁鐵磁通量的1/10為始動值，系統的動作原理如圖4-9。

(八) 霍耳感知器在配置上要特別注意：

1. 兩感知器間的距離為兩個線圈の間距。

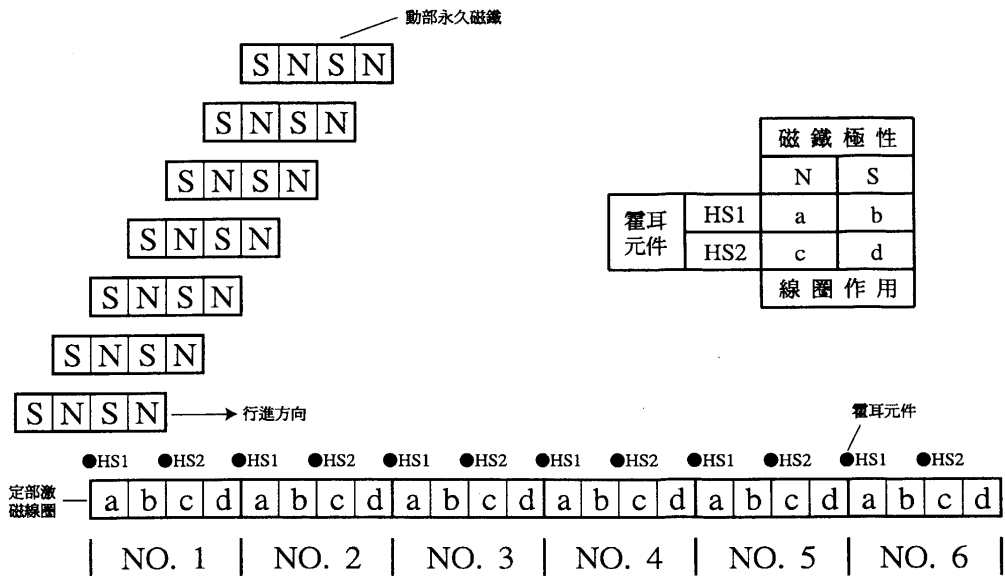
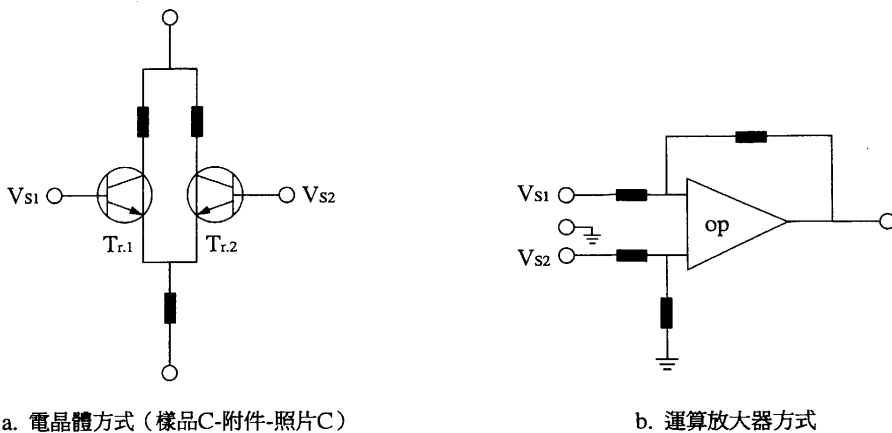


圖4-9 線形驅動器動作原理（樣品B—附件—照片B）



a. 電晶體方式（樣品C-附件-照片C）

b. 運算放大器方式

圖4-10 差動放大電路型式

2. 感知器要避免受到激磁線圈的磁場影響。

C、線形驅動器控制電路

- (一) 當霍耳感知器檢測到車體所在位置的極性後，將由控制電路即時的使對應位置的線圈通上電流激磁，而吸引車體上永久磁鐵使之前進，若霍耳感知器脫離極性，線圈要立刻截流。
- (二) 霍耳感知器所感測到的磁極狀態，將利用差動放大電路將信號電流取出，差動放大電路可採用電晶體(Tr)方式，或使用運算放大器(OP)的方式，如圖4-10，本製作係採用電晶體式。
- (三) 由差動放大電路所檢出的信號電流極小僅約2mA，無法讓線圈有足夠的電流激磁，以產生吸引所需要的磁通量，必須使用功率晶體將其放大，在本設計裡線圈最大電流以1A為上限值，因此晶體的放大率至少要有 $1A/2mA=1000mA/2mA=500$ 左右，通常功率晶體的放大率不高，約在數十之間，於是運用達靈頓放大的方式提高放大率，如圖4-11。
- (四) 調整線圈的激磁電流，即可改變磁通量，使吸引力變化，因此可以車速控制。
- (五) 控制電路的基本單元設計如圖4-12，由於本設計採用四個單元，故控制電路有四組。

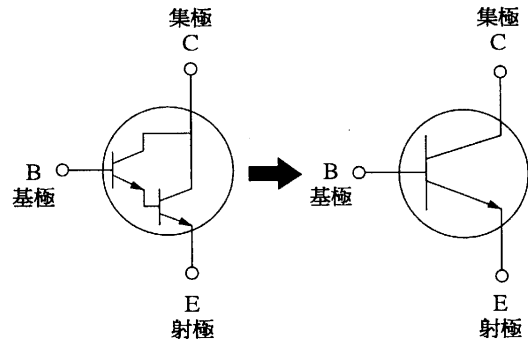


圖4-11 達靈頓放大原理

五、研究結果

A、磁浮支持機構

- (一) 因磁浮支持機構採用永久磁鐵構成，所以車體上磁鐵與導軌上磁鐵的磁極作用力為一近似的定值，因此車體重量影響磁浮距離，在本系統裡車體磁鐵約500高斯，導軌磁鐵約300高斯，其磁浮承載作用的起始距離約有18mm。
- (二) 以10元硬幣（每個重7.5g）當作砝碼，實驗八個硬幣重約60g壓縮距離為1.5mm，16個硬幣重120g壓縮距離為3.0mm，似乎呈等比例的線性關係，因此可得到 $1.5/60=3.0/120=0.025\text{mm/g}$ ，此為每公克壓縮的距離。
- (三) 起始距離18mm減去磁浮保留空隙5mm後，為車體重量可以使用的距離等於13mm，因此車體重量不得大於 $13/0.025=520\text{g}$ 。

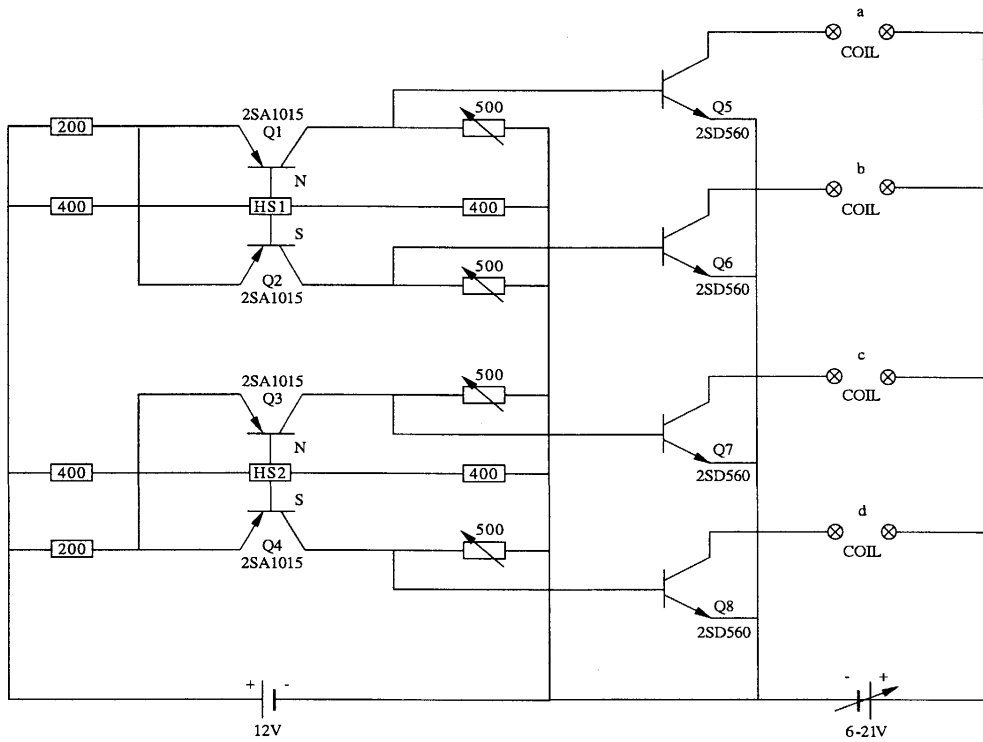


圖4-12 基本單元控制電路（樣品D-附件-照片D）

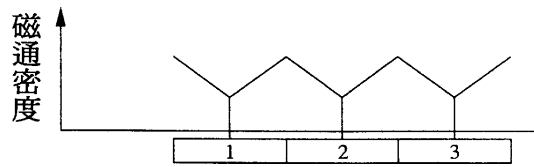


圖5-1 磁通分佈

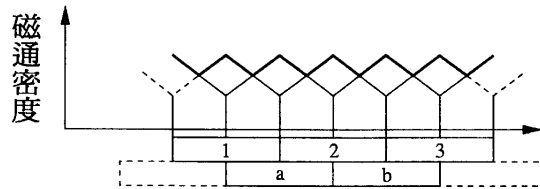


圖5-2 修補後之磁通分佈

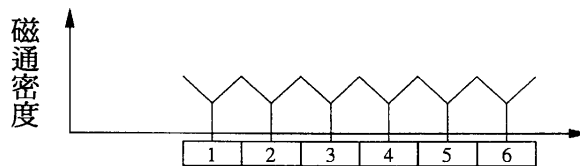


圖5-3 1/2尺寸的磁通分佈

- (四) 磁浮 1 號完成品車重 478g，磁浮空隙 5.5mm 合於設計條件。
- (五) 在本製作中，磁極係由一個個小磁鐵組合而成，其磁通分佈呈鋸齒形，如圖 5-1，在中心處為中性區幾乎沒有磁性形成凹陷，使磁通滑落影響磁浮的平穩，在實驗中察覺磁性有修補作用，因此在兩磁鐵中間加上同極適量的磁通，可以改善此現象，如圖 5-2，或者採用更小的磁鐵以縮小鋸齒也有類似功能，如圖 5-3。

B、線形驅動器

- (一) 車體（移動部）永久磁鐵的平均磁通約為 500 高斯，定部線圈的激磁磁通係以移動部磁通的 1/10（50 高斯）為始動值，依據表 1 由三種線圈實驗數據，可知 0.35Φ900T 的線圈在 0.3A 時可滿足此條件，所以驅動器定部線圈採用 0.35Φ 的漆包線繞在 3.1cmx4.2cm 的框架上，線圈直流電阻約 20 歐姆，再考量線圈的溫升，所以線圈的激磁電流以不超過 1A 為宜，因此 0.3A 至 1.0A 間即為可調整之電流，以調變車速。
- (二) 驅動器驅動車體直線移動速度量測資料如表 2。
- (三) 由表 2，激磁線圈之磁通與行車速度之關係如圖 5-4。
- (四) 由表 2 完成器的系統運轉特性分析，此磁浮車體行走的初始值為通入 0.329A 的線圈電流，產生 57 高斯的磁通密度使之啟動，這個數據與設計之初所預設之值極為接近，證明此條件符合本系統之設計。

規格 電流 A	0.29 φ 1150T		0.32 φ 1120T		0.35 φ 900T	
	a	b	a	b	a	b
0.1	11G	23G	11G	23G	11G	18G
0.2	21G	45G	21G	45G	21G	35G
0.3	31G	67G	31G	67G	31G	52G
0.4	41G	89G	41G	89G	41G	69G
0.5	51G	110G	51G	110G	51G	86G
0.6	61G	133G	61G	133G	61G	102G
0.7	71G	156G	71G	156G	71G	119G
0.8	81G	178G	81G	178G	81G	135G
0.9	91G	201G	91G	201G	91G	151G
1.0	101G	224G	101G	224G	101G	169G

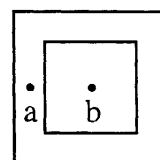


表1 線圈電流—磁通密度實驗數據

電流 A	電壓 V	直流電阻 Ω	磁通密度 G	移動54cm 量測時間 sec		平均時間 sec	平均速度		
							cm/sec	m/min	km/hr
0.230 ^A	4.65 ^V	20.2 ^{Ω}	40G	1	無法 啟動	0	0	0	0
				2					
				3					
				4					
				5					
0.329 ^A	6.65 ^V	20.2 ^{Ω}	57G	1	2"86	2"79	19.35	11.61	0.70
				2	2"77				
				3	2"82				
				4	2"74				
				5	2"77				
0.428 ^A	8.65 ^V	20.2 ^{Ω}	72G	1	2"22	2"19	24.66	14.79	0.89
				2	2"16				
				3	2"21				
				4	2"23				
				5	2"14				
0.527 ^A	10.65 ^V	20.2 ^{Ω}	87G	1	1"90	1"87	28.88	17.33	1.04
				2	1"82				
				3	1"86				
				4	1"89				
				5	1"89				
0.676 ^A	13.65 ^V	20.2 ^{Ω}	117G	1	1"58	1"59	33.96	20.38	1.22
				2	1"52				
				3	1"61				
				4	1"68				
				5	1"57				
0.824 ^A	16.65 ^V	20.2 ^{Ω}	135G	1	1"42	1"46	36.99	22.19	1.33
				2	1"47				
				3	1"45				
				4	1"49				
				5	1"48				
0.973 ^A	19.65 ^V	20.2 ^{Ω}	167G	1	1"34	1"32	40.91	24.55	1.47
				2	1"29				
				3	1"35				
				4	1"30				
				5	1"34				

表2 線形驅動器完成後之運轉性能（行車速度）

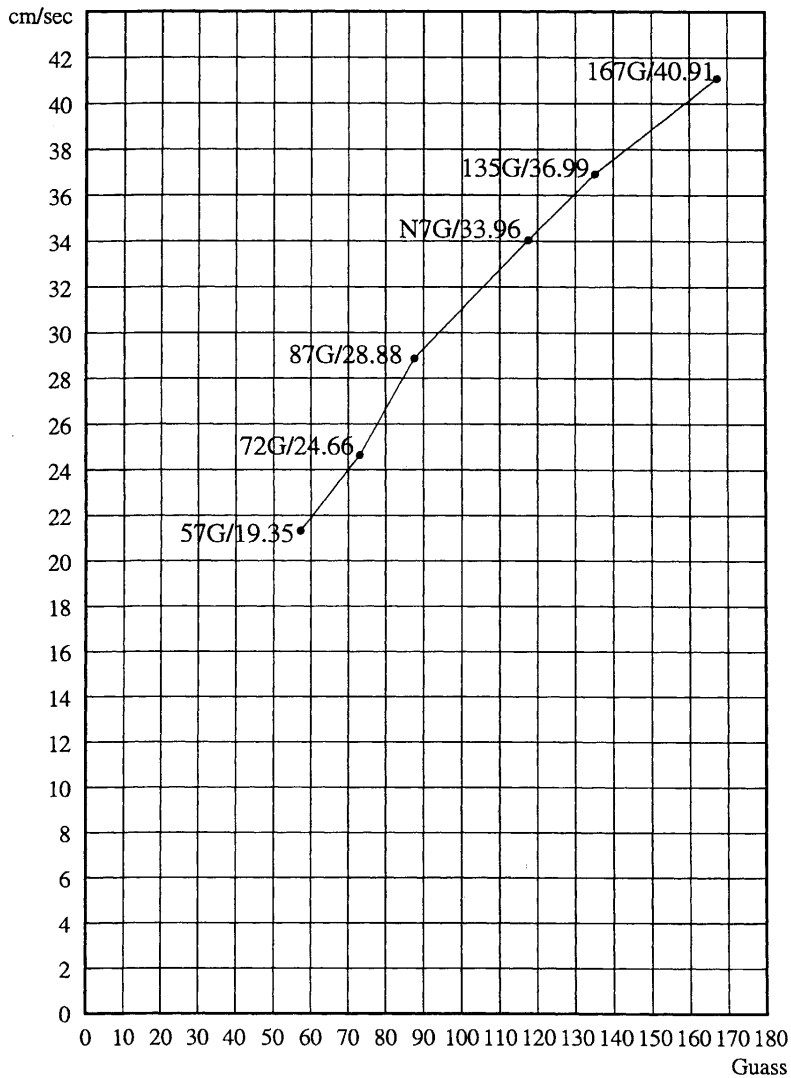


圖5-4 磁通—速度關係

六、討論

- (一) 此次所設計的線形驅動器，定部線圈因採用二相方式(180°)，會有啟動上的死點，這個問題可將定部的二相式線圈，改成三相式(120°)的配置即可改善，其理由如圖6-1。

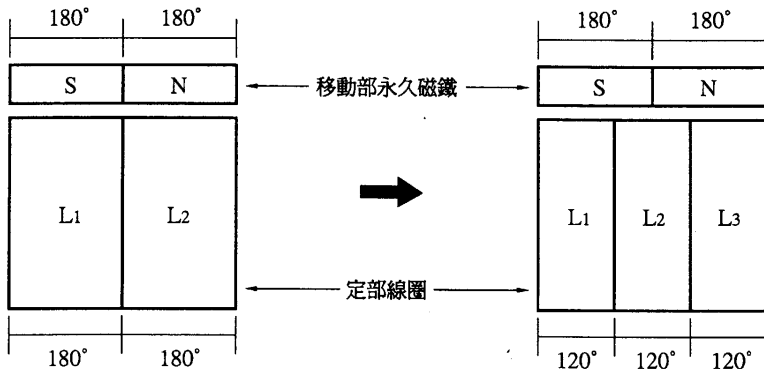


圖6-1 改善啟動死點方法

(二) 要使線形驅動器的定部與動部保持一定的間隙並不容易，由於磁浮1號係採用下方垂直方式牽引，根本上與磁浮支持的浮力產生相違背的作用力，因而影響懸浮平穩度，假使將牽引機構改至車體兩側以水平方式牽引應可改善，其牽引概念如

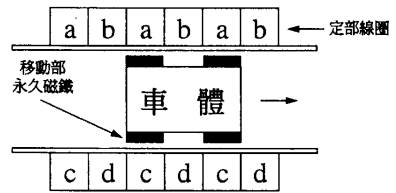


圖6-2 水平方式牽引

圖6-2，依此概念再度研製磁浮2號（其設計圖詳附件三）完成後實驗證明其穩定性大為提升，加速性更高達50%以上，整體效能獲得極大改善。

(三) 由 F （推力）= n （線圈有效導體數）· t （線圈圈數）· B （磁通密度）· I （電流）· L （有效導體長度）——（原式）。

$$\textcircled{1} \text{ 因為： } \phi \text{（磁通量）} = B \cdot \frac{W \text{（有效導體寬度）} \cdot L}{P \text{（極數）}}$$

$$\text{所以： } B \cdot L = \frac{\phi \cdot P}{W} \text{ 代入原式}$$

$$F = n \cdot t \cdot I \cdot \frac{\phi \cdot P}{W} \dots\dots\dots (1)$$

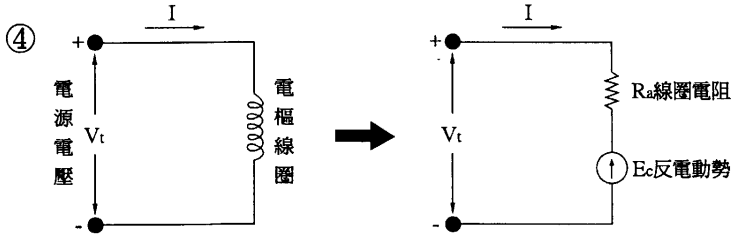
$$\textcircled{2} \text{ 又 } K_g \text{（電磁力常數）} = n \cdot t \cdot \frac{P}{W} \text{ 代入(1)式}$$

$$\text{則 } F = K_g \cdot \phi \cdot I \dots\dots\dots (2)$$

$$\textcircled{3} \text{ 又 } K_t \text{（推力常數）} = K_g \cdot \phi \text{ 代入(2)式}$$

$$\text{則 } \boxed{F = K_t \cdot I} \dots\dots\dots (3)$$

則 $F = K_t \cdot I$ (3)



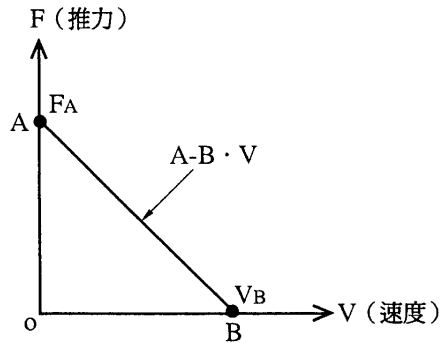
$$I = \frac{V_t - E_c}{R_a} \quad \text{代入(3)式}$$

$$F = k_t \cdot \frac{V_t - E_c}{R_a} \quad \text{..... (4)}$$

⑤又 E_c (反電動勢) = K_f (感應電壓常數) · V (速度) 代入(4)式

$$\begin{aligned} F &= K_t \cdot \frac{V_t - K_f \cdot V}{R_a} \\ &= \frac{K_t \cdot V_t}{R_a} - \frac{K_t \cdot K_f \cdot V}{R_a} \\ &= A - B \cdot V \quad \text{..... (5)} \end{aligned}$$

因此推力 F 隨速度 V 之增加而呈直線下降，形成LDM下降特性。



⑥在 B 點時之速度為 V_B ，而推力 F 為 0 ，代入(5)式

$$F = A - B \cdot V_B = 0$$

$$V_B = \frac{A}{B} = \frac{V_t \text{ (電源電壓)}}{K_f \text{ (感應電壓常數)}}$$

⑦在 A 點時之推力為 F_A ，而速度為 0 ，代入(5)式

$$F_A = A - B \cdot 0 = A = \frac{K_t \cdot V_t}{R_a}$$

其中 $\frac{V_t}{R_a} = I_s$ (起動電流) 所以 $F_a = K_t \cdot I_s$

F_a 則為起動推力

⑧由 $F = A - B \cdot V$ 知推力與電源電壓 V_t 成比例變化，證明圖5-4本製作線形推動器之磁通—速度應為一線性式成為一直線，可能由於速度量測的誤差造成非線性是可理解的。

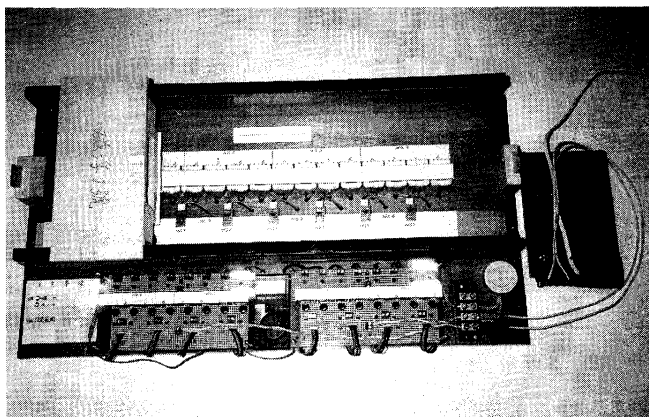
七、結論

此次線形直流驅動器與磁浮系統的研究和製作，雖能達到啟動和行走的目標，使得數月來的擔憂終能放心來，但這只是個「起步」，其中還有許多的問題和技術尚待進一步的鑽研，尤其感應型和同步型的驅動方式，以及驅動平穩性的控制，或是加入系統控制單元等，都是日後待研究的方向。

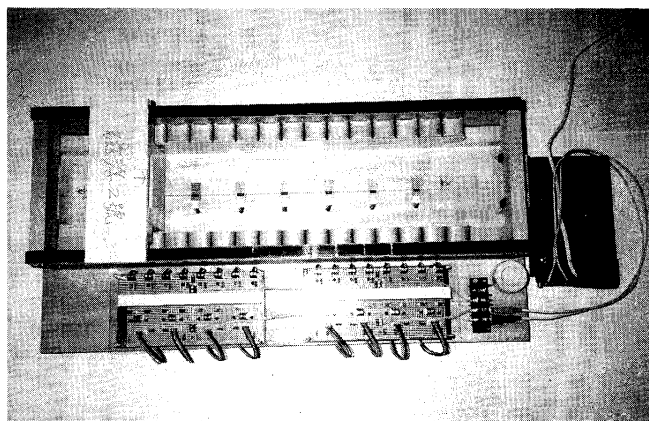
磁浮系統在德、日等國已有實驗系統在進行，相信假以時日，磁浮必會成為大眾運輸工具的主流，提供快速、舒適、安全、低污染的服務，因此這方面的研究有賴科學家、工程師和你我的努力，本文的內容對國中生而言，也許稍嫌困難，但如能拋磚引玉，引起同學們參與的興趣，方不失參展的主要用意。

八、參考資料

- (一) 電動機控制—羅煥茂編著—電子技術出版社
- (二) 馬達驅動電路技術—辰白編譯—建興出版社
- (三) 線型伺服電動機—許中平、黃煌嘉編譯—全華科技圖書公司
- (四) 感測元件—杜中明譯—儒林圖書公司
- (五) 實用磁路設計—王以真編著—全華科技圖書公司
- (六) 電機機械—劉康立、陳立明譯—曉園出版社
- (七) 物理學—謝華孫譯—東華書局
- (八) 國中理化第四冊—國立編譯館
- (九) 高中物理第三、四冊—國立編譯館
- (十) 電子學—劉利誠編譯—全華科技圖書公司

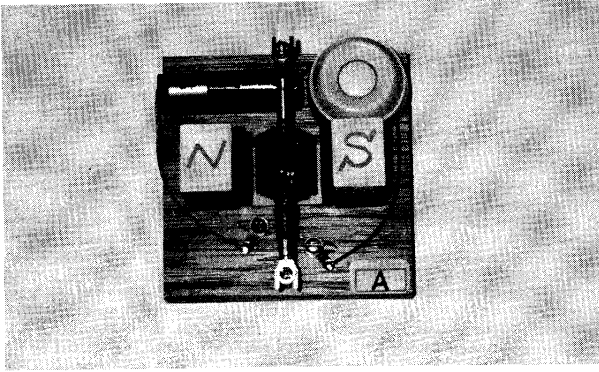


磁浮 1 號照片

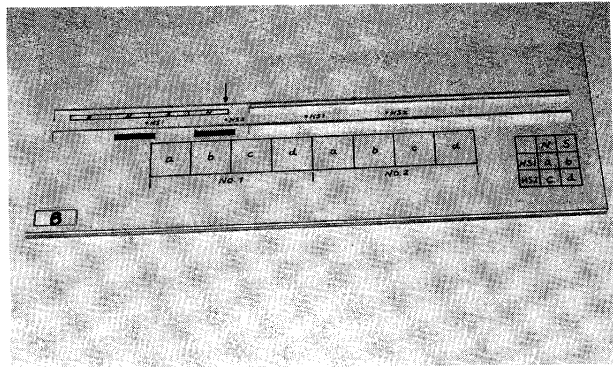


磁浮 2 號照片

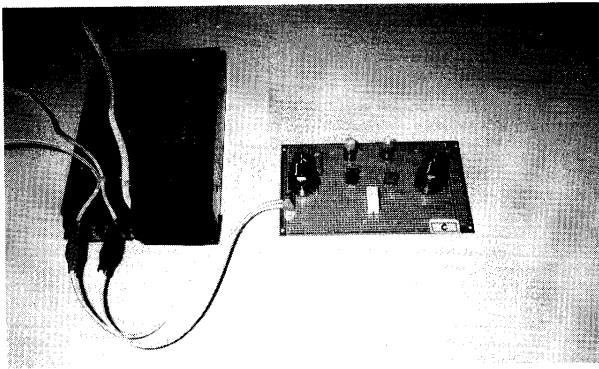
附件一



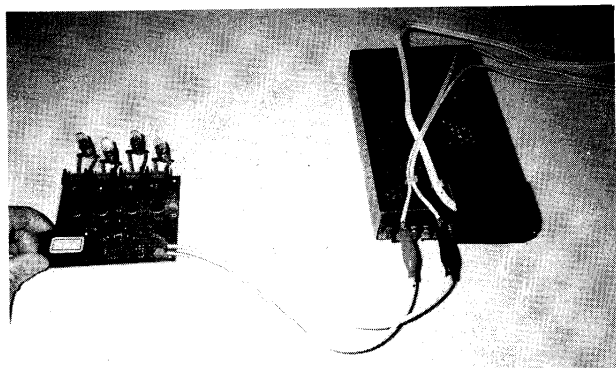
照片A
直流電動機



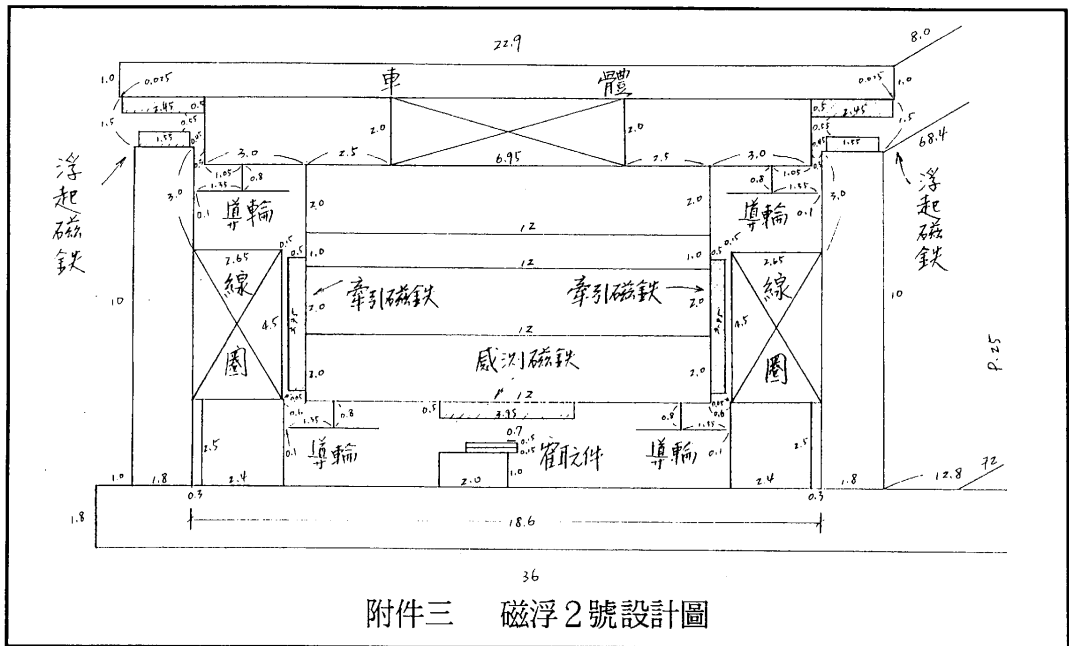
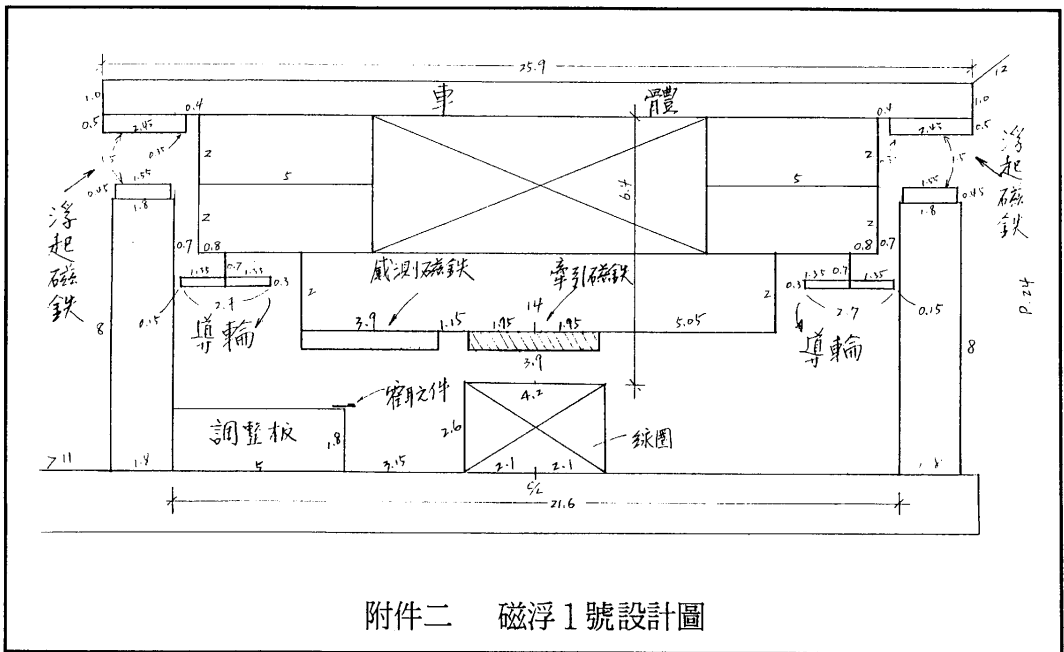
照片B
線形驅動器作原理說明板



照片C
差動放大器動作原理



照片D
線形驅動器控制電路基本單元



評語

本作品係利用磁性斥力使車體懸浮，並設計線性馬達之磁場切換控制電路，具有相當之難度，作者對各部份之設計，皆能推導計算，並以實驗量測其運轉性能，其思考嘗試與製作的過程，算是相當嚴謹，很具研究之精神。