

# 中華民國第 59 屆中小學科學展覽會 作品說明書

---

國中組 生活與應用科學(一)科

032810

自製磁浮馬達應用於發電機之研究

學校名稱：桃園市立經國國民中學

作者： 國二 李柏翰	指導老師： 洪瑞聰
---------------	--------------

關鍵詞：磁浮、法拉第、摩擦力

## 摘要

本組實現一個結合磁浮模組、馬達模組及發電模組之自製磁浮-馬達-發電實驗平台 **Maglev-Motor-Generator (MMG)**，探討法拉第定律及摩擦力影響。首先，將實心圓鋁柱加工製成感應-同步合一的同軸轉子，再將強力磁鐵嵌入圓鋁柱轉子表面及兩端，並藉由下方固定磁鐵斥力達到磁浮懸空之目的。另外，透過變頻器驅動定子旋轉磁場帶動磁浮轉子與旁邊線圈切割磁力線以驗證法拉第定律及發電與轉速關係。為了提高磁浮穩定，磁浮轉子一端以擋板限制其位移量，調整磁鐵角度、磁力大小來達到穩定之磁浮支撐力，並探討在不同材料擋板下，摩擦力對磁浮轉速的影響。

本作品利用上課所學知識，建置 MMG 實驗平台來探討轉速與摩擦力及發電關係，最後將研究結果加以分析及驗證，達到科學實驗之目的。

## 壹、研究動機

現代工業要求高產能與高效率，因此高速化是許多儀器設備發展的一個重要方向。以光碟機為例，從早期的幾倍速，進展至目前的幾十倍速；以工具機為例，從每分鐘幾千轉，進展至目前的幾萬轉，人們對於速度的要求似乎永無止盡，但速度的提升卻常遭遇瓶頸，分析許多設備之速度瓶頸，多發生在軸承溫度問題。一般常用的軸承多為接觸式滾動軸承，接觸面摩擦問題不可避免，摩擦力不僅損耗能量及機件，也會生熱使機件因溫升而變形影響精度，甚至破壞整個設備。速度愈高，問題愈嚴重，通常配合適當的潤滑以降低摩擦係數，來改善問題，然而，潤滑會產生污染問題，不利於環保。為解決摩擦問題，透過非接觸方式來支撐轉子是未來必走的方向，也唯有如此才能避免機件因相互接觸產生耗損，進而達到高速化。

由於磁浮軸承具有高速運轉穩定、無震動、無需使用機械軸承、無防塵罩、不怕灰塵進入機構核心的特點，近年來廣受各界的探討與研究。但是為了獲得穩定的磁浮控制力及安定運轉轉矩，磁浮系統多採用強健控制、智慧型控制等高複雜度的閉迴路控制理論來設計，再透過精密的感測元件及強大微處理器來計算龐大運算程式產生控制力以獲得穩定輸出，價格十分昂貴。目前只用在高速離心機、超真空幫浦系統、精密加工、磁浮列車、人工心臟、心室輔助器、太空望遠鏡、風洞實驗應用等高精密需求產業。

歷屆科展作品有關磁浮發電及摩擦力的相關研究並不多。其中，台北市立麗山高中的「反轉式風力發電之磁浮轉子研究探討」(2014 台灣國際科展)，提出磁浮風力發電機單雙組旋翼在不同電阻、風速等變因下所受的影響及磁浮軸承的擺動軌跡分析[1]。此外，臺北市私立復興實驗高級中學的「承諾一個乾淨的未來－太陽能磁浮馬達和高效率磁浮小型電動機及風力發電機」(第 52 屆科展)，利用切割線圈的原理製造小型風力發電機及霍爾感應器取代傳統電樞製作無碳刷馬達，實現結合發電與電動功用的第三代高效率磁浮小型電動機及風力發電機[2]。

為了進一步瞭解磁場與發電之間的關係，本組開始著手蒐集相關資訊並上網搜尋磁場、電磁、磁浮及發電原理等相關資料，並與學校老師及家長共同討論，著手設計第一代 MMG(電磁鐵磁浮)、第二代改良型 MMG(冷媒冷卻)及第三代 MMG(永磁式磁浮)，並完成相關測試以了解佛萊明定則、法拉第定律及摩擦力與轉速之間關係。

## 貳、研究目的

- 一、了解電磁鐵製作方式，並實際測試磁力與電源關係。
- 二、研究磁場、角度、溫度與磁浮穩定度關係。
- 三、認知電能與磁能的應用與研究。
- 四、自製磁浮馬達發電模組。
- 五、探討摩擦力對轉速的影響。

## 參、研究設備及器材

- 一、研究組別：

本組作品將設備分為磁浮模組、馬達模組及發電模組三大類，依圖一至圖三先後建置完成，相關架構及設備說明如表一、表二所示：

表一

組 別	架 構
磁浮模組	鋁質圓柱轉軸、定子電磁鐵、強力磁鐵、托架、定子輸入電源、塑膠擋板
馬達模組	鋁罐、漆包線、轉子繞製單相定子磁場、變頻器
發電模組	強力磁鐵、定子電樞繞組、三用電表

## 二、研究設備：

表二

類別	設備及器材名稱	單位	數量	設備及器材名稱	單位	數量
儀器與工具	CNC 銑床	台	1	非接觸式光電轉速表	台	1
	砂輪機	台	1	單相定子	組	1
	虎鉗	台	1	電磁接觸器線圈	個	1
	鑽床	台	1	木板	片	1
	手工電鑽	支	1	強力磁鐵	顆	30
	漆包線	捲	1	升壓型變壓器	台	1
	變頻器	台	2	筆記型電腦	台	1
	三相定子	組	1	電源供應器	台	1
	壓縮機	台	1	示波器	台	1
	蒸發器	組	1	線鋸	台	1
	壓克力板	片	2	車床	支	1

## 肆、研究過程

### 一、製作構思

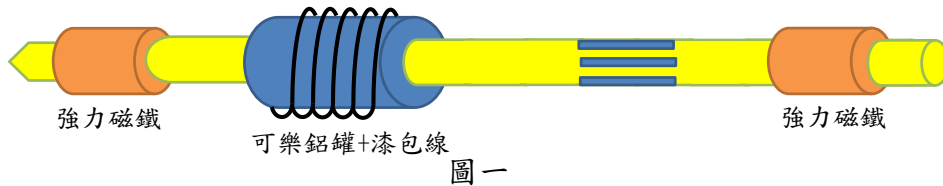
傳統接觸式軸承所衍生的摩擦力問題是無法避免的，摩擦力不僅耗損能量，機件也會因此過熱、變形而影響整體精度，甚至造成整個系統損毀。雖然採用潤滑劑雖然可以降低摩擦係數改善問題，但是其產生之污染問題不利於環保，且也無法長時間運轉於高轉速之場所。

因此，透過非接觸方式來支撐轉子是未來發展的方向，也唯有如此才能避免機件因相互摩擦而產生耗損，進而達到高速化。目前常用非接觸式軸承主要有三類：第一類是空氣軸承、第二類為流體軸承、第三類為磁浮軸承。其中，空氣軸承在大負載時精度會下降難以控制且剛性不佳，只能用於輕載，且必須搭配空氣幫浦，故不實用。流體軸承，剛性高、可承受負荷大，成本也不高，但流體阻尼不小，且容易受溫度影響影響精度。

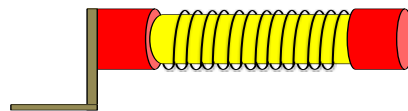
由於磁浮軸承具有高速運轉穩定、無震動、無需使用機械軸承、無防塵罩、不怕灰塵進入機構核心的特點，近年來廣受各界的探討與研究。為了瞭解磁浮、磁場與發電之間的關係，本組開始著手蒐集相關資訊並上網搜尋磁場、電磁、發電原理及磁浮等相關資料，並與學校老師及家長共同討論，著手設計 MMG (磁浮模組-馬達模組-發電模組) 機構，來驗證磁浮、轉速控制及磁場與線圈匝數-發電量之間的關係。

## 二、製作步驟

首先，選擇材質輕盈鋁質合金材料作為轉子以減少重量(鐵圓柱太重，塑膠、壓克力容易形變、易碎且加工不易)，請家長協助加工製成 20mm 及 10mm 等不同直徑之圓柱長條狀，並於頭尾兩端裝置圓柱形強力磁鐵(圖一)。接著將一個可樂鋁罐頭尾兩端中心部位鑽孔，纏繞漆包線並用三秒膠逐層固定約 400 匝，兩端短路做成感應馬達轉子，在鋁棒另一端將強力磁鐵嵌入轉子作為轉磁式發電的轉子磁場。

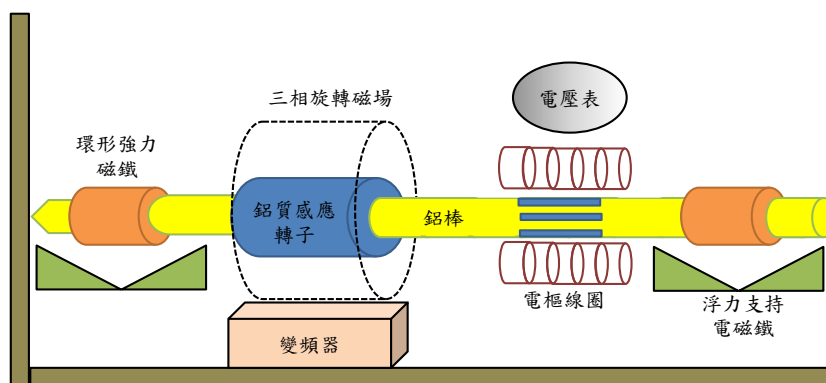


圖一



圖二

浮力部份，本組將 800 匝漆包線繞製於圓柱型鐵塊上，並通以直流電產生固定磁極之電磁鐵，透過外加電壓/電流大小來調整電磁鐵磁力大小(圖二)。此外，為了能夠控制發電的轉速來實驗法拉第定律及佛萊明定則，本組拆下三相感應馬達定子加上變頻器作為旋轉磁場，並透過變頻器的調整來獲得所需之轉速完成第一代 MMG (圖三)。



圖三

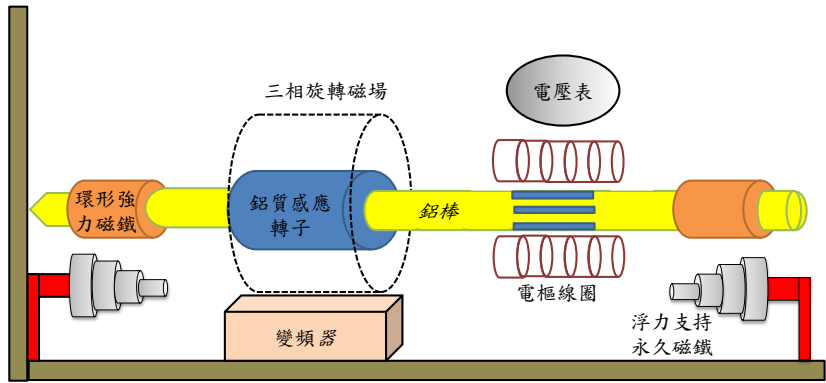
經實際測試結果發現，電磁鐵通以直流後溫度非常高，且磁場非常不穩定甚至會消失(2-3 分鐘)，經詢問師長及查閱中央大學科學教育中心網站後發現：由於電阻很小，加上直流電後經過一段時間會產生高溫( $W = I^2 R t$ )，過熱的漆包線會使電磁鐵磁力改變影響磁浮的穩定度，若是持續調整電源輸出增加電流量提供更高磁通量，電源供應器會過載而燒掉保險絲，加裝限流電阻也不易克服且增加消耗，

穩定的浮力控制難以達成，而這也是最困難的地方。此外，當漆包線的溫度越高時，導磁鐵塊的導磁率會下降，磁力會降低。當溫度超過鐵心的居禮溫度(Curie Temperature)561.67 度時，由於熱能增加，使的粒子動能提高，破壞了金屬的鐵磁性並轉變為順磁性，此時其磁力不足以吸附在磁鐵上，磁力會消失。

因此，為了克服溫度過高產生的不確定現象以提供更穩定的磁浮特性，本組將 MMG 加上一組冷媒壓縮機，並利用纏繞在電磁鐵上的銅管(蒸發器)來降低鐵心溫度、提高系統磁浮穩定性(第二代改良型 MMG)。另外，為了獲得更好的冷卻效果，本組採用先啟動壓縮機將蒸發器降至零度 C 以下(結霜)，再輸入電磁鐵電源操作策略。

經試驗後發現，與第一代 MMG 只提供 2-3 分鐘穩定磁浮相較，第二代 MMG 可以提供 5-8 分鐘的磁浮穩定能力(壓縮機產生結霜越久，穩定時間越長)，電磁鐵的磁浮穩定性的確提高不少。但隨著時間增長，鐵心溫度持續累增，冷媒壓縮機所提供之冷卻效果已經無法有效降低電磁鐵溫度，磁浮開始變得非常不穩定，且蒸發器所凝結之冰霜融化成大灘積水，造成系統短路，損毀了第二代 MMG 三相定子、變頻器及電源供應器，需另外重新建置硬體。

因此，為了避免上述問題，本組改以永久磁鐵來取代原先電磁鐵來提供所需之浮力，並購置不同大小、形狀及磁力線之永久磁鐵來做微調，完成第三代 MMG(圖四)。



圖四

由於永久磁鐵之磁力大小不具可調性，磁浮穩定點調整難度倍增，需反覆測試、購置不同規格之強力磁鐵搭配後才能符合需求。但是，當磁浮斥力與轉子間取得靜態磁浮平衡後，若再加入定子旋轉磁場擾動及鋁製轉子嵌入強力磁鐵所造成重量分配誤差，又衍生出另一個新問題。為了克服這項缺點，本組重新調整磁場位置分佈並將磁力往單邊集中，再藉由一個壓克力作為擋板來獲得所需的動態磁浮平衡。經試驗證明，第三代 MMG 所提供之磁浮穩定性及持續性皆較前兩代提昇很多，且無須考量 Curie Temperature 所造成之困擾，但是轉子尖端與擋板之間的接觸摩擦損失，對其轉速造成相當程度

的影響。

為了進一步了解接觸摩擦對轉子轉速影響程度，本組著手蒐集相關資料及理化課本所學摩擦力知識，設計規劃實驗方式，並簡化數學式以方便計算分析。利用非接觸式光電轉速表來量測轉速 rpm 值，記錄轉子在 20Hz、30Hz、40Hz 及 50Hz 等不同變頻器輸出頻率下，其磁浮轉子對拋光木頭、鏡面及壓克力材料擋板之轉速數值並加以分析。

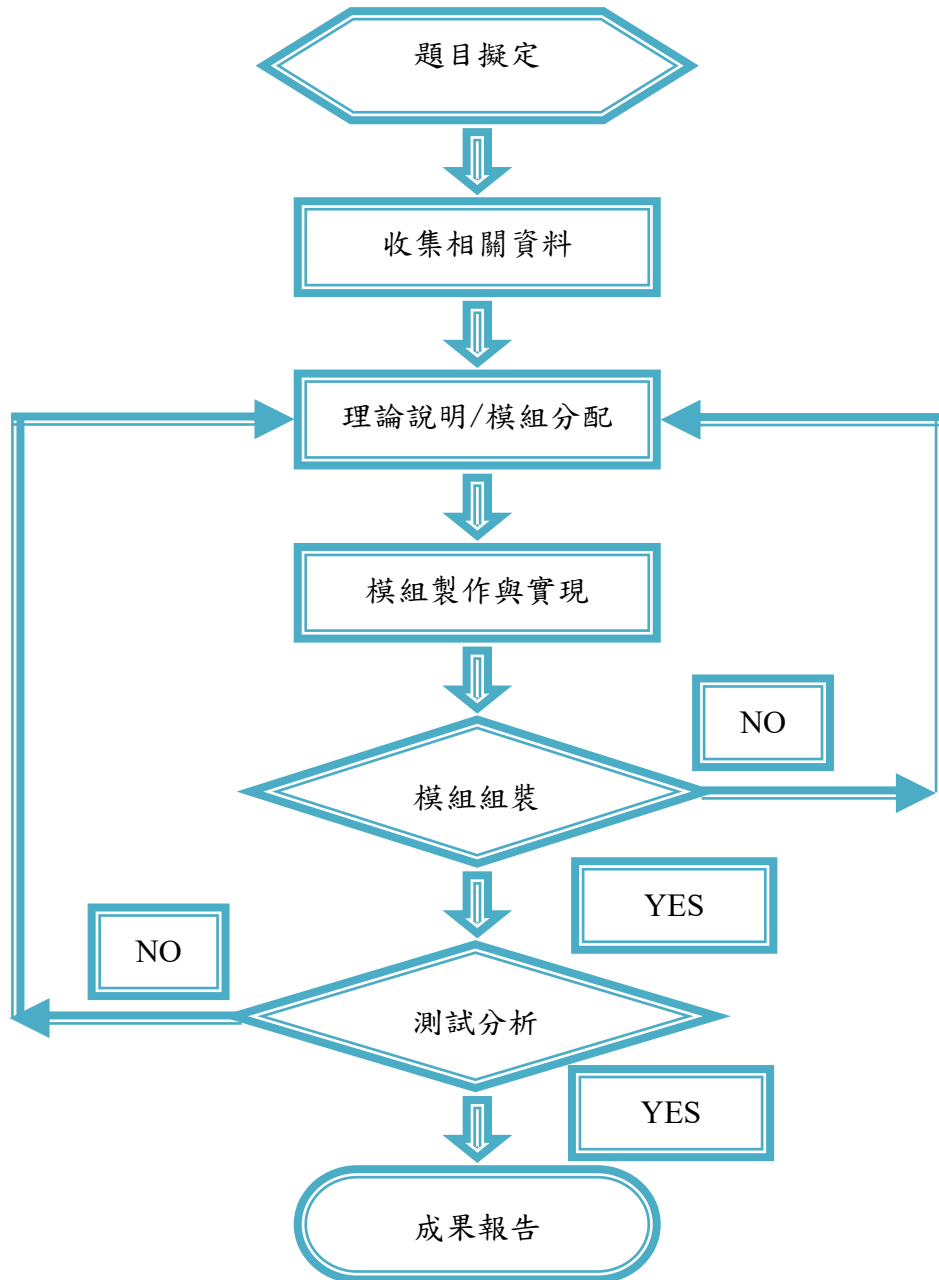
此外，為了瞭解法拉第定律之繞組匝數、磁通量之間關係與反抗磁通關係，本組設計將三個相同大小的環形鋁塊，分別纏繞 200、400、600 等不同匝數之漆包線，先後放置在嵌入強力磁鐵的轉子旁作為發電的定子電樞繞組。當磁浮轉子旋轉時，內嵌之強力磁鐵磁場將與兩旁電樞線圈相互切割，依法拉第定律可知，放置兩端之定子繞組將產生電壓：

$$E = N \frac{d\Phi}{dt}$$

其中： $E$  為電樞線圈產生之感應電勢； $d\Phi$  為轉子旋轉時，強力磁鐵所產生之磁通變化量； $N$  為電樞線圈匝數； $dt$  為轉子旋轉所產生之時間變化。

本組透過變頻器轉速控制及三種不同匝數線圈，來實驗法拉第定律中匝數與磁通變化量(磁通/轉速)的關係，並觀察磁浮高度、轉速、穩定性、發電量與定子線圈位置之間的相互關係，並以圖表方式呈現其結果。

### 三、研究流程



圖五

### 四、相關原理說明

#### (一)歐姆定律：

在直流電路中，若負載電阻值不變，則電源電壓越大，電路電流也越大，其關係式如下(圖六)：

$$V = I \times R$$

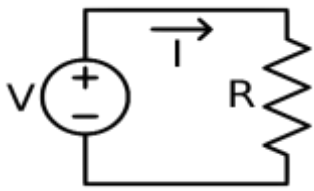
其中，V：(電壓，單位：伏特)， I：(電流，單位：安培)， R：(電阻，單位：歐姆)

#### (二)感應機原理：

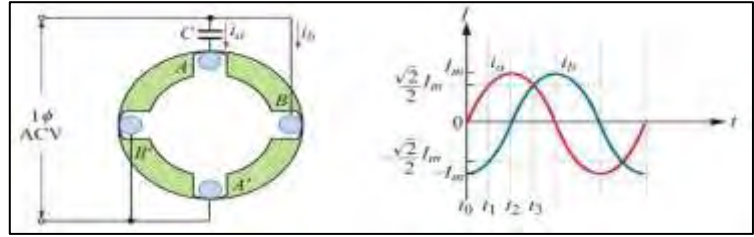
感應電動機轉子繞組的電流是利用電磁感應而生，當轉子繞組短接時，由於定子磁場的變



化切割下，轉子感應出一電壓並衍生出電流及磁場因此而轉動，所以稱為感應電動機(圖七)。



圖六



圖七

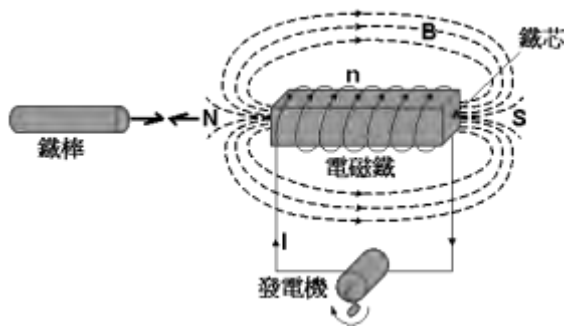
資料來源：DeltaMOOCx 台達電子文教基金會

(三)電磁鐵原理：

當直流電通過導體時會產生磁場，若使直流電通過由導體構成的線圈則會產生具方向性的磁場。但是單純由直流電和線圈所構成磁場不夠集中而導致產生的磁力不夠，因此會在線圈的中心加入一磁性物質以達到集中磁場的效果。一般而言，電磁鐵所產生的磁場強度和直流電大小、線圈圈數及中心的導磁物質有關，在設計電磁鐵時會注重線圈的分佈和導鐵物質的選擇，並利用直流電的大小來控制磁場強度(圖八)。

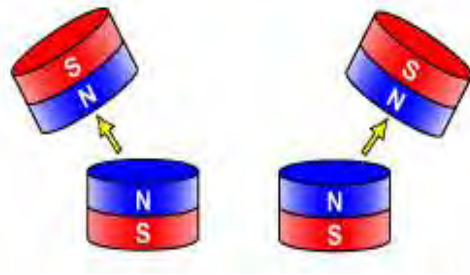
(四)磁浮原理：

強力磁鐵或電磁鐵異極會相吸，同極卻有極強的排斥力，磁浮軸承能浮起來就是利用這個原理。而轉子的重量並不輕，若要靠磁鐵相吸及相斥的力量將它浮起來，磁力就必須要很強。因此搭配使用電磁鐵和強力磁鐵，除了可增強磁性外還可以節省一部分電力(圖九)。



圖八

資料來源：通訊博物館網站-電磁鐵篇

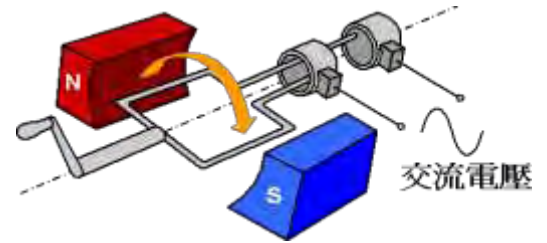


圖九

資料來源：物理園網站-磁浮火車篇

### (五) 法拉第定律：

磁鐵切割線圈速率愈快時，線圈產生電壓愈大；當磁鐵接近或離開線圈時，磁鐵移動的速率愈快，線圈產生的電壓也愈大(圖十)。



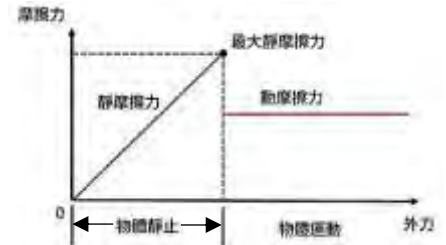
圖十

資料來源：通訊博物館網站-交流發電機篇

### (六) 摩擦力原理：

兩物體的表面互相接觸，若欲使二者相對滑動，則接觸表面間即會產生摩擦力，當兩物體為相對靜止狀態，此摩擦力為靜摩擦力，當兩物體間有相對滑動狀態，此摩擦力為動摩擦力(圖十一)。另外，摩擦係數的大小決定於接觸面間的光滑程度。越粗糙，摩擦係數越大。

- 最大靜摩擦力 ( $f_s$ ) 與接觸面的正向力 (N) 的關係式為： $f_s = N \times \mu_s$
- 動摩擦力 ( $f_k$ ) 與接觸面的正向力 (N) 的關係式為： $f_k = N \times \mu_k$



圖十一

資料來源：均一教育平台網站-摩擦力

## 伍、研究結果

### 一、第一代電磁鐵型 MMG

#### (一) 轉子製作

本組想自行設計轉子繞組，請學長用 CNC 代為加工製作轉子外殼(圖十二)並繞製約 2000 匝的漆包線(圖十三)，但是測驗後發現，由於轉子過重加上轉軸太細，其直徑無法搭配足夠大小之強力磁鐵，加上轉子無法在定子旋轉磁場下轉動(可能是繞製過程中漆包線斷線)。因此，改以車床加工後圓鋁柱串聯一小型鼠籠式馬達轉子製成(圖十四)，效果不錯，但是受限於連接點中心有所誤差，低速及高速旋轉時不穩定，無法在太低及較高轉速下使用。



圖十二



圖十三



圖十四

#### (二) 電磁鐵製作

電磁鐵設計，首先採用材料及加工都容易取得的壓克力經車床製作(圖十五)，但是由於壓克力並

非鐵磁性材料，所產生之電磁力非常有限(幾乎沒有)，後來改採用鐵圓柱加工後繞製(圖十六)，電磁力明顯提升很多，但是伴隨著鐵心溫度攀升及居禮溫度問題，磁場會逐漸消失。



圖十五



圖十六

### (三)運轉測驗

圖 a 學長電磁鐵心製作	圖 b 電磁鐵漆包線繞製	圖 c 第一代電磁鐵測驗	圖 d 改良電磁鐵測驗
圖 e 三相定子旋轉磁場	圖 f 變頻器	圖 g 靜態測試	圖 h 第一代 MMG

經實驗後發現，當 MMG 運轉到一段時間後(約 2-3 分鐘)，磁浮轉子就會降低高度，開始變得不穩定甚至脫落，電磁鐵所提供的穩定性非常差。過熱的漆包線會使圖 c 包覆在鐵心上的黑色絕緣膠帶融化成一大塊，甚至會造成漆包線短路(由於當時缺乏可量測高溫的紅外線測溫槍，無法得知當時溫度是否達到鐵的居禮溫度，但是由絕緣膠帶多層黏貼後融化成一大塊無法剝離，可以想像溫度很高)，只能再另行購製更粗的漆包線繞製重作(圖 d)。

當浮力不足時，本組採用調升電源供應器之電壓源及電流源輸出，則電磁鐵心溫度會繼續攀高，電源供應器也會過載燒掉保險絲，加裝限流電阻也不易克服且徒增消耗，最佳浮力難以控制，第一代 MMG 設計有瑕疵。

另外，依法拉第定律，電壓會隨著轉速提升及匝數增加而成等比例提升，但是本實驗結果發現，

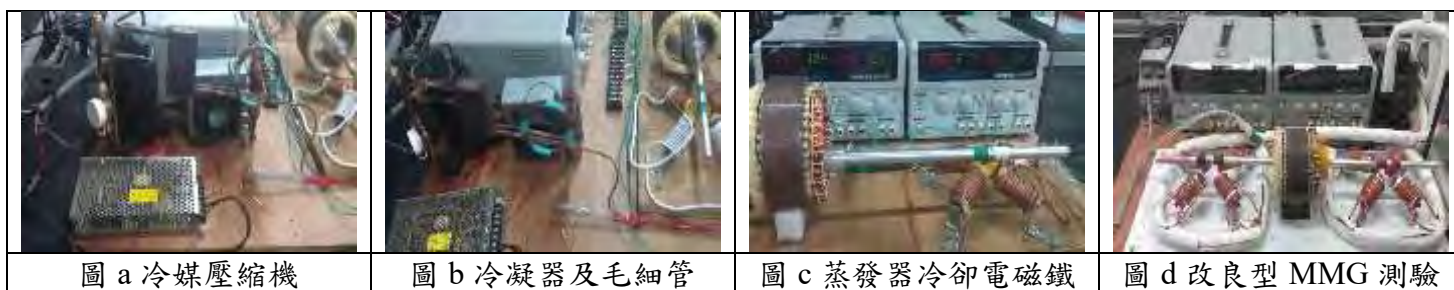


電壓並沒有依比例提高，經詢問電機專家了解這是因為自己做的繞組鐵心並非用矽鋼製成，磁阻大且容易磁飽和，加上不完美漆包線繞製所致。

因此，為了避免因為溫度過高產生的不確定現象，提升穩定的磁浮特性，本組修正架構，增加壓縮機、冷媒、冷凝器、蒸發器等冷卻系統來降低電磁鐵溫度，提高系統之穩定性。

## 二、第二代改良型 MMG(冷媒冷卻)

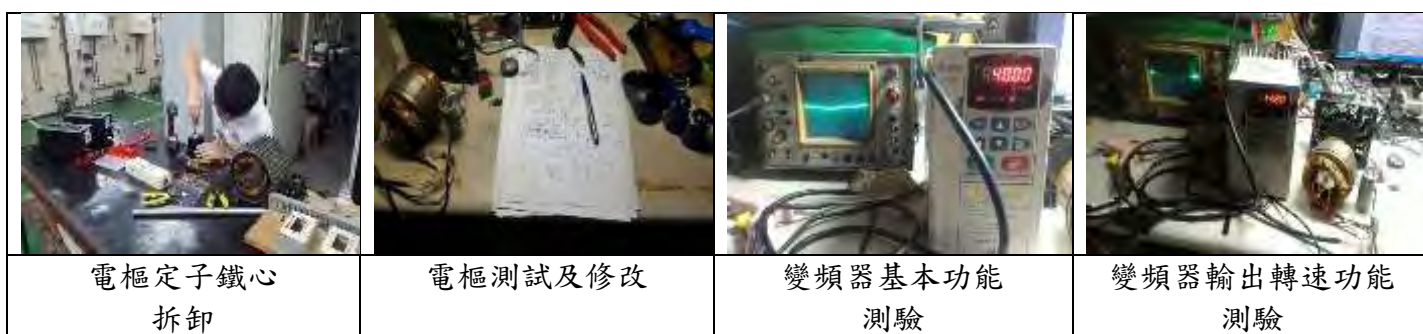
為了改善電磁鐵因溫度過高所造成之不穩定缺點，我跟學長去資源回收場買一台堪用的壓縮機及相關設備，並在學長的協助下完成冷媒填充及冷凝器、蒸發器的安裝繞製，並利用纏繞在電磁鐵上的中空細銅管(蒸發器)內的冷媒帶走熱能，降低鐵心溫度提高系統磁浮穩定性。此外，為了獲得更好的冷卻效果，採用先啟動壓縮機將蒸發器降至零度 C 以下(結霜)，再啟動電磁鐵電源操作策略。







經試驗後發現，與第一代 MMG 只提供 2-3 分鐘穩定磁浮相較，第二代 MMG 可以提供 5-8 分鐘的磁浮穩定能力(壓縮機產生結霜越久，穩定時間越長)，電磁鐵的磁浮穩定性的確提高不少。但隨著時間增長，鐵心溫度持續累增，冷媒壓縮機所提供之冷卻效果還是無法有效降低電磁鐵溫度，磁浮開始變得非常不穩定，且蒸發器凝結後之冰霜，融化後產生大灘積水，不但造成系統短路，甚至損毀了第二代 MMG 定子磁場、變頻器及壓縮機電源供應器，需另外購置設備重建硬體。

## 三、第三代永磁式磁浮 MMG

為了解決上述溫度造成之不穩定問題，本組重新設計浮力模組，改以永久磁鐵取代電磁鐵來提供所需之浮力。此外，為了克服磁力調整問題，購置不同大小、形狀及磁場強度之永久磁鐵來做微調，藉由磁鐵之間相對位子及角度、高度反覆修正，並重新取得定子、變頻器完成第三代 MMG。

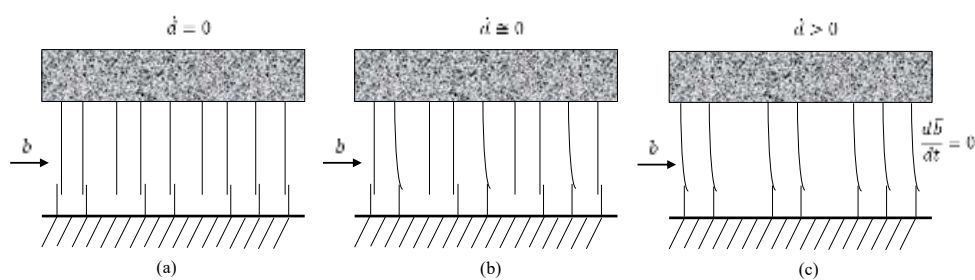


			
110V/220V 變壓器接線	電樞定子漆包線 繞製	磁浮運轉模擬 測試	第三代 MMG

由於永久磁鐵之磁力不具可調性，磁浮穩定點調整難度倍增，需反覆測試、購置不同規格之強力磁鐵搭配後才能符合需求。但是當磁浮斥力與轉子間取得靜態磁浮平衡後，若再加入定子旋轉磁場擾動及鋁製轉子嵌入強力磁鐵所造成重量分配誤差，又衍生出另一個新問題。因此，本組重新調整磁場位置分佈並將磁力往單邊集中，並藉由一個擋板限制來獲得所需之轉子動態磁浮平衡。

經測試後發現，第三代 MMG 所提供之穩定性及持續性較前兩代提昇很多，且無須考量 Curie Temperature 所造成之困擾，轉子磁浮及旋轉穩定度高且可以高速運轉。因此，本組就以第三代 MMG 為主體，設計一連串之發電試驗及摩擦力試驗來了解法拉第定律及摩擦力所造成的影響。此外，為提高實驗數據之可信度，每項實驗均做五次，並利用網路購買的非接觸式光電轉速表及數位三用電表量測其轉速與發電量大小再取其平均值作分析。

對於摩擦力現象及描述，網路上及學術論文常見以 LuGre 摩擦力模型來表示其靜摩擦力、動摩擦力及黏滯摩擦力(圖十七)，但是其數學式演算法過於複雜，不是我們國中生程度可以瞭解。



圖十七

因此，為了分析摩擦力與轉速之間的關係，本組提出一個簡化的輸入作用力與轉子作用力及摩擦力之間的關係式，並忽略摩擦力接觸面積及表面粗糙所造成的影響：

$$\begin{aligned}
 F_m &= F_r + N \mu_s + N \mu_k + D \\
 &= F_r + (f_s + f_k) + D
 \end{aligned}$$

其中： $F_m$  為定子旋轉磁場所提供之輸入轉動作用力； $F_r$  為機械轉子所產生之 rpm 轉動力量； $N$  為接觸面的正向力； $\mu_s$  為靜摩擦力係數； $\mu_k$  為動摩擦力係數； $f_s$  為最大靜摩擦力； $f_k$  為動摩擦力； $D$  為

轉子不穩定及干擾所造成損失轉動力。

為了簡化方程式，本組將靜摩擦力與動摩擦力合併考量，重新定義為總摩擦力  $f = f_s + f_k$ ，並將方程式簡化成  $F_m = F_r + f + D$ 。此外，由於摩擦力之正向力  $N$  與接觸面固定時，動摩擦力與最大靜摩擦力恆保持定值，與外力大小、接觸面大小、物體速度快慢均無關[9]。因此，當轉子轉動時，其總摩擦力  $f$  為一固定值，只與物體材料有關，與轉子轉速無關。為了瞭解摩擦力對轉速的影響程度，本組以 20Hz、30 Hz、40 Hz 及 50 Hz 在壓克力、拋光木頭及鏡子等三種不同材料下，觀察其轉速與頻率之間關係，並加以分析。

#### 四、摩擦力實驗

表三

[註]轉速公式( $n = \frac{120f}{p}$ )

頻率 20 Hz		定子磁場轉速：1200 rpm			單位：rpm	
實驗 擋板材料	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均
壓克力	453.6	455.5	456.6	453.4	452.1	454.24
拋光木頭	493.3	491.4	489.6	492.2	493.4	491.98
鏡子	647.1	650.1	649.5	651.1	645.6	648.68

表四

頻率 30 Hz		定子磁場轉速：1800 rpm			單位：rpm	
實驗 擋板材料	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均
壓克力	704.5	704.6	705.1	706.2	705.8	705.24
拋光木頭	940.8	942.1	943.5	941.5	940.2	941.62
鏡子	1587.4	1587.4	1588.2	1589.4	1586.9	1587.86

表五

頻率 40 Hz		定子磁場轉速：2400 rpm			單位：rpm	
實驗 擋板材料	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均
壓克力	1072.6	1071.3	1072.5	1075.5	1075.6	1073.5
拋光木頭	1210.9	1213.2	1218.5	1210.6	1214.5	1213.54
鏡子	2244.1	2244.2	2246.2	2245.3	2246.3	2245.22

表六

頻率 50 Hz		定子磁場轉速：3000 rpm			單位：rpm	
實驗 擋板材料	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均
壓克力	1062.9	1066.5	1064.2	1068.3	1065.3	1065.44
拋光木頭	1461.7	1448.5	1442.3	1445.8	1445.6	1448.78
鏡子	2818.2	2820.2	2819.6	2818.6	2818.5	2819.02

由實驗得知，當變頻器啟動初期(0 Hz)，轉子無法立即旋轉，需要上升到 5-8Hz 才能開始轉動，若調整變頻器輸出電壓設定值，當設定電壓值越小，轉子運轉所需頻率越高，甚至不能轉動，若增加電壓值，啟動時所需頻率就會下降，但是馬達定子容易發燙。此外，當轉子在低頻及高頻運轉時，容易產生不穩定運轉狀態，與擋板的接觸點會一直晃動，呈現圓形、蝶形或不規則狀的移動，這些由旋轉磁場產生之擾動及轉子結構重心不穩定所造成之轉動力  $D$  損失，都會對轉子  $rpm$  轉動力量  $F_r$  產生影響。

當定子旋轉磁場所提供之輸入轉動作用力  $F_m$  未能克服最大靜摩擦力時，轉子無法轉動。當  $F_m > f_s$  時，轉子開始運轉，且動摩擦力  $f_k$  基本上變動不大。因此，只要  $F_m > f$  時，就會表現在轉子所產生之  $rpm$  轉動力量  $F_r$  上。本組依  $F_m = F_r + f + D$  關係式，將表三~表六所做的之平均值，分析其結果。  
[註]為方便分析，作用力不以牛頓為單位，改以 rpm 之數據來呈現， $F_m$  為理想之旋轉磁場轉速， $F_r$  為機械轉子旋轉磁場轉速，兩者之差距為總摩擦力  $f$  及跟不確定干擾  $D$  的和。

表七

$(f + D) =$ 理想之旋轉磁場轉速 - 機械轉子旋轉磁場轉速		單位: rpm		
頻率 擋板材料	20 Hz/1200 rpm	30 Hz/1800 rpm	40 Hz/2400 rpm	50 Hz/3000 rpm
壓克力	745.76	1094.76	1326.5	1934.56
拋光木頭	708.02	858.38	1186.46	1551.22
鏡子	551.32	212.14	154.78	180.98

由表七可以歸納出下列幾個結論：

1. 摩擦力(包含材料、轉子不穩定及干擾)所造成之能量損失相當可觀：以本組實驗之壓克力、拋光木頭及鏡子擋板材料為例，在相同頻率、不同材料下，其所造成之轉速差距相當大。因此，如何避免摩擦力產生、提高電能與機械能之轉換效能，無接觸點的完全磁浮是有其必要性。
2. 觀察不同材料接觸點之位移量及數據變化：鏡面光滑、摩擦力甚小，在低頻及高頻運轉時，容

易因轉子不穩定旋轉造成鏡面與轉子之間接觸點滑動距離變大，微量增加摩擦損失。但是壓克力跟拋光木頭反而因表面摩擦係數大，限制其轉子接觸點不穩定變化量，呈現誤差值隨著轉速上升而提高。

3. 以鏡子為例，轉子由靜止開始運轉所需之頻率約為 8Hz，但是當反向操作，由高頻慢慢調回低頻時，其最低保持旋轉所需頻率約為 5Hz，由此可以觀察出動摩擦力  $f_k$  較靜摩擦力  $f_s$  小，與圖十一相符。

### 五、法拉第實驗

為了探討法拉第定律及其相關發電原理，本組利用針車子繞製 200、400 及 600 匝漆包線作為發電的感應線圈，並設計 20-70Hz 等七組不同輸入頻率控制轉子的轉速，探討匝數、轉速(磁通變化量)與電壓之間關係，並分析其結果。

表八

[註]轉速公式( $n = \frac{120f}{p}$ )

頻率 20 Hz		定子磁場轉速：1200 rpm				單位：伏特	
實驗 匝數	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均	
200	0.25	0.23	0.24	0.24	0.25	<b>0.242</b>	
400	0.27	0.28	0.27	0.29	0.28	<b>0.278</b>	
600	0.31	0.29	0.30	0.32	0.31	<b>0.306</b>	

表九

頻率 30 Hz		定子磁場轉速：1800 rpm				單位：伏特	
實驗 匝數	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均	
200	0.31	0.32	0.32	0.31	0.32	<b>0.316</b>	
400	0.34	0.35	0.35	0.35	0.34	<b>0.346</b>	
600	0.38	0.39	0.38	0.37	0.39	<b>0.382</b>	

表十

頻率 40 Hz		定子磁場轉速：2400 rpm				單位：伏特	
實驗 匝數	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均	
200	0.36	0.37	0.37	0.37	0.36	<b>0.366</b>	
400	0.40	0.41	0.41	0.39	0.41	<b>0.404</b>	
600	0.42	0.43	0.47	0.46	0.49	<b>0.454</b>	



表十一

頻率 50 Hz		定子磁場轉速：3000 rpm					單位：伏特
實驗 匝數	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均	
200	0.37	0.38	0.38	0.38	0.37	<b>0.376</b>	
400	0.42	0.44	0.43	0.41	0.42	<b>0.424</b>	
600	0.45	0.45	0.47	0.45	0.46	<b>0.456</b>	

表十二

頻率 60 Hz		定子磁場轉速：3600 rpm					單位：伏特
實驗 匝數	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均	
200	0.35	0.37	0.37	0.36	0.39	<b>0.368</b>	
400	0.44	0.47	0.42	0.44	0.43	<b>0.440</b>	
600	0.46	0.45	0.46	0.47	0.46	<b>0.460</b>	

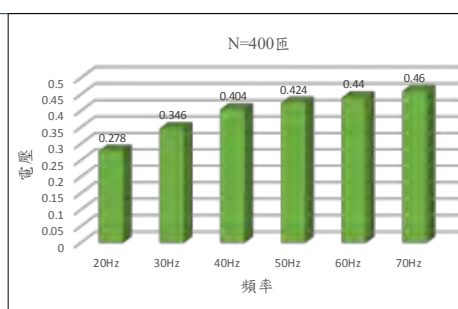
表十三

頻率 70 Hz		定子磁場轉速：4200 rpm					單位：伏特
實驗 匝數	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均	
200	0.38	0.37	0.38	0.37	0.39	<b>0.378</b>	
400	0.46	0.48	0.45	0.45	0.46	<b>0.460</b>	
600	0.48	0.46	0.48	0.47	0.46	<b>0.470</b>	

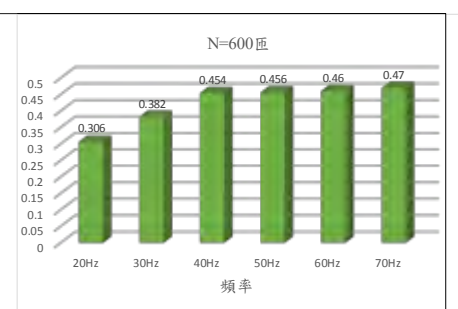
為了更加瞭解法拉第定律應電勢-匝數-磁通變化三者之間關係，本組將相同線圈匝數-不同輸出頻率所偵測到之發電量加以比較分析，並以直條圖方式呈現其結果：



圖十八



圖十九



圖二十

依法拉第定律公式，發電之應電勢  $E$  與匝數  $(N)$  及磁通變化量  $(\Delta \phi / \Delta t)$  成正比，且定子旋轉磁場每分鐘轉速  $n=120f / p$ 。但是本作品之實際轉子轉速，會因感應馬達轉差率及轉子尖端與壓克力板間

摩擦力影響而降低。

為簡化計算方便分析，本組不考慮轉子與壓克力板之間摩擦力及定子與轉子之間的轉差率。此外，由於手工繞製發電定子繞組漆包線品質較不穩定，不同匝數繞組之間比較還需考量其他變因，無法客觀相較，且由圖十八至圖二十比較，200、400、600 匝所產生之電壓輸出差異並不大。因此，本組僅以 400 匝為例來加以分析並探討其結果。

由法拉第定律可知，發電之應電勢與匝數及轉子轉速(頻率)成正比關係，本組以 400 匝繞組為例，觀察在 20Hz-70Hz 等 6 組不同頻率輸出時，其應電勢大小及電壓與頻率的關係。

當頻率由 20Hz 增加到 30Hz (頻率上升 1.5 倍)時，其應電勢由 0.278v 上升到 0.346v (電壓上升 1.2446 倍)；此外，當頻率由 30Hz 增加到 40Hz 時 (頻率上升 1.33 倍)，其應電勢由 0.346v 上升到 0.404v (電壓上升 1.1676 倍)；接著，當頻率由 40Hz 增加到 50Hz 時 (頻率上升 1.25 倍)，其應電勢由 0.404V 上升到 0.424v (電壓上升 1.0495 倍)；再來，當頻率由 50Hz 增加到 60Hz 時 (頻率上升 1.2 倍)，其應電勢由 0.424v 上升到 0.44v (電壓上升 1.0377 倍)；最後，當頻率由 60Hz 增加到 70Hz 時(頻率上升 1.167 倍)，其應電勢由 0.44V 上升到 0.46V (電壓上升 1.0455 倍)。

由表十四及表十五可以發現，本項實驗之電壓比值/頻率比值的百分比落在 82%~90%，其誤差百分比約為 10%~17%之間，並未明顯呈現正比關係，且其頭尾累積誤差高達 52.72%。由圖十八到圖二十之直條圖可以看出，當頻率在 40Hz 以前，其兩者上升比值較接近，但是超過 40Hz 以上，誤差就逐漸擴大。

表十四

頻率	頻率比值(A)	電壓比值(B)	$C=(B/A) \times 100\%$	誤差比例(1-C)
20Hz-30Hz	1.5	1.2446	82.97%	17.03%
30Hz-40Hz	1.33	1.1676	87.79%	12.21%
40Hz-50Hz	1.25	1.0495	83.96%	16.04%
50Hz-60Hz	1.2	1.0377	86.48%	13.53%
60Hz-70Hz	1.167	1.0455	89.59%	10.41%

表十五

總頻率變化	總頻率變化比值(A)	總電壓變化比值(B)	$C=(B/A) \times 100\%$	總誤差比例(1-C)
20Hz-70Hz	3.5	1.6547	47.28%	52.72%

## 陸、研究討論

### 1. 法拉第實驗數據分析：

- (1) 受限於轉子懸浮所能提供之浮力及機械平衡穩定度，無法使用較大且較重的強力磁鐵嵌入轉子以提供足夠磁通切割發電，加上自製電樞繞製時排列不佳增加磁場耗損，因此所能產生之發電效果非常有限，但是還是能夠觀察到法拉第定律所說明的電壓隨著轉速上升及線圈匝數增加而提高之現象。
- (2) 當變頻器輸出頻率大於 50Hz 以上、定子旋轉磁場提高到 3000rpm 以上時，電樞發電量並未明顯提升，經詢問師長及查閱資料，是自製繞組磁阻過大及線圈磁飽和造成發電量無法再提升。
- (3) 靜態機械磁浮平衡容易獲得，但是轉子轉動時，由於加入旋轉磁場會干擾強力磁鐵靜磁力平衡及造成機械重心不穩定，因此非常難以克服。
- (4) 提供旋轉磁場的定子是電風扇拆卸下來的單相電容式感應式馬達，移除電容後將啟動線圈及運轉線圈連接變頻器輸出端的兩相旋轉磁場，其所提供之磁場及大小並不平衡，因此需要外加一擋板控制藉以獲得足夠的機械平衡。

### 2. 變頻器輸入參數 01-02、01-04、01-06 三個選項可以控制輸出電壓及頻率：

- (1) 當設定輸出電壓為 10 伏特時，由於定子旋轉磁場不足，因此鋁合金轉子無法感應驅動旋轉。
- (2) 當輸出電壓提高到 15 伏特、輸出頻率大於 13Hz 時，其旋轉磁通開始驅使轉子轉動。
- (3) 如果慢慢提高輸出電壓，轉子轉動所需之頻率就逐漸下降。
- (4) 當電壓大於 45 伏特以上，只要  $f=1$  到 2Hz 之間便可驅使轉子轉動，但是定子會產生高溫。

經過不斷測試，本組設定變頻器輸出電壓參數分別為：01-02 設定為 20 伏特；01-04 設定 19.9 伏特；01-06 設定為 19.8 伏特，以提供較平順之輸出電壓。

### 3. 摩擦力實驗數據分析：

- (1) 摩擦力所造成之能量損失相當可觀。壓克力、拋光木頭及鏡子擋板材料，在相同頻率不同材料下，其所造成轉速差距相當大。
- (2) 由於鏡子表面光滑摩擦力小，在低頻時與高頻時，磁浮轉子抖動反而造成接觸點與擋板之間呈現不穩定滑動接觸，徒增摩擦力損失、降低機械轉子所產生之 rpm 轉動力量  $F_r$ 。但是壓克力跟拋光木頭反而因為摩擦力大限制其不穩定接觸滑動變化量，其誤差值隨著轉速上升而提高。

(3)轉子由靜止開始運轉所需之頻率約為 8Hz，但是當反向操作，由高頻慢慢調回低頻時，其最低保持旋轉所需頻率約為 5Hz，由此可以觀察出動摩擦力  $f_k$  較靜摩擦力  $f_s$  小，符合圖十一之  $f_s > f_k$  之物理特性。

(4)如何避免摩擦力產生提高電能與機械能之轉換率，完全磁浮是本組今後必須努力的目標。

本次科展研究學到，要產生足夠的浮力使轉子能夠浮在空中並旋轉，使用磁鐵是必要的方式之一，但是受限於自製之電磁鐵浮力不足以承受轉子重量，若要能產生足夠的浮力並有效的控制，則必須以強力磁鐵搭配電磁鐵。

此外，從第一代的設計到第三代的修正調整，在這長達一年多的時間，讓我對居禮溫度、電磁鐵、磁飽和、壓縮機、熱交換、靜摩擦力、動摩擦力之物理特性有全新的認識，也對 LuGre 摩擦力模型有了初步的了解，更學習到要如何建立系統、問題解決及實驗設計與分析，這些都要感謝指導教授及指導老師、父母與多位師長、學長們的協助，教導我如何改善實驗缺失及可以思考的方向。

經過這一連串實驗，讓我對於磁通、電磁鐵、摩擦力等物理特性及其衍生之磁浮、發電原理有更進一步的認識，也從中學學習到資料蒐集、擬定目標、建置機構、設計實驗等各項步驟及方法，對於未來學習幫助非常大，也對科學實驗更加著迷。

## 柒、參考資料

- [1]. 吳明德、徐志成、邱嵩庭、廖卉馨、梁晉維著，反轉式風力發電之磁浮轉子研究之探討，台北市，台灣國際科展，2014 年。
- [2]. 彭黃銘、馬瑪宣、羅于傑，承諾一個乾淨的未來—太陽能磁浮馬達和高效率磁浮小型電動機及風力發電機，台北市，國立台灣科學教育館第 52 屆全國中小學科展作品，101 年。
- [3]. 徐慶堂、黃天祥著，電子學 I，台北縣，台科大圖書股份有限公司，2007 年。
- [4]. 黃慧容、梁賢達著，電工機械 I，台北縣，台科大圖書股份有限公司，2007 年。
- [5]. 黃仲宇、梁正著，基本電學 I，台北縣，台科大圖書股份有限公司，2006 年。
- [6]. 王光復、何啟君著，生活科技，台北市，華興文化事業有限公司，2007 年。
- [7]. 劉生武、謝秀蘭著，室內配線，台北縣，台科大圖書股份有限公司，2007 年。
- [8]. 生活科技學科中心編著，單元教學活動設計甄選入選作品集，台北縣，生活科技學科中心，2007 年。
- [9]. 林英智等，自然與生活科技 4，康軒文教事業股份有限公司，新北市，2017 年。

## 【評語】 032810

1. 本作品研製具有磁浮轉子的發電機，適合用於觀測法拉第定律，作者獨力完成此作品，實驗數據亦完整，作者的研究精神值得鼓勵。
2. 惟對於作品中所使用的器材，作者仍需較深入的了解，才能進一步探討各變因造成的影響，並進而設計較佳的實驗。
3. 作品中所使用的鋁圓柱形轉子的轉動的電磁原理仍缺進一步的探討、發電時感應電動勢對磁浮轉子轉動穩定性的影響亦可多作討論。鼓勵作者再接再厲，持續精進並改良研究的方法與結果，讓作品更完整。

## 摘要

本組實現一個結合磁浮模組、馬達模組及發電模組之自製磁浮-馬達-發電實驗平台 **Maglev-Motor-Generator (MMG)** 來探討法拉第定律及摩擦力影響。透過變頻器驅動定子旋轉磁場帶動磁浮轉子與旁邊線圈切割磁力線以**驗證法拉第定律及發電與轉速關係**。為了提高磁浮穩定，磁浮轉子一端以擋板限制其位移量，調整磁鐵角度、磁力大小來達到穩定之磁浮支撐力，並**探討在不同擋板材料下，摩擦力對磁浮轉速的影響**，最後將研究結果加以分析及驗證，達到科學實驗之目的。

## 壹、研究動機

磁浮軸承具有高速運轉穩定、無震動、無需使用機械軸承、無防塵罩、不怕灰塵進入機構核心的特點，近年來廣受各界的探討與研究。為了進一步瞭解磁場與發電之間的關係，本組開始蒐集相關資訊並上網搜尋磁場、電磁、磁浮及發電原理等相關資料(國三理化課程)，著手設計**第一代 MMG(電磁鐵磁浮)**、**第二代改良型 MMG(冷媒冷卻)**及**第三代 MMG(永磁式磁浮)**，並完成相關測試以了解**佛萊明定則、法拉第定律及摩擦力與轉速之間關係**(國二理化課程)。

## 貳、研究目的

1. 了解電磁鐵製作方式，並實際測試磁力與電源關係。
2. 研究磁場、角度、溫度與磁浮穩定度關係。
3. 自製磁浮馬達發電模組探討法拉第定律及摩擦力對轉速的影響。

## 參、研究過程及方法

首先，選擇材質輕盈鋁合金材料作為轉子製成 20mm 及 10mm 不同直徑之圓柱體，並於頭尾兩端裝置圓形強力磁鐵(圖一)。接著將一個可樂鋁罐頭尾兩端中心部位鑽孔，纏繞漆包線並用三秒膠逐層固定約 400 匝，兩端短路做成感應馬達轉子，在鋁棒另一端將強力磁鐵嵌入轉子作為轉磁式發電機的轉子磁場。

浮力部份，將 800 匝漆包線繞製於圓柱型鐵塊上，並通以直流電產生固定磁極之電磁鐵，透過外加電壓/電流大小來



圖一

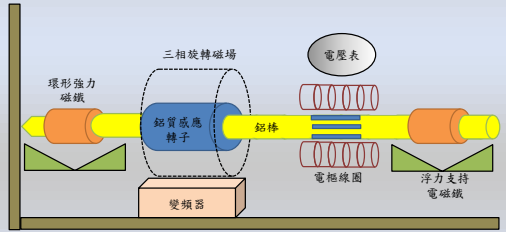
調整電磁鐵磁力大小(圖二)。此外，為了能夠控制發電機的轉速來實驗法拉第定

律及楞次定律，利用三相感應馬達定子



圖二

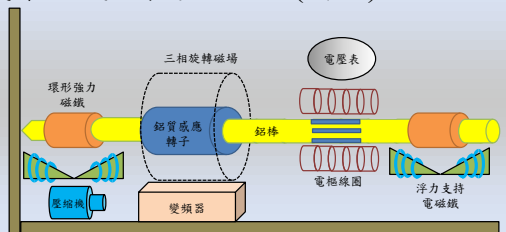
加上變頻器作為旋轉磁場，並透過變頻器的調整來獲得所需之轉速完成第一代 MMG(圖三)。



圖三

經實驗後，由於漆包線電阻很小，加上直流電會產生高溫，**當溫度超過鐵心的居禮溫度(Curie Temperature)時**，由於熱能增加，使得粒子動能提高，破壞了金屬的鐵磁性並轉變為順磁性，此時其**磁力不足以吸附在磁鐵上**，磁力會消失，電磁鐵磁力下降影響磁浮的穩定度，最佳浮力難以控制。

為了克服溫度過高產生的不確定現象本組將 MMG 加上一組冷媒壓縮機，並利用纏繞在電磁鐵上的銅管(蒸發器)來降低鐵心溫度、提高系統磁浮穩定性完成第二代改良型 MMG(圖四)。



圖四

與第一代 MMG 只提供 2-3 分鐘穩定磁浮相較，第二代 MMG 可以提供 5-8 分鐘的磁浮穩定，電磁鐵的穩定性的確提高不少。但隨著時間增長，鐵心溫度持續累增，**冷媒壓縮機所提供之冷卻效果已無法有效降低電磁鐵溫度**，磁浮開始變得非常不穩定，最後造成損毀。

為了修正上述問題，改以永久磁鐵取代原先電磁鐵來提供所需浮力，並購置不同大小、形狀及磁力線之永久磁鐵做微調，完成第三代 MMG(圖五)。

經試驗後證明，**第三代 MMG 穩定性及持續性較前兩代提升很多**，且無須考量 Curie Temperature 所造成之困擾，但是轉子尖端與壓克力板之間的接觸摩擦力對其轉速卻造成相當程度影響。因此，本組以第三代 MMG 為主體，設計一連串發電與摩擦力實驗，來了解法拉第定律及摩擦力所造成的影響。



## (二) 法拉第實驗

為了瞭解法拉第定律應電勢-匝數-磁通變化三者之間關係，本組將相同線圈匝數-不同輸出頻率所偵測到之發電量加以比較分析，並以直條圖方式呈現其結果：

表六

實驗		頻率 20 Hz 定子磁場轉速：1200 rpm 單位：伏特				
匝數	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均
200	0.25	0.23	0.24	0.24	0.25	0.242
400	0.27	0.28	0.27	0.29	0.28	0.278
600	0.31	0.29	0.30	0.32	0.31	0.306

表七

實驗		頻率 30 Hz 定子磁場轉速：1800 rpm 單位：伏特				
匝數	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均
200	0.31	0.32	0.32	0.31	0.32	0.316
400	0.34	0.35	0.35	0.35	0.34	0.346
600	0.38	0.39	0.38	0.37	0.39	0.382

表八

實驗		頻率 40 Hz 定子磁場轉速：2400 rpm 單位：伏特				
匝數	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均
200	0.36	0.37	0.37	0.37	0.36	0.366
400	0.40	0.41	0.41	0.39	0.41	0.404
600	0.42	0.43	0.47	0.46	0.49	0.454

表九

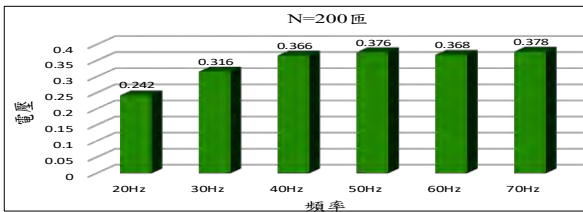
實驗		頻率 50 Hz 定子磁場轉速：3000 rpm 單位：伏特				
匝數	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均
200	0.37	0.38	0.38	0.38	0.37	0.376
400	0.42	0.44	0.43	0.41	0.42	0.424
600	0.45	0.45	0.47	0.45	0.46	0.456

表十

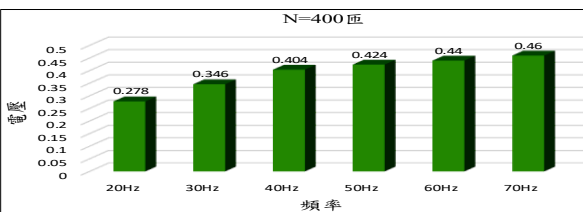
實驗		頻率 60 Hz 定子磁場轉速：3600 rpm 單位：伏特				
匝數	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均
200	0.35	0.37	0.37	0.36	0.39	0.368
400	0.44	0.47	0.42	0.44	0.43	0.440
600	0.46	0.45	0.46	0.47	0.46	0.460

表十一

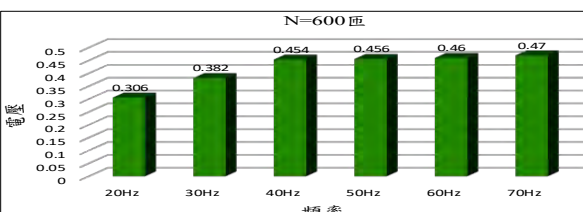
實驗		頻率 70 Hz 定子磁場轉速：4200 rpm 單位：伏特				
匝數	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均
200	0.38	0.37	0.38	0.37	0.39	0.378
400	0.46	0.48	0.45	0.45	0.46	0.460
600	0.48	0.46	0.48	0.47	0.46	0.470



圖六



圖七



圖八

為簡化計算方便分析，本組不考慮轉子與壓克力板之間摩擦力及定子與轉子之間的轉差率所造成轉速損失。此外，自己手工繞製漆包線品質不穩定，不同匝數繞組比較還需考量其他變因無法客觀比較，上面圖表 200、400、600 匝所產生之電壓輸出差異並不大。因此，本組僅以 400 匝為例來加以分析並探討其結果(表十二)。

表十二

頻率	頻率比值(A)	電壓比值(B)	C=(B/A)X100%	誤差比例(1-C)
20Hz-30Hz	1.5	1.2446	82.97%	17.03%
30Hz-40Hz	1.33	1.1676	87.79%	12.21%
40Hz-50Hz	1.25	1.0495	83.96%	16.04%
50Hz-60Hz	1.2	1.0377	86.48%	13.53%
60Hz-70Hz	1.167	1.0455	89.59%	10.41%

由上面法拉第實驗可以歸納出下列幾個結論：

1. 依法拉第定律公式，發電之應電勢  $E$  與匝數  $N$  及磁通變化量  $\frac{d\Phi}{dt}$  成正比，且定子旋轉磁場每分鐘轉速  $n = \frac{120f}{p}$ 。但是本實驗之發電量受到感應馬達轉差率及摩擦力損失降低轉速減少磁通變化量、手工繞製漆包線品質不穩定等影響，發電效果並不明顯。

2. 受限於轉子懸浮提供之浮力及機械平衡穩定度，無法使用較大且較重的強力磁鐵嵌入轉子以提供足夠磁通切割發電，加上自製電樞繞製排列不佳增加耗損，因此所能產生之發電效果有限，但是還是能夠觀察到法拉第定律電壓隨著轉速上升及線圈匝數增加而提高之現象。

3. 當變頻器輸出頻率大於 50Hz 以上、定子旋轉磁場提高到 3000rpm 以上時，電樞發電量並未明顯提升，這是由於自製繞組磁阻過大及線圈磁飽和造成發電量無法再提升。

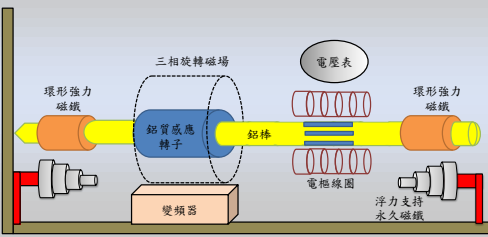
4. 靜態機械磁浮平衡容易獲得，但是轉子轉動時，由於加入旋轉磁場會干擾靜磁力平衡及機械重心不穩定，因此非常難以克服。

第三代 MMG 定子採用單相電容式感應馬達，移除電容後再將啟動線圈及運轉線圈接至變頻器輸出端，所產生磁場大小並不平衡增加動態磁浮平衡之困難度，因此需要外加擋板限制以獲得機械平衡。

要產生足夠的浮力使轉子能夠浮在空中並旋轉，磁鐵是可以採用的方法之一，若要能產生足夠的浮力並有效的控制，則必須以強力磁鐵搭配電磁鐵。

7. 定子旋轉磁場之漆包線繞組為感性負載 ( $Z_L = 2\pi fL$ )，在低頻下阻抗低，容易因為電流過大發燙損毀，所以不能長時間在低頻下運轉。

從第一代的設計到第三代的修正調整，在長達一年多的時間，讓我對居禮溫度、電磁鐵、磁飽和、壓縮機、熱交換、靜摩擦力、動摩擦力之物理特性有全新的認識，也對 LuGre 摩擦力模型有了初步的了解，更學習到要如何建立系統、問題解決及實驗設計與分析能力，也從中學習到資料蒐集、擬定目標、建置機構、設計實驗等各項步驟及方法，對於未來學習幫助非常大，也對科學實驗更加著迷。



圖五

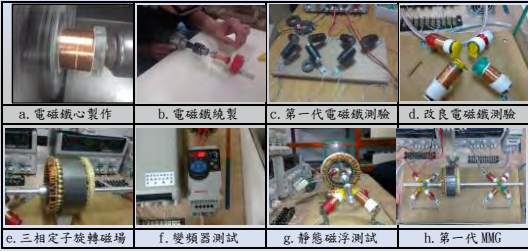
## 肆、研究結果與討論

### 一、第一代 MMG

#### (一)轉子製作



#### (二)電磁鐵及運轉測驗



### 二、第二代改良型 MMG



### 三、第三代永磁式磁浮 MMG

#### (一)摩擦力實驗

為了分析摩擦力與轉速之間的關係，本組提出一個輸入作用力與轉子作用力及摩擦力之間的關係式：

$$F_m = F_r + N\mu_s + N\mu_k + D$$

$$= F_r + (f_s + f_k) + D$$

其中： $F_m$  為定子旋轉磁場所提供之輸入轉動作用力； $F_r$  為機械轉子所產生之 rpm 轉動力量； $N$  為接觸面的正向力； $\mu_s$  為靜摩擦力係數； $\mu_k$  為動摩擦力係數； $f_s$  為最大靜摩擦力； $f_k$  為動摩擦力； $D$  為轉子不穩定及干擾所造成損失轉動力。

此外，為簡化分析，將靜摩擦力與動摩擦力合併考量，重新定義總摩擦力  $f = f_s + f_k$ ，將方程式簡化成  $F_m = F_r + f + D$  並以頻率在 20Hz、30 Hz、40 Hz、50 Hz 及壓克力、拋光木頭、鏡子等三種不同材料下，觀察其轉速與頻率之間關係。

表一 [註]轉速公式( $n = \frac{120f}{p}$ )

頻率 20 Hz		定子磁場轉速：1200 rpm					單位：rpm
實驗	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均	
擋板材料							
壓克力	453.6	455.5	456.6	453.4	452.1	454.24	
拋光木頭	493.3	491.4	489.6	492.2	493.4	491.98	
鏡子	647.1	650.1	649.5	651.1	645.6	648.68	

表二

頻率 30 Hz		定子磁場轉速：1800 rpm					單位：rpm
實驗	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均	
擋板材料							
壓克力	704.5	704.6	705.1	706.2	705.8	705.24	
拋光木頭	940.8	942.1	943.5	941.5	940.2	941.62	
鏡子	1587.4	1587.4	1588.2	1589.4	1586.9	1587.86	

表三

頻率 40 Hz		定子磁場轉速：2400 rpm					單位：rpm
實驗	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均	
擋板材料							
壓克力	1073.6	1071.3	1072.6	1075.6	1075.6	1073.6	
拋光木頭	1210.9	1213.2	1218.5	1210.6	1214.5	1213.54	
鏡子	2244.1	2244.2	2246.2	2245.3	2246.3	2245.22	

表三

頻率 40 Hz		定子磁場轉速：2400 rpm					單位：rpm
實驗	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均	
擋板材料							
壓克力	1072.6	1071.3	1072.5	1075.5	1075.6	1073.5	
拋光木頭	1210.9	1213.2	1218.5	1210.6	1214.5	1213.54	
鏡子	2244.1	2244.2	2246.2	2245.3	2246.3	2245.22	

表四

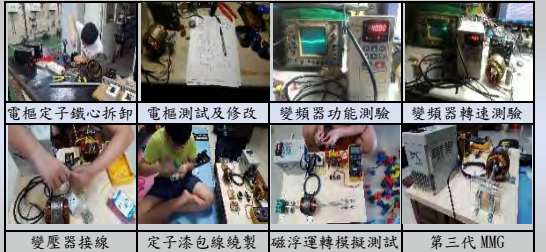
頻率 50 Hz		定子磁場轉速：3000 rpm					單位：rpm
實驗	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均	
擋板材料							
壓克力	1062.9	1066.5	1064.2	1068.3	1065.3	1065.44	
拋光木頭	1461.7	1448.5	1442.3	1445.8	1445.6	1448.78	
鏡子	2818.2	2820.2	2819.6	2818.6	2818.5	2819.02	

表五

$(f+D)$ = 理想之旋轉磁場轉速 - 機械轉子旋轉磁場轉速		單位：rpm			
頻率	20 Hz/1200 rpm	30 Hz/1800 rpm	40 Hz/2400 rpm	50 Hz/3000 rpm	
擋板材料					
壓克力	745.76	1094.76	1326.5	1934.56	
拋光木頭	708.02	858.38	1186.46	1551.22	
鏡子	551.32	212.14	154.78	180.98	

由實驗發現，由於靜摩擦力存在，啟動初期磁浮轉子無法立即旋轉，輸出頻率需要提高至 5-8Hz 才能開始轉動，若調降變頻器輸出電壓，轉子啟動所需頻率越高，反之，所需頻率就會下降，但是馬達定子容易發燙。

轉子在低頻及高頻運轉時，容易產生不穩定運轉狀態，與擋板的接觸點會一直晃動，呈現圓形、蝶形或不規則狀的移動，這些由旋轉磁場產生之擾動及轉子結構重心不穩定所造成之轉動力損失都會對轉子 rpm 轉動力量  $F_r$  產生影響。



由摩擦力實驗歸納出下列幾個結果：

1. 摩擦力所造成之能量損失相當可觀，以本組實驗之壓克力、拋光木頭及鏡子擋板材料為例，在相同頻率、不同材料下，其所造成之轉速差距相當大。因此，如何避免摩擦力產生、提高電能與機械能之轉換效能，無接觸點的完全磁浮是有其必要性。
2. 觀察不同材料接觸點之位移量及數據變化時，鏡面光滑、摩擦力甚小，在低頻及高頻運轉時，容易因轉子不穩定旋轉造成鏡面與轉子之間接觸點滑動距離變大，微量增加摩擦損失。但是壓克力跟拋光木頭反而因表面摩擦係數大，限制其轉子接觸點不穩定變化量，呈現誤差值隨著轉速上升而提高。
3. 以鏡子為例，轉子由靜止開始運轉所需之頻率約為 8Hz，但是當反向操作，由高頻慢慢調回低頻時，其最低保持旋轉所需頻率約為 5Hz，由此可以觀察出動摩擦力  $f_k$  較最大靜摩擦力  $f_s$  小，與國二理化課本摩擦力單元所敘述的定義是一致的。