

# 2022 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 100033  
參展科別 工程學  
作品名稱 真空磁浮飛輪儲能裝置  
得獎獎項

就讀學校 國立臺南第一高級中學  
指導教師 何俊昌、鄭振宗  
作者姓名 鄭丞恩

關鍵詞 磁浮軸承、飛輪、能量儲存

## 作者簡介



I'm 16 years old and a senior high school student from Tainan. My interest in magnet and magnetic toys started when I bought a magnet at a stationery store near my school, I was an elementary student then. The magnet was fun to play with and it made me wonder how it pushed the other magnet without even touching it. As I grow older my fascination with magnets has also grown. I tried and failed several times in magnetic levitation, which didn't stop me from my fascination. I spent most of my time practicing and learning what more could magnets contribute to modern technology and finding out that magnets could be the key material for flywheels. With my interest and creativity, I have come to design a unique magnetic-bearing flywheel. I believed that my design would play a big role in helping people in storing energy, which is similar to the modern day's power bank, but it is much friendlier to the environment.

## 摘要：

本研究實現一個真空中操作的小型磁浮軸承飛輪儲能系統，並探討其特性。為了延長能量保持時間、提高效率，我們分析了導致旋轉動能損失的因素。在自然減速測試中，於大氣環境操作的飛輪其阻力力矩隨轉速呈二次方增加；在真空環境中，阻力力矩隨著轉速的增加緩慢，約為線性關係。我們並發現馬達與發電機組導線中的渦電流損耗是真空中飛輪減速的主要因素。以多芯線圈取代單芯線圈後，待機時間延長為 3 倍，自然減速至停止的時間在 8 小時以上，可以持續 20 分鐘供電 1.3 瓦。這項研究的結果可應用在電網中儲存能量的全尺寸飛輪。

## Abstract

In this work, a small-scale model of the flywheel energy storage system operated in a vacuum with passive magnetic bearings is built from scratch and investigated. To elongate the time for keeping the energy and improve the efficiency, the factors resulting in the loss of the rotational kinetic energy are analyzed. In the spin-down test, the deceleration torque is found to increase quadratically with the rotation speed when the flywheel is in an atmospheric environment. In a vacuum environment, the deceleration torque increases linearly and much more slowly with the increasing rotation speed. We found that the eddy-current loss in the wires of the motor-generator dominates the deceleration of the flywheel in a vacuum. By replacing the copper wires with multistrand wires, the standby time is tripled and the spin-down time increases to more than 8 hours. The developed flywheel can supply the power of 1.3 W for 20 minutes. The results of this study can be applied to build a full-scale flywheel for energy storage in the electrical grid.

## 代號/縮寫定義

| 代號/縮寫              | 原文                                     | 中文簡稱     |
|--------------------|--|----------|
| a, b, c            | terminals of motor/generator coils     | 馬達/線圈的接點 |
| BLDC               | brushless direct current               | 無刷直流     |
| CFRP               | Carbon Fiber Reinforced Polymer        | 碳纖維      |
| D                  | Diameter of flywheel                   | 飛輪直徑     |
| FR4                | Flame Retardant glass-reinforced epoxy | 玻璃纖維     |
| H                  | Height of flywheel                     | 飛輪高度     |
| I0, I1, I2         | current sensors                        | 電流感測器    |
| IR                 | InfraRed                               | 紅外線      |
| ID                 | Inner Diameter                         | 內徑       |
| L                  | Length of threaded rod                 | 螺桿長度     |
| N34, N40, N45, N52 | grades of NdFeB magnets                | 釹鐵硼磁鐵等級  |
| OD                 | Outer Diameter                         | 外徑       |
| PC                 | PolyCarbonate                          | 聚碳酸酯     |
| PWM                | Pulse-Width Modulation                 | 脈衝寬度調變   |
| R, S, T            | terminals of three-phase rectifier     | 三相整流器的接點 |
| SS304              | 304 Stainless Steel                    | 304 不鏽鋼  |
| U, V, W            | terminals of BLDC motor controller     | 馬達控制器的接點 |
| USB                | Universal Serial Bus                   | 通用序列匯流排  |
| V0, V1, V2         | voltage sensors                        | 電壓感測器    |
| Ver.               | version                                | 版本       |
| $\phi$             | diameter of threaded rod               | 螺桿直徑     |

## 符號定義

| 符號                   | 名稱  | 單位   |
|----------------------|---|--|
| $a$                  | 馬達磁鐵半徑  | m 或 mm   |
| $B_{\text{eff}}$     | 磁鐵對線圈的等效磁場  | T  |
| $\mathcal{E}$        | 感應電動勢 $\mathcal{E} = -v_{\text{eff}} B_{\text{eff}} \ell$ | m/s 或 mm/s   |
| $E_0, E_1$           | 飛輪充電、放電的總能量   | J  |
| $f, f_0$             | 轉子的旋轉頻率、簡諧振盪頻率  | Hz   |
| $F_g, F_n$           | 重力, 端板的正向力  | N  |
| $F_x, F_y, F_z$      | $x, y, z$ 軸的磁力分力  |  |
| $F_{\text{tot}}$     | 線圈對馬達轉子的作用力   |  |
| $H$                  | 飛輪的高度   | m 或 mm   |
| $i$                  | 馬達線圈中的電流  | A  |
| $I_{\text{cm}}, I_0$ | 剛體的質心軸、偏心軸轉動慣量  | $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 或 $\text{kg}\cdot\text{cm}^2$ , $1 \text{ kg}\cdot\text{m}^2 = 10^4 \text{ kg}\cdot\text{cm}^2$ |
| $I_w$                | 飛輪的轉動慣量   |  |
| $K$                  | 飛輪的旋轉動能   | J  |
| $k$                  | 多芯線圈的芯數   | 無單位  |
| $\kappa$             | 定電流下馬達力矩常數  | $\text{N}\cdot\text{m}/\text{rad}$   |
| $\ell$               | 線圈的有效長度   | m  |
| $m$                  | 磁鐵的質量   | kg   |
| $M$                  | 飛輪的質量   |  |
| $n$                  | 飛輪長度放大的比例   | m/m (無單位)  |
| $n_c$                | 線圈串聯數   | 無單位  |
| $n_m$                | 馬達轉子的磁極數  |  |
| $N$                  | 線圈匝數  |  |
| $r$                  | (馬達磁鐵)偏心量/線圈的等效半徑   | m 或 mm   |
| $R$                  | 飛輪/馬達轉子的半徑  |  |
| $P_d$                | 飛輪轉子的損耗功率   |  |
| $\tau$               | 線圈對馬達轉子的作用力矩  | $\text{N}\cdot\text{m}$  |
| $\tau_d$             | 飛輪轉子的阻力力矩   | $\text{N}\cdot\text{m}$  |
| $V_p$                | 三相發電機各線圈的電壓峰值   | V  |
| $V_{\text{out}}$     | 三相全波整流後輸出的電壓  |  |
| $V_{\text{out, p}}$  | $V_{\text{out}}$ 的峰值                                      |  |
| $v_{\text{eff}}$     | 等效速度 $v_{\text{eff}} = n_m r \omega$                      | m/s 或 mm/s   |
| $\omega$             | 飛輪的角速度  | rps 或 rad/s, $1 \text{ rps} = 2\pi \text{ rad/s}$  |
| $\omega_0$           | 定電流下轉子的簡諧振盪角頻率  | rad/s  |

# 一、前言

## (一) 研究動機

能源轉型需要可靠、低成本的能量儲存裝置<sup>[1]</sup>。再生能源如風力、太陽等屬於間歇性能源，不能控制發電量，如果有可靠的能量儲存方式，就可以在再生能源大量發電的時候把電力儲存起來，傳統的發電設備如火力、水力、核能，也可以在用電量少的時候儲存過剩的電力，等到用電尖峰的時候再釋放電力。目前全世界被採用的儲能方案有 96%是抽蓄水力(pumped hydro)發電，其它 4%依序有熔鹽(molten salt)、鋰電池(lithium-ion battery)、飛輪(flywheel)、壓縮空氣 (compressed air) 等技術，如表 1<sup>[2]-[4]</sup>。

表 1、主要儲能技術比較<sup>[2]-[4]</sup>

| 儲能技術                     | 能量密度 <sup>[2]</sup><br>(W·h/L) | 最高效率 <sup>[4]</sup> | 環境影響<br>程度 | 限制條件 <sup>[3]</sup> |
|--------------------------|--------------------------------|---------------------|------------|---------------------|
| 抽蓄水力(pumped hydro)       | 0.2-2                          | 65%-80%             | 高          | 需要水庫及高度<br>不適合低溫操作  |
| 熔鹽(molten salt)          | 70-210                         | 65%-75%             | 低          | 需配合熱力發電             |
| 鋰電池(lithium-ion battery) | 200-400                        | 75%-90%             | 高          | 不適合低溫操作             |
| <b>飛輪(flywheel)</b>      | <b>20-80</b>                   | <b>80%-90%</b>      | <b>低</b>   | <b>儲能維持時間短</b>      |
| 壓縮空氣 (compressed air)    | 2-6                            | 65%-75%             | 低          | 不適合低溫操作             |

抽蓄水力需要高度落差以及大量的水，佔地很大，受地理條件限制；熔鹽必須配合熱力發力設備，例如太陽熱力發電、火力發電、核能發電，不適合其它發電方法的儲能應用<sup>[3]</sup>；鋰電池、飛輪、壓縮空氣等技術則可以廣泛應用到各種發電方法的電力儲存。雖然電池能量密度高，但正常操作下放電深度不能太大，否則會導致壽命減短。飛輪的能量密度與電池接近，容許的放電深度大，可以快速充放電，功率密度高，建置維護成本則更低。

因應氣候變遷，發電及儲能設備必需承受更劇烈的天候變化，例如在 2021 年春天，美國德州因為異常的低溫造成發電設備故障，發生大停電<sup>[5]</sup>。鋰電池的最低工作溫度-20°C，無法在寒冷的氣候中正常使用<sup>[6]</sup>；壓縮空氣也會因為低溫使壓力下降而減少能量<sup>[7]</sup>。相較之下，飛輪儲能裝置<sup>[8]-[12]</sup>在真空中運作，不會結冰，能量密度不受溫度變化影響<sup>[8]</sup>。如果再考慮對環境影響程度，鋰電池則每用幾年就要更換，原料開採、廢料回收處理都是棘手的環境問題；而飛輪儲能裝置使用壽命長，即使報廢拆除材料也很容易回收，可以循環利用，對環境的影響程度低。

雖然有不少優點，飛輪儲能的主要缺點是儲能維持時間短，只能保持數小時到數天；還有能量密度仍然不如鋰電池。不過，相較於鋰電池，飛輪技術很少被研究人員關注，應該還有許多進步的空間。

## (二) 研究目的

為了克服飛輪儲能維持時間短的缺點，本研究設計一個小型飛輪儲能裝置，利用被動式磁浮以及真空減少能量損失，探討延長能量儲存時間以及提昇效率的關鍵因素。

# 二、研究方法及過程

## (一) 研究流程

為了找出飛輪儲能裝置能量損耗的主要原因並予以改進，本研究設計了軸向磁通馬達/發電機、磁浮軸承、飛輪、以及真空室，組合成為「真空磁浮飛輪儲能裝置」，量測其自然減速時間、轉動慣量、以及發電電壓與時間的關係，分析阻力力矩、功率、及發電電壓與轉速關係，探討空氣阻力、磁浮軸承特性、馬達/發電機線圈形式、以及飛輪設計對儲存系統發電時間的影響，分析能量損耗的主要原因，並提出改進方案；研究流程如圖 1。

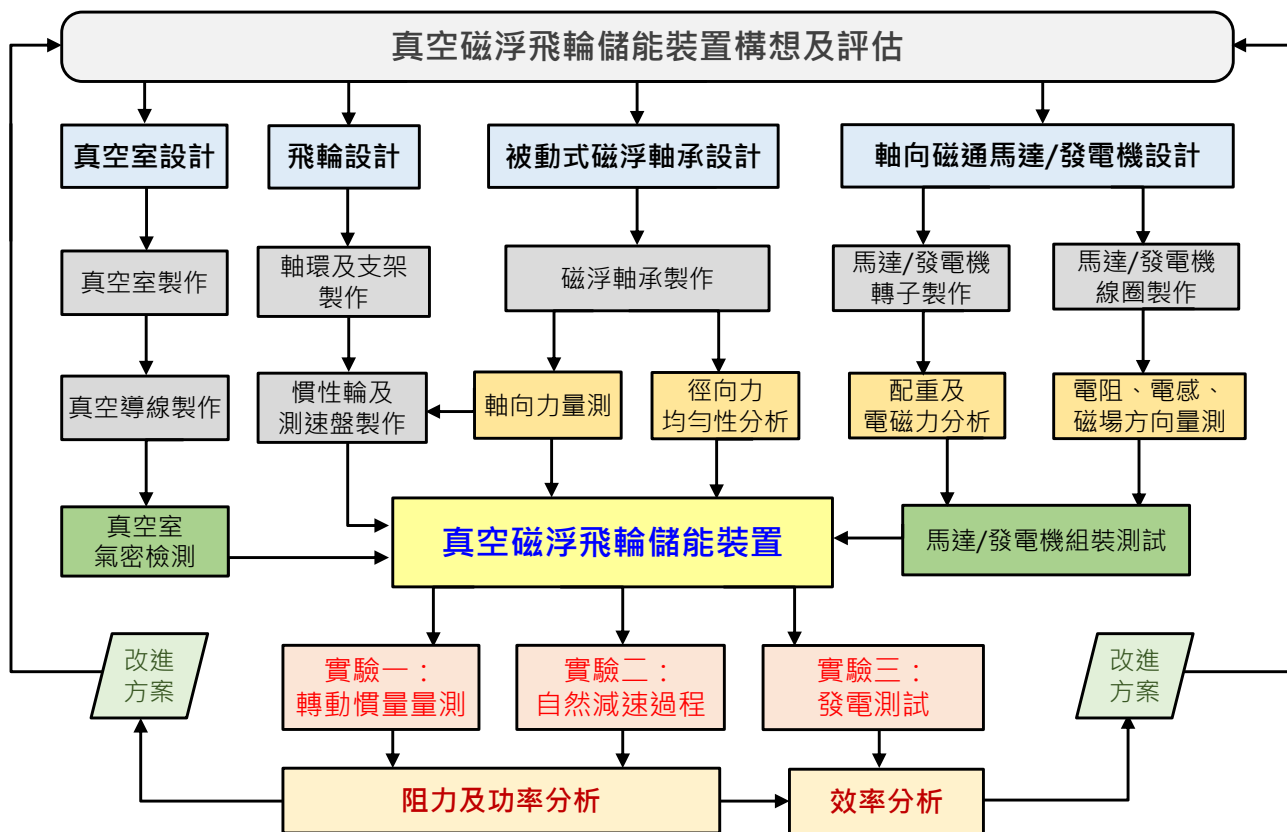
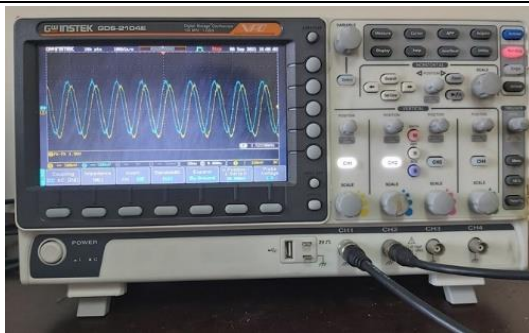


圖 1、研究流程

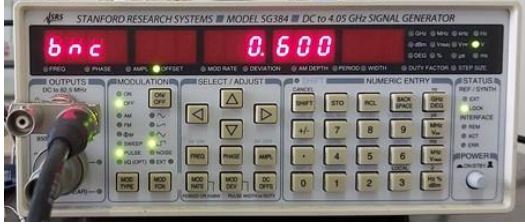

## (二) 研究設備及器材

本研究需要量測質量、磁力、磁場、電壓、電流、時間、壓力、及頻率等物理量，並製作馬達轉子、飛輪、線圈、電路、以及支撐結構零件，所採用的設備、器材、及軟體規格與用途如下表。

表 2、主要研究設備、器材、軟體

| 名稱/型號/規格                            | 照片  | 功能及用途   |
|-------------------------------------|---|---|
| 示波器<br>GDS-2104E<br>四通道，<br>100 MHz |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 量測發電線圈的三相感應電壓及頻率</li> <li>● 量測發電整流後的電壓</li> <li>● 量測轉子的旋轉頻率，換算轉速</li> <li>● 量測轉子振動頻率，求出轉動慣量</li> </ul> |



|   |   |   |
|---|---|---|
| <p>訊號產生器<br/>SG384<br/>DC~4.05 GHz</p>  |    | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 產生交流電壓，測試馬達/發電機線圈的方向</li> <li>● 產生直流電壓，測試電壓量測裝置的功能</li> </ul>  |
| <p>高斯計<br/>FW-BELL<br/>5180</p>   |    | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 量測磁鐵表面的磁場強度(挑選磁鐵)</li> <li>● 量測馬達轉子磁場與距離的關係</li> </ul>   |
| <p>多功能電錶<br/>CIE8007<br/>DC/AC</p>  |    | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 量測電壓、電阻、及線圈電感</li> <li>● 檢查電路</li> </ul>   |
| <p>電子秤<br/>#1: WH-B,<br/>3 kg ±0.1 g<br/>#2: 3 kg ±0.1 g<br/>#3: MH-500,<br/>500 g ±0.1 g<br/>#4: WTB200,<br/>200 g ± 0.001 g</p> |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 量測磁浮軸承的軸向力及徑向力強度(#1)</li> <li>● 量測磁鐵徑向均勻性(#2)</li> <li>● 量測馬達線圈通電產生的力矩(#3)</li> <li>● 馬達磁鐵配重(#4)</li> <li>● 量測飛輪及零件重量</li> <li>● 測定樹脂比例(製作線圈)</li> </ul> |
| <p>Arduino<br/>Uno R3</p>   |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 量測及紀錄轉速</li> <li>● 量測自然/發電減速時間</li> <li>● 控制馬達轉速</li> <li>● 量測電壓，紀錄電壓、電流、功率</li> <li>● 驅動藍芽模組</li> </ul>   |
| <p>藍芽模組<br/>HC-05</p>   |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 無線傳輸量測數據</li> <li>● 無線傳輸控制指令</li> </ul>  |
| <p>電流感測器<br/>ACS712 (5 A)<br/>電壓/電流錶頭</p>   |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 量測進入馬達控制器的電流、發電機輸出的電流</li> </ul>   |

|   |   |  |
|---|---|--|
| <p>馬達控制器<br/>DS-7 (300 W,<br/>無霍耳)</p> <p>可變電阻 5 kΩ</p> |    | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 以可變電阻(電位計)控制 BLDC 馬達轉速</li> <li>● 以 Arduino 的 PWM 功能產生電壓，控制馬達轉速</li> </ul>                            |
| <p>電壓轉換板<br/>(輸入電壓<br/>&lt;30V)</p>                     |    | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 發電機電壓升壓(#1、#3) 及降壓(#1~#4)</li> <li>● 測定馬達力矩時提供定電流(#2)</li> <li>● 無線操作時提供 Arduino 的直流電源(#5)</li> </ul> |
| <p>真空幫浦<br/>V-i120SV<br/>(最低絕對氣壓<br/>0.15 torr)</p>     |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 觀察真空度</li> <li>● 真空室抽真空</li> </ul>  |
| <p>LibreCAD <sup>[13]</sup><br/>平面設計軟體</p>              |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 設計不鏽鋼飛輪、馬達轉子、支撐結構、及真空室</li> <li>● 2D/3D 圖形繪製</li> </ul>   |
| <p>FreeCAD <sup>[14]</sup><br/>三維設計軟體</p>               |  |  |

### (三) 原理與實驗設計

#### 1. 飛輪(慣性輪)

##### (1) 飛輪儲能原理

飛輪系統利用高速旋轉之慣性輪的動能儲存能量，旋轉動能可表示為

$$K = \frac{1}{2} I_w \omega^2 \quad (\text{單位 J}), \quad (1)$$

其中  $I_w$  為轉動慣量(單位  $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ )， $\omega$  為角速度(單位  $\text{rad/s}$ )。轉動慣量與飛輪的質量及形狀有關，以圖 2 的圓柱體飛輪為例，其繞中心軸之轉動慣量為

$$I_w = \frac{1}{2} MR^2, \quad (2)$$

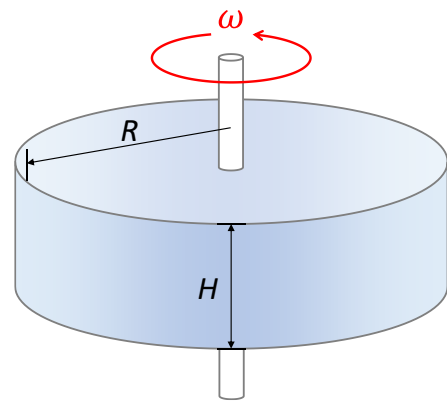


圖 2、圓柱體飛輪

其中  $M$  為慣性輪質量(單位  $\text{kg}$ )， $R$  為半徑(單位  $\text{m}$ )。只要增加轉動慣量並提高轉速，就可以增加飛輪儲存的能量。不過，所有材料都有抗拉強度(tensile strength)<sup>[15]</sup>的限制，製作慣性輪必須選用強度大的材料，才能承受高轉速下的離心力。材料的密度及強度是決定飛輪性能的關鍵，部份材料的密度與抗拉強度如下表，適合製作慣性輪的材料有不鏽鋼、碳纖維(CFRP)、以及玻璃纖維(FR4)複合材料等。

表 3、材料的密度與抗拉強度

| 材料                        | 壓克力<br>Acrylic | 碳纖維<br>CFRP* | 玻璃纖維<br>FR4 | 鋁<br>Aluminum | 磁鐵<br>NdFeB | 不鏽鋼<br>SS430 | 不鏽鋼<br>SS304 | 不鏽鋼<br>SS316 | 黃銅<br>Brass |
|---------------------------|----------------|--------------|-------------|---------------|-------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| 密度<br>( $\text{g/cm}^3$ ) | 1.18           | 1.6          | 1.85        | 2.7           | 7.6         | 7.75         | 7.93         | 8.0          | 8.73        |
| 抗拉強度<br>Yield<br>(MPa)    | 60             | 570          | 250         | 90            | 75          | 310          | 215          | 206          | 124         |

\*因供應問題，本研究並無使用 CFRP 材料製作飛輪。

旋轉動能與轉速平方 $\omega^2$ 成正比、與轉動慣量 $I_w$ 成正比；轉動慣量 $I_w$ 與 $R^2$ 成正比、與質量 $M$ 成正比；而質量 $M$ 則與 $R^2$ 成正比、與高度 $h$ 成正比。如果把慣性輪的尺寸等比例放大 $n$ 倍，半徑 $R$ 、高度 $H$ 會變成 $n$ 倍、質量會變成 $n^3$ 倍，故轉動慣量 $I_w$ 變成 $n^5$ 倍；在相同轉速下，飛輪儲存的能量為 $n^5$ 倍、體積為 $n^3$ 倍，故**能量密度提高為 $n^2$ 倍**。這個優點勝過一般電池：當電池尺寸放大，其能量密度並不會增加。因此，把飛輪做得更大，能量密度有可能和鋰電池一樣，或者超過鋰電池。依據方程式(1)、(2)計算直徑 10 至 150 cm 之圓盤飛輪的能量密度如圖 3，當轉速達到 200 rps 以上，直徑超過 1 m 的不鏽鋼飛輪其能量密度可達到鋰電池的水準。

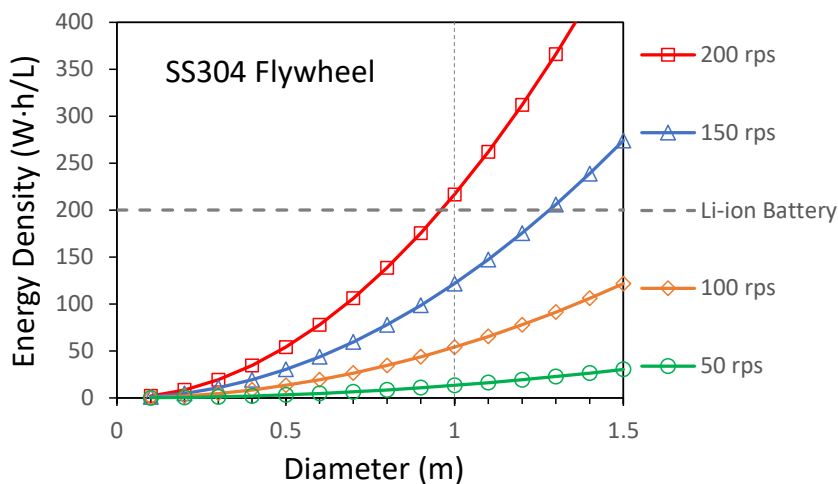


圖 3、直徑 10 至 150 cm 之圓盤飛輪的能量密度

## (2) 飛輪設計

本研究設計的飛輪轉子，計算轉動慣量時須考慮部份組件(如磁鐵)偏心旋轉的問題。依據平行軸定理，繞平行偏心軸  $O$  旋轉之剛體的轉動慣量為

$$I_o = I_{cm} + Mr^2 \quad (3)$$

其中 $I_{cm}$ 為繞質心軸的轉動慣量， $M$ 為剛體的質量， $r$ 為偏心量。由(2)、(3)可知，當偏心量比轉子的半徑大很多(例如 10 倍)， $I_o \approx Mr^2$ 。

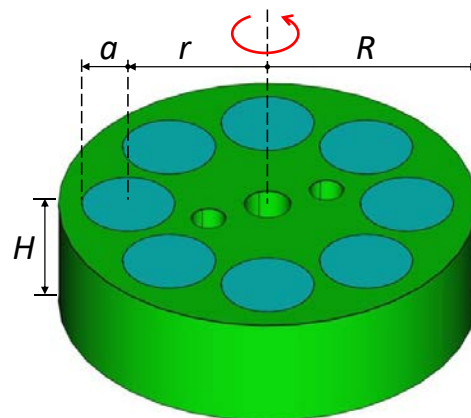


圖 4、馬達轉子，綠色為 FR4，藍色為磁鐵。



圖 4 為本研究設計的馬達轉子，它是半徑  $R$ 、高度  $H$  的 FR4 飛輪加上中心孔、偏心孔，並置入八個偏心的圓柱形磁鐵，其半徑為  $a$ 、高度為  $H$ 、質量為  $m$ 。由(2)可計算磁鐵的質心軸轉動慣量為  $I_{cm} = \frac{1}{2}ma^2$ ，代入(3)即得磁鐵的偏心軸轉動慣量為

$$I_o = \frac{1}{2}ma^2 + mr^2, \quad (4)$$

將(4)式的質量  $m$  視為挖除之圓柱孔的質量(負質量)，(4)式即可應用於估計開孔後的圓柱形 FR4 飛輪轉動慣量。本研究的飛輪主體組件以及開孔都是圓柱形(或接近圓柱形)，可利用(2)、(3)、(4)與表 3 的材料密度估算整個飛輪轉子的轉動慣量。

本研究發展了五個版本的飛輪(Ver.1~Ver.5)，其轉子設計如圖 5，主要組件照片如圖 6。飛輪轉子是以機械加工製作，主要組件包括 D72 磁性不鏽鋼盤(1、2 號組件)、D72 鋁測速盤(3 號組件)、D77 黑鐵盤(4 號組件)、D78 不鏽鋼飛輪(5 號組件)、D98 不鏽鋼飛輪(6 號組件)、第一至四版馬達/發電機轉子(7 號組件)、以及第五版馬達/發電機轉子(8 號組件)等；各版本飛輪及組件的尺寸、質量、與轉動慣量計算結果如表 4。第四、五版飛輪可以在真空中運作。

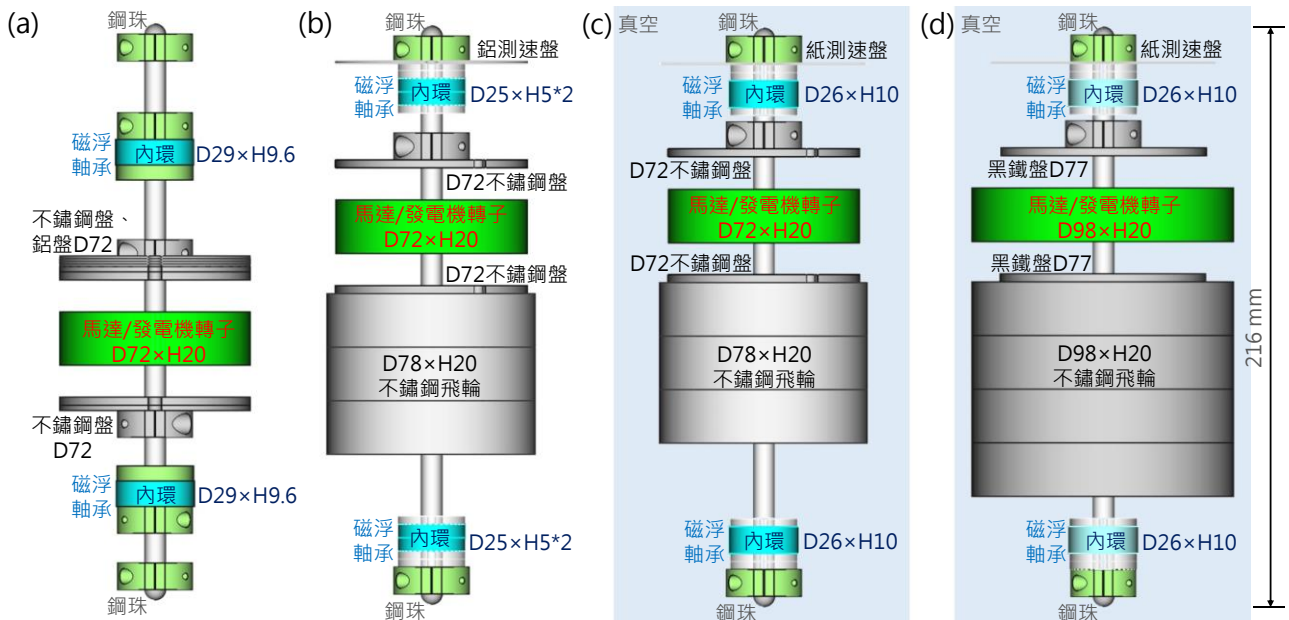


圖 5、飛輪轉子設計：(a)第一、二版，(b)第三版，(c)第四版，(d)第五版；長度 216 mm。

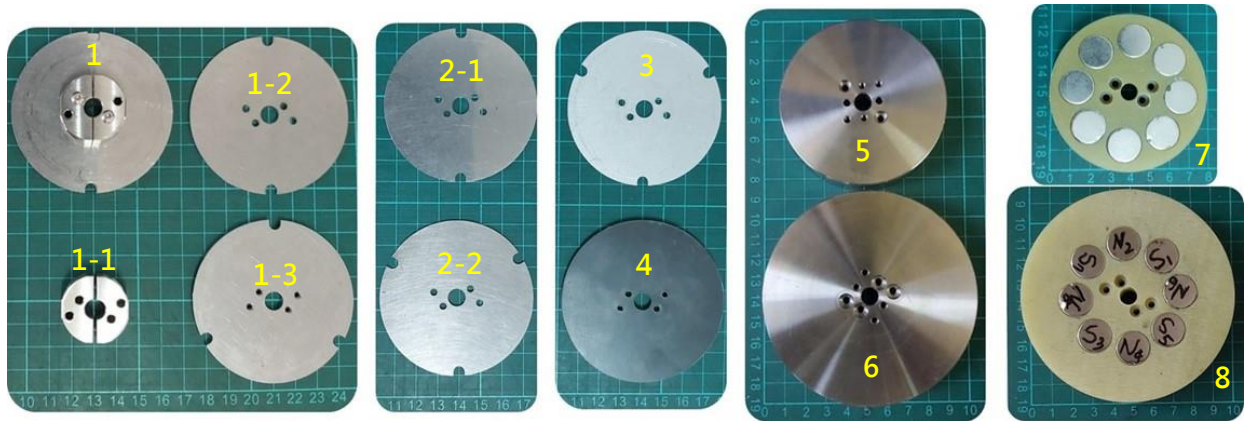


圖 6、飛輪組件：1 為 1-1~3 組合而成的 D72 磁性不鏽鋼盤，1-2、1-3 厚度 2、3 mm，1-1 為軸環；2 為 D72×H1 磁性不鏽鋼盤；3 為 D72×H1 鋁測速盤；4 為 D77×H3 黑鐵盤；5 為 D78×H20 不鏽鋼飛輪；6 為 D98×H20 不鏽鋼飛輪；7 與 8 分別為 D72×H20 與 D98×H20 馬達/發電機轉子，由尺寸  $\phi 16 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$  的鈦鐵硼磁鐵及 FR4 圓框組成。

第一、二版飛輪組合採用上圖 1、2、3 號組件與 7 號馬達轉子為慣性輪，具有磁性的不鏽鋼盤(1 號組件)可以提昇馬達電磁力，也是量測轉速的測速盤。第一、二版飛輪實驗主要是由 1 與 7 號組件構成，轉動慣量約  $3.9 \text{ kg}\cdot\text{cm}^2$ ，需要增加轉動慣量時可再加上 2、3 號組件。

第三、四版飛輪組合體除了沿用前兩版組件，另採用 5 號組件(外徑 78 mm、高 20 mm 的不鏽鋼飛輪)與 7 號組件為慣性輪，代表性組合的轉動慣量估計值為  $19 \text{ kg}\cdot\text{cm}^2$ 。

第五版飛輪組合體除了沿用前四版組件，另採用 6 號組件(外徑 98 mm、高 20 mm 的不鏽鋼飛輪)與 7 號組件為慣性輪，代表性組合的轉動慣量估計值為  $59 \text{ kg}\cdot\text{cm}^2$ 。

表 4、飛輪轉子組件規格 ( $1 \text{ kg}\cdot\text{cm}^2 = 0.0001 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ )

| 組件編號 | 直徑 D×高度 H (mm) | 材質      | 質量 (g) | 轉動慣量 ( $\text{kg}\cdot\text{cm}^2$ ) | 用途                              |
|------|----------------|---------|--------|--------------------------------------|---------------------------------|
| 1-1  | 軸環 D29×H10     | 304 不鏽鋼 |        |                                      | Ver.1~3 飛輪、測速盤、<br>Ver.1~4 馬達磁盤 |
| 1-2  | 圓盤 D72×H2      | 430 不鏽鋼 | 188    | 1.08                                 |                                 |
| 1-3  | 圓盤 D72×H3      | 430 不鏽鋼 |        |                                      |                                 |
| 2-1  | 圓盤 D72×H1      | 430 不鏽鋼 | 30     | 0.2                                  |                                 |
| 2-2  | 圓盤 D72×H2      | 430 不鏽鋼 | 60     | 0.4                                  |                                 |
| 3    | 圓盤 D72×H1      | 鋁       | 11     | 0.07                                 | Ver.1~3 飛輪、測速盤                  |
| 1-1  | 軸環 D29×H10     | 304 不鏽鋼 |        |                                      | Ver. 5 馬達磁盤                     |
| 4    | 圓盤 D77×H3      | 黑鐵      | 158    | 0.87                                 |                                 |

|   |                          |                    |      |      |                  |
|---|--------------------------|--------------------|------|------|------------------|
| 5 | 飛輪 D78×H20               | 304 不鏽鋼            | 675  | 5.58 | Ver.3、4 飛輪       |
| 6 | 飛輪 D98×H20               | 304 不鏽鋼            | 1002 | 13.7 | Ver.5 飛輪         |
| 7 | 飛輪 D72×H20<br>磁鐵 D16×H20 | FR4<br>NdFeB (N52) | 320  | 1.59 | Ver.1~4 馬達/發電機轉子 |
| 8 | 飛輪 D98×H20<br>磁鐵 D16×H20 | FR4<br>NdFeB (N52) | 320  | 2.78 | Ver.5 馬達/發電機轉子   |

第一至五版飛輪轉子之轉動慣量與旋轉動能估計結果如表 5。當轉速為 400 rps，第一、二版飛輪的能量為 1.2 kJ，第三、四版的能量為 6.0 kJ，第五版的能量達到 18.6 kJ。不過，基於安全考量，各實驗測試操作的最高轉速皆未超過 230 rps (14 krpm)。

表 5、第一至第五版飛輪轉子的轉動慣量與旋轉動能估計值 ( $1 \text{ kg}\cdot\text{cm}^2 = 0.0001 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ )

| 適用版本  | 第一、二版                  | 第三、四版                | 第五版                  |
|---|------------------------|----------------------|----------------------|
| 主要組件<br>(代表組合)                                      | D72 不鏽鋼盤*2<br>D72 馬達轉子 | D78 飛輪*3<br>D72 馬達轉子 | D98 飛輪*4<br>D98 馬達轉子 |
| 飛輪<br>(代表值, $\text{kg}\cdot\text{cm}^2$ )           | 2.1                    | 16.7                 | 54.7                 |
| 馬達/發電機轉子<br>( $\text{kg}\cdot\text{cm}^2$ )         | 1.6                    | 1.6                  | 2.8                  |
| 其它 <sup>s</sup><br>( $\text{kg}\cdot\text{cm}^2$ )  | 0.2                    | 0.7                  | 1.5                  |
| <b>飛輪組合體</b><br>(代表值, $\text{kg}\cdot\text{cm}^2$ ) | <b>3.9</b>             | <b>19</b>            | <b>59</b>            |
| 轉速 100 rps 旋轉動能                                     | 77 J                   | 375 J                | 1,165 J              |
| 轉速 200 rps 旋轉動能                                     | 308 J                  | 1,500 J              | 4,658 J              |
| 轉速 400 rps 旋轉動能                                     | 1,232 J                | 6,001 J              | 18,634 J             |

<sup>s</sup>含不鏽鋼磁盤、磁浮軸承內環磁鐵、軸環、磁鐵套環、墊片、以及螺絲等。

### (3) 軸環

一般的軸環是以止付螺絲鎖在軸上固定轉軸，其設計如圖 7(a)，但它的質量分配不平均，又容易使轉軸損傷變形，不能重覆拆裝多次，不適合需要高速旋轉的磁浮飛輪實驗。更好的設計是半圓軸環：以螺絲互鎖夾住轉軸，轉軸不變形、不損傷，可重覆拆裝，而且完全對稱、

質量分配平均，適合高速旋轉的磁浮飛輪實驗。本研究採用的半圓軸環如圖 7(b)，為了配合磁浮軸承轉子的磁鐵，軸環外徑有 29 mm 及 25 mm 兩種設計，材質有 FR4 及 304 不鏽鋼兩種。本研究的飛輪、磁浮軸承轉子、及馬達轉子，皆以半圓軸環固定在直徑 8 mm、長度 200 mm 的 316 不鏽鋼主軸上。

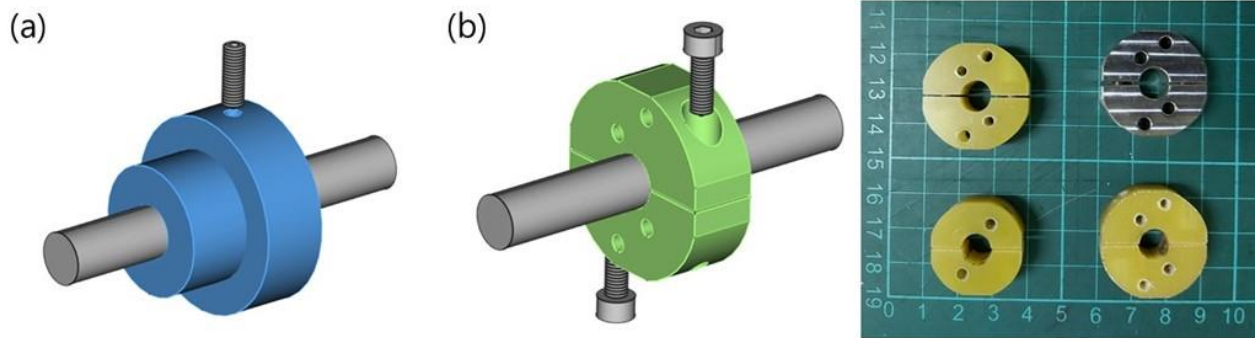


圖 7、軸環設計：(a) 一般軸環，(b) 半圓軸環及實體照片

#### (4) 測速盤

本研究的馬達轉子有四組磁極，利用示波器觀察發電線圈感應電壓，將頻率除以 4 即為轉速；但這樣不能記錄轉速與時間關係。為了正確記錄轉速與時間的關係，本研究採用測速盤以 Arduino 及電腦記錄轉速與時間，測速盤及紅外線感測器(IR sensor)電路如圖 8。第一版飛輪採用單孔測速盤，它是 2 孔及 3 孔測速盤疊合(質心仍在轉軸上)。單孔的優點是頻率即為轉速，可在低速時目測確認轉速值正確性，有助於開發轉速量測程式；但單孔的轉速解析度僅 1 rps (= 60 rpm)。第三版以後，量測轉速的程式測試無誤，為了提高轉速量測的精確度，改用三孔測速盤，包括 3 孔不鏽鋼盤(亦作為馬達磁盤)以及 3 孔鋁盤，轉速解析度 1/3 rps (= 20 rpm)；第四、五版改為 30 孔的塑膠紙測速盤，轉速解析度提昇至 1/30 rps (= 2 rpm)。



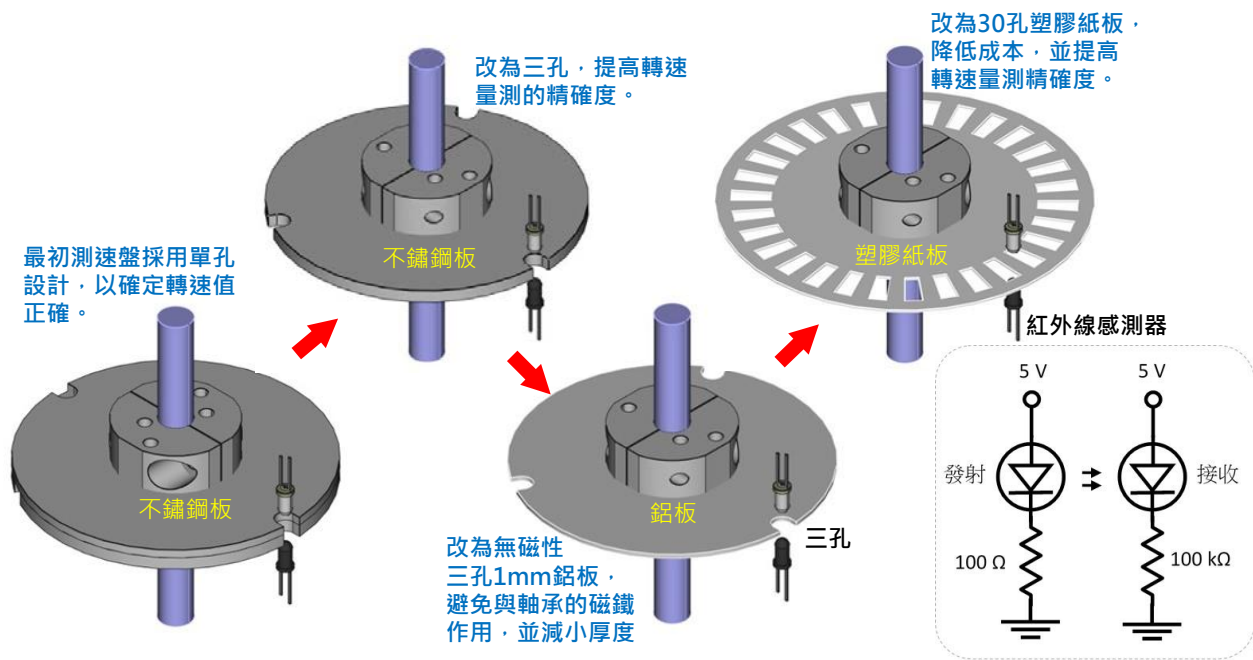


圖 8、測速盤演進

## 2. 磁浮軸承

### (1) 被動式磁浮原理

要使飛輪達到高轉速，軸承的摩擦力必須非常小，否則在高速轉動時會產生高溫，必須加強冷卻散熱<sup>[16]</sup>，高溫除了造成能量消耗，也會使軸承損壞。磁浮軸承幾乎沒有摩擦力，在高速旋轉時不會因為摩擦過熱造成高能量損耗。不過，依據恩紹定理(Earnshaw's theorem)<sup>[17]</sup>，以靜態電荷組成的系統，無法只利用靜電力達到穩定平衡，把這個數學證明應用在靜磁場，就是說永久磁鐵的組合無法只利用靜磁力就達成穩定的磁浮<sup>[18]</sup>。所以，要使飛輪的磁浮軸承穩定，必須採用主動控制，不斷地量測轉子的位移並改變磁場強度來維持平衡<sup>[10],[11]</sup>，或者是利用反磁性很強的材料，例如超導體<sup>[12]</sup>。但是，主動控制需要電力，超導體須以低溫致冷機維持在零下 200 度的極低溫，這兩種磁浮都需要能量輸入。除了這兩種方法，利用磁鐵的排斥力並加上接觸點來限制轉軸的移動，即可實現被動式磁浮軸承(passive magnetic bearing)<sup>[18]</sup>，其原理可利用圖 9 的範例說明。

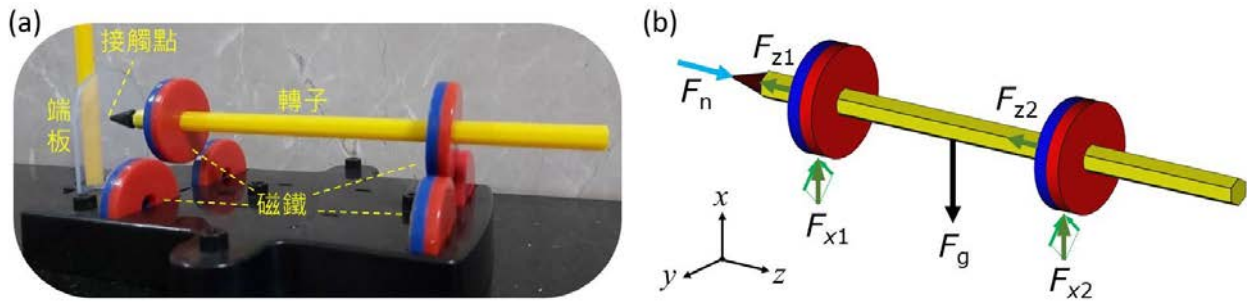


圖 9、有接觸點的被動式磁浮範例：(a)被動式磁浮玩具，(b)力平衡分析

在圖 9 中，磁鐵的磁極方向都相同(藍色為 N 極)，轉子受到重力( $F_g$ )、下方磁鐵的磁力( $F_{x1}$ 、 $F_{x2}$ 、 $F_{z1}$ 、 $F_{z2}$ )、以及左方接觸點的正向力( $F_n$ )作用；當轉子向上、向下( $\pm x$  方向)偏移時，磁力會自動減小、增加，與重力形成穩定平衡；當轉子向左或向右偏移時，磁力的水平( $y$  方向)分量也會自動把轉子推回平衡點，至於在沿轉軸的方向，因為磁力  $F_{z1}$ 、 $F_{z2}$  的方向與轉子前後( $\pm z$ )偏移的方向相同，必須有接觸點產生正向力  $F_n$  來抵消磁力才能穩定平衡。為了使飛輪旋轉時接觸點的摩擦力減到最小，必須盡量減小正向力；當轉子的偏移為零時，磁力  $F_{z1}$ 、 $F_{z2}$  與正向力也會變成零，但這是不穩定的，因為轉子會往沒有接觸點的方向偏移；解決方法是在轉軸兩端都加上接觸點(端板)限制偏移範圍，就可以把摩擦力減到極小且維持平衡。2001 年 Ohio Aerospace Institute 的研究團隊發表了採用這種被動式磁浮軸承的飛輪<sup>[9]</sup>，飛輪直徑 102 mm，轉子質量 2.26 kg，在大氣下測試轉速可以到 5500 rpm (= 92 rps)。2008 年，新加坡南洋理工大學的研究團隊發表了採用被動式徑向磁浮軸承飛輪的數值分析結果<sup>[11]</sup>，系統質量 0.49 kg，預期轉速為 20,000 rpm (=333 rps)。

## (2) 磁浮軸承設計

本研究的飛輪轉子及軸承設計初始構想如圖 10，以方形磁鐵排列為環形陣列，與轉軸上的內環鐵鐵構成被動式磁浮軸承，調整外環陣列與內環磁鐵間距，可達成穩定的徑向平衡；兩個端板限制轉子的軸向( $\pm z$  方向)偏移，可以使正向力減到最小，降低摩擦損失。

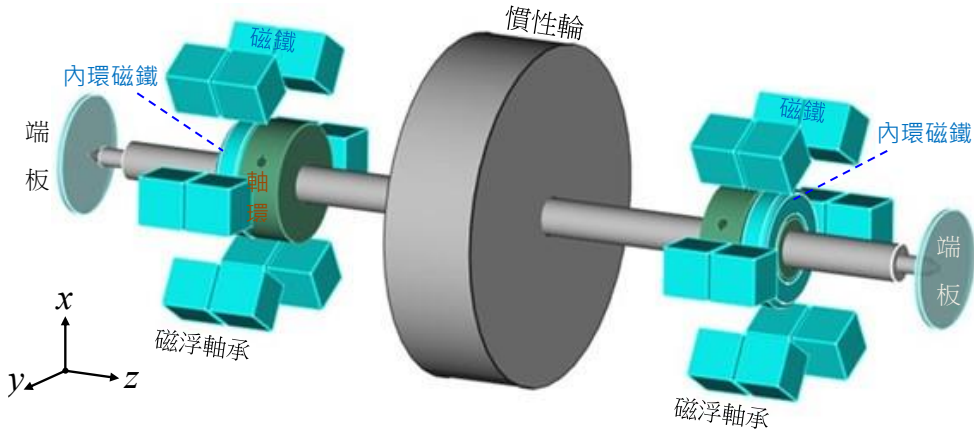


圖 10、採用被動式磁浮軸承之飛輪的初始構想：(a) 磁浮軸承及轉子，(b) 組合圖

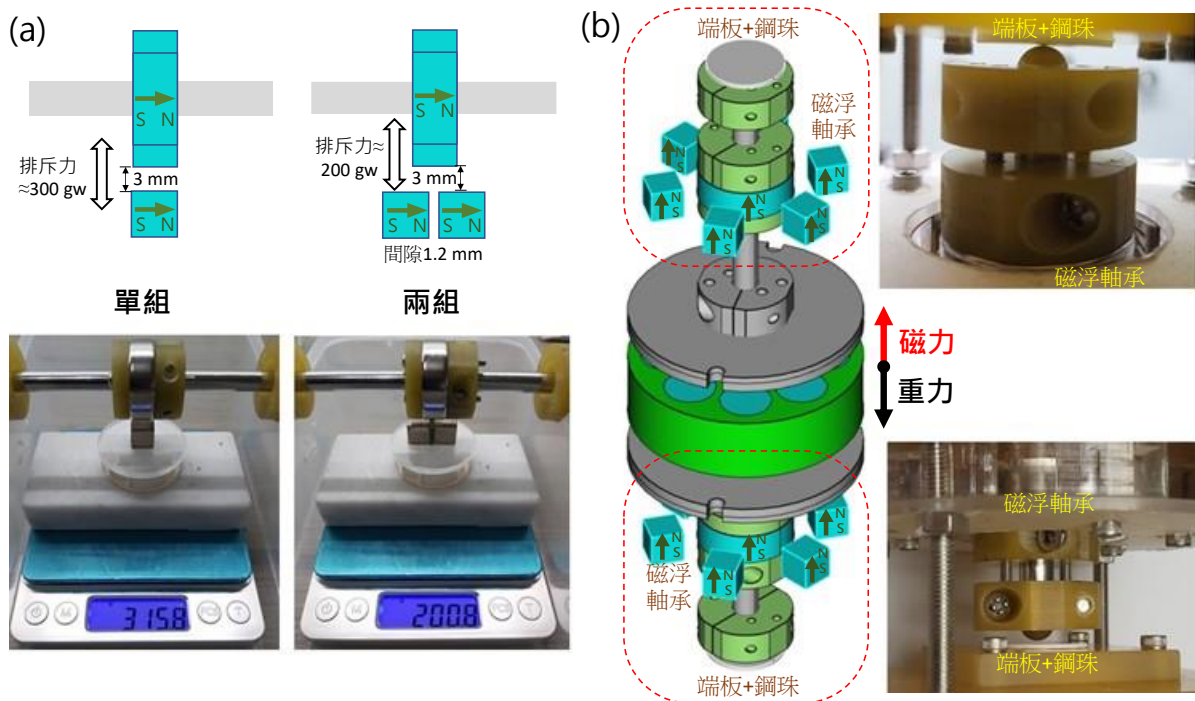


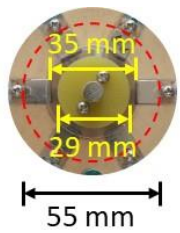
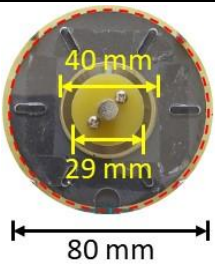
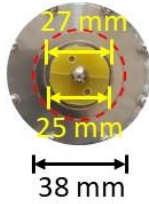
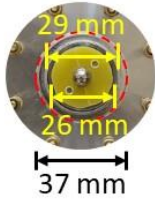
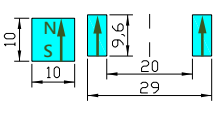
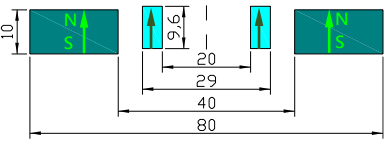
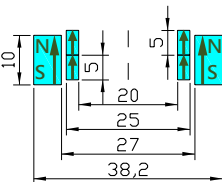
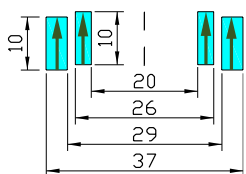



圖 11、磁浮軸承初步測試：(a) 徑向排斥力量測，(b) 第一版飛輪的被動式磁浮軸承。

為了解初始構想的磁浮軸承之  $x$ 、 $y$  方向(徑向)磁力能否支撐整個轉子的重量，在製作第一版飛輪之前，量測了磁浮軸承的方形磁鐵( $1 \text{ cm}^3$ )與內環磁鐵(直徑 29 mm、高 9.6 mm)之間的排斥力，如圖 11。評估後發現幾個問題：(1)兩組方形磁鐵的排斥力約 200 gw，比單組的 300 gw 更小，若慣性輪的質量增加到 1 kg 以上，此架構的磁浮軸承徑向力不足以抵消重力；(2)即使徑向力抵消了重力，轉子也會向下(- $x$  方向)偏移，使磁浮軸承的徑向恢復力不平均；(3)當轉子有軸向偏移，磁浮軸承的軸向力快速增加，如果轉子與端板的接觸點為尖點，很容

易破壞端板。因此，第一版飛輪即採用直立轉軸，並以鋼珠取代尖點，如圖 11(b)。直立式的優點為：磁浮軸承的軸向力足夠大，可以支撐比較重的轉子，且轉子在中心軸上，徑向力平均，高速旋轉時比較不會晃動。

在本研究的開發過程中，磁浮軸承的規格透過實驗測試持續改良，共有四款磁浮軸承設計，其磁鐵的磁極方向都互相平行，磁鐵材料及尺寸如表 6。

表 6、第一版至第五版飛輪的磁浮軸承規格

| 版本      | 第一版  | 第二版   | 第三版   | 第四、五版  |
|---------|--|---|---|--|
| 照片      |   |    |   |   |
| 尺寸 (mm) |   |    |    |  |
| 內環磁鐵    | <br>N35 釹鐵硼<br>外徑 29 mm<br>內徑 20 mm<br>高 9.6 mm | <br>N35 釹鐵硼*2 個<br>外徑 25 mm<br>內徑 20 mm<br>高 5 mm | <br>N40 釹鐵硼<br>外徑 26 mm<br>內徑 20 mm<br>高 10 mm |  |
| 外環磁鐵    | 立方體 N35 釹鐵硼<br>1 cm <sup>3</sup> *6 個  | 環型肥粒鐵<br>外徑 80 mm<br>內徑 40 mm<br>高 10 mm  | 環型 N45 釹鐵硼<br>外徑 38 mm<br>內徑 27 mm<br>高 9.6 mm  | 環型 N40 釹鐵硼<br>外徑 37 mm<br>內徑 29 mm<br>高 10 mm  |



第一版的磁浮軸承外環由 6 個 1 cm<sup>3</sup> 立方體 N35 磁鐵組成，可調整內、外環距離(軸承間隙)，但是磁鐵的磁場強度有個別差異，會使轉子的旋轉軸偏離外環的中心軸，且各角度的磁力不同，旋轉時不夠平順。

第二版磁浮軸承的內環採用與第一版相同的 29 mm 鈹鐵硼磁鐵，外環則為外徑 80mm、內徑 40 mm 的肥粒鐵(ferrite)磁鐵。第二版軸承的旋轉較為平順，但軸承間隙大(5.5 mm)，軸向支撐力小，無法應用於 0.4 kg 以上的飛輪。

第一、二版磁浮軸承的內、外環磁極方向都與轉軸平行，但是內環磁鐵的磁化不夠均勻，導致轉子晃動明顯。為了克服這個問題，自第三版起，磁浮軸承的內外環都是從許多磁鐵中挑選最均勻的來使用，以減輕轉子偏心與晃動的問題。

第三版磁浮軸承的內環採用兩個外徑 25mm、高 5mm 的 N35 磁鐵，外環則採用外徑 38mm、內徑 27 mm 的 N45 鈹鐵硼，軸承間隙 1 mm，轉子晃動較小、偏心量也小，可支撐 3 kg 的飛輪轉子。第四、五版採用訂製的 N40 鈹鐵硼磁鐵，內環外徑 26mm、高 10mm，外環外徑 37mm、內徑 27 mm，軸承間隙 1.5 mm，轉子晃動小、偏心量低，能支撐 5 kg 的飛輪轉子。

表 7、第三、四、五版飛輪之磁浮軸承所挑選之磁鐵的徑向力(單位 gw)非均勻性

|     | Ver. 3                 |              | Ver. 4 & 5                 |                         |                          |
|-----|------------------------|--------------|----------------------------|-------------------------|--------------------------|
|     | 內環：20 選 4<br>(OD25×H5) |              | 外環：10 選 2<br>(OD38.2×H9.6) | 內環：20 選 2<br>(OD26×H10) | 外環：20 選 2<br>(OD37×H9.6) |
| 上軸承 | #6<br>0.46%            | #7<br>0.49%  | #8<br>0.50%                | #18<br>0.20%            | #3<br>0.14%              |
| 下軸承 | #11<br>0.23%           | #19<br>0.16% | #10<br>0.23%               | #10<br>0.16%            | #13<br>0.10%             |

第三及第四、五版飛輪之磁浮軸承的環形磁鐵，是 10 至 20 個磁鐵中挑選最均勻者使用，所挑選之磁鐵徑向力(單位 gw)的非均勻性量測結果如表 7，其中百分比定義為八個方向磁力的標準差除以平均值；非均勻性最大值 0.5%，最小值 0.1%。磁浮軸承內、外環的組合是依據非均勻性數據挑選，使上、下軸承的磁力約略相同。徑向力量測方式如圖 11(a)。

### (3) 端板

在第一版的實驗測試中，與鋼珠接觸的端板最初採用防刮貼片、石英片等表面堅硬、低摩擦係數的材質，卻發現它很容易破碎損壞，刮傷鋼珠表面，於是改用不易破碎的聚碳酸酯(PC)塑膠板；但是 PC 板在數次實驗後會凹陷，於是改為表面不易凹陷磨損、且摩擦係數小的石墨片；在第二版之後的各版本實驗中，端板主要採用石墨片，部份實驗的端板採用摩擦係數更低的鐵氟龍片。各端板材料的動摩擦係數如下表，各版本飛輪的端板及底座如圖 12。

表 8、端板材料與 304 不鏽鋼珠之間的動摩擦係數量測結果

| 防刮貼片 | 石英片  | PC 板 | 石墨片  | 鐵氟龍片 | 壓克力板 | 304 不鏽鋼 |
|------|------|------|------|------|------|---------|
| 0.13 | 0.15 | 0.13 | 0.15 | 0.10 | 0.16 | 0.24    |

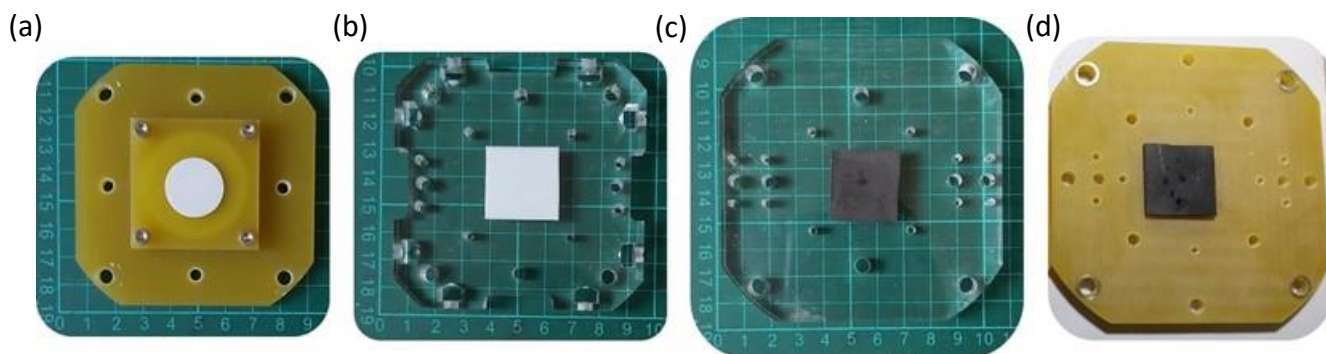


圖 12、底座及端板：(a)第一、二版，PC 板，(b)第三版，鐵氟龍片，(c)第四、(d)五版，石墨片

### 3. 馬達/發電機

#### (1) 軸向磁通無刷直流馬達

無刷直流(brushless direct current, BLDC)馬達是沒有電刷的直流馬達，轉子是磁鐵、定子是線圈，沒有摩擦損耗，很適合飛輪應用。BLDC 馬達有徑向磁通與軸向磁通兩種設計<sup>[19]</sup>，軸向磁通馬達的構造簡單，容易製作，而且轉子及線圈整體厚度可以做得比較小，在飛輪系統中留更多空間給慣性輪。利用市售的圓柱形磁鐵即可製作軸向磁通馬達<sup>[20]</sup>，相同的設計亦適合作為發電機<sup>[21]</sup>。本研究採用的軸向磁通馬達設計如圖 13。

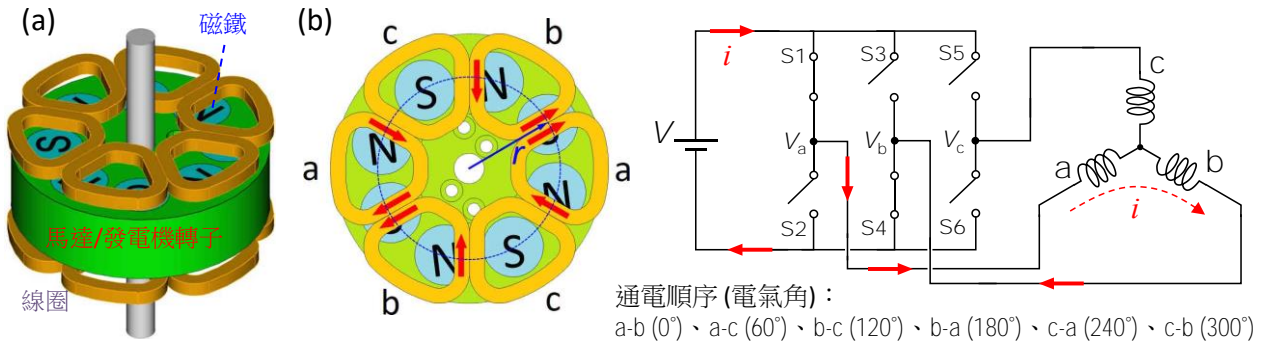


圖 13、軸向磁通無刷直流馬達：(a)線圈與轉子結構，(b) 操作原理<sup>[18]</sup>

在這個 BLDC 馬達的設計中，轉子由四組磁極方向相反的八個磁鐵組成，磁鐵為圓柱形(直徑 16 mm、高 20 mm)；轉子上、下方各有六個線圈(亦稱定子)，每兩個線圈串聯為 a、b、c 三組線圈。當轉子旋轉 90°，馬達即經歷一個操作週期(360°的電氣角)，此週期中 a、b、c 線圈通電的相位角相差 60 度，使轉子可以被電磁力推動持續旋轉。假設有  $n_c$  個線圈串聯，每個線圈匝數為  $N$ ，在磁鐵的等效磁場  $B_{\text{eff}}$  中受作用力  $F_{\text{tot}} = n_c \times N \times i \ell B_{\text{eff}}$  的有效長度為  $\ell$ ，電流為  $i$ ，作用於線圈的電磁力與馬達轉子受到的反作用力  $F_{\text{tot}}$  大小相同，合力矩為

$$\tau = rF_{\text{tot}} = rn_c Ni \ell B_{\text{eff}}, \quad (5)$$

其中  $r$  為上圖(b)標示的等效半徑，反作用力  $F_{\text{tot}} = n_c Ni \ell B_{\text{eff}}$ 。表 9 為本研究之馬達的設計參數代表值，利用這些數據估計馬達的力矩  $\tau = 0.0172 \text{ N}\cdot\text{m}$ ，反作用力  $F_{\text{tot}} = 0.72 \text{ N}$ 。

表 9、本研究之馬達/發電機的設計參數

| 參數  | 電流<br>$i$ | 等效磁場<br>$B_{\text{eff}}$ | 有效長度<br>$\ell$ | 等效半徑<br>$r$ | 匝數<br>$N$ | 磁極數<br>$n_m$ | 串聯數<br>$n_c$ | 轉速<br>$\omega$          |
|-----|-----------|--------------------------|----------------|-------------|-----------|--------------|--------------|-------------------------|
| 代表值 | 1 A       | 0.2 T                    | 16 mm          | 24 mm       | 56 turns  | 4 poles      | 4 coils      | 100 rev/s<br>= 628rad/s |

本研究中的馬達控制方式如圖 14，飛輪的旋轉加速是以 300 W BLDC 馬達控制器驅動，轉速設定是利用電腦透過將指令透過藍芽無線傳輸(或 USB 介面)送至 Arduino UNO 微處理器，產生 PWM (pulse-width modulation)訊號，經過一個由電容與電阻組成的低通濾波器，產生 0-5V 的直流電壓來控制。轉速訊號也是透過無線傳輸由電腦記錄並顯示。在部份實驗中，為了減少馬達對轉速量測的干擾，飛輪的旋轉加速是以電位計分壓手動調整控制轉速。

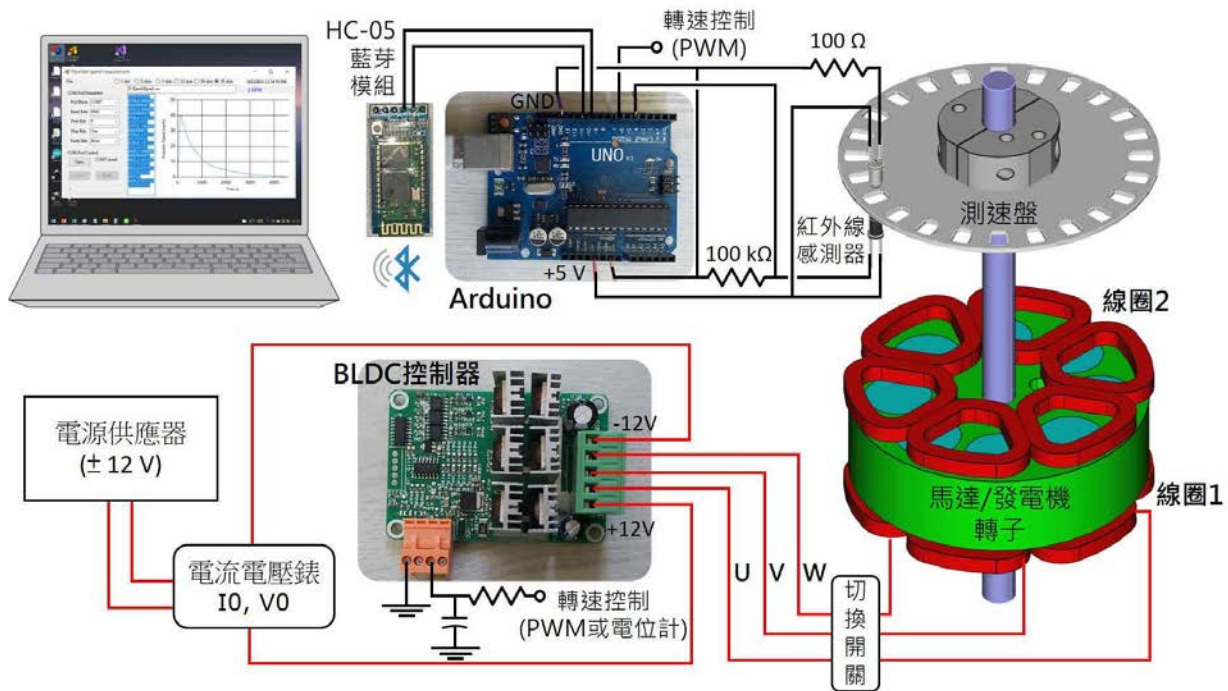


圖 14、飛輪系統的馬達運作方式



## (2) 軸向磁通發電機

當飛輪加速到適當的轉速  $\omega$ ，馬達即可作為發電機使用，把飛輪的動能轉換為電能。發電機原理如圖 15(a)，各線圈 a、b、c 的感應電動勢峰值與磁極數  $n_m$ 、串聯數  $n_c$ 、等效半徑  $r$ 、有效長度  $\ell$ 、匝數  $N$  成正比，其峰值的可表示為

$$V_p = -n_c N n_m r \omega B_{\text{eff}} \ell \quad (6)$$

其中  $\omega = 2\pi f$ ， $f$  為旋轉的頻率。由上式可知，電壓與轉速  $\omega$  成正比；當尺寸不變，磁極數  $n_m$ 、匝數  $N$ 、串聯數  $n_c$  越多，則感應電壓越高。三相全波整流後，輸出的直流電壓  $V_{\text{out}} = V_{\text{out}+} - V_{\text{out}-}$ ，其直流電壓的峰值可表示為 [22],[23]

$$V_{\text{out,p}} = \sqrt{3}V_p \quad (7)$$

取表 9 的設計參數代表值，由(6)、(7)可求出 a、b、c 各線圈的感應電動勢峰值為 10.8 V，直流電壓峰值 17.9 V，如圖 15(b)。

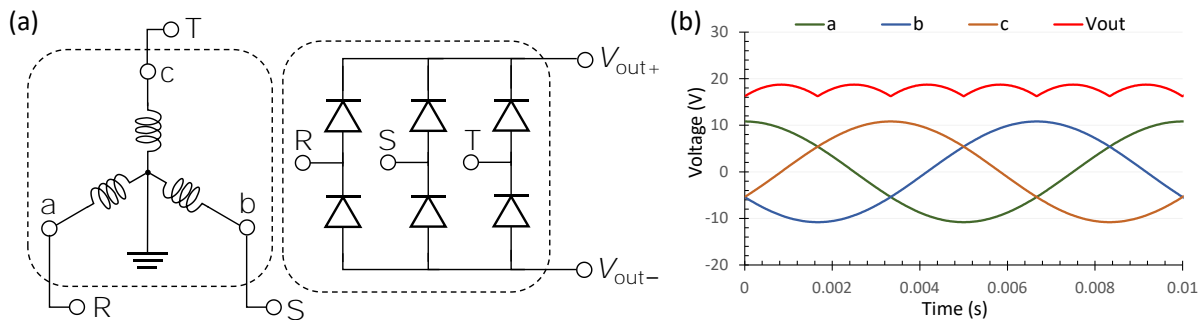


圖 15、發電機原理[22],[23]：(a)三相整流電路接法，(b)三相交流電壓與整流後的直流電壓

方程式(6)可以利用長度  $\ell$  導線在等效磁場  $B_{\text{eff}}$  中以電氣角之等效速度  $v_{\text{eff}} = n_m r \omega$  移動時的感應電動勢  $\mathcal{E} = -v_{\text{eff}} B_{\text{eff}} \ell$  推得。發電機轉子角度與電氣角的關係如圖 16，因磁極數  $n_m = 4$ ，當發電機轉子旋轉  $90^\circ$ ，即完成一個發電週期(電氣角旋轉  $360^\circ$ )，亦即每轉一圈有四個週期發電，發電頻率為旋轉頻率的四倍；當轉子以角速度  $\omega$  轉動，線圈中的磁場以  $n_m \omega$  的角頻率變動。由圖 15(b)及圖 16 知，線圈 a、c、b 分別在電氣角  $0^\circ$ 、 $120^\circ$ 、 $240^\circ$  達到最大感應電壓。

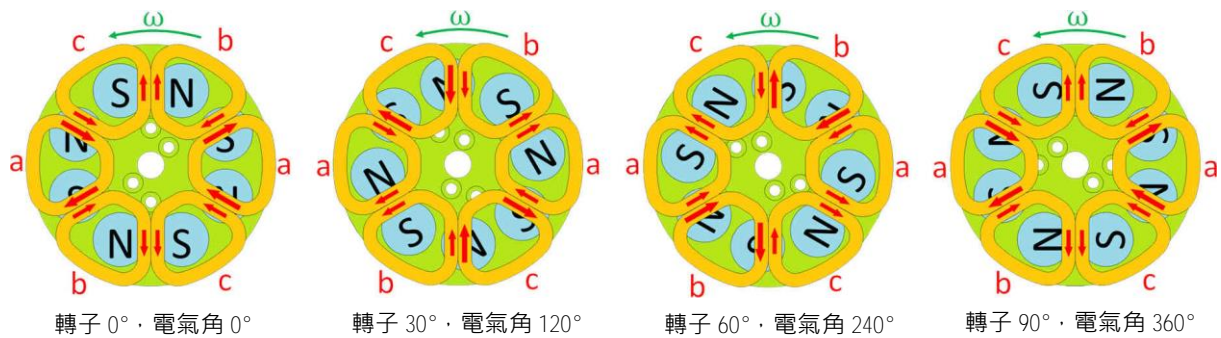


圖 16、發電機轉子角度與電氣角的關係

本研究中的發電機運作方式如圖 17，當飛輪達到足夠的轉速，發電線圈 a、b、c(即切換過來的馬達線圈)產生 R、S、T 三相交流電壓，經過三相全波整流電路產生直流電壓，此電壓透過直流升壓/降壓模組接到測試用的負載(枱燈)。為了避免發電的電壓太高造成升降壓模組損壞，在整流電路後加上兩個反向串聯的 30 V 基納二極體限制最高電壓。電流量測是利用霍耳電流感測器(I1 及 I2)，電壓量測是利用電阻分壓(V1 及 V2)，電流及電壓訊號都以 Arduino 的類比輸入腳量測，透過藍芽無線傳輸傳送到電腦。轉速訊號也是透過無線傳輸由電腦記錄並顯示。因為安全考量，本研究在實驗操作時轉速不超過 240 rps (= 14,400 rpm)，發電線圈整流後輸出的直流電壓限制在 30 V 以內。

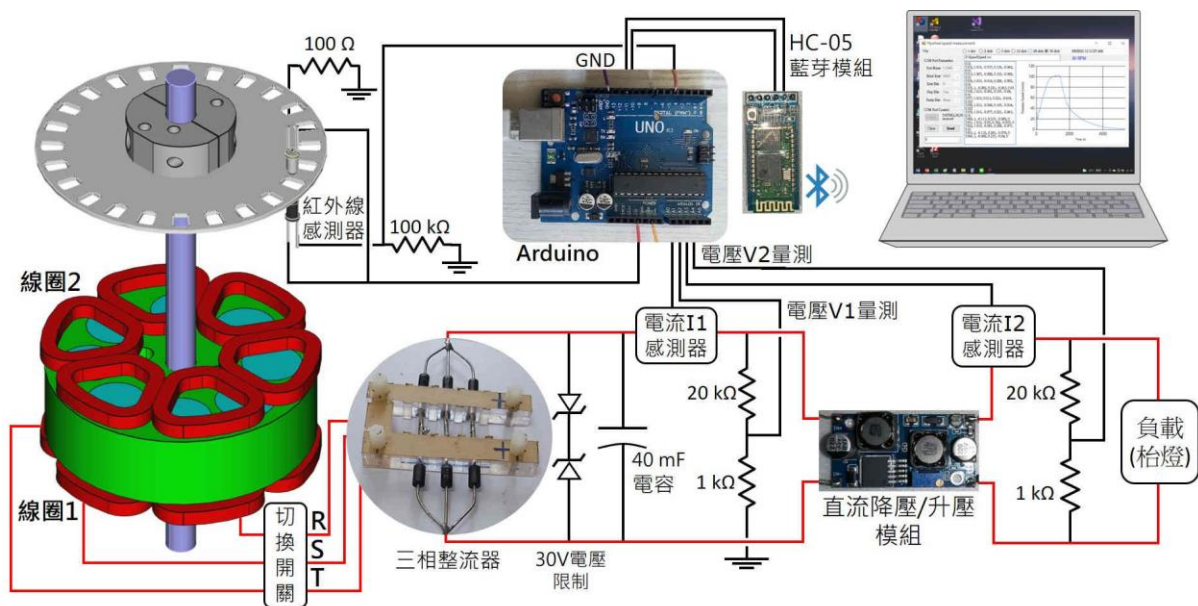


圖 17、發電機運作方式；量測馬達功率時，感測器 I2 改接到圖 14 中的 I0 量測電流。

### (3) 線圈串聯與並聯

本研究大部份實驗以線圈 1 作為馬達驅動飛輪，如圖 18(a)；為了使馬達到較高轉速(或提高發電電壓)，也測試了將上、下兩組線圈取同相位端點作串聯或並聯的組合。以 a、b 相位為例，並聯時，電流分為兩個分支通過 a1、a2 及 b1、b2，如圖 18(b)；而串聯時，電流依序通過 a2、a1、b1、b2，如圖 18(c)。在實驗中，串聯或並聯是用多通道開關切換。測試後發現，並聯可以達到較高轉速，但是在發電時減速比較快，可能因為並聯線圈之間的封閉迴路感應電流造成能量損失；發電時串聯可以提高輸出電壓，但電阻變大，可供應的最大電流減小。

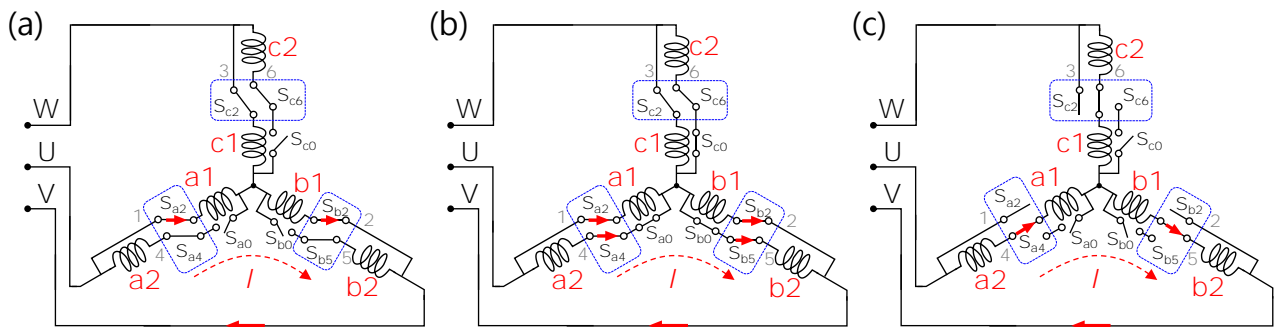


圖 18、馬達/發電機線圈接法：(a)使用線圈 1，(b) 線圈 1、2 並聯，(c)線圈 1、2 串聯。

### (4) 馬達/發電機轉子製作

馬達/發電機轉子由 8 個圓柱形 N52 的釹鐵硼磁鐵與 FR4 轉子框架組成，第一版的轉子框架(沿用至第四版)直徑 72 mm、高 20 mm，第五版的轉子框架直徑 98 mm、高 20 mm；這兩個版本的磁鐵孔配置及尺寸都相同，通孔直徑 16mm、深 20 mm(配合相同大小的磁鐵)，也可以配合相同的線圈使用。製作馬達/發電機轉子的流程如圖 19，先量測轉子框架與各磁鐵重量，記錄後，將重量相同的磁鐵排列在對稱的位置上，計算質心最接近心央的組合。第五版馬達轉子的磁鐵配重如圖 19(b)，其質心大約在轉軸上。

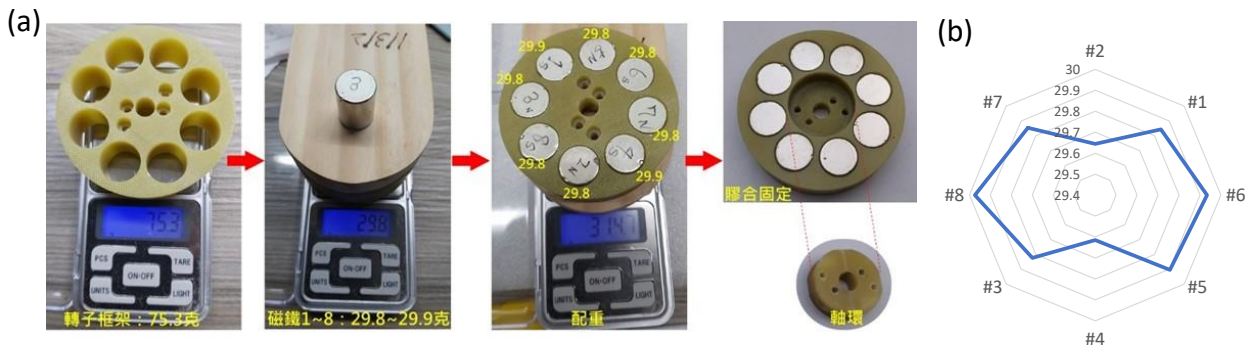


圖 19、(a)馬達/發電機轉子製作流程(Ver.1)；(b)馬達轉子的磁鐵配重圖(Ver.5)。

### (5) 馬達/發電機線圈製作

線圈的製作流程如圖 20，線圈係以手動繞線製作，繞線機可以幫助繞線時的轉動並記錄匝數。繞線時須同時上膠，繞到設定的匝數後取下線圈，上膠布固定，等膠乾再拆下後框架。繞線完成的 6 個線圈標示正負極後，放置到線圈框架中，標示編號，然後以硬化時間長、流動性高的環氧樹脂(epoxy，簡稱為 AB 膠)填滿線圈框架，約 6 小時後包上保鮮膜(避免黏合)並鎖上壓合板使表面平整，直到 24 小時後取下壓合板與保鮮膜即可。

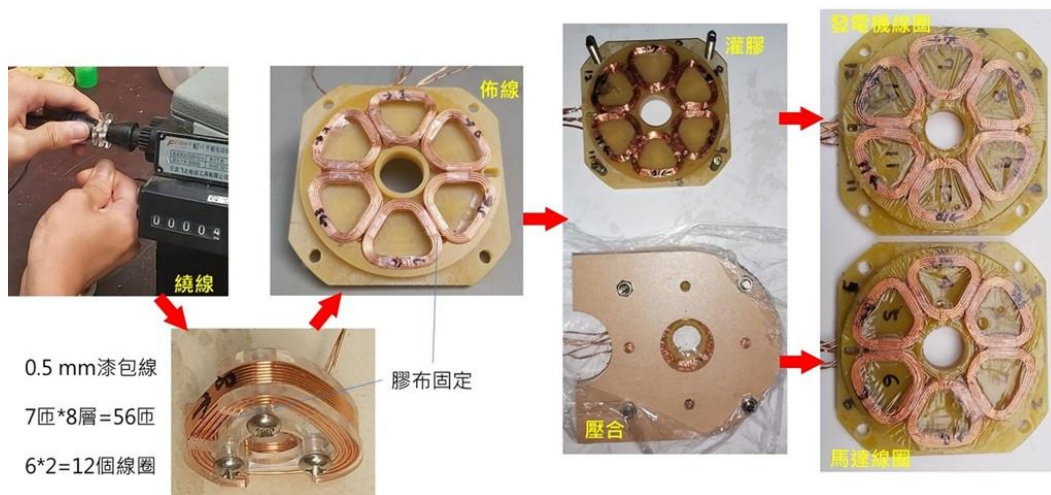


圖 20、於 Ver.1~3 使用的馬達/發電機線圈製作流程，採用 0.5 mm 單芯漆包線。

第一版線圈(沿用到第三版)框架以 FR4 製作，成本較高；第四、五版線圈框架放大(配合 6 mm 螺桿)，改用雷射切割後黏合的壓克力板(如圖 21)，以降低成本並加快研究進度。



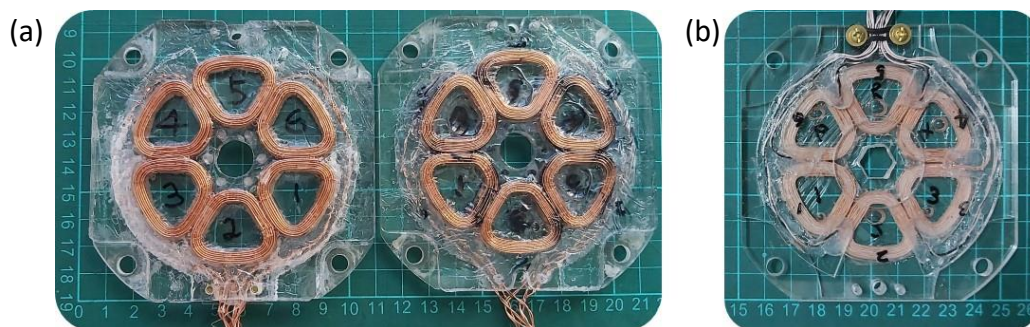


圖 21、第四版與第五版的馬達/發電機線圈：(a) Ver.4 的 30 匝線圈(單芯，線徑 0.7 mm，左) 及 56 匝線圈(單芯，線徑 0.5 mm，右)，(b)Ver.5 的 56 匝線圈(多芯，線徑 0.5 mm)。

#### 4. 支撐結構與真空室

##### (1) 支撐結構與組件

第一至第五版飛輪的支撐結構，都是利用四支螺桿把磁浮軸承座、線圈座、以及端板底座連結起來，以便調整各組件之間距離。以螺桿連結端板座、軸承座、線圈框架的支撐結構如圖 22。第一至第三版的線圈座及端板底座是以玻璃纖維板製作；第四版的磁浮軸承座、線圈座、及端板底座是以壓克力板製作；第五版的磁浮軸承座與線圈座以壓克力板製作、而端板底座則是以玻璃纖維板製作以便減少厚度。由於壓克力雷射加工只能切割二維圖形，玻璃纖維加工也加工方法的限制，在製作前都需要先繪製三維模型確認設計是否正確。支撐結構與組件設計是利用開源軟體 LiberCAD<sup>[13]</sup>先繪製二維設計圖，再利開源軟體 FreeCAD<sup>[14]</sup>完成 3D 模型繪製。

第一至第三版飛輪採用直徑 5 mm 的不鏽鋼螺桿，如圖 22(a)。在實驗測試後，發現 5 mm 螺桿連結的支撐結構容易振動，故第四版飛輪改用直徑 6 mm 的螺桿，如圖 22(b)，最初的材質為 304 不鏽鋼，但發現 6 mm 螺桿與馬達轉子的磁鐵之間有磁力作用，因而更換為 6 mm 的黃銅螺桿，並沿用至第五版。

第四、第五版的 6 mm 黃銅螺桿長度以及磁浮軸承座、線圈座、及端板底座的外徑等尺寸，皆配合真空室之壓克力管的長度(247 mm)與內徑(120 mm)，恰可置入真空室內，在抽真空後，

壓克力管的外徑收縮，可與其緊密貼合，在飛輪旋轉時提供側向的支撐力，減少振動。

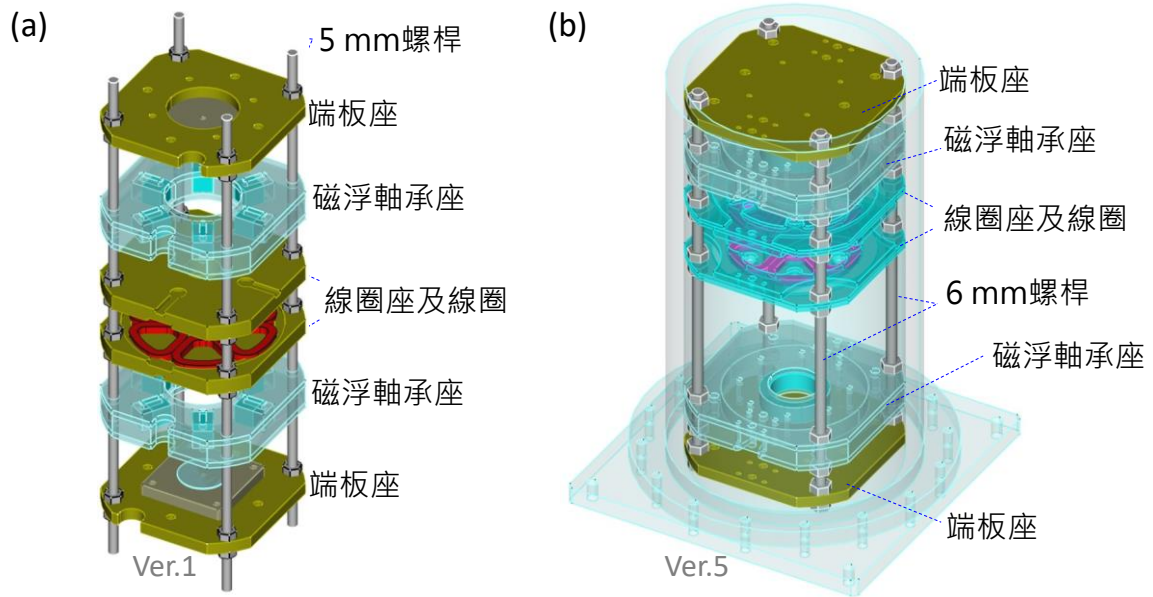


圖 22、支撐結構：(a) Ver.1~3 採用 5 mm 螺桿，(b) Ver.4、5 採用 6 mm 螺桿及真空室

## (2) 真空室

真空室是利用 10 mm 厚的壓克力管(外徑 140 mm、內徑 120 mm、高 247 mm)與雷射切割壓克力板組合而成，設計如圖 23(a)。可拆裝部份利用 O 環型與壓克力緊迫環達成氣密，不可拆的部份是以壓克力膠或環氧樹脂密封，例如貫穿真空室的導線與螺絲孔。以螺絲固定組裝完成後，以真空幫浦抽氣，如圖 23(b)，直到抽氣口上裝設的壓力計顯示-76 cm·Hg，關上閥門停止抽氣。測試後確認真空室的洩漏很小，一天內的氣壓上昇不超過 0.1 cm·Hg。

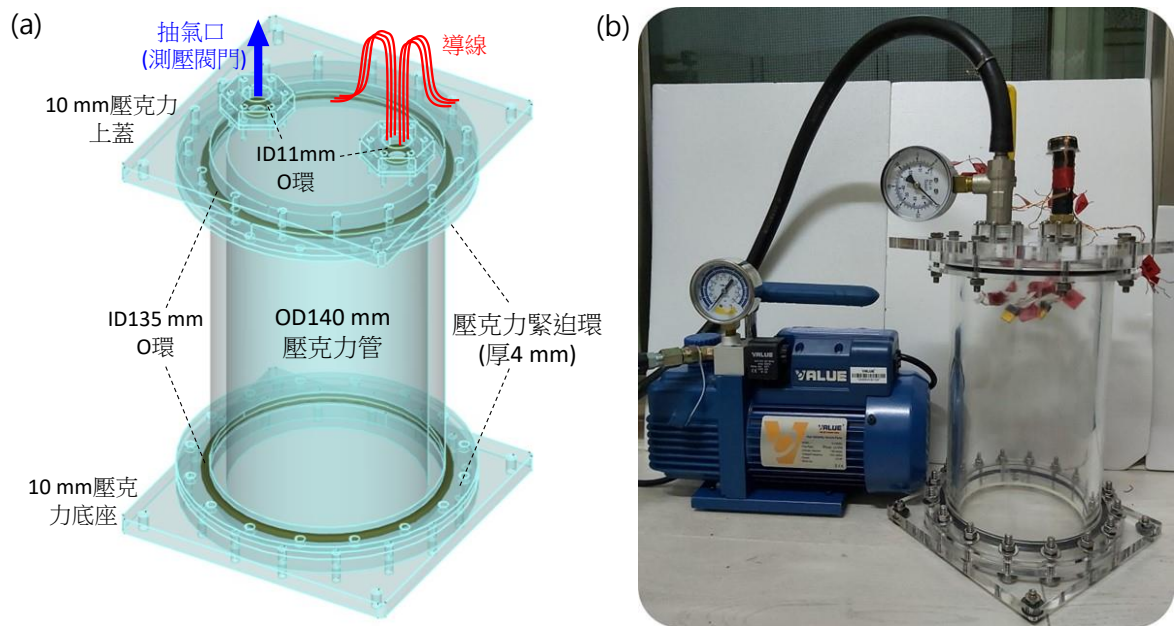


圖 23、真空室：(a)氣密設計，(b)抽氣測試

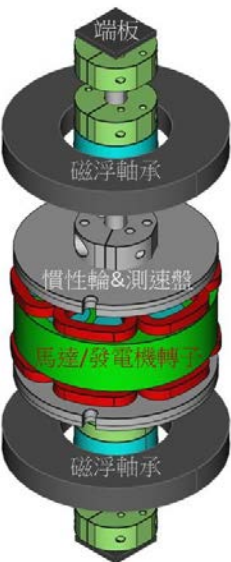

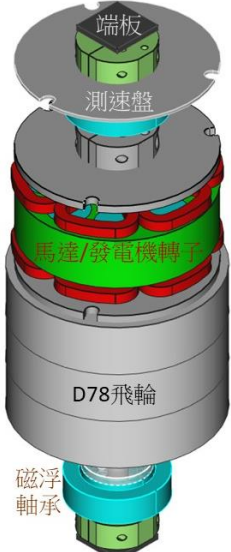

#### (四) 真空磁浮飛輪系統研發歷程

真空磁浮飛輪系統的研發歷程如下表，共有五個版本，以下依磁浮軸承、飛輪轉子、發電線圈等規格的演進，設計修改的考慮因素說明如後。

表 10、磁浮飛輪研發歷程 (長度單位 mm)

| 版本           | 磁浮軸承與飛輪轉子 | 規格、操作方式   |
|--------------|-----------|---|
| 第一版<br>Ver.1 |           | 支架*4：304 不鏽鋼螺桿 $\phi 5 \times L300$<br>磁浮軸承*2：外環 10×10×10 磁鐵(N35)*6~12，<br>內環 OD29×ID20×H9.6 磁鐵(N35)<br>端板*2：防刮貼片→石英片→PC 板<br>馬達/發電機轉子：D72×H20 (FR4、N52 磁鐵)<br>馬達/發電機線圈：56 匝單芯線圈*12 個<br>慣性輪：430 不鏽鋼盤 D72×H(2+3)*2 組、<br>D72×H1*0~2 片，鋁盤 D72×H1*0~2 片<br>測速盤：單孔 |

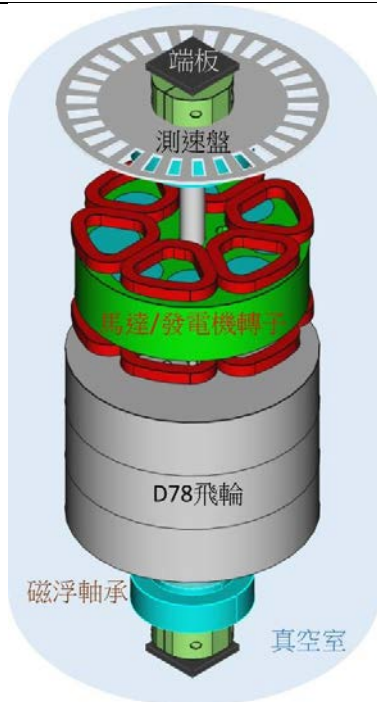


|                      |   |   |
|----------------------|---|---|
|                      |   | <p>實驗測試(大氣環境)：</p> <p>(1)拉線加速，計時器量測自然減速時間，示波器觀察發電線圈之電壓、頻率(除以4=轉速)；</p> <p>(2) 以示波器量測發電電壓、轉動慣量；</p> <p>(3) 以 Arduino 讀取測速盤轉速，以 USB 傳送至電腦記錄減速過程。</p>  |
| <p>第二版<br/>Ver.2</p> |     | <p>支架、馬達/發電機、慣性輪、測速盤：同 Ver.1</p> <p>磁浮軸承*2：外環 OD80×ID40×H10 肥粒鐵，<br/>內環 OD29×ID20×H9.6 磁鐵(N35)</p> <p>端板*2：PC 板→石墨片</p> <p>實驗測試(大氣環境)：</p> <p>(1)手調 BLDC 馬達控制器加速，用示波器觀察測速盤頻率(=轉速)及發電頻率(除以4=轉速)；</p> <p>(2)以 Arduino 讀取測速盤轉速，以 USB 傳送至電腦記錄減速過程；</p> <p>(3)以示波器量測發電的交流電壓、直流電壓；</p> <p>(4)以示波器量測轉子振動頻率，計算轉動慣量。</p> |
| <p>第三版<br/>Ver.3</p> |   | <p>支架：304 不鏽鋼螺桿 <math>\phi 5 \times L265</math> *4 支</p> <p>磁浮軸承*2：外環 OD38×ID27×H10 磁鐵(N45)，<br/>內環 OD25×ID20×H5 磁鐵(N35)*2</p> <p>端板*2：石墨片 或 鐵氟龍</p> <p>馬達/發電機：同 Ver.1~2</p> <p>慣性輪：304 不鏽鋼飛輪 D78×H20*1~4 個，<br/>430 不鏽鋼盤 D72 *0~2 組</p> <p>測速盤：3 孔鋁盤，或 6、12、24 孔紙板</p> <p>實驗測試(大氣環境)：同 Ver.2</p>               |



第四版

Ver.4



支架\*4：304 不鏽鋼螺桿  $\phi 6 \times L265$ ，  
或 黃銅螺桿  $\phi 6 \times L250$

磁浮軸承\*2：外環 OD37×ID29×H10 磁鐵(N40)，  
內環 OD26×ID20×H10 磁鐵(N40)\*2

端板\*2：同 Ver.3

慣性輪：同 Ver.3

馬達/發電機轉子：同 Ver.1~3

馬達線圈：30 匝單芯線圈\*6，線徑 0.7

發電機線圈：56 匝單芯線圈\*6，線徑 0.5

測速盤：塑膠紙 30 孔圓板

實驗測試(大氣或真空環境)：

- (1)手調 BLDC 馬達控制器加速，Arduino 讀取測速盤轉速(除以 30 = 轉速)，以 USB 傳送至電腦記錄減速過程；
- (2)以示波器量測發電的交流電壓、直流電壓；
- (3)以示波器量測轉子振動頻率，計算轉動慣量；
- (4)改變線圈與馬達磁鐵的距離，分析阻力變化；
- (5)以攝影機記錄供電給柏燈的過程。

|                       |  |  |
|-----------------------|--|--|
| <p>第五版<br/>Ver. 5</p> |   | <p>支架：黃銅螺桿 <math>\phi 6 \times L250 *4</math><br/> 磁浮軸承*2 組：同 Ver.4<br/> 端板*2：石墨片<br/> 馬達/發電機轉子：D98×H20 (FR4、N52 磁鐵)<br/> 馬達/發電機線圈：56 匝多芯線圈*12 個，或 Ver.4 的單芯線圈<br/> 慣性輪：304 不鏽鋼飛輪 D98×H20 *1~4 個，黑鐵盤 D77×H3 *0 或 2 個<br/> 測速盤：同 Ver.4<br/> 實驗測試(真空及大氣環境)：<br/> (1)透過無線傳輸，以電腦控制 BLDC 馬達控制器加速；<br/> (2)以電腦自動記錄減速與發電過程的轉速、電壓、電流；<br/> (3)以示波器量測轉子振動頻率，計算轉動慣量；<br/> (4)以攝影機記錄供電給枱燈的過程。</p> |
|-----------------------|--|--|

### 1. 第一版 Ver.1

- (1) 採用 D72 不鏽鋼盤為慣性輪，馬達為單芯線圈，單孔測速盤， $\phi 5 \text{ mm} \times L300 \text{ mm}$  不鏽鋼螺桿，大氣操作。

(2) 依初始構想的設計，磁浮軸承以 6 個  $1\text{ cm}^3$  的 N35 立方磁鐵與 1 個外徑 29 mm 的 N35 環形磁鐵組成。發電磁鐵的磁力不均勻使轉子偏心、晃動。

改進：磁浮軸承外環更換為外徑 80 mm、內徑 40 mm 的環形磁鐵。

(3) 沒有馬達控制器，以人力手動拉線加速。

改進：找出合適的馬達控制器。

(4) 量測自然減速時間，用示波器觀察發電線圈的感應電壓波形與頻率。

改進：撰寫以測速盤量測轉速的程式，並製作紅外線感測器電路。

(5) 以防刮貼片、石英片作為端板，實測發現易破裂、不耐用，且石英片會刮損鋼珠表面。

改進：端板改為 PC 塑膠板。

## 2. 第二版 Ver.2

(1) 採用 D72 不鏽鋼盤為慣性輪，馬達為單芯線圈，單孔測速盤， $\phi 5\text{ mm} \times L300\text{ mm}$  不鏽鋼螺桿，大氣操作；完成以測速盤量測轉速的程式修改，並確認紅外線感測器電路參數。

(2) 磁浮軸承外環採用內徑 40 mm 的環形肥粒鐵磁鐵，飛輪轉子轉動平順，但是磁力小，不能支撐較重的飛輪，且 29 mm 內環磁鐵的磁力均勻性不佳，高速旋轉時晃動幅度大。

改進：內外環都使用釹鐵硼磁鐵，購買多個同型磁鐵，量測其各方向磁力的均勻性，找出最均勻的環形磁鐵組合為磁浮軸承。

(3) 發電並整流後，輸出電壓與轉速成正比，若接上燈炮發電，高轉速時功率很大易損壞。

改進：找出合適的直流降壓/昇壓模組，接在整流電路之後。

(4) 自然減速及發電持續時間不夠長。

改進：增加轉動慣量，設計新的慣性輪(D78×H20 mm)。

(5) 端板採用 PC 塑膠板易變形。

改進：端板改用石墨片。

### 3. 第三版 Ver.3

- (1) 採用 D78 mm×H20mm 飛輪，馬達為單芯線圈，3~24 孔測速盤， $\phi$  5 mm ×L265 mm 不鏽鋼螺桿，大氣操作。
- (2) 磁浮軸承磁鐵的磁力均勻性已改善，但軸向力不足以支撐 3 kg 以上轉子。  
改進：找可靠的來源，訂製材質優良的磁鐵，提昇均勻性及軸向力。
- (3) 單孔測速盤的轉速解析度不足，可量測的最低轉速 1 rps。  
改進：先改用 3 孔鋁板為測速盤，之後改用手工切割的 6 孔、12 孔、24 孔紙板。
- (4) 當端板改用鐵氟龍、使用新的慣性輪、並移去馬達轉子及線圈，以拉線加速測試，發現自然減速時間增加很多，推測是馬達轉子磁鐵與螺桿起作用造成能量損失；另外，發現在低轉速(約 10 rps)下，端板摩擦力小的飛輪易發生共振，使轉速快速下降。  
改進：增加馬達與螺桿的距離，改用 6 mm 不鏽鋼螺桿、真空室，使結構更堅固；，加強實測找出能量損失主因。
- (5) 將上、下線圈都串聯作為馬達使用，最高轉速只有 140 rps，並聯時可以到 200 rps 以上；  
可能是在線圈的電感或電阻較高時，不易達到高速。  
改進：上、下半邊線圈可分別作為獨立的發電機及馬達線圈，製作大線徑的馬達線圈。

### 4. 第四版 Ver.4

- (1) 採用 D78 mm×H20mm 飛輪，馬達為單芯線圈，24~30 孔測速盤， $\phi$  6 mm ×L265 mm 不鏽鋼螺桿或  $\phi$  6 mm ×L245 mm 黃銅螺桿，大氣或真空操作。
- (2) 進行阻力功率分析時，手工切割的 24 孔測速盤不夠準確，其解析度 2.5 rps 非整數。  
改進：改用雷射切割的 30 孔塑膠紙測速盤。

- (3) 改用無磁性的黃銅螺桿後，自然減速時間稍有增加；若轉子加速後移去馬達線圈，發現自然減速時間明顯增長，由 20 min 增加至 1 小時。可能是線圈的渦電流損耗造成能量損失。  
改進：以多芯線(Litz wire)<sup>[24]</sup>製作新的馬達/發電機線圈。
- (4) 進行真空中的自然減速與發電測試，無負載時可發電時間約 10 分鐘  
改進：製作新的慣性輪(D98 mm)，再提昇轉動慣量。
- (5) 示波器量測的電壓與轉速無法同步，不利於分析轉速與發電電壓的關連性。  
改進：修改程式及電路，電壓、電流與轉速都以 Arduino 量測，同步擷取記錄。

## 5. 第五版 Ver.5

- (1) 採用 D98 mm×H20mm 飛輪，馬達為單芯或多芯線圈，30 孔測速盤， $\phi 6 \text{ mm} \times L245 \text{ mm}$  黃銅螺桿，真空操作時可穩定供電 20 分鐘。
- (2) 完成電壓、電流與轉速量測程式，採用 30 孔測速盤，轉速解析度改進為 2 rps；但同時量測電壓、電流與轉速時，轉速會被馬達的控制訊號干擾。  
改進：量測時不使用 USB 介面，改用藍芽無線傳輸，減少干擾。
- (3) Arduino 的電壓輸入範圍只有 5 V，不能量測發電整流後 20 V 以上的電壓。  
改進：加上電阻分壓降壓，並進行電壓量測校準。
- (4) 電流感測器的不能解析 0.1 A 以下的電流。  
改進：未來更換為分流電阻式的功率量測板(例如 INA219)。

### 三、研究結果與討論

#### (一). 研究結果

##### 1. 磁浮軸承特性

##### (1)軸向力量測

磁浮軸承的軸向力必須支撐飛輪轉子重量，把支撐力上限設定為最大軸向力的一半，可以確保磁浮軸承維持徑向平衡。磁浮軸承的內、外環磁鐵軸向位置偏移與軸向力的關係如圖 24，軸向力是利用電子秤(#1)量測，位置設定是利用四支 6 mm 的不鏽鋼螺桿，每轉一圈為 1 mm，最小位移量為 1/6 mm，並計入秤盤形變的位移修正。圖 24(a)顯示，第一版磁浮軸承的軸向力最大值僅 4 N，兩組磁浮軸承最多支撐 0.4 kg 的轉子；第二版磁浮軸承的軸向力最大 17 N，兩組可支撐 1.7 kg 的轉子；第三版磁浮軸承的軸向力最大 30 N，兩組可支撐 3 kg 的轉子；第四、五版磁浮軸承的軸向力最大，兩組可支撐 5 kg 的轉子。

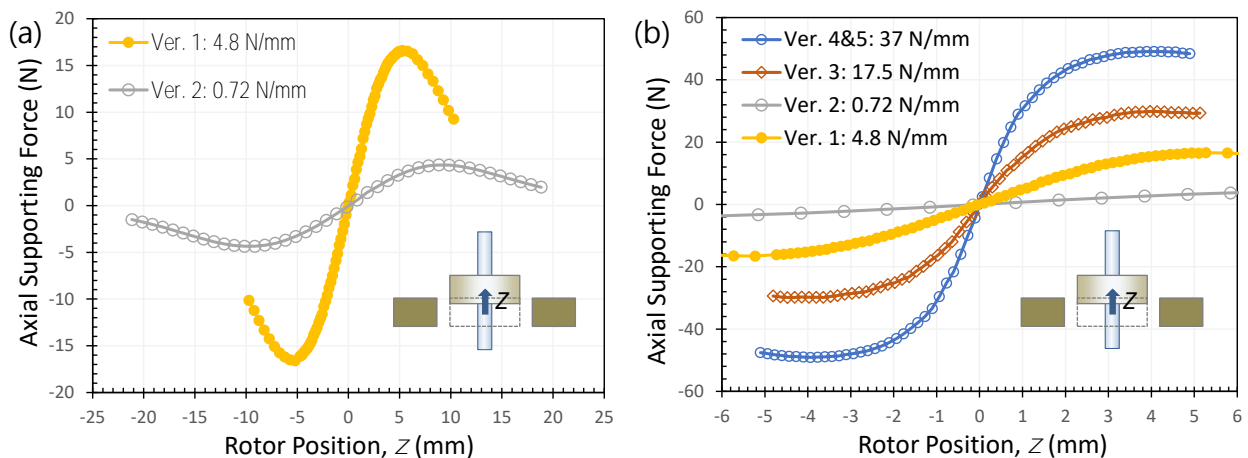


圖 24、磁浮軸承的軸向排斥力與轉子位置的關係：(a)第一、二版， (b) 第一至五版比較

##### (2)徑向力分析

磁浮軸承的徑向力是維持飛輪轉子穩定的恢復力。圖 25 為以電子秤量測第三版及第四、五版飛輪之兩組的磁浮軸承的徑向力與轉子位置偏移量的關係，轉子的位置偏移量設定是利

用四支 6 mm 的不鏽鋼螺桿，每轉一圈為 1 mm，最小位移量為 1/6 mm，並計入秤盤形變之位移修正。量測結果發現，第三版磁浮軸承的徑向恢復力之力常數為 17 N/mm，比第四、五版磁浮軸承的 13.7 N/mm 更大，其原因應該是因為第三版的間隙只有 1 mm，比第四、五版的 1.5 mm 小，且外環磁鐵等級為 N45，比第四、五版的 N40 略高。

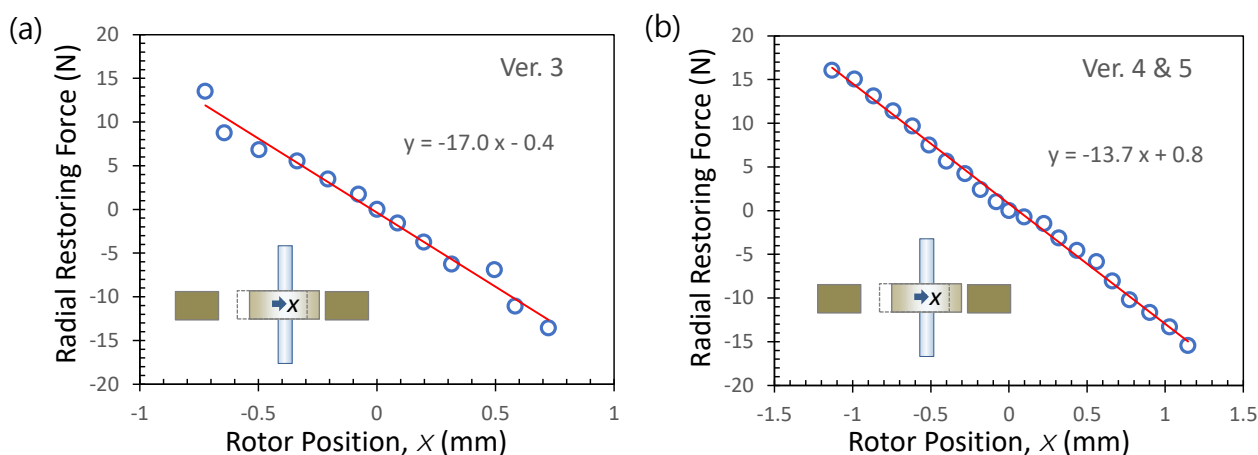


圖 25、磁浮軸承內環磁鐵的徑向恢復力量測：(a)第三版，(b)第四、五版

## 2. 馬達/發電機特性分析

### (1)馬達/發電機轉子的磁場特性

第一版至第五版的馬達/發電機轉子，都是由 8 個直徑 16 mm、高 20 mm 的 N52 釹鐵硼磁鐵以 AB 膠固定於圓柱形 FR4 框架組成，磁鐵偏心量都是 24 mm，故磁場特性相似。磁鐵的表面磁場強度決定了馬達可輸出的力矩、還有發電機可產生的電壓。第一至三版轉子的磁鐵表面磁場隨距離衰減的關係如圖 26(a)，各磁鐵之磁場強度如圖 26(b)。在磁鐵表面，最高磁場強度約 0.4 T，比同等級磁鐵的典型值 0.7 T 低<sup>[25]</sup>。線圈位置在距離 0.2 mm 處，其磁場 0.2 T 即為表 9 的代表值，由方程式(5)估計馬達的力矩 0.017 N·m/A，足以推動轉子。

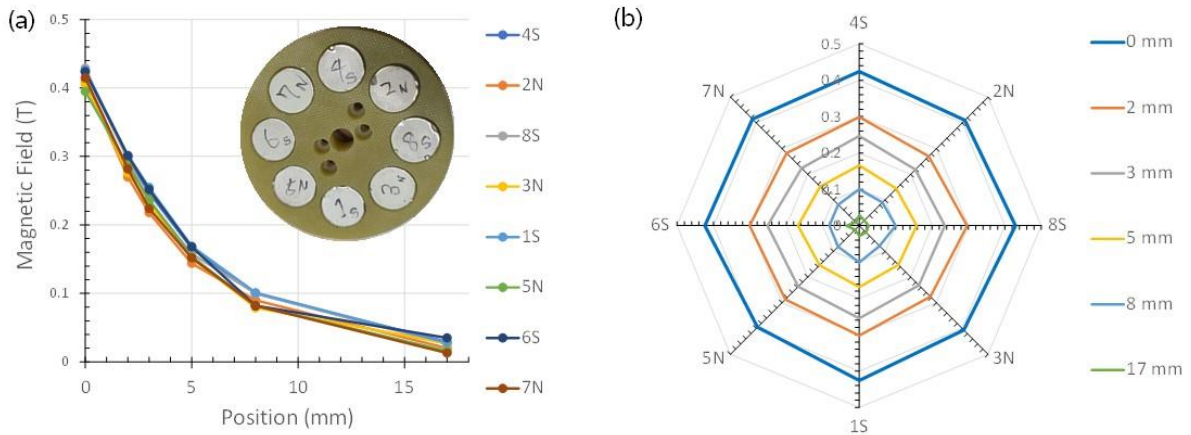


圖 26、馬達/發電機轉子之磁鐵表面磁場：(a) 強度與距離關係，(b) 各磁鐵之磁場強度

## (2)馬達的力矩

當馬達線圈通以 1 A 電流、線圈與轉子的距離 2 mm，輸出力矩與角度的關係如圖 27。量測結果顯示，在  $0^\circ$  及  $45^\circ$  ( $\approx 0.8 \text{ rad}$ ) 附近力矩接近零，而在  $22.5^\circ$  ( $\approx 0.4 \text{ rad}$ ) 附近最大；56 匝單芯線圈 (Ver.1~3)、30 匝單芯線圈 (Ver.4)、及 56 匝多芯線圈 (Ver.4) 的最大負力矩分別為  $-0.025$ 、 $-0.012$ 、及  $-0.03 \text{ N}\cdot\text{m}$ ，這些值除以線圈等效半徑 36 mm，得等效作用力分別為 0.69、0.33、0.83 N (= 71、34、及 85 gw)，與估計值接近； $0^\circ$  為力平衡點，此處的斜率大小  $\kappa = -d\tau/d\theta$  為扭轉力矩常數，其值分別為  $\kappa = 0.114$ 、 $0.044$ 、 $0.114 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$ 。當馬達角度偏移，恢復力會使轉子在  $0^\circ$  附近振盪，求出振盪頻率與力矩常數後，可以計算轉動慣量。

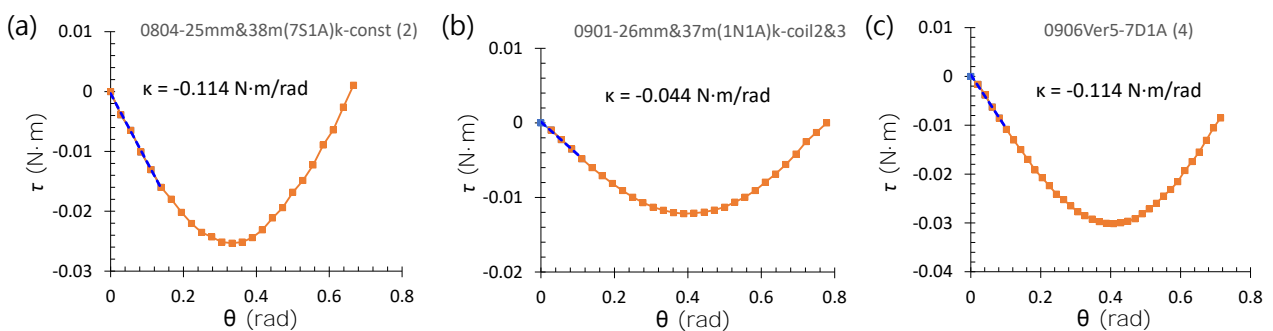


圖 27、1 A 電流下的馬達力矩：(a) 56 匝單芯線圈，(b) 30 匝單芯線圈，(c) 56 匝多芯線圈。



### (3)發電機的三相電壓

第三版飛輪之發電機的三個線圈的電壓如圖 28，由 IR sensor 訊號測得轉子頻率為 58 Hz。在此頻率下，由發電機方程式(6)計算的電壓為 12.6 V，與下圖的量測結果相當接近。

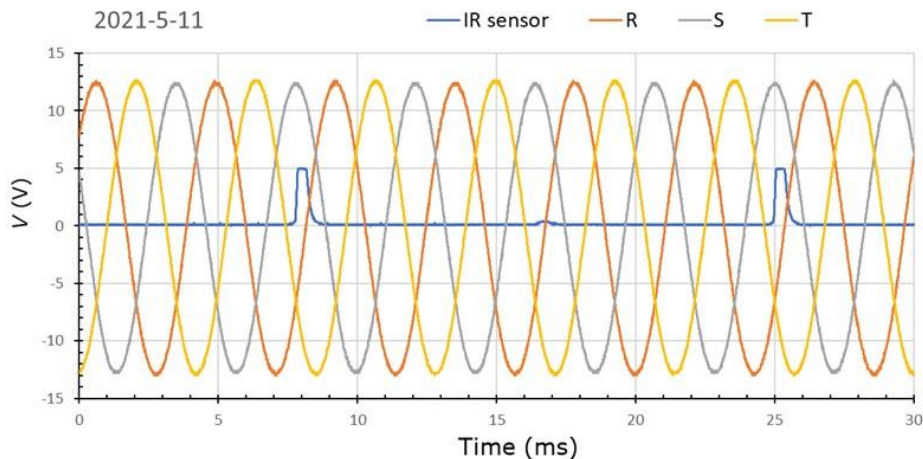


圖 28、第三版飛輪之發電機的三相電壓(轉速 58.2 rps)；第四、五版的特性相似。

## 3. 系統測試

### (1) 實驗一：轉動慣量量測

由方程式(5)可知，馬達力矩與線圈電流及磁場成正比；依據圖 27 的馬達力矩的量測結果，當電流固定，馬達轉子會在力矩為零的平衡點附近振盪，如圖 30(a)。當角度很小，可以視為簡諧振盪，其角頻率  $\omega_0 = 2\pi f_0$  與力矩常數  $\kappa$  及轉動慣量  $I_w$  有關，記錄振盪頻率後可以由  $\omega_0 = \sqrt{\kappa/I_w}$  解出轉動慣量  $I_w = \kappa/\omega_0^2$ 。圖 30(b)、(c)為馬達轉子動慣量的量測結果，定電流 1 A 之力矩常數為  $\kappa = 0.114 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$ ，由測得頻率  $f_0 = 1.31$  及  $0.71 \text{ Hz}$  可計算得第三版與第五版飛輪的轉動慣量分別為  $17.3 \text{ kg}\cdot\text{cm}^2$  及  $58.1 \text{ kg}\cdot\text{cm}^2$ 。各版本飛輪的轉動慣量量測與計算值如表 11。

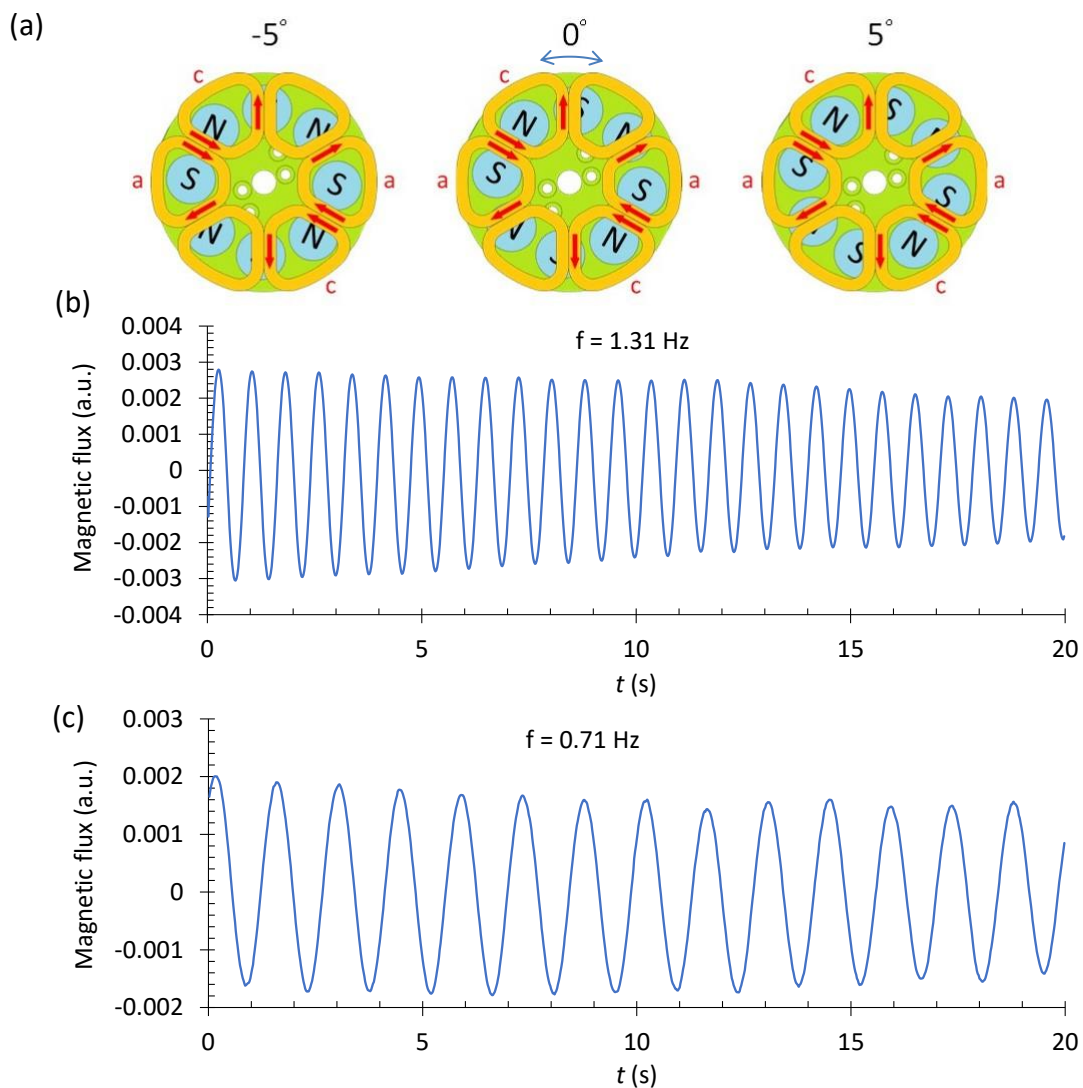


圖 29、轉動慣量量測：(a) 原理，(b)第三版， $17 \text{ kg}\cdot\text{cm}^2$ ，(c)第五版， $58 \text{ kg}\cdot\text{cm}^2$ 。

表 11、各版本飛輪轉子的轉動慣量(單位： $\text{kg}\cdot\text{cm}^2$ )

| Ver.1 | Ver. 2 | Ver. 3-1 | Ver.3-2 | Ver.3-3 | Ver.3-4 | Ver. 3-5 | Ver. 4-1 | Ver.4-0 | Ver.5 |
|-------|--------|----------|---------|---------|---------|----------|----------|---------|-------|
| 2.81  | 2.82   | 2.8*     | 4.29    | 9.03    | 13*     | 17.3     | 16.5     | 20*     | 58.1  |

\*計算值，依據最接近之飛輪組合的量測值以及方程式(2)、(3)估計。

## (2) 實驗二：減速過程量測(spin-down test)

圖 30 為第一至第五版飛輪的自然減速實驗結果。此實驗的最高速超過 100 rps，但為了與拉線加速(無馬達)的實驗比較，取 20 rps 為起始轉速。量測結果顯示，自然減速時間隨著轉動慣量的增加而延長。取轉動慣量  $2.8 \text{ kg}\cdot\text{cm}^2$  的 Ver.1、2、3-1 比較，具有肥粒鐵外環磁浮軸承的 Ver.2 減速最慢，可能是因為內外環磁鐵之間間隙最大，但是它的軸向力小，不能支撐更重的飛輪轉子。再取轉動慣量  $17 \text{ kg}\cdot\text{cm}^2$  的 Ver.3-5 與 Ver.4-1 比較，Ver.4 減速都比較慢，顯示第四版磁浮軸承的偏心量小可能是關鍵因素。當線圈與馬達轉子距離增加為 5 mm 至 16 mm (加速後線圈遠離)，減速更為緩慢，且無馬達的 Ver.4-0 比真空中的 Ver.4-1 減速更慢，顯示馬達與線圈接近時有較大阻力。 $20 \text{ rps}$  的減速度乘以轉動慣量之阻力力矩如表 12，Ver.1~3 阻力力矩都在同一數量級( $10^{-3} \text{ N}\cdot\text{m}$ )，Ver.4-0 無馬達與真空操作的 Ver.5-1、5-2 也在同一數量級 ( $10^{-4} \text{ N}\cdot\text{m}$ )。為探討無馬達或線圈遠離使阻力變小的現象是否因為單芯線的渦電流效應引起，在 Ver.5 比較了以單芯線及多芯線作為馬達線圈的飛輪轉子減速實驗，發現無論在真空或大氣的環境下操作，多芯線圈比單芯線圈更好，自然減速最慢。

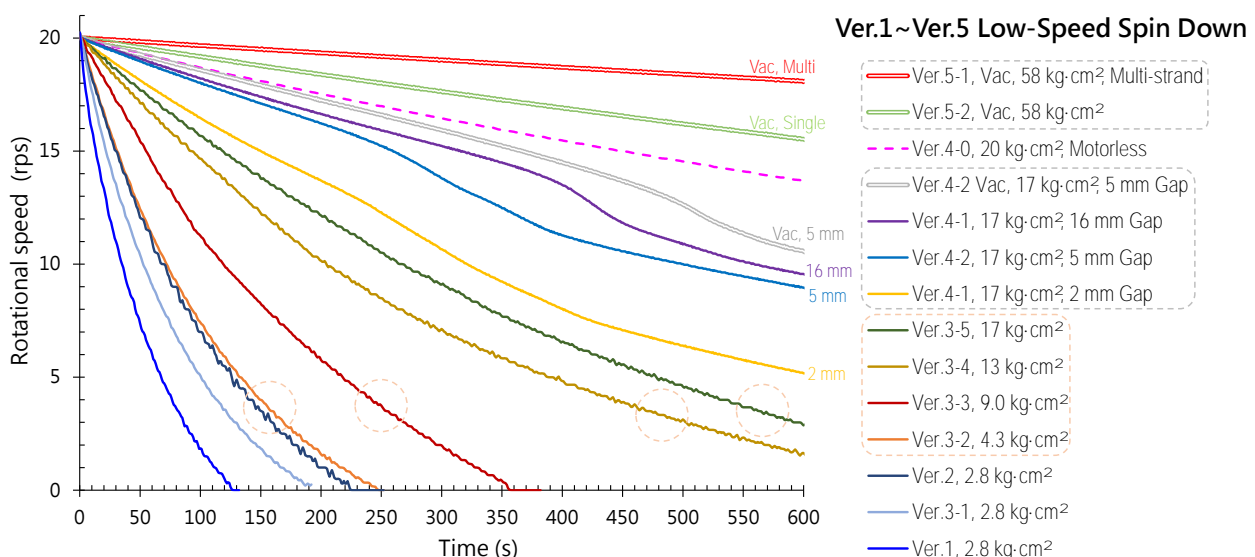


圖 30、第一至五版飛輪的低速自然減速過程。未標示真空的環境為大氣；未標示 PC 或鐵氟龍的端板為石墨；未標示距離的線圈離馬達轉子 2 mm；未標示多芯線圈者為單芯線圈。

表 12、各版本飛輪於 20 rps 之最小減速度及阻力力矩比較

| 版本                               | Ver.1   | Ver. 2  | Ver. 3-5 | Ver. 4-1 | Ver. 4-0 | Ver.5-2 | Ver.5-1 |
|----------------------------------|---------|---------|----------|----------|----------|---------|---------|
| 轉慣動量 $\text{kg}\cdot\text{cm}^2$ | 2.8     | 2.8     | 17       | 17       | 20       | 58      | 58      |
| 減速度 $\text{rev/s}^2$             | 0.428   | 0.198   | 0.0498   | 0.0385   | 0.0141   | 0.00792 | 0.00333 |
| 阻力力矩 $\text{N}\cdot\text{m}$     | 0.00077 | 0.00035 | 0.00053  | 0.00041  | 0.00018  | 0.00029 | 0.00012 |

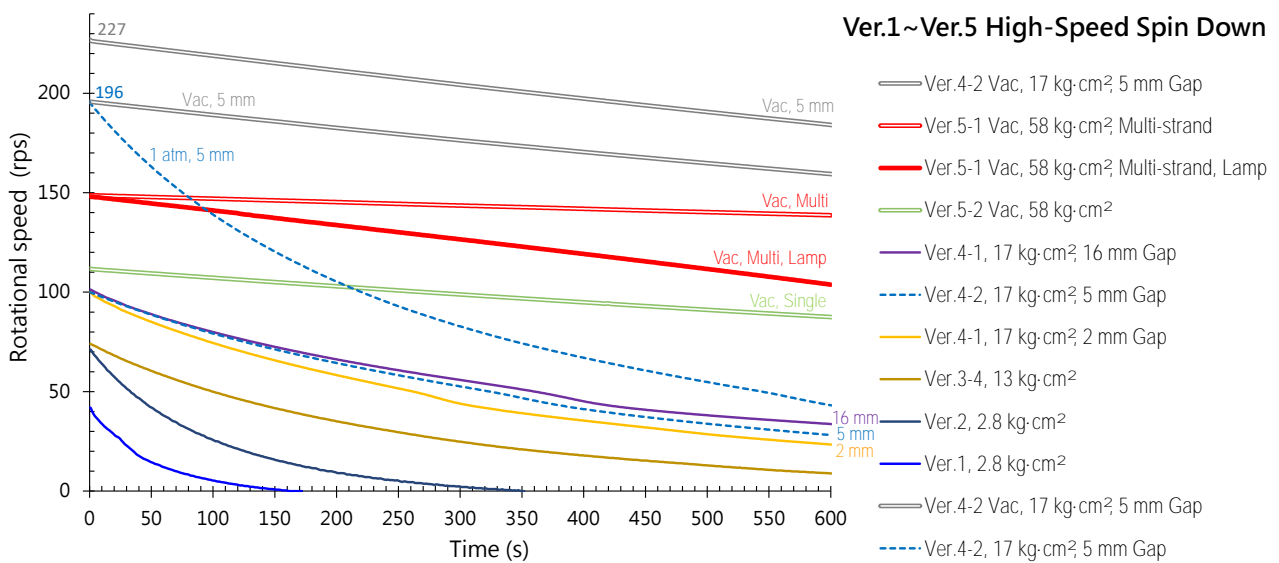


圖 31、第一至五版飛輪的高速減速過程；未標示者為單芯線圈，離馬達轉子 2 mm。

圖 31 是第一至五版飛輪的高速減速過程比較，第一、二版飛輪磁浮軸承的偏心較明顯，基於安全性考量，轉速不超過 100 rps。自第三版起，磁浮軸承的偏心量比較小，使飛輪可以提高轉速，但發現如果把兩組線圈(圖 13、14 的馬達/發電機線圈 1、線圈 2)串聯，速度仍無法超過 100 rps；如果把兩組線圈並聯或者僅使用一組線圈加速，則可以到 100 rps 以上。以第四版飛輪為例，在大氣中的最高速 196 rps (=11,800 rpm)，真空中最高速 227 rps (=13,600 rpm)。由於串聯使電感及電阻變大、並聯使電感及電阻變小，顯示馬達控制器的高速操作只適用於低電感或低電阻的馬達線圈。第五版飛輪的轉子有 5 kg，在高速旋轉時若發生振動，可能造成不可回復的損壞，故最操作時高速不超過 150 rps。第五版飛輪比較了單芯線圈(Ver.5-2)與多芯線圈(Ver.5-1)在高轉速的減速時間，發現單芯線圈無法加速到 120 rps 以上，而多芯線圈

則可以加速到 140 rps 以上；於真空中操作時，單芯線圈在 112 rps 的減速度  $0.061 \text{ rev/s}^2$ ，比多芯線圈在 149 rps 的減速度  $0.024 \text{ rev/s}^2$  更大。第四版飛輪在真空中 227 rps 的減速度  $0.11 \text{ rev/s}^2$ ，略大於第五版飛輪供電給柃燈的減速度  $0.070 \text{ rev/s}^2$ ，其阻力力矩  $0.0012 \text{ N}\cdot\text{m}$  比第五版多芯線圈的  $0.0008 \text{ N}\cdot\text{m}$  高，卻小於第五版單芯線圈的  $0.0022 \text{ rev/s}^2$ ；高轉速下有低阻力，顯示磁浮軸承、飛輪、與馬達設計參數仍有相當大的進步空間。

### (3) 實驗三：發電測試

發電測試採用第三、四、五版轉動慣量較高的飛輪，圖 32 為飛輪發電及供電的轉速與電壓變化過程，其中 V1 為發電機輸出經過三相整流的電壓，為使供應的電壓穩定，在負載之前加上轉換效率 94%~95%的穩壓模組，其輸出為 V2。

圖 32(a)為第三版飛輪在大氣中以線圈 2 發電的過程，升/降壓模組輸出電壓 27 V，無負載可穩定發電 93 s，穩壓發電終止時轉速約 20 rps。

圖 32(b)為第四版真空飛輪以線圈 2 發電的過程，採用降壓模組輸出 13 V，無負載可持續 400 秒，穩壓發電終止時轉速仍有 76 rps。

圖 32(c)為第五版真空飛輪以線圈 1 供電給柃燈的過程，採用升/降壓模組，輸出 11.2 V 可持續發光 1287 s (約 20 分鐘)，穩壓發電終止時轉速約 20 rps。

圖 32(d)為第五版的第 3-4 次測試，提高升/降壓模組的輸出為 13.2 V，供電功率升高；為使飛輪充份放電以提高儲能效率，高速僅以線圈 1 發電，而在轉速減半、V1 電壓低於 15 V 以後切換為圖 18(c)的形式，使線圈 1、2 串聯發電，柃燈可持續發光 304 s (約 5 分鐘)，穩壓發電終止時轉速約 10 rps。



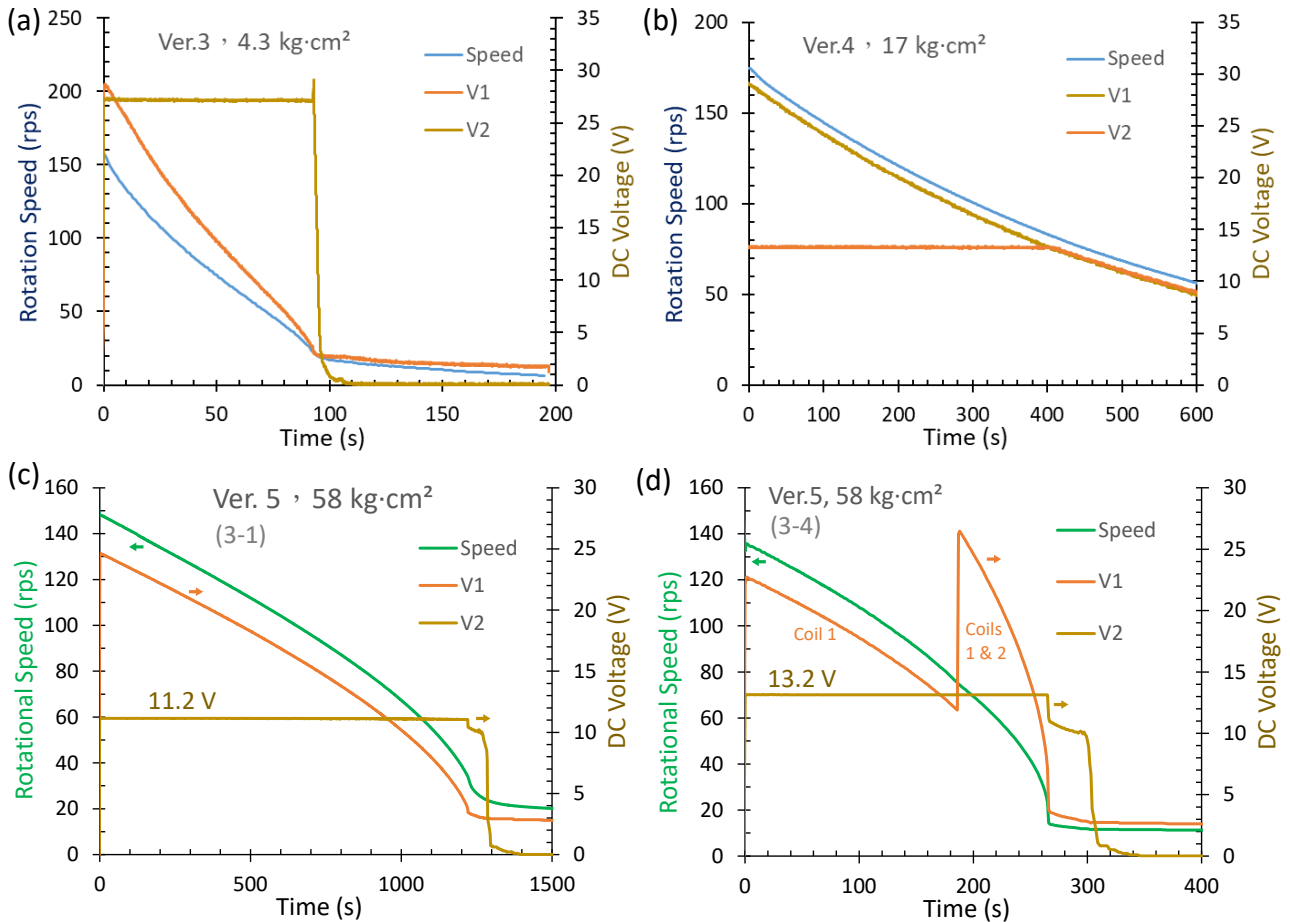


圖 32、空載發電時間：(a) 第三版，大氣中，(b)第四版，真空中，(c)及(d)第五版，真空中，次數 3-1、3-4 表示第三次組裝後第 1、4 次操作。

圖 33(a)、(b)為第五版真空飛輪供電 11.2 V、13.2 V 給檯燈的充、放電功率與時間關係，充電功率為圖 14 中進入馬達的電流  $I_0$  與電壓  $V_0$  的乘積，放電功率為圖 15 中整流器輸出電流  $I_1$  與電壓  $V_1$  的乘積。將圖 33 的充電與放電功率對時間積分，即可得到對飛輪充電的總能量  $E_0$  以及飛輪放電的總能量  $E_1$ 。飛輪的充放電效率定義為

$$\text{充放電效率} = \frac{E_1}{E_0} \times 100\% \quad (8)$$

令  $\Delta K$  為飛輪轉子由發電開始至結束的動能減少量，則發電效率可定義

$$\text{發電效率} = \frac{E_1}{\Delta K} \times 100\% \quad (9)$$

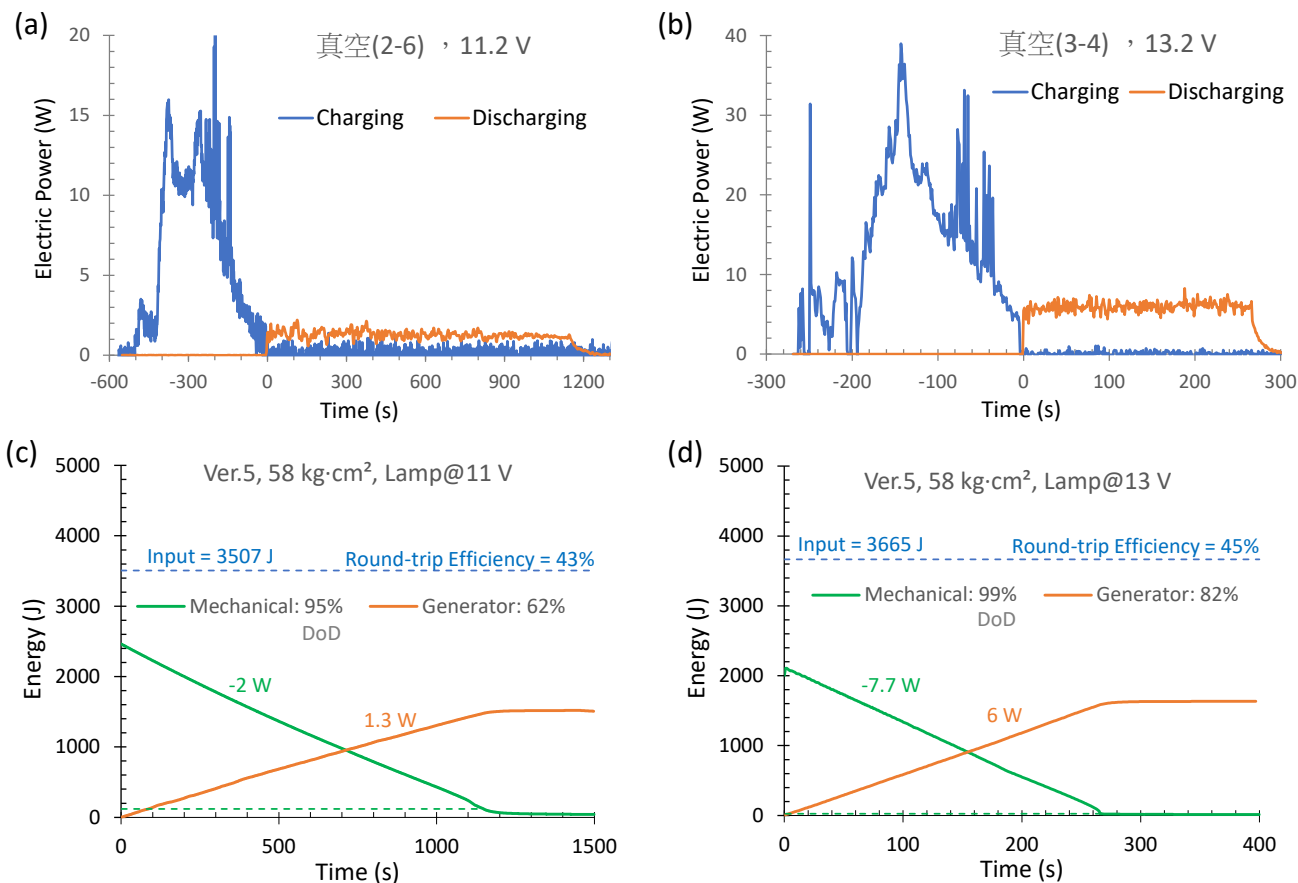


圖 33、第五版真空磁浮飛輪 (a)供電 11.2 V、(b)供電 13.2 V 的充、放電功率，以及 (c)供電 11.2 V、(d)供電 13.2 V 的放電深度、發電效率、以及充放電效率。

表 13、第五版飛輪在大氣與真空環境下對檯燈供電的效率

| 條件(次數), 供電電壓           | 放電時間 (s)    | 動能差 $\Delta K$ (J) | 充電總能 $E_0$ (J) | 放電總能 $E_1$ (J) | 發電效率 $E_1/\Delta K$ | 充放電效率 $E_1/E_0$ |
|------------------------|-------------|--------------------|----------------|----------------|---------------------|-----------------|
| 單芯線*-真空, 11.2 V        | 505         | 1662               |                | 485            | 29%                 |                 |
| 大氣(1-3), 11.2 V        | 452         | 1655               | 6024           | 1037           | 63%                 | 17%             |
| 真空(2-6), 11.2 V        | 1144        | 2451               | 3507           | 1524           | 62%                 | 43%             |
| 真空(2-7), 11.2 V        | 1129        | 2428               | 3866           | 1392           | 57%                 | 36%             |
| 真空(2-8), 11.2 V        | 936         | 1935               | 3624           | 1148           | 59%                 | 32%             |
| <b>真空(3-1), 11.2 V</b> | <b>1287</b> | <b>2467</b>        | <b>3921</b>    | <b>1940</b>    | <b>79%</b>          | <b>49%</b>      |
| 真空(3-2), 11.2 V        | 1156        | 2362               | 3719           | 1182           | 50%                 | 32%             |
| 真空(3-3), 11.2 V        | 1184        | 2344               | 3590           | 1131           | 48%                 | 31%             |
| <b>真空(3-4), 13.2 V</b> | <b>304</b>  | <b>1994</b>        | <b>3665</b>    | <b>1632</b>    | <b>82%</b>          | <b>45%</b>      |

\*其它未標示的實驗都採用多芯線圈。

第五版飛輪在大氣與真空環境下對枱燈供電的發電效率以及充放電效率如表 13，大氣環境下的測試結果也並列作為比較(次數 1-3 表示第一次裝設後第 3 次操作)。比較電壓 11.2 V (功率 1.3 W)的結果發現，具有多芯線圈發電機的真空飛輪其充放電效率在 30%至 50%之間，發電效率約 50%至 80%，若採用單芯線圈則發電效率都在 40%以下。不過，即使採用多芯線圈， $E_1/\Delta K$  有時偏低(約 50%)、有時變高(約 80%)，較高的效率出現在前幾次測試，顯示端板與鋼珠之接觸點的持續磨損對效率有影響，實測石墨端板使用約  $10^6\sim 10^7$  轉後需要更換；此外，飛輪在旋轉時偶發的振動造成不固定的能量損失，每次重組飛輪振動發生的頻率會改變，可能是磁浮軸承的軸向偏移量不同會改變其徑向支撐力，因而改變了振動頻率。除了飛輪的結構因素，操作方式也會影響發電及充放電效率。

圖 33(c)、(d)是旋轉動能與發電機產生的電能對時間的關係。當供電電壓為 11.2 V 時功率 1.3 W，放電深度為 95%，發電效率為 62%，充放電(round-trip)效率是 43%，如圖 33(c)；當供電電壓為 13.2 V 時功率 6 W，放電深度 99%，發電效率 82%，充放電效率 45%，如圖 33(d)。分析各次實驗結果發現，把線圈串聯可以充份利用機械能、增加放電深度，而當放電功率增加，發電效率會變大；也就是說，放電深度或供電的功率變大，都可以提高充放電效率。

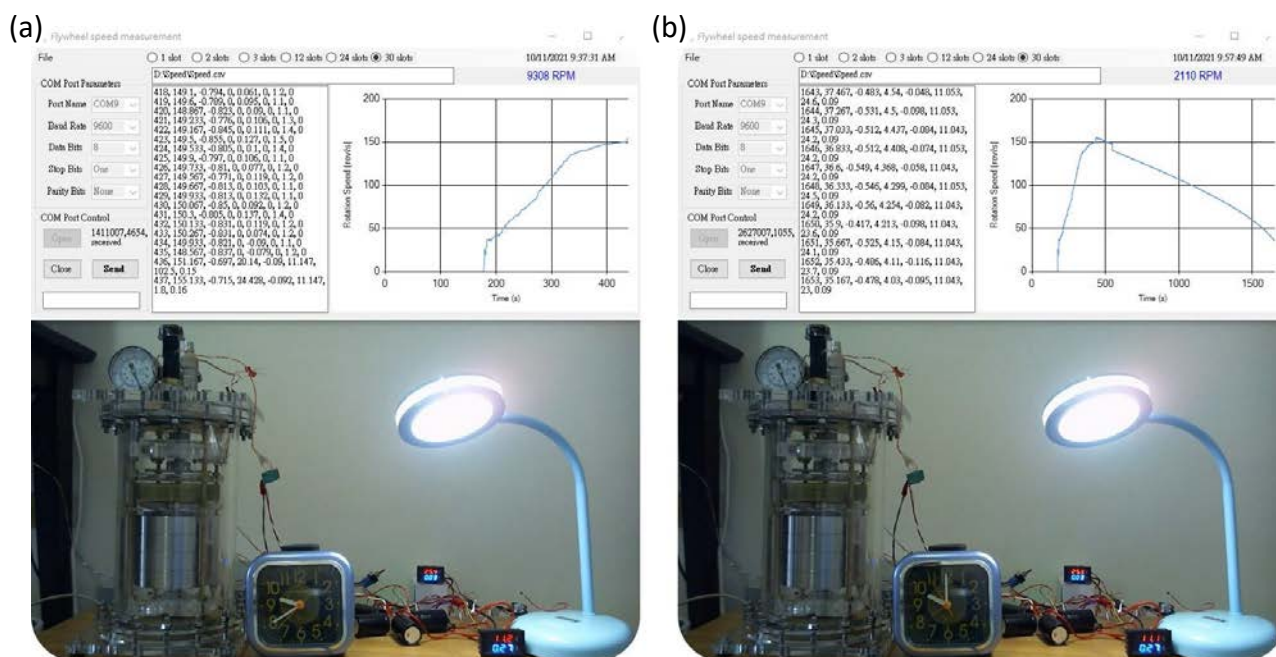


圖 34、第五版真空磁浮飛輪可供電 11.2 V 維持 20 分鐘：(a)開始，(b)結束，電壓 11.1 V。枱燈的電流約 0.12 A (須減去電流錶頭背景值)。

第五版飛輪於真空下有負載發電的測試過程如圖 34，此飛輪的轉動慣量  $58 \text{ kg}\cdot\text{cm}^2$ ，馬達/發電機採用 56 匝多芯線圈。開始發電時(148 rps)的動能有 2512 J，自動升壓/降壓模組輸出設定為 11.2 V；穩定供電 20 分鐘後，動能減為 129 J(33.6 rps)，估計供電 20 分鐘期間內的平均發電效率為 70%，若考慮升/降壓模組的效率 94%，在整流電路之後的發電效率約 80%。

由表 14 及如圖 33(d)可知，當供電電壓提高為 13.2 V、功率增加為 6 W，發電效率增加為 82%，第四次測試的充放電效率仍然有 45%。又由表 12 可知，增加飛輪轉動慣量並不會增加阻力力矩，若使用相同的磁浮軸承且飛輪尺寸放大，將可在更高功率長時間放電，並提昇充放電效率。

## (二) 討論

充放電效率除了與線圈轉換能量的損失有關，主要取決於飛輪的機械能使用效率。在實驗中發現，造成飛輪能量損失的主要因素有轉動慣量、端板材質、是否真空、線圈的距離，以及線材為多芯或單芯線。線圈的影響可由以下分析說明。

圖 35 為第四版飛輪(轉動慣量  $17 \text{ kg}\cdot\text{cm}^2$ )在大氣與真空環境下的阻力力矩  $\tau_d$  及損耗功率  $P_d$  與角速度  $\omega$  的關係； $P_d$  是利用方程式(1)求出動能  $K$  後，對時間  $t$  微分求得( $P_d = -dK/dt$ )，而阻力力矩  $\tau_d$  則是由  $P_d = \tau_d\omega$  解出。以  $\omega$  為變數  $x$ 、 $\tau_d$  為變數  $y$ ，將  $\tau_d$  與  $\omega$  的數據以二次多項式函數  $y(x) = c_2x^2 + c_1x + c_0$  擬合，擬合結果如表 14，可發現在高速(100 rps 或 628 rad/s 以上)時，在大氣中運作的主要阻力來源是二次項  $c_2x^2$  ( $c_2 = 4.06 \times 10^{-9} \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^2/\text{rad}^2$ )，由阻力方程式<sup>[26]</sup>可知，空氣阻力與飛輪的切線速度平方成正比，故二次項係數主要受空氣阻力影響。在真空中運作時，二次項係數減小 39 倍，一次項  $c_1x$  ( $c_1 = 3.95 \times 10^{-7} \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$ )則減小 3.5 倍，成為重要的阻力來源，它與轉速成正比，可能是源自旋轉的馬達及軸承轉子磁鐵與線圈及周圍金屬支架的作用，或是鋼珠與端板之間因為轉子晃動造成的動摩擦損失，轉速越高作用次數越多。在極低速時，主要阻力來源是常數項( $c_0 = 0.000185 \text{ N}\cdot\text{m}$ )，它相當於磁浮軸承的啟動力矩(starting torque)，與端板的摩擦力有關。

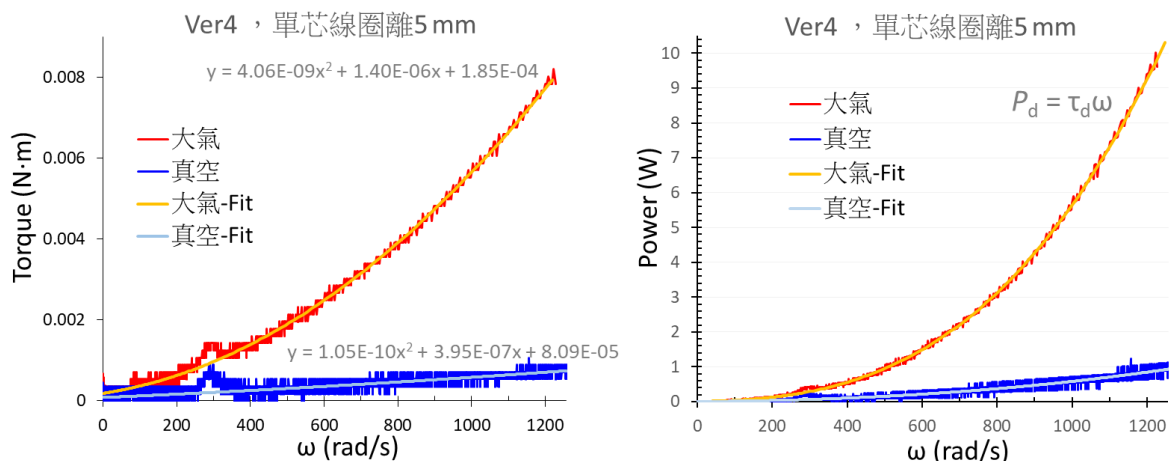


圖 35、第四版飛輪在真空與非真空環境下的：(a)阻力力矩，(b)損耗功率 與角速度的關係。在  $\omega = 200$  至  $400$  rad/s 因轉子振動力矩上升，擬合時未使用這段數據。

表 14、第四版飛輪在真空與非真空環境下的阻力力矩  $\tau_d$  擬合值

| 操作環境 | 轉速      | $\tau_d$ 擬合值 | 二次項 $c_2x^2$    | 一次項 $c_1x$      | 常數項      |
|------|---------|--------------|-----------------|-----------------|----------|
| 大氣   | 100 rps | 0.002667     | 0.001604        | 0.000878        | 0.000185 |
|      | 200 rps | 0.008358     | <b>0.006418</b> | 0.001756        |          |
| 真空   | 100 rps | 0.000370     | 0.000042        | 0.000248        | 0.000081 |
|      | 200 rps | 0.000743     | 0.000166        | <b>0.000496</b> |          |

分析第五版飛輪在真空環境下有負載發電的結果如圖 36、37，可發現多芯線圈的損耗功率、阻力力矩都比單芯線圈小。取 97 rps 比較，接上枱燈後增加的損耗功率大約相同(1.8 W)，單芯線圈的自然損耗功率 0.9 W，發電功率 2.7 W，機械能使用效率約 70%，能量損耗較大；而多芯線圈的自然損耗功率 0.2 W，發電功率 2 W，機械能使用效率約 90%；在相同的轉速下，單芯線圈的損耗功率與阻力力矩皆為多芯線圈的 3 倍。在發電終止前，電壓偏低使線圈電流快速上升，損耗功率與力矩都出現峰值，且多芯線圈的損耗功率與阻力峰值皆高於單芯線圈，這是因為此時多芯線圈飛輪的轉速恰好與其自然減速(綠色線)發生振動的轉速相同；將線圈串聯使發電終止的轉速降至 10 rps 以下即可避免這個問題。



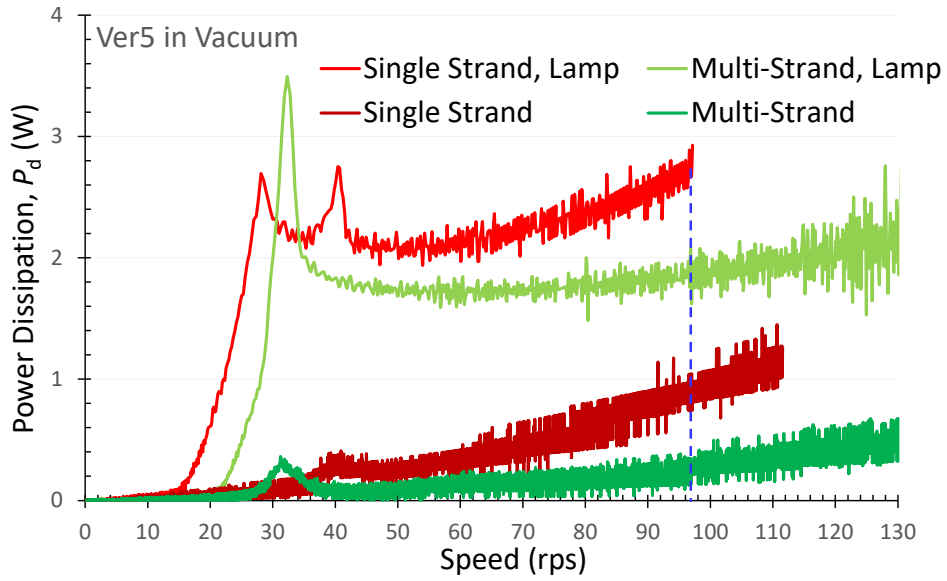


圖 36、多芯線圈、單芯線圈之第五版真空下的損耗功率與轉速關係；使用線圈 1 發電。

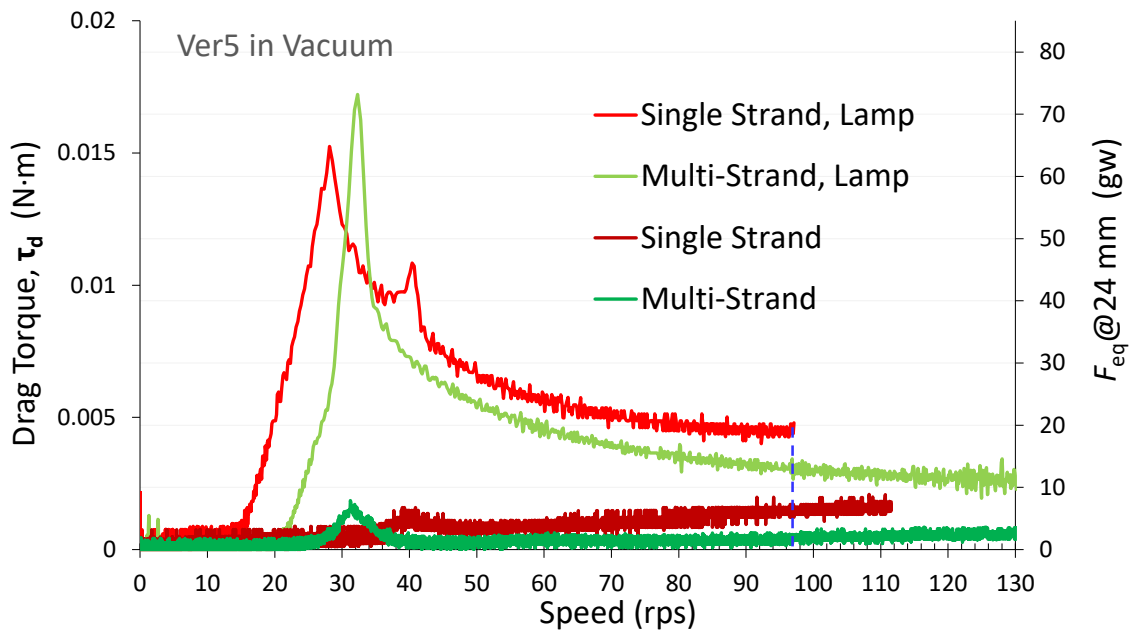


圖 37、多芯線圈、單芯線圈之第五版真空下的阻力與轉速關係；使用線圈 1 發電。

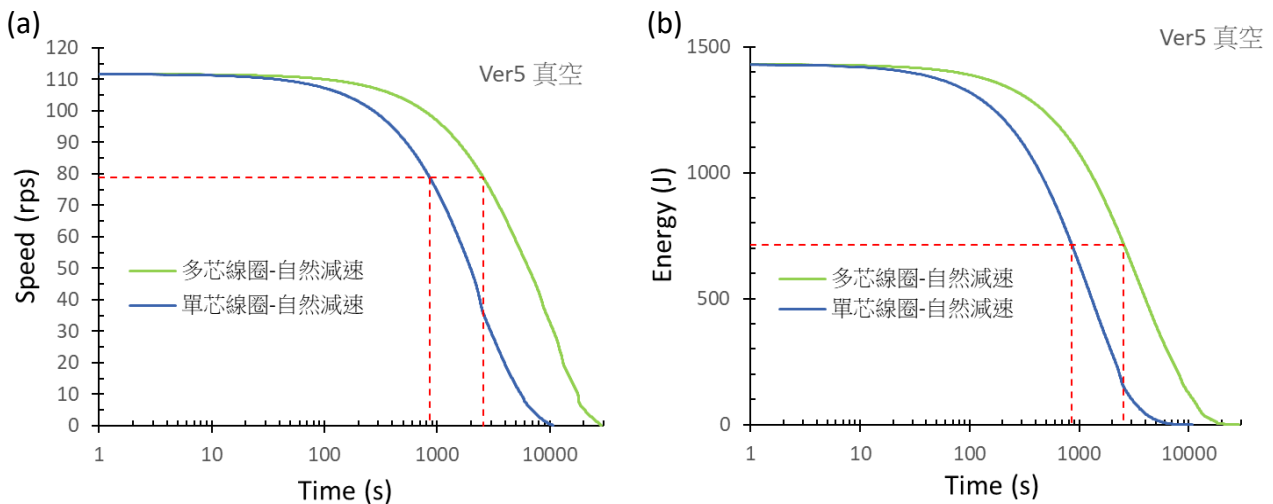


圖 38、真空操作之第五版飛輪在未發電(待機)情況下的 (a)轉速，(b)能量 與時間的關係，紅虛線指出能量減半的待機時間；轉動慣量皆為  $58 \text{ kg}\cdot\text{cm}^2$ 。

多芯線圈的能量損耗比單芯線圈小的現象，對飛輪的待機與供電時間有重大影響。因為這個原因，使用多芯線圈的 Ver.5 飛輪可以達到較高的轉速，且相同轉速的待機時間長很多。圖 38 為在多芯線圈、單芯線圈之第五版飛輪的轉速與能量對時間的關係。由相同的轉速 (111.6 rps) 開始，取能量減半的時間為待機時間，單芯線圈待機時間是 855 s (14.25 min)，多芯線圈是 2555 s (42.58 min)，約為 3 倍；比較轉速減至零的時間，單芯線圈為 10810 s (3.00 hr)，多芯線圈則為 29812 s (8.03 h)，約為 2.7 倍。

採用單芯線圈與多芯線圈之第五版飛輪供電時的損耗功率與時間比較如圖 39，發電功率為 1.3 W，採用多芯線圈的飛輪穩定供電 1160 s (= 19.3 min)，而採用單芯線圈的飛輪則可穩定供電 432 s (= 7.2 min)。由於單芯線圈的損耗功率比較大，供應相同能量輸出的持續時間比較短。

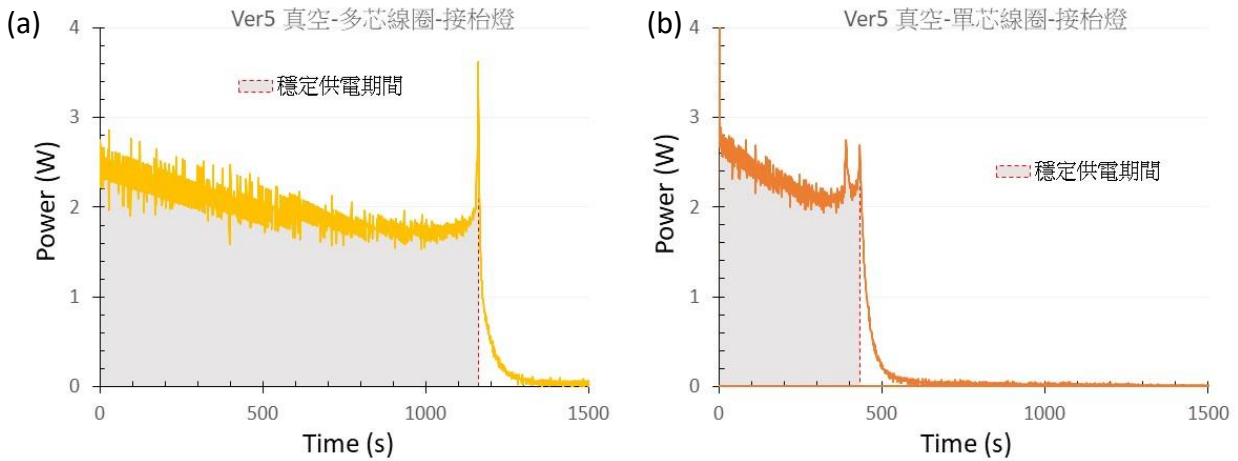


圖 39、第五版飛輪供電時的損耗功率與時間關係：(a)多芯線圈，(b)單芯線圈

單芯線圈能量損耗較大的物理機制，可用渦電流效應與電阻的功率消耗解釋。在本研究中飛輪轉速不超過 227 rps，4 磁極馬達在線圈中造成的磁場變動頻率在 900 Hz 以下，銅導線內的集膚深度(skin depth)<sup>[27]</sup>在 2.2 mm 以上，比導線直徑(0.5 mm 或 0.7 mm)大很多，故集膚效應不明顯，導線內部磁場可視為均勻。如圖 40，將導線視為許多圓柱體單元(cell)串聯，各單元長度=線徑= $w$ ；當發電機轉子旋轉，變動的磁場使圓柱體單元內產生渦電流，渦電流迴路的感應電動勢與圓柱體單元側面(磁場穿透)的截面積成正比( $\propto w^2$ )，而渦電流迴路的電阻則與圓柱體直徑成反比( $\propto 1/w$ )，因電阻損耗功率=(感應電動勢)<sup>2</sup>/電阻，故圓柱體單元內的渦電流損耗功率與線徑的五次方成正比：

$$P_{\text{cell}} \propto (w^2)^2 / (1/w) \propto w^5 \quad (10)$$

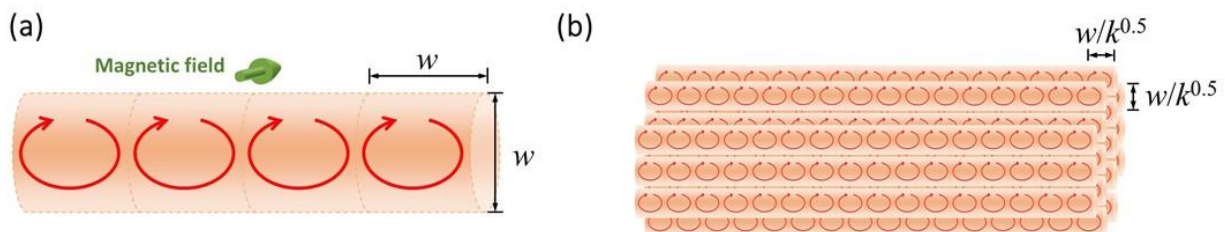


圖 40、導線在橫向交流磁場中的渦電流效應：(a)單芯導線，(b)總截面積相同的多芯導線

若採用總截面積及體積(電流傳輸能力)與單芯導線相同的多芯導線，其芯線數為  $k$ ，每條芯線直徑為  $w/k^{0.5}$ ，芯線傳輸電流的截面積為  $1/k$  倍，圓柱體單元體積為  $1/k^{1.5}$  倍；因總體積固定，單元數與單元體積成反比，故多芯導線的圓柱體單元數增為  $k^{1.5}$  倍。由(10)可推得多芯導線的渦電流損耗功率與芯線數  $k$  成反比：

$$P_{\text{eddy}} = k^{1.5} P_{\text{cell}} \propto k^{1.5} (w/k^{0.5})^5 \propto 1/k \quad (11)$$

以上圖為例，單芯線直徑為線徑  $w$ ，以  $k = 16$ 、直徑  $w/4$  之漆包線構成的多芯導線可以達到相同電流傳輸能力，其渦電流損耗功率將下降為  $1/16$ 。本研究的 Ver. 5 飛輪採用 100 芯導線，其渦電流損耗功率可下降為  $1/100$ ，不再是造成真空中操作之飛輪能量損失的主因。

在克服了空氣阻力與導線渦電流的能量損耗問題後，如何減小馬達磁鐵、軸承磁鐵、以及其它金屬組件的渦電流與磁滯效應<sup>[28]</sup>、還有飛輪在特定轉速發生劇烈振動造成能量損耗，都是後續可以進一步探討的問題；此外，能否利用旋轉之磁鐵排斥力形成穩定的恢復力<sup>[29]</sup>來取代端板以完全消除摩擦力，也是值得研究的課題。

## 四、結論與應用

### (一) 結論

本研究已成功開發小型的真空磁浮飛輪裝置模型，採用被動式磁浮軸承、在真空環境操作。第四版飛輪轉動慣量  $17 \text{ kg}\cdot\text{cm}^2$ ，最高轉速達到 227 rps。第五版飛輪提高轉動慣量，並使用多芯線圈使能量損耗再降低、效率提昇，已達成的規格如下：

- 轉動慣量  $58 \text{ kg}\cdot\text{cm}^2$ ，由轉速 148 rps 自然減速至停止的時間超過 8 小時。
- 飛輪轉子動能減半的儲能維持時間 43 min；
- 以轉速約 100 rps 供電時，機械能約 90% 進入發電機；
- 供電 1.3 W 可持續 20 min，供電 6 W 可持續 4.5 min；
- 最佳發電效率約 80%、充放電效率約 50%；

本研究展示了利用被動式磁浮軸承的小型飛輪系統，此成果比尺寸及設計類似的被動式磁浮軸承飛輪<sup>[9]</sup>有更高的轉速。由於飛輪的能量與其尺寸的 5 次方成正比，將本研究所設計小模型尺寸放大，即可大幅提昇供電能力、充放電效率、與儲能維持時間。

### (二) 未來發展與應用

在研究期間，發現了一些問題與可能的改進方向，在未來可以持續探討：

- 因為無法取得高強度、低密度的碳纖維材料，高轉動慣量的飛輪是採用不鏽鋼製作。不鏽鋼密度大( $8 \text{ g/cm}^3$ )，第五版飛輪轉子的重量 5 kg，已經接近磁浮軸承可以提供的支撐力上限。因為轉動慣量與半徑平方成正比，未來如果改用碳纖維材料並且把飛輪半徑放大，或許可以在相同的重量下有更大的轉動慣量，提高能量密度。



- 被動式磁浮軸承可以提供穩定的徑向磁浮，可是軸向位置需要用端板來限制；不過石墨端板表面會磨損，實測的使用壽命大約  $10^6$  至  $10^7$  轉。為了以不消耗電力的方式維持軸向平衡，可利用超導體<sup>[12]</sup>或是磁浮陀螺<sup>[29]</sup>形成穩定磁浮來取端板。
- 實際測試時，在某些轉速下容易發生劇烈振動造成額外的能量損失，改變磁浮軸承內外環的軸向偏移比例可以改善這個現象，詳細的機制值得進一步探討。
- 單芯線在變動磁場中的渦電流會造成能量損耗，但磁浮軸承的磁鐵也會導電，高速旋轉時可能也有渦電流損耗，它對總能量損耗的影響程度值得進一步探討。

目前實現的第五版飛輪模型總能量只有 2.5 kJ，如果把尺寸放大 10 倍並達到相同轉速，總能量放大  $10^5$  倍為 250 MJ，大約是 69 kW·h，這樣就可以應用在需要大量用電的情形作為緊急電源，例如跳電，或下班後用電量大增的電動車充電設施。未來持續改良磁浮軸承、發電機、及整體結構，使飛輪的待機時間更長，確實有可能使飛輪在電力儲存扮演重要角色。

## 五、參考文獻

- [1] 盧展南，「萬一大停電 我能應變嗎？」，聯合報民意論壇 A12 版，2021-02-19，  
<https://udn.com/news/story/7339/5259989>
- [2] Fact Sheet | Energy Storage (2019), 2021-09-15, <https://www.eesi.org/papers/view/energy-storage-2019>
- [3] Electricity Storage Technology Review, 2021-09-15,  
<https://www.energy.gov/sites/default/files/2020/10/f79/Electricity%20Storage%20Technologies%20Report.pdf>
- [4] Round Trip Efficiency, 2021-02-21, <https://energymag.net/round-trip-efficiency/>
- [5] 聯合報國際 A9 版、世界鏡頭：超強寒流造成德州大停電 極端氣候暴露美國供電弱點，2021-02-20，<https://vip.udn.com/vip/story/121937/5256118>

- [6] 各種電池的基本認識，2021-02-20，<https://blog.xuite.net/joh3622/johnason/112606679>
- [7] Compressed-air energy storage, 維基百科, 2021-09-18,  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Compressed-air\\_energy\\_storage#Diabatic](https://en.wikipedia.org/wiki/Compressed-air_energy_storage#Diabatic)
- [8] R. Hebner, J. Beno, & A. Walls, “Flywheel batteries come around again,” IEEE Spectrum, 39(4), 46-51 (2002).
- [9] M. Siebert, B. Ebihara, R. Jansen, R. L. Fusaro, A. Kascak, & A. Kenny, “A passive magnetic bearing flywheel,” 36th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, vol. 1, pp. 125-132, July 29–August 2, 2001.
- [10] P. McMullen, V. Vuong, & L. Hawkins, “Flywheel energy storage system with AMB’s and hybrid backup bearings,” In Tenth International Symposium on Magnetic Bearings, August 21-23, 2006, Martigny, Switzerland.
- [11] T. D. Nguyen, K. J. Tseng, S. Zhang & C. Zhang, “A Flywheel Cell for Energy Storage System,” 2008 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies, P. 214.
- [12] Karen Kwon, “Flywheels Turn Superconducting to Reinvigorate Grid Storage,” IEEE Spectrum, 2021-04-07, <https://spectrum.ieee.org/superconducting-flywheel-grid-energy-storage>
- [13] LibreCAD, 2021-01-30, <https://librecad.org/>
- [14] FreeCAD, 2021-01-30, <https://www.freecadweb.org/>
- [15] Ultimate tensile strength, [https://en.wikipedia.org/wiki/Ultimate\\_tensile\\_strength](https://en.wikipedia.org/wiki/Ultimate_tensile_strength)
- [16] L. Zheng, “Super high-speed miniaturized permanent magnet synchronous motor,” PhD thesis, University of Central Florida, 2005.
- [17] Earnshaw's theorem，維基百科，2021-01-30，  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Earnshaw%27s\\_theorem](https://en.wikipedia.org/wiki/Earnshaw%27s_theorem)

- [18] J. P. Yonnet, "Permanent magnet bearings and couplings," IEEE Transactions on Magnetics, 17(1), 1169-1173, 1981.
- [19] Sang-Hoon Kim, "Chapter 10 Brushless direct current motors," Electric Motor Control: DC, AC, and BLDC Motors, Elsevier Science, 2017.
- [20] "3D printed axial brushless motor for drones: one rotor & two stators," Youtube video, posted on 2020-07-28 by Dominique H, [https://youtu.be/w25OAqQk\\_9g](https://youtu.be/w25OAqQk_9g)
- [21] "Making an axial flux generator," Youtube video, posted by Chris workshop on 2014-01-04, <https://youtu.be/flHOG7EcCU>
- [22] Rectifier, 維基百科, 2021-05-11, <https://en.wikipedia.org/wiki/Rectifier>
- [23] Diode bridge, 維基百科, 2021-05-11, [https://en.wikipedia.org/wiki/Diode\\_bridge](https://en.wikipedia.org/wiki/Diode_bridge)
- [24] Litz wire, 維基百科, 2021-08-4, [https://en.wikipedia.org/wiki/Litz\\_wire](https://en.wikipedia.org/wiki/Litz_wire)
- [25] K&J Magnetics - Pull Force and Surface Field Data, 2021-09-20, <https://www.kjmagnetics.com/magnetsummary.asp>
- [26] Drag equation, 維基百科, 2021-09-25, [https://en.wikipedia.org/wiki/Drag\\_equation](https://en.wikipedia.org/wiki/Drag_equation)
- [27] Skin effect, 維基百科, 2021-09-26, [https://en.wikipedia.org/wiki/Skin\\_effect](https://en.wikipedia.org/wiki/Skin_effect)
- [28] Magnetic hysteresis, 維基百科, 2021-09-26, [https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic\\_hysteresis](https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_hysteresis)
- [29] M. D. Simon, L. O. Heflinger, & S. L. Ridgway, "Spin stabilized magnetic levitation," American Journal of Physics, 65(4), 286-292 (1997).

## 附錄

### A. Arduino UNO 控制程式

```
#include <FreqCount.h>
#include <Wire.h>
#include <SoftwareSerial.h>
SoftwareSerial BTSerial(10, 11); // RX | TX
#include "Arduino.h"
#include <Adafruit_INA219.h>
Adafruit_INA219 ina219;

unsigned long myTime;

int MOS_Pin = 7;
int SetSpeed=0;
int InData=0; // for incoming serial data
int n = 26; // 255*26=6630
int HTime = 0;
int LTime = 255;
unsigned long CommandTime=0;
unsigned long WaitTime = 2000; //wait for 2 Seconds
int analogPin0 = A0;
int I1_Val = 0; // variable to store the current value
int analogPin1 = A1;
int V1_Val = 0; // variable to store the voltage value
int analogPin2 = A2;
int I2_Val = 0; // variable to store the rectified voltage value
int analogPin3 = A3;
int V2_Val = 0; // variable to store the rectified voltage value

bool OutputON = false;
bool OutputOFF = true;
void setup() {
```

```

pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT); //LED_BUILTIN is Pin 5
pinMode(MOS_Pin, OUTPUT);    // sets the digital pin 7 as output
FreqCount.begin(1000);
BTSerial.begin(9600); // HC-05 default speed

uint32_t currentFrequency;

if (! ina219.begin()) {
  Serial.println("Failed to find INA219 chip");
  while (1) { delay(10); }
}

Serial.println("Measuring voltage and current with INA219 ...");
}

void loop() {
  float shuntvoltage = 0;
  float busvoltage = 0;
  float current_mA = 0;
  float loadvoltage = 0;
  float power_mW = 0;
  double t;
  unsigned long myTime;
  if (FreqCount.available()) {
    digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
    I1_Val = 0;
    for (int i=0;i<10;i++) {
      I1_Val+= analogRead(analogPin0); // read the current I1 from the Hall sensor, 185 mV/A
    }
    V1_Val = 0;
    for (int i=0;i<10;i++) {
      V1_Val+= analogRead(analogPin1); // read the voltage from the 1st 20+1 kohm voltage
divider
    }
    I2_Val = 0;
    for (int i=0;i<10;i++) {
      I2_Val+= analogRead(analogPin2); // read the current from the 10 ohm power resistor
    }
  }
}

```



```

V2_Val = 0;
for (int i=0;i<10;i++) {
  V2_Val+= analogRead(analogPin3); // read the voltage from the 2nd 20+1 kohm voltage
divider
}

```

```

shuntvoltage = ina219.getShuntVoltage_mV();
busvoltage = ina219.getBusVoltage_V();
current_mA = ina219.getCurrent_mA();
power_mW = ina219.getPower_mW();
loadvoltage = busvoltage + (shuntvoltage * 0.001);

```

```

unsigned long count = FreqCount.read();
t = (0.5+(double)millis());
myTime = (unsigned long)t;
BTSerial.print(myTime); // prints time since program started
BTSerial.print(",");
BTSerial.print(count);
BTSerial.print(",");
BTSerial.print(I1_Val);
BTSerial.print(",");
BTSerial.print(V1_Val);
BTSerial.print(",");
BTSerial.print(I2_Val);
BTSerial.print(",");
BTSerial.print(V2_Val);
BTSerial.print(",");
BTSerial.print(current_mA);
BTSerial.print(",");
BTSerial.println(loadvoltage);
digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
if (BTSerial.available()) {
  InData = BTSerial.parseInt(); // read the incoming byte:
  if ((0<=InData)&&(InData<256)&&(myTime-CommandTime>WaitTime)) {
    SetSpeed = InData;
    if (InData>0) {
      OutputON = true;
    } else {

```

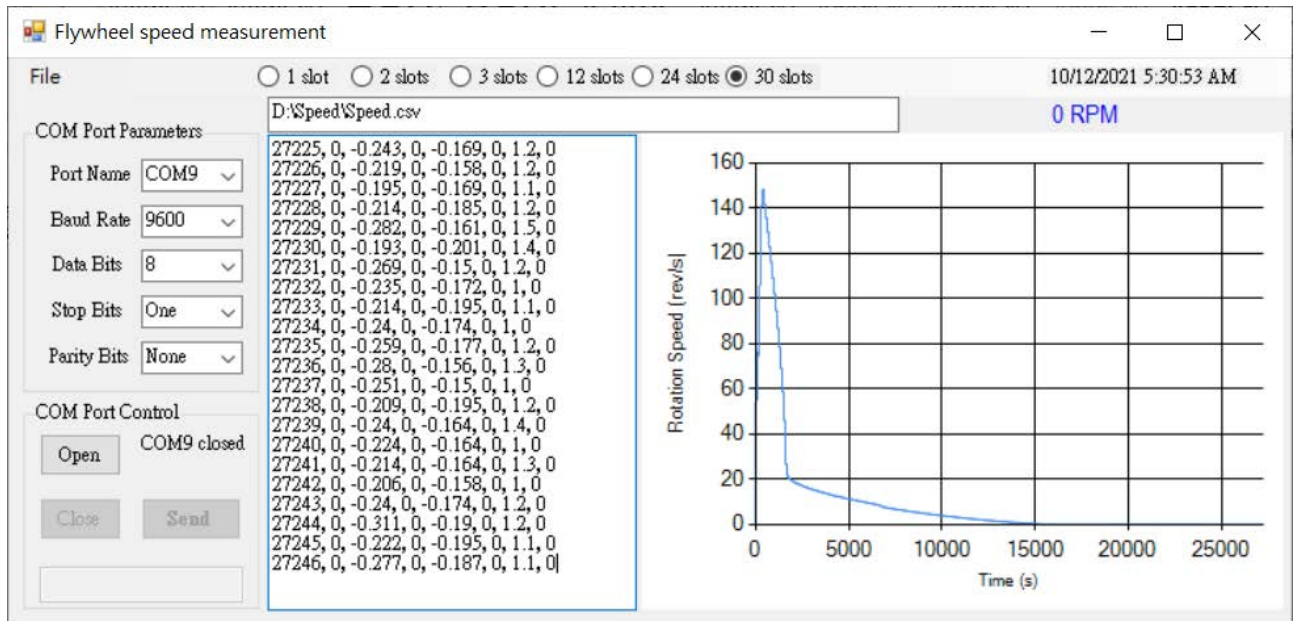
```

        OutputON = false;
    }
    //Serial.println(InData);
    CommandTime = myTime;
}
HTime = SetSpeed;
LTime = 255 - HTime;
}
}
if (OutputON) {
    for (int i=0; i<n; i++) {
        digitalWrite(MOS_Pin, HIGH);
        delayMicroseconds(HTime);
        digitalWrite(MOS_Pin, LOW);
        delayMicroseconds(LTime);
        if (OutputOFF) {
            OutputOFF=false;
        }
    }
} else {
    if (!OutputOFF) {
        digitalWrite(MOS_Pin, LOW);
        //Serial.println(1111);
    }
    OutputOFF=true;
}
}
}

```

## B. 電腦程式

### 1. 圖形介面及操作方式



操作方式：按[Open]開啟無線通訊並擷取數據，輸入 0-255 按[Send]設定轉速

### 2. C#程式碼(量測部份)

```
private void timer1_Tick(object sender, EventArgs e)
{
    lbTime.Text = System.DateTime.Now.ToString("G");
    {
        if (serialPort1.IsOpen)
        {
            if (dataR != "")
            {
                lbStatus.Text = dataR + "received";
                string[] sArray = dataR.Split(',');
                dataArray[0, dataNum] = 0.001 * (Double.Parse(sArray[0])+1);
                if (dataNum == 1)
                {
                    initialTime = dataArray[0, dataNum];
                }
                dataArray[0, dataNum] = Math.Round(dataArray[0, dataNum] - initialTime + 1,1);
                dataArray[1, dataNum] = Math.Round(Double.Parse(sArray[1]) / SlotNum,3);
            }
        }
    }
}
```

```

        dataArray[2, dataNum] = Math.Round((Double.Parse(sArray[2])-5120)/5120*2.5/0.185,3);
        dataArray[3, dataNum] = Math.Round(Double.Parse(sArray[3]) / 10240 * 5 * 11.7244 , 3);

//V1

        dataArray[4, dataNum] = Math.Round((Double.Parse(sArray[4]) - 5120) / 5120 * 2.5 / 0.185,
3); //I2

        dataArray[5, dataNum] = Math.Round(Double.Parse(sArray[5]) / 10240 * 5 * 21.336, 3);

//V2

        dataArray[6, dataNum] = Math.Round(Double.Parse(sArray[6]), 2); //I0
        dataArray[7, dataNum] = Math.Round(Double.Parse(sArray[7]), 2); //V0
        RotSpeed = Math.Round(dataArray[1, dataNum] * 60.0,1);
        chart1.Series[0].Points.AddXY(dataArray[0, dataNum], dataArray[1, dataNum]);
        dataR = dataArray[0, dataNum].ToString() + ", " + dataArray[1, dataNum].ToString() + ", " +
dataArray[2, dataNum].ToString() + ", " + dataArray[3, dataNum].ToString() + ", " + dataArray[4, dataNum].ToString() + ",
" + dataArray[5, dataNum].ToString() + ", " + dataArray[6, dataNum].ToString() + ", " + dataArray[7, dataNum].ToString();
        txtReceive.AppendText(dataR + "\r\n");
        txtReceive.Refresh();
        lbSpeed.Text = RotSpeed.ToString() + " RPM";
        if (!File.Exists(lbFileName.Text))
        {
            using (StreamWriter sw = File.CreateText(lbFileName.Text))
            {
                sw.WriteLine("Time, Speed(rps), I1 (A), V1 (V), I2 (A), V2 (V), I0 (mA), V0 (V)");
            }
        }
        using (StreamWriter sw = File.AppendText(lbFileName.Text))
        {
            sw.WriteLine(dataR);
        }
        dataR = "";
    }
}
}
}

```

## 【評語】 100033

本作品探討真空磁浮飛輪儲能裝置。值得鼓勵。

1. 建議可以針對不同變因的影響原理與效益,作進一步探討.
2. 磁浮軸承除了限制轉動之外，也可評估是否導入徑向磁浮軸承來取代兩端尖點支撐，以進一步減少摩擦力。
3. 本作品在實施上下了不少努力，若能進一步顯現與現有的商用真空磁浮飛輪儲能裝置的差異(<https://arxiv.org/pdf/2103.05224.pdf>)與作品的獨特性，當能更為彰顯本作品的價值。