

第二十一屆旺宏科學獎

成果報告書

參賽編號：SA21-275

作品名稱：真空磁浮飛輪儲能裝置之
能量損耗因素分析

姓名：鄭丞恩

關鍵字：飛輪、能量儲存、磁浮

目錄

一、研究題目：真空磁浮飛輪儲能裝置之能量損耗因素分析	1
二、研究動機與目的	1
(一) 研究動機	1
(二) 研究目的	2
三、研究過程	2
(一) 研究流程	2
(二) 飛輪儲能原理	2
(三) 設計與製作	4
(1) 磁浮軸承	4
(2) 軸環設計	6
(3) 飛輪轉子設計	6
(4) 馬達/發電機轉子	7
(5) 馬達/發電機線圈與驅動電路	8
(6) 支撐結構與真空室	13
(四) 實驗量測與分析	14
(1) 磁浮軸承的徑向恢復力	14
(2) 磁浮軸承的軸向支撐力	15
(3) 馬達力矩量測	16
(4) 實驗一：轉動慣量量測	16
(5) 實驗二：自然減速量測	17
(6) 實驗三：發電測試	19
四、分析與討論	21
(一) 空氣阻力的能量損耗	21
(二) 渦電流的能量損耗	22
五、結論與應用	23
參考資料	24

研究報告

一、研究題目：真空磁浮飛輪儲能裝置之能量損耗因素分析

二、研究動機與目的

(一) 研究動機

能源轉型是人類文明永續發展的必然途徑，在可預見的未來世界將使用更多再生能源。電能儲存(簡稱儲能)可以克服風力、太陽能等間歇性能源對電力系統的衝擊，是未來智慧電網穩定供電的關鍵^[1]。在已知的儲能方法中，已經實用化的方法有抽蓄水力、熔鹽、電池、飛輪、壓縮空氣等^{[2]-[9]}。抽蓄水力是主要的大型儲能方式，它需要特定地理高度條件以及大量的水。熔鹽儲能必須配合火力等熱力發電設備，並不適用於近年快速擴增的風力與太陽能發電。極端氣候下因低溫使供電中斷的機率增高，但抽蓄水力、電池、以及壓縮空氣儲能等方法都不適合極低溫操作。鋰電池的能量密度雖高，大量建置的成本也高，且所需原料的稀有性使其產量受限，加上電池壽命不長要經常更換，原料開採及回收對環境的衝擊會很大^[10]。

相較於其它方法，飛輪儲能的效率高、功率密度大、充放電快速、壽命長、材料可回收、並且能耐受低溫；但其主要缺點是儲能時間短^[5]，故目前的主要應用都是數秒至數分鐘的短時間的儲能，例如資料中心的不斷電系統^[11]，以及風力發電場的功率調控^[5]。

表 1、主要儲能技術比較^{[7]-[9]}

儲能技術	能量密度 ^[7] (W·h/L)	最高效率 ^[9]	環境影響程度	限制條件 ^[8]
抽蓄水力	0.2-2	65%-80%	高	需要水庫及高度、不適合低溫操作
熔鹽	70-210	65%-75%	低	須配合熱力發電
電池	80-400	75%-90%	高	不適合低溫操作
飛輪	20-80	80%-90%	低	儲能維持時間短
壓縮空氣	2-6	65%-75%	低	不適合低溫操作

飛輪利用旋轉動能儲存能量，只要增加半徑、提高轉速，能量密度就會變大，未來材料的改良還可以再提高能量密度。因此，飛輪研究的重點是儘量提高轉速，並採用真空與磁浮來減小能量損耗^[5]；事實上，當摩擦力及阻力減到非常小，並沒有其它物理機制會限制飛輪儲能的時間上限，飛輪就能像地球自轉一樣持續很久。不過，目前已應用的飛輪系統都是採用主動式磁浮^[12]或超導磁浮^[13]，這兩種磁浮方法本身就會造成能量損耗；若能實現消耗能量更小的磁浮技術，使飛輪儲能時間延長至數小時，實用性將會大幅提高。飛輪具有高功率輸出的特點，未來在電動車被大量使用後，若建置儲能時間數小時的飛輪設備將足以解決下班時間充電功率大增的尖峰供電問題。

(二) 研究目的

製作小型真空磁浮飛輪儲能裝置，探討能量損耗因素，以及延長儲能時間的方法。

三、研究過程

(一) 研究流程

研究過程概要如圖 1，主要步驟有：

1. 設計飛輪、真空室、磁浮軸承、以及馬達/發電機，組合為「真空磁浮飛輪儲能裝置」。
2. 實驗一：轉動慣量量測，利用簡諧振盪頻率及力矩常數求出飛輪的轉動慣量；
實驗二：自然減速過程，量測飛輪在大氣及真空下的自然減速時間；
實驗三：發電測試，量測飛輪儲能裝置充放電的電壓、電流、功率與時間的關係。
3. 分析各種操作條件下的阻力力矩、功率、以及發電效率。
4. 探討空氣阻力、磁浮軸承特性、以及馬達與飛輪設計對儲能時間的影響。
5. 找出能量損耗的主要原因，提出改進方案。

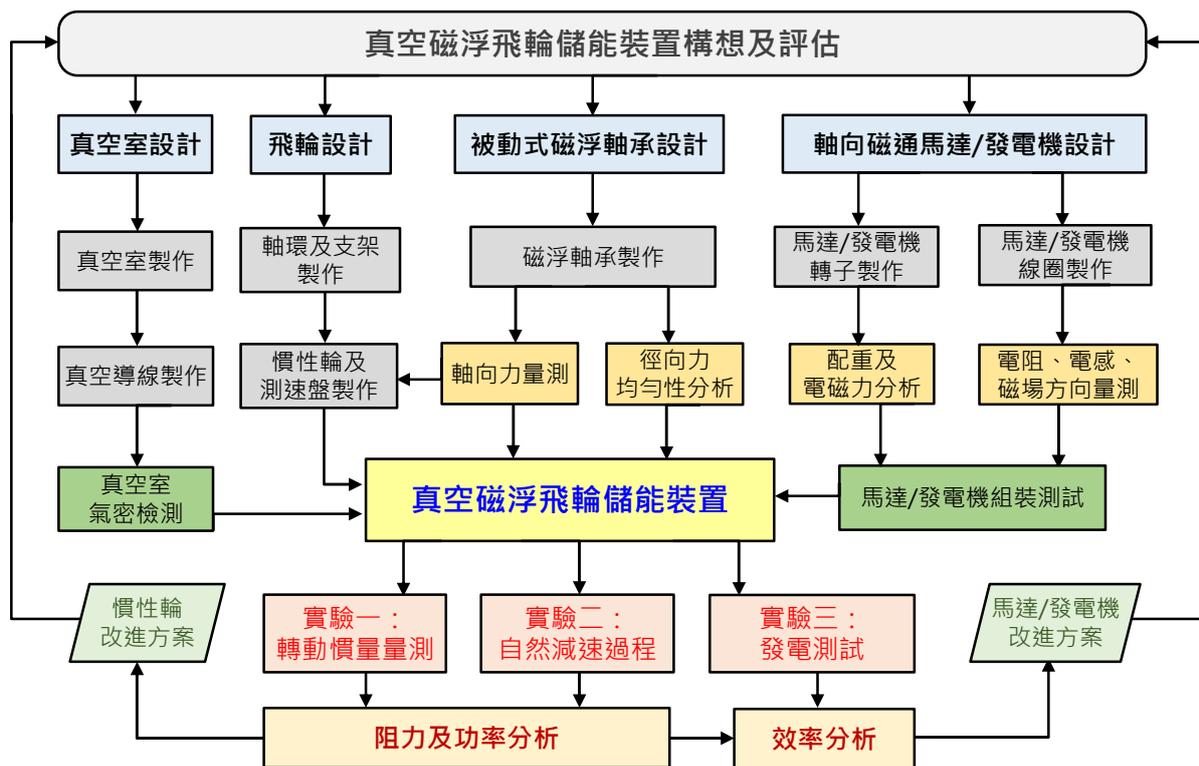


圖 1、研究流程

(二) 飛輪儲能原理

飛輪系統利用旋轉動能儲存能量，總能量可表示為

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

其中 I_w 為轉動慣量(單位 $\text{kg}\cdot\text{m}^2$)， ω 為角速度(單位 rad/s)。轉動慣量與飛輪的質量及形狀有關，

以圓柱體飛輪為例(如圖 2)，繞中心軸的轉動慣量為

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

其中 M 為慣性輪質量(單位 kg)， R 為半徑(單位 m)。增加轉動慣量並提高轉速，即可增加飛輪儲存的能量。旋轉動能與轉速平方 ω^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。由(1)、(2)可推得圓盤飛輪的能量密度與 R^2 及 ω^2 成正比：

$$\text{體積能量密度 } e_v = \frac{\text{旋轉動能}}{\text{體積}} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2}MR^2 \right) \omega^2 / \text{體積} = \frac{1}{4} \rho R^2 \omega^2 \quad (3)$$

其中 ρ 為慣性輪材料的密度。由(3)可知，當轉速相同，把慣性輪的半徑 R 放大 n 倍，則**能量密度提高為 n^2 倍**。這項特性與電池不同：當電池尺寸放大，其能量密度並不會增加。因此，只要飛輪半徑足夠大，能量密度就可以和電池一樣高。由於材料的抗拉強度(tensile strength)^[14]有極限，選用強度大的材料才能承受高轉速的離心力。部份材料的密度與抗拉強度如表 2，適合製作慣性輪的有不鏽鋼、碳纖維、以及玻璃纖維複合材料等。飛輪的能量密度上限可以用以下公式估計^[5]：

$$e_{v,\max} = K\sigma_t \quad (4)$$

其中 $K \approx 0.5$ 為圓盤飛輪的形狀係數(無單位)， σ_t 是材料的抗拉強度(單位 MPa)。此方程式預測抗拉強度越大、能量密度上限越高。在表 2 的材料中，以碳纖維強化樹脂(Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP)的抗拉強度 570 MPa 最高，其次是 AISI4340 鋼的 470 MPa，代入(4)估算其能量密度上限分別為 79 W·h/L 及 65 W·h/L。圖 3 是依據方程式(3)計算的圓盤飛輪能量密度，當轉速達到 12,000 rpm 以上，直徑超過 0.53 m 的 AISI4340 不鏽鋼飛輪或直徑超過 1.17 m 的 CFRP 飛輪，其能量密度勝過鉛酸電池。由於總能量為體積乘以能量密度，體積與長度三次方成正比，而能量密度與半徑平方成正比，如果把飛輪的尺寸放大 n 倍，總能量將會放大為 n^5 倍。

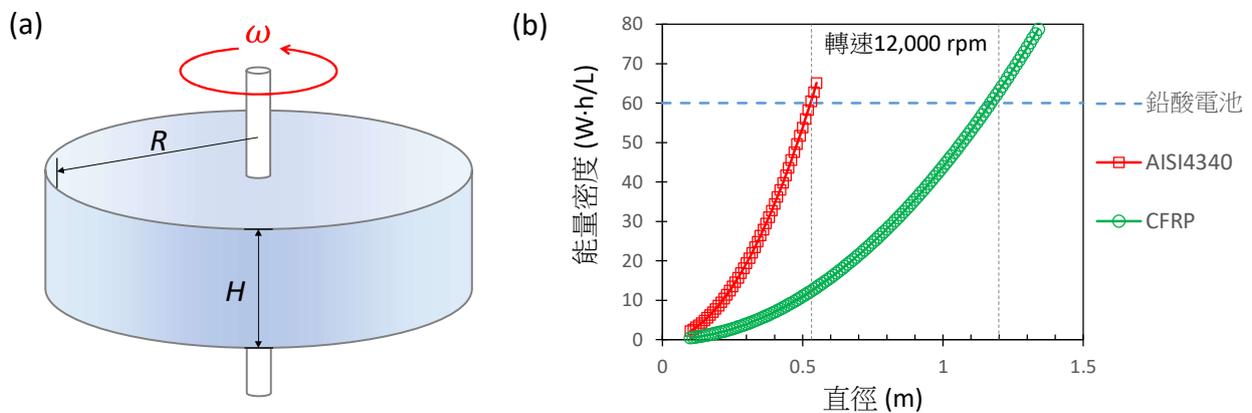


圖 2、(a) 圓盤飛輪，(b) 直徑 0.1 至 1.1 m 之不鏽鋼與 CFRP 圓盤飛輪的能量密度

表 2、材料的密度與抗拉強度^{[5], [12]}

材料	壓克力 Acrylic	碳纖維 CFRP*	玻璃纖維 FR4	鋁 Aluminum	磁鐵 NdFeB	不鏽鋼 AISI4340	不鏽鋼 SS430	不鏽鋼 SS304	黃銅 Brass
密度 ρ (g/cm ³)	1.18	1.6	1.85	2.7	7.6	7.85	7.75	7.93	8.73
抗拉強度 Yield (MPa)	60	570	250	90	75	470	310	215	124

(三) 設計與製作

(1) 磁浮軸承

要使飛輪達到高轉速，軸承的摩擦力必須很小，否則在高速轉動時會產生高溫，除了造成能量消耗，也會使軸承損壞，故需要加強冷卻散熱^[15]。理想的磁浮軸承沒有摩擦力，即使高速旋轉也沒有能量損耗。不過，依據恩紹定理(Earnshaw's theorem)^[16]，只利用永久磁鐵組合的磁浮軸承無法穩定平衡^[17]。要使這種磁浮軸承穩定，必須量測轉子位移、不斷改變磁場強度來維持平衡^[12]，或利用反磁性很強的超導體取代磁鐵^[13]。但是不斷改變磁場強度的控制方法需要電力，而超導體則必須維持在零下 200°C 的極低溫，這兩種方式都會造成能量耗。事實上，在不使用額外能量的前提下，利用磁鐵排斥力加上低摩擦的接觸點來限制轉軸移動，也可以實現被動式磁浮軸承(passive magnetic bearing)^[18]，其原理可利用圖 3 說明。

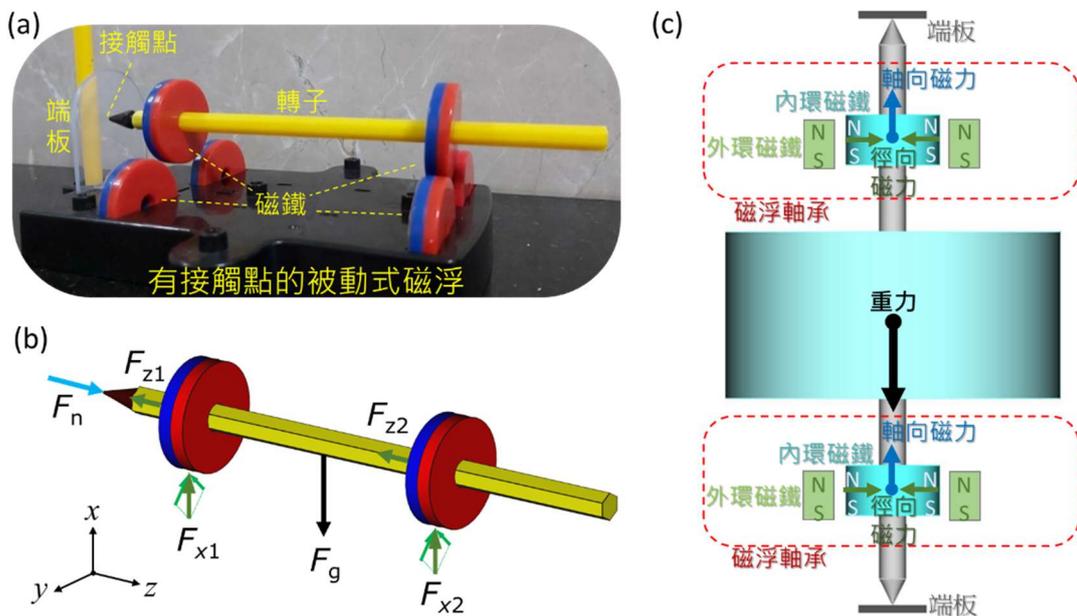


圖 3、磁浮軸承與飛輪設計：(a)磁浮玩具，(b)平衡的力圖，(c) 直立式磁浮飛輪設計概念

圖 3(a)為有接觸點的被動式磁浮玩具照片，圖 3(b)為其磁浮平衡的力圖，磁鐵的磁極方向都相同(藍色為 N 極)；轉子受到重力(F_g)、磁力(F_{x1} 、 F_{x2} 、 F_{z1} 、 F_{z2})、以及接觸點的正向力(F_n)作用。當轉子上、下($\pm z$ 方向)或左、右($\pm y$ 方向)偏移時磁力也會自動把轉子推回平衡位置；而在沿轉軸方向因為磁力 F_{z1} 、 F_{z2} 與轉子前後($\pm z$)偏移的方向相同，轉子很容易往沒有接觸點的

方向偏移，不是穩定平衡。解決方法是在轉軸兩端都加上接觸點(端板)限制偏移範圍，調整位置使接觸點正向力 F_n 幾乎為零，這樣就可以把摩擦力減到極小且維持平衡。

2001 年 Ohio Aerospace Institute 研究團隊發表了有接觸點、水平式轉軸的被動式磁浮軸承飛輪^[18]，在大氣下測試轉速可以到 5500 rpm (= 92 rps)。水平式轉軸的缺點是上下磁力不對稱，容易振動偏離中心軸，不易達到高轉速。更好的設計是直立式轉子，如圖 3(c)，在轉軸兩端加上低摩擦的端板限制轉軸移動，內外環磁鐵有徑向恢復力可以維持穩定平衡、軸向支撐力可以抵消重力，使端板的摩擦力很小。因為重力與磁力抵消，改用電磁鐵來控制軸向平衡也不會消耗太多能量。例如在 2008 年，新加坡南洋理工大學的研究團隊發表了採用直立式轉子的磁浮軸承飛輪，其數值分析結果^[19]預測轉速可達到 20,000 rpm。在本研究開發過程中，磁浮軸承的規格透過實驗測試持續改良，共有四款設計，如表 3。

表 3、磁浮軸承組件的材料及尺寸(依外環磁鐵的形式尺寸分類)

版本	一：ID35 mm 鈹鐵硼、環形陣列	二：ID40mm 肥粒鐵、環型	三：ID27mm 鈹鐵硼、環型	四、五：ID29mm 鈹鐵硼、環型
照片				
尺寸 (mm)				
外環磁鐵	立方 N35 鈹鐵硼 1 cm ³ * 6 個	環型肥粒鐵 外徑 80 mm 內徑 40 mm 高 10 mm	環型 N45 鈹鐵硼 外徑 38 mm 內徑 27 mm 高 9.6 mm	環型 N40 鈹鐵硼 外徑 37 mm 內徑 29 mm 高 10 mm
內環磁鐵	 N35 鈹鐵硼 外徑 29 mm、內徑 20 mm、高 9.6 mm		 N35 鈹鐵硼*2 個 外徑 25 mm 內徑 20 mm 高 5 mm	 N40 鈹鐵硼 外徑 26 mm 內徑 20 mm 高 10 mm

實驗測試發現，中心軸兩端若為尖點，很容易破壞端板，故軸兩端與端板的接觸點都採用 8 mm 的不鏽鋼珠。各端板材料的動摩擦係數如表 4，最初端板採用防刮貼片、石英片等表面堅硬的材質，但它們容易破碎並刮傷鋼珠表面；之後改用聚碳酸酯(PC)塑膠板及摩擦係數更低的鐵氟龍片，但這些塑料板易凹陷變形；因此，最後端板採用表面不易破碎或凹陷變形的石墨片。各版本飛輪的端板及底座照片如圖 4。

表 4、端板材料與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

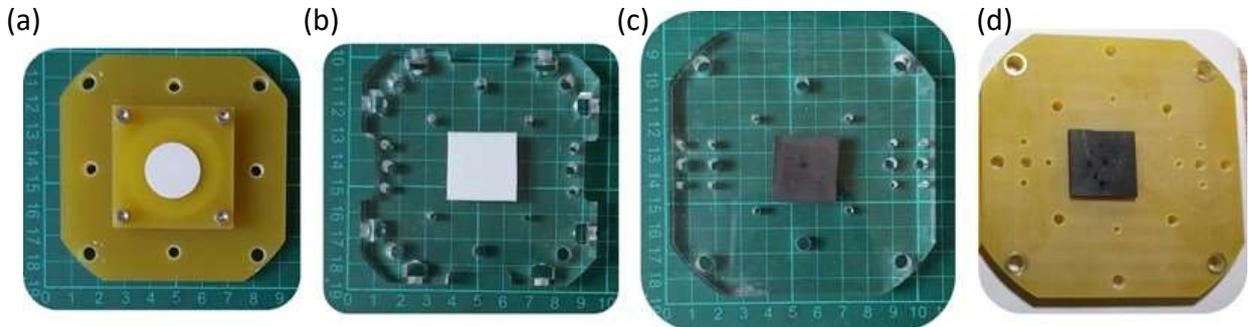


圖 4、底座及端板：第一至三版的(a) PC 板、(b)鐵氟龍片，(c)、(d)第四、五版的石墨片

(2) 軸環

一般的軸環是以無頭螺絲鎖在軸上固定轉軸，其設計如圖 5(a)，但它的質量分配不平均、螺絲會使轉軸損傷變形，不適合需要高速旋轉、重覆拆裝多次的磁浮飛輪實驗。更好的設計是半圓軸環^[20]，如圖 5(b)，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。本研究的半圓軸環配合磁浮軸承磁鐵及飛輪尺寸來設計，軸環外徑有 29 mm 及 25 mm 兩種，材質有 FR4 及 304 不鏽鋼兩種；半圓軸環實體照片如圖 5(b)。本研究的飛輪、磁浮軸承轉子、及馬達轉子都是以半圓軸環固定在直徑 8 mm、長度 200 mm 的 316 不鏽鋼主軸上。

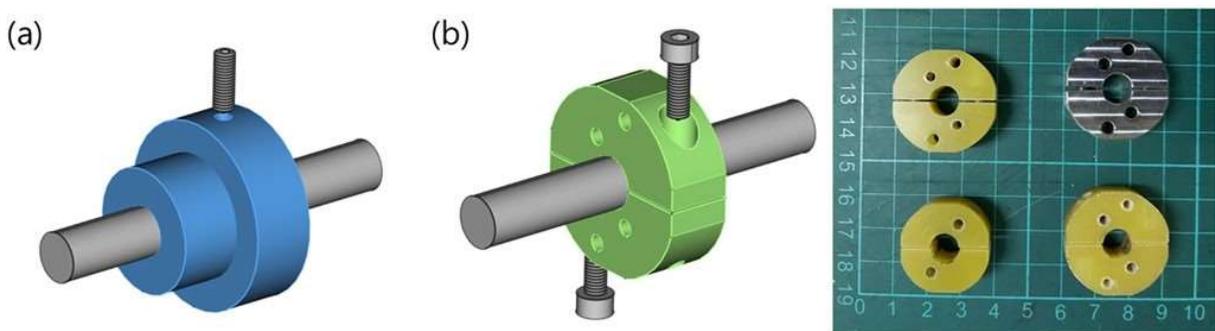


圖 5、軸環設計：(a) 一般軸環，(b) 半圓軸環及實體照片

(3) 飛輪轉子

本研究發展了五個飛輪系統版本(Ver.1~Ver.5)，轉子設計如圖 6，圓盤飛輪採用材料容易取得的 304 與 430 不鏽鋼，以機械加工製作後，利用軸環固定在 8 mm 軸心上組成飛輪轉子。第一至四版採用 D72 磁性不鏽鋼盤、D78 不鏽鋼飛輪、及 D72 馬達/發電機轉子，第五版採用 D77 黑鐵盤、D98 不鏽鋼飛輪、及 D98 馬達/發電機轉子。第四、五版飛輪可以在真空中運作。

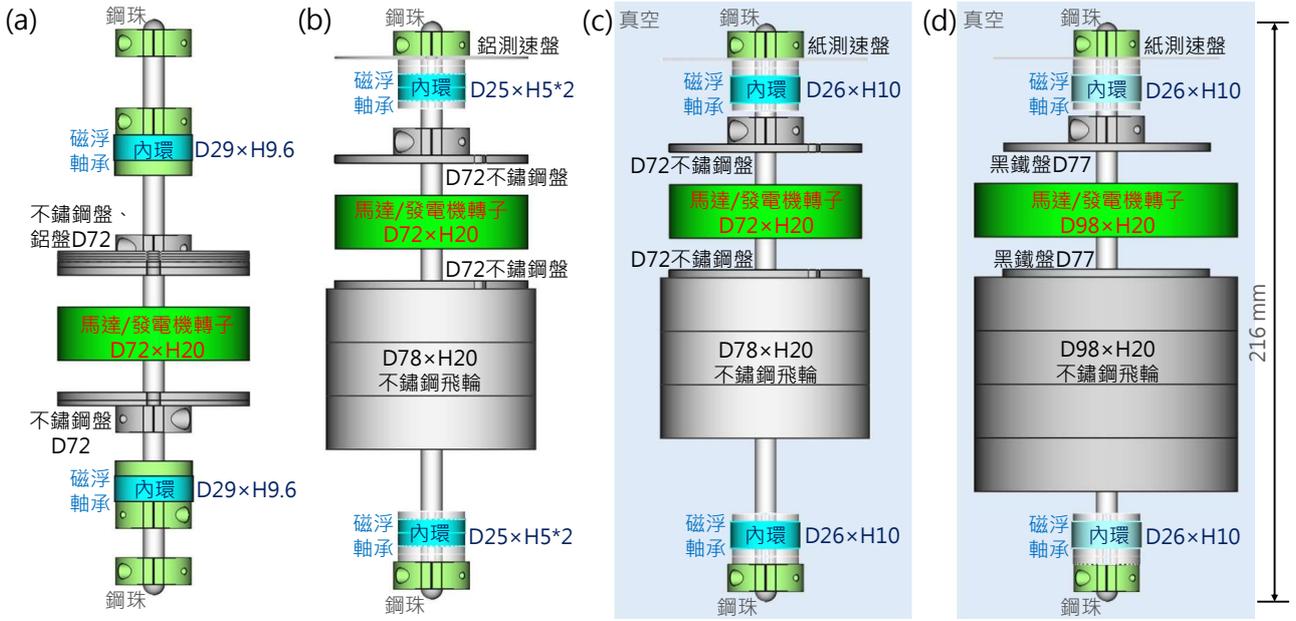


圖 6、飛輪轉子設計：(a)第一、二版，(b)第三版，(c)第四版，(d)第五版；總長度 216 mm。

(4) 馬達/發電機轉子

驅動飛輪及發電需要磁鐵與線圈組成馬達/發電機。圖 7 是本研究設計的馬達轉子，以機械加工製作 FR4 玻璃纖維強化樹脂圓盤，其半徑 R 、高度 H ，有中心孔及偏心孔，中心孔是用來固定主軸，偏心孔內置入八個直徑 $2a$ 、高度 H 的圓柱磁鐵。依據平行軸定理，繞偏心軸旋轉之剛體的轉動慣量為

$$I_o = I_{cm} + mr^2 \quad (5)$$

其中 I_{cm} 為繞質心軸的轉動慣量， m 為偏心體的質量， r 為偏心量。將(2)式的 R 取代為 a 求出磁鐵繞質心軸的轉動慣量後代入(5)式，可推得磁鐵繞偏心軸的轉動慣量為

$$I_o = \frac{1}{2}ma^2 + mr^2 \quad (6)$$

轉子組件以及開孔都是圓柱形，扣掉挖除的 FR4 圓柱孔，並忽略中心孔及固定用的螺絲孔，則整個馬達轉子的轉動慣量大約為：

$$I_{motor} = \frac{1}{2}M_0R^2 - 8 \cdot \left(\frac{1}{2}M_-a^2 + M_-r^2\right) + 8 \cdot \left(\frac{1}{2}m_1a^2 + m_1r^2\right), \quad (7)$$

其中 $M_0 = \rho_0\pi R^2H$ 為未挖孔的 FR4 轉子質量， $M_- = \rho_0\pi a^2H$ 為圓柱孔挖除後的 FR4 質量， $m_1 = \rho_1(\pi a^2)H$ 為磁鐵質量， ρ_0 為 FR4 密度， ρ_1 為磁鐵密度。在各版本的飛輪中， $a = 8 \text{ mm}$ ，

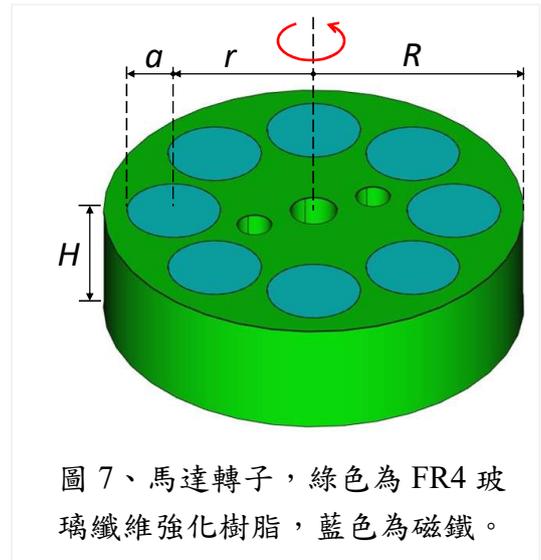


圖 7、馬達轉子，綠色為 FR4 玻璃纖維強化樹脂，藍色為磁鐵。

$r = 24 \text{ mm}$ 、 $H = 20 \text{ mm}$ 、馬達及慣性輪轉子 $R = 72 \text{ mm}$ 或 98 mm ，利用(7)式與表 2 的材料密度估算慣性輪與馬達轉子組合後的飛輪系統轉動慣量如表 5。

表 5、飛輪系統的轉動慣量($1 \text{ kg}\cdot\text{cm}^2 = 0.0001 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$)與能量估計

慣性輪	304 不鏽鋼 $\phi 72 \times 5 \text{ mm} * 2$	304 不鏽鋼 $\phi 78 \times 5 \text{ mm} * 3$	304 不鏽鋼 $\phi 98 \times 5 \text{ mm} * 4$
馬達轉子	FR4 $\phi 72 \times 10 \text{ mm}$	FR4 $\phi 72 \times 10 \text{ mm}$	FR4 $\phi 98 \times 10 \text{ mm}$
飛輪轉動慣量 ($\text{kg}\cdot\text{cm}^2$)	2.1	16.7	54.7
馬達轉子轉動慣量 ($\text{kg}\cdot\text{cm}^2$)	1.6	1.6	2.8
其它 ^s ($\text{kg}\cdot\text{cm}^2$)	0.2	0.7	1.5
飛輪組合體轉動慣量 (代表值, $\text{kg}\cdot\text{cm}^2$)	3.9	19	59
轉速 6000 rpm 能量	77 J	375 J	1,165 J
轉速 12,000 rpm 能量	308 J	1,500 J	4,658 J
轉速 24,000 rpm 能量	1,232 J	6,001 J	18,634 J

^s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。

(5) 馬達/發電機線圈與電路

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，沒有會摩擦損耗的電刷，而且可以作為發電機使用，很適合飛輪應用。BLDC 馬達有徑向磁通與軸向磁通兩種設計^[21]，軸向磁通馬達的構造簡單，容易製作，而且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^[22]，發電機也是相同的設計^[23]。本研究採用的軸向磁通馬達設計如圖 8，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(可稱為定子)，每兩個線圈串聯構成 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° ，使轉子被電磁力推動持續旋轉，如圖 8(c)。假設有 n_c 個線圈串聯，每個線圈有 N 匝，在磁鐵的等效磁場 B_{eff} 中受到作用力 $F_{\text{tot}} = n_c \times N \times i \ell B_{\text{eff}}$ 的有效長度為 ℓ ，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大小相同，其力矩為

$$\tau = rF_{\text{tot}} = rn_c N i \ell B_{\text{eff}}, \quad (8)$$

其中 r 為圖 8(b)標示的等效半徑。表 6 為本研究中馬達的設計參數代表值，利用這些數據代入(8)估計得馬達力矩 $\tau = 0.0172 \text{ N}\cdot\text{m}$ ，作用力 $F_{\text{tot}} = 0.72 \text{ N}$ 。

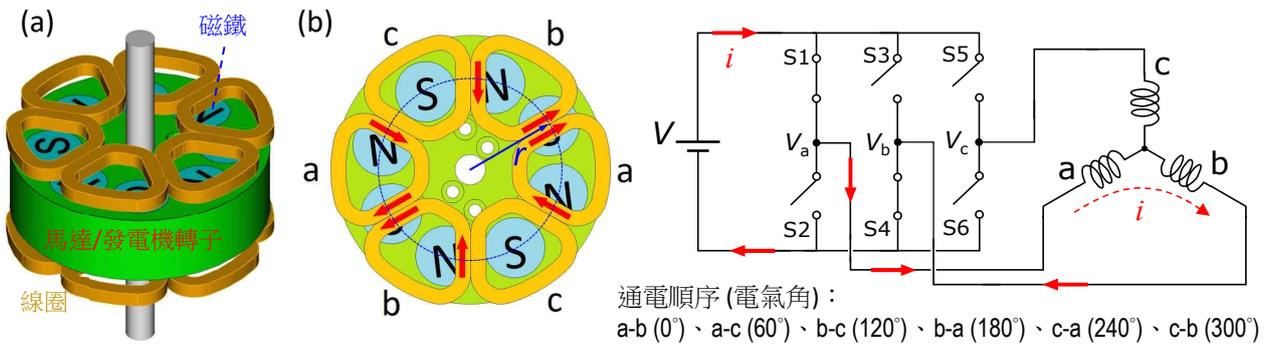


圖 8、軸向磁通無刷直流馬達：(a)線圈與轉子結構，(b) 操作原理^[21]

表 6、本研究之馬達/發電機的設計參數

參數	電流 i	等效磁場 B_{eff}	有效長度 ℓ	等效半徑 r	匝數 N	磁極數 n_m	串聯數 n_c	轉速 ω
代表值	1 A	0.2 T	16 mm	24 mm	56 turns	4 poles	4 coils	100 rps = 628rad/s

馬達運作方式如圖 9，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 至 5V 的直流電壓來控制；轉速量測是利用紅外線感測器，透過無線傳輸到電腦記錄並顯示。在部份實驗中，為了減少馬達電動勢對轉速量測的干擾，改以電位計手動調整分壓來控制飛輪轉速。

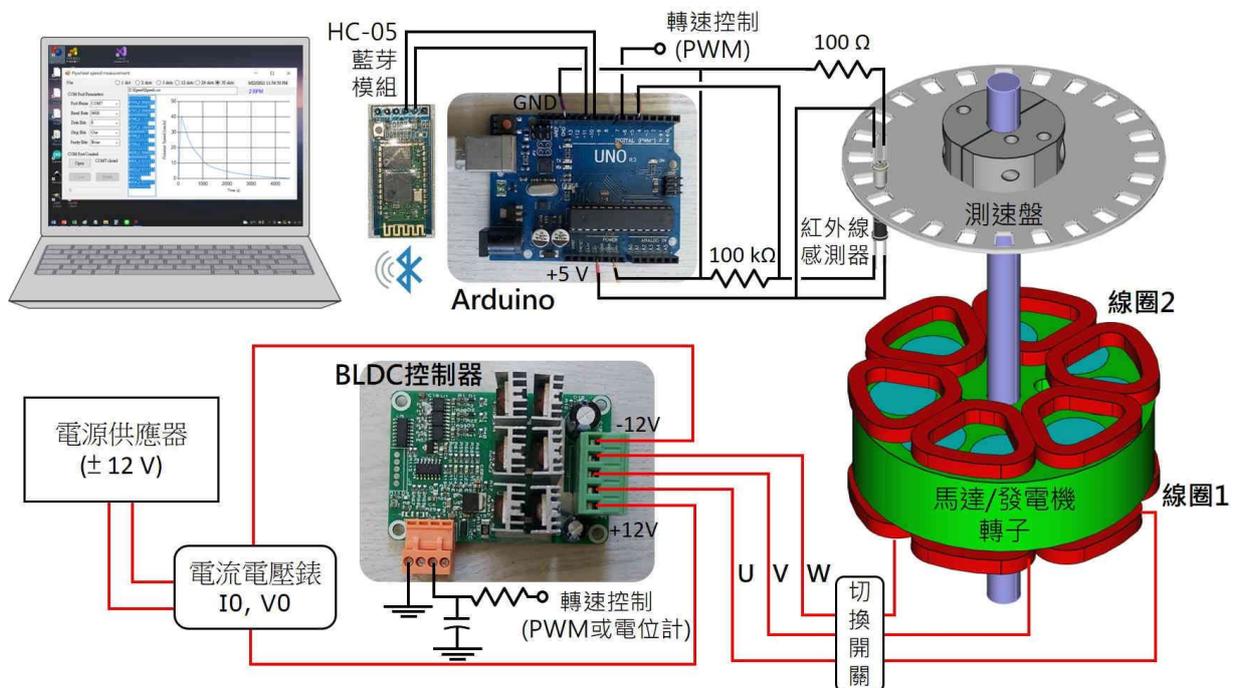


圖 9、馬達運作方式

當馬達轉子達到相當大的轉速 ω 後，把線圈切換至整流器即成為發電機，使飛輪的動能轉換為電能，發電原理如圖 10。各線圈 a、b、c 的感應電動勢與磁極數 n_m 、串聯數 n_c 、等效半

徑 r 、有效長度 l 、匝數 N 成正比。長度 l 的導線在等效磁場 B_{eff} 中的運動相當於以電氣角之等效速度 $v_{\text{eff}} = n_m r \omega$ 移動，其感應電動勢 $\mathcal{E} = -v_{\text{eff}} B_{\text{eff}} l$ ，可推得感應電壓峰值為

$$V_p = -n_c N n_m r \omega B_{\text{eff}} l \quad (9)$$

其中 $\omega = 2\pi f$ ， f 為轉子旋轉的頻率。由上式可知，電壓與轉速 ω 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。圖 10(a) 三相全波整流後電壓 $V_{\text{out}} = V_{\text{out}+} - V_{\text{out}-}$ ，直流電壓輸出可表示為 [24]

$$V_{\text{out,dc}} = 3\sqrt{3}V_p/\pi \quad (10)$$

取表 6 的設計參數，由(9)、(10)可求出 a、b、c 線圈感應電動勢峰值 $V_p = 10.8 \text{ V}$ ，三相整流後的直流電壓 $V_{\text{out,dc}} = 17.9 \text{ V}$ ，如圖 10(b)。

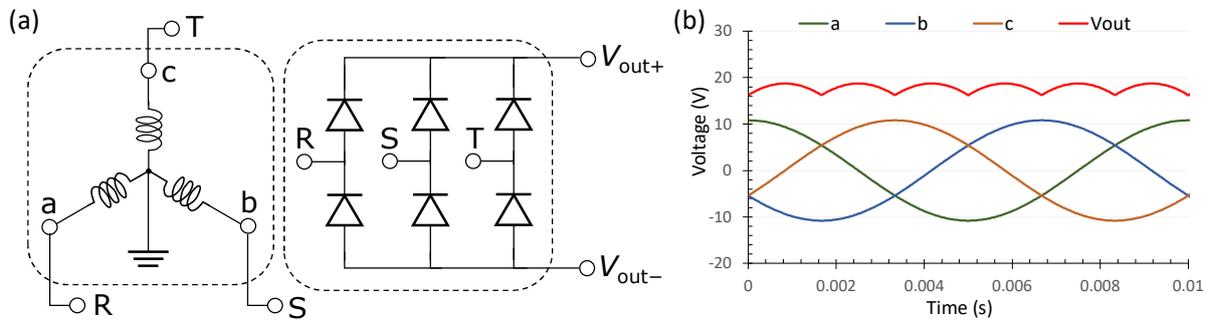


圖 10、發電機原理[24],[25]：(a)三相整流電路接法，(b)三相交流電壓與整流後的直流電壓

發電機轉子角度與電氣角的關係如圖 11，因磁極數 $n_m = 4$ ，當發電機轉子旋轉 90° ，即完成一個發電週期(電氣角旋轉 360°)，亦即每轉一圈有四個發電週期，發電頻率為旋轉頻率的四倍；當轉子以角速度 ω 轉動，線圈中的磁場以 $n_m \omega$ 的角頻率變動。由圖 10(b)及圖 11 知，線圈 a、c、b 分別在電氣角 0° 、 120° 、 240° 達到最大感應電壓。

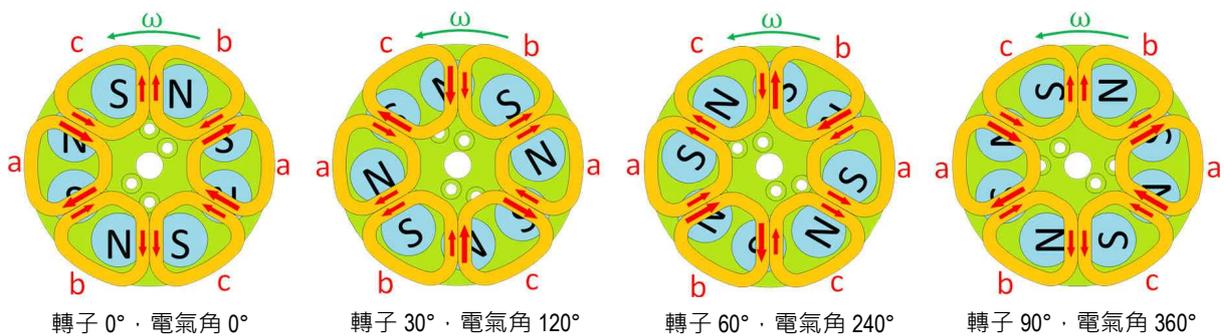


圖 11、發電機轉子角度與電氣角的關係

本研究中的發電機運作方式如圖 12，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。基於安全考量，在實驗操作時轉速不超過 230 rps，發電線圈整流後輸出的直流電壓限制在 30 V 以內。

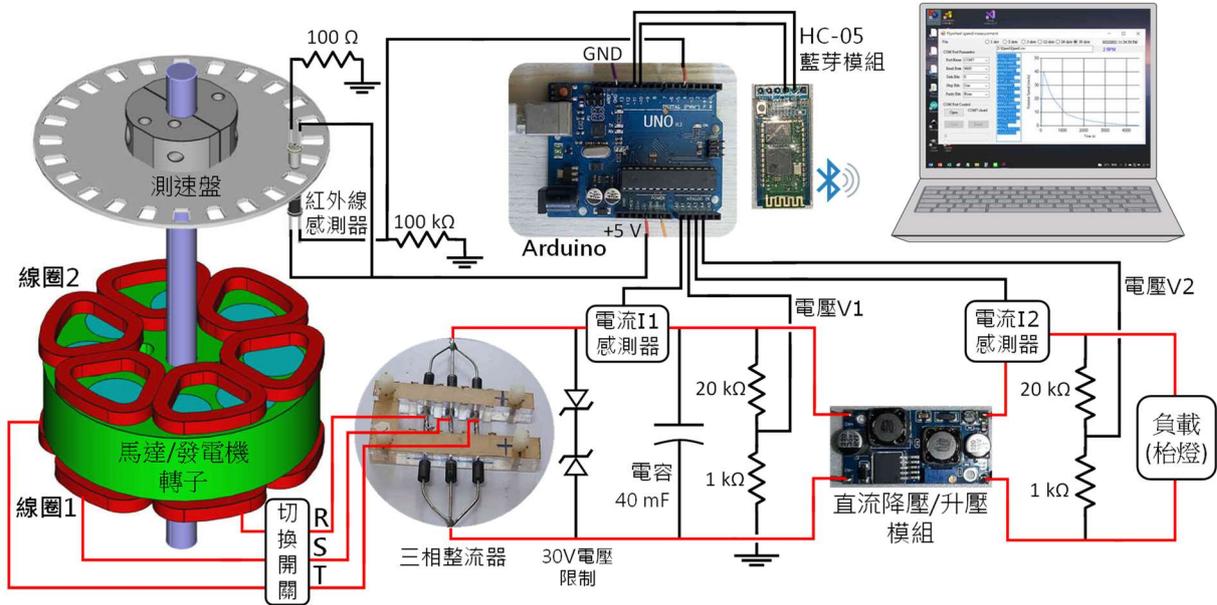


圖 12、發電機運作方式；量測馬達功率時，感測器 I2 改接到圖 14 中的 I0 量測電流。

本研究大部份實驗以線圈 1 作為馬達驅動飛輪，接線如圖 13(a)；為了使馬達到較高轉速(或提高發電電壓)，也測試了將上、下兩組線圈串聯或並聯的組合。以 a、b 相位為例，並聯時，電流分別通過 a1、a2 及 b1、b2 線圈，如圖 13(b)；而串聯時，電流依序通過 a2、a1、b1、b2 線圈，如圖 13(c)；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，可供應的最高電流會變小。

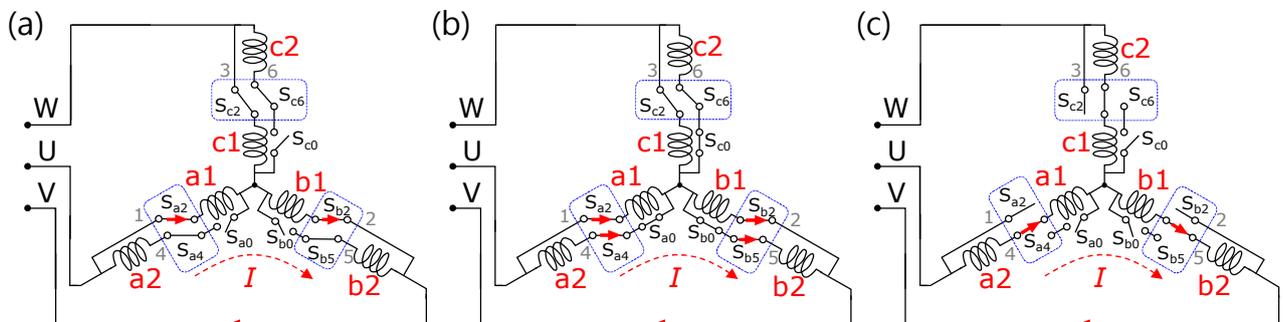


圖 13、馬達/發電機線圈接法：(a)使用線圈 1，(b) 線圈 1、2 並聯，(c)線圈 1、2 串聯。

馬達/發電機轉子是由 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

兩個版本的磁鐵及轉子通孔直徑 16 mm、深 20 mm 都相同(配合相同大小的磁鐵)，可以共用線圈。組裝馬達/發電機轉子的流程如圖 14(a)，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 14(b)，磁鐵質量是以 1 mg 的精密電子秤量測，配重完成後質心大約在轉軸上。

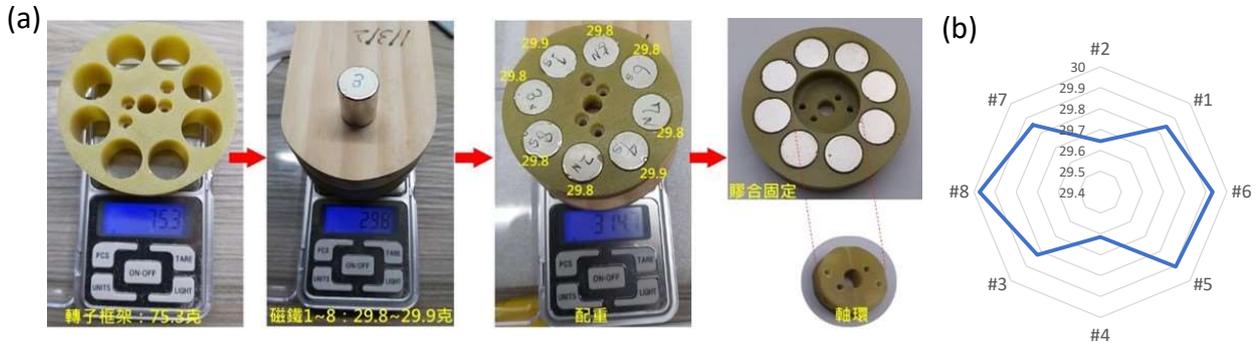


圖 14、(a)馬達/發電機轉子製作流程(Ver.1)；(b)馬達轉子的磁鐵配重(Ver.5)。

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 的圓柱形 N52 釹鐵硼磁鐵以 AB 膠固定於 FR4 框架組成，磁鐵偏心率都是 24 mm，磁極方向正反交替。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 15(a)，各磁鐵之磁場強度如圖 15(b)。在磁鐵表面，最高磁場強度約 0.4 T；線圈中心位置在距離磁鐵表面 4 mm 處，其磁場約 0.2 T，由方程式(8)可估計 1 A 電流的馬達力矩為 0.017 N·m，足以推動轉子。

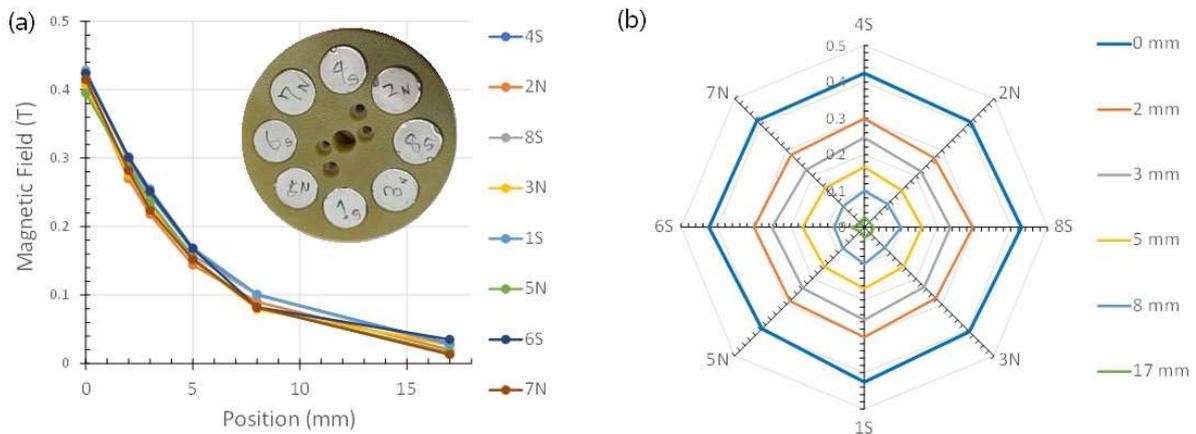


圖 15、馬達轉子的磁鐵表面磁場：(a) 磁場強度與距離關係，(b) 各磁鐵的磁場強度。

每組馬達/發電機線圈共有 12 個線圈，其製作流程如圖 16。線圈是使用手動繞線機製作，繞線機可以固定繞線框架、使轉動平順、記錄匝數。繞線時同時對線圈塗上膠水或白膠，繞到設定的匝數後取下線圈，用膠布固定，等膠乾後再拆下框架。繞線完成的線圈標示正負極後，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，或稱為 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，放置 24 小時完全硬化後取下壓合板與保鮮膜即可。



圖 16、馬達/發電機線圈製作流程(第一至三版飛輪)

第一版至第三版的線圈框架以 FR4 製作，尺寸準確而且強度大，但成本比較高，而且製作時間長。第四、五版線圈框架配合 6 mm 螺桿，尺寸變大，如圖 17。由於推動飛輪的作用力並不大，線圈框架改用雷射切割、黏合的壓克力板製作，以降低成本並加快研究進度。

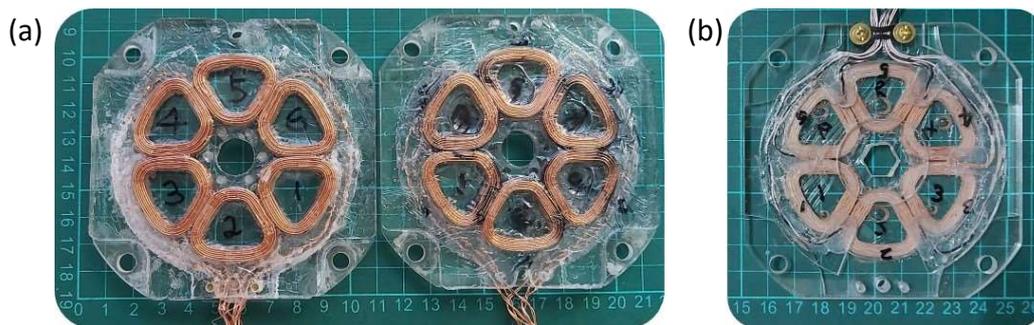


圖 17、第四、五版的馬達/發電機線圈：(a) 第四版的 30 匝線圈(單芯，線徑 0.7 mm，左)及 56 匝線圈(單芯，線徑 0.5 mm，右)，(b) 第五版的 56 匝線圈(多芯，線徑 0.5 mm)。

(6) 支撐結構與真空室

飛輪系統的支撐結構如圖 18，它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，可以調整各組件之間的距離。磁浮軸承座都是以壓克力板製作，第一至三版的線圈座是以玻璃纖維板製作，而第四、五版則是以玻璃纖維板製作。由於壓克力雷射加工只能切割二維圖形，玻璃纖維加工也有加工方法的限制，在製作前先以 LiberCAD 繪製二維設計圖，再轉入 FreeCAD 繪製三維模型，以確認設計是否正確。

第一至第三版飛輪採用直徑 5 mm 的不鏽鋼螺桿，如圖 18(a)，但實驗測試發現 5 mm 螺桿組成的支撐結構容易振動，因此第四版起改用直徑 6 mm 的螺桿，如圖 18(b)。由於 5 mm 螺桿與馬達的磁鐵距離很近，304 不鏽鋼螺桿的磁性微弱卻明顯被吸引，而改用 6 mm 螺桿加大距離後仍有磁力作用，故第四、五版更換為 6 mm 黃銅螺桿。磁浮軸承座、線圈座、及端板底座的外徑圓皆配合真空室之壓克力管的內徑，恰可置入壓克力管真空室內，如圖 18(b)，抽真空後真空室的內徑收縮將與其緊密貼合，提供側向的支撐力，可減少飛輪的振動。

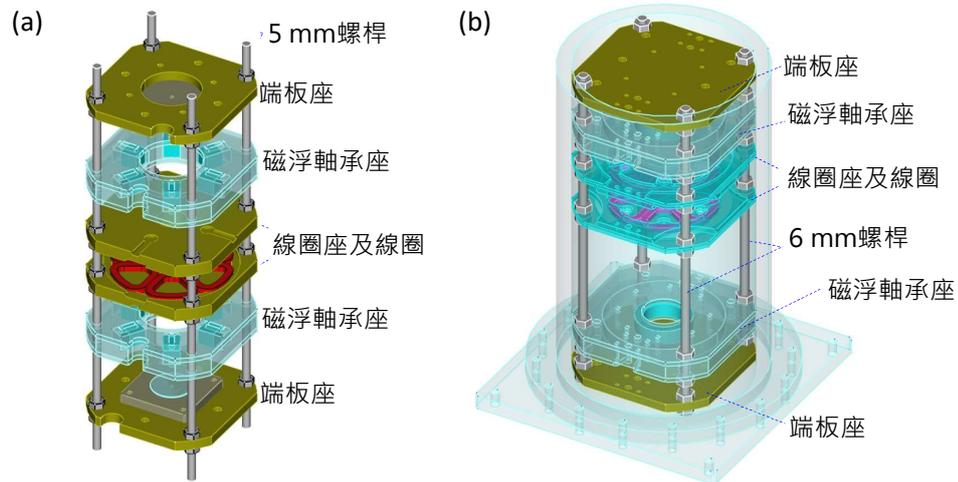


圖 18、支撐結構：(a) Ver.1~3 採用 5 mm 螺桿，(b) Ver.4、5 採用 6 mm 螺桿(置入真空室)

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 19(a)。可拆裝部份利用 O 環與壓克力緊迫環達成氣密，不可拆的部份(貫穿真空室的導線與螺絲孔)是以壓克力膠或環氧樹脂密封。用螺絲固定組裝完成後，以真空幫浦抽氣，直到抽氣口上的壓力計顯示-76 cm·Hg，關上閥門停止抽氣，如圖 19(b)。測試後確認真空室的洩漏很小，放置兩週後氣壓上昇大約 2 torr，如圖 19(c)。在每次真空飛輪的轉速及發電實驗之前，都會重新抽氣使氣壓維持在-76 cm·Hg 附近。

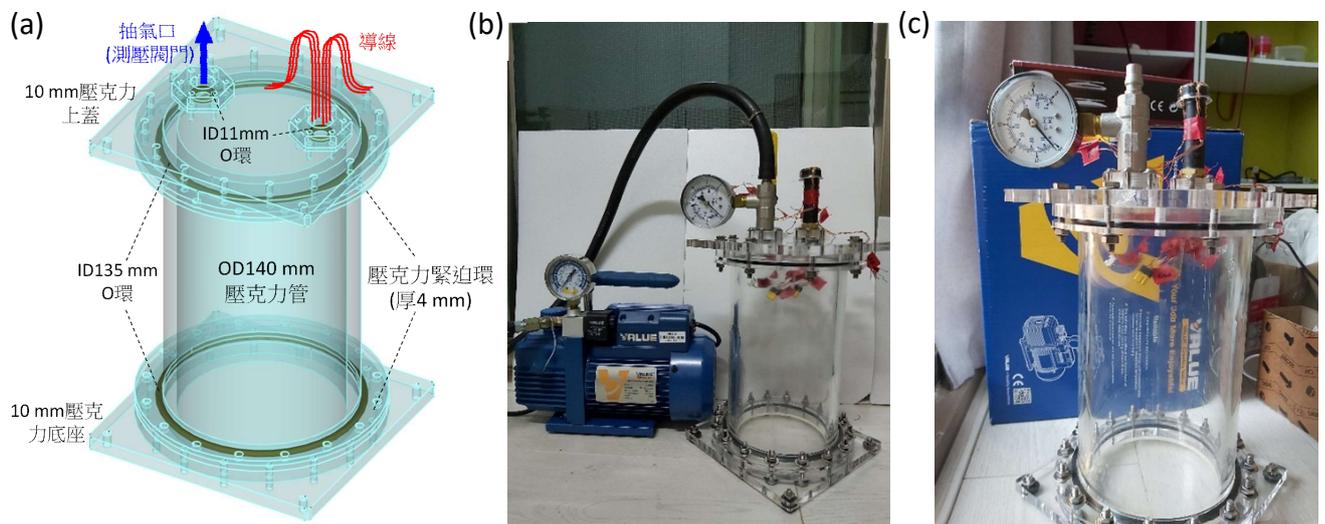


圖 19、真空室：(a) 設計概念，(b)以真空幫浦抽氣，(c)兩週後氣壓上升很少(約 2 torr)

(四) 實驗量測與分析

(1) 磁浮軸承的徑向恢復力

磁浮軸承的徑向力是維持飛輪轉子穩定的恢復力。圖 20 為以電子秤量測第三、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，螺帽每轉一圈位移 1 mm，最小位移量為 1/6 mm，並計入秤盤形變之位移修正。第三版磁浮軸承的徑向恢復力常數為 17 N/mm，比第四、五版磁浮軸承的 13.7 N/mm 更大，可能是因為第三版的內外環磁鐵間隙只有 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。

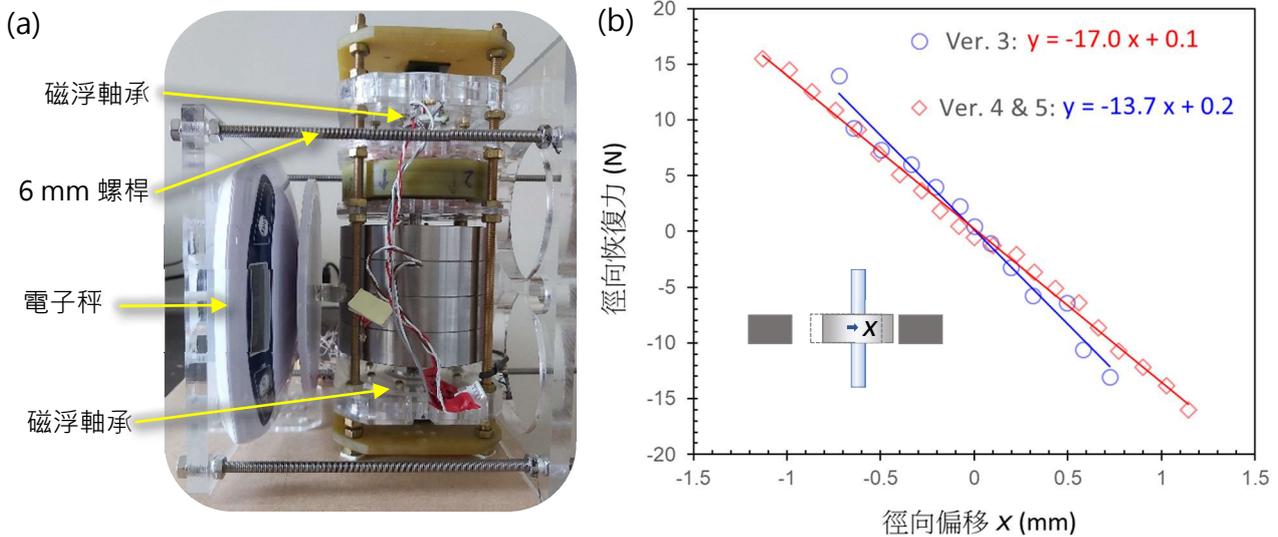


圖 20、磁浮軸承的徑向恢復力量測：(a)量測方式，(b)量測結果

(2) 磁浮軸承的軸向支撐力

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，可確保水平恢復力足以維持磁浮軸承的徑向平衡。磁浮軸承的內、外環磁鐵軸向偏移與軸向力的關係如圖 21，軸向力是利用電子秤量測，位置設定是利用四支 6 mm 的不鏽鋼螺桿。第一版磁浮軸承的最大軸向力僅 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；第三版磁浮軸承的最大軸向力 30 N，兩組最多可以支撐 3 kg 的轉子；第四、五版磁浮軸承的軸向力更大，可以支撐 5 kg 的轉子。

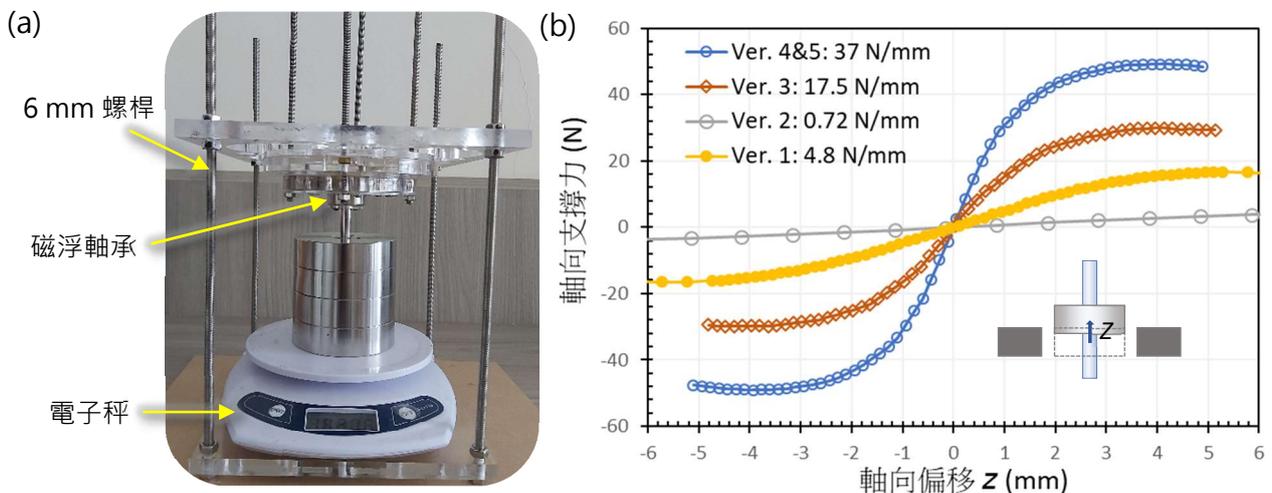


圖 21、磁浮軸承的軸向支撐力量測：(a)量測方式，(b)量測結果

(3) 馬達力矩量測

輸出力矩與角度關係的量測方式如圖 22。量測時，對馬達線圈通以 1 A 電流，把膠帶貼在馬達轉子的外圍並連結到貼在電子秤的壓克力方棒，移動電子秤(每次 1 mm)使膠帶拉動馬達轉子，以電子秤記錄拉力，利用刻度尺記錄馬達轉子的圓周位移換算為旋轉角度。量測結果顯示，56 匝線圈通以 1 A 電流的最大作用力 0.83 N (= 85 gw)，最大負力矩為 $-0.03 \text{ N}\cdot\text{m}$ ，與利用方程式(8)估計的數值接近。在 0° 及 45° 附近力矩接近零，而在 22.5° 附近最大；在 0° (力平衡點)附近，力矩常數 $\kappa = -0.114 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$ 。

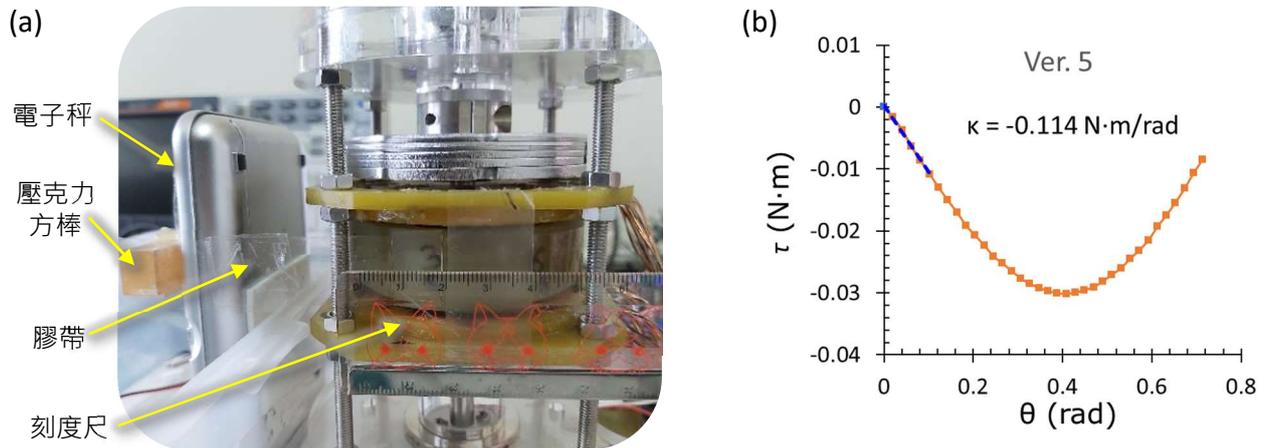


圖 22、馬達力矩量測：(a) 量測方式，(b) 第五版飛輪的力矩量測結果(電流 1 A)。

(4) 實驗一：轉動慣量量測

飛輪的轉動慣量可以利用其扭轉振盪頻率來推算。當振盪角度不大，可視為簡諧振盪，其角頻率 $\omega_0 = 2\pi f_0$ 與力矩常數 κ 及飛輪轉動慣量 I_w 有關^[26]：

$$\omega_0 = \sqrt{\kappa/I_w} \quad , \quad I_w = \kappa/\omega_0^2 \quad (11)$$

測得轉子振盪頻率與力矩常數後，利用(11)即可求出飛輪轉子的轉動慣量。轉動慣量是採用圖 22 的實驗架構量測，電流固定為 1 A，移去電子秤及膠帶，以手撥動馬達轉子使其自由振盪，如圖 23(a)，用示波器記錄馬達線圈的感應電壓波形，即可得振盪頻率。第三版與第五版飛輪轉子的振盪頻率量測結果如圖 23(b)、(c)，測得頻率 $f_0 = 1.3$ 及 0.7 Hz ，其力矩常數皆為 $\kappa = 0.114 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$ ，可計算得轉動慣量各為 $17 \text{ kg}\cdot\text{cm}^2$ 及 $58 \text{ kg}\cdot\text{cm}^2$ 。第三、四、五版飛輪之轉動慣量的實測值與計算值如表 7。

表 7、各版本飛輪的轉動慣量與 20 rps 減速力矩

版本、 線圈間隙	Ver.3-2 2 mm	Ver.3-3 2 mm	Ver.3-4 2 mm	Ver. 3-5 2 mm	Ver. 4-1 2 mm	Ver. 4-2 5 mm	Ver.4-0 無馬達	Ver.5-1 2 mm 真空
轉動慣量 ($\text{kg}\cdot\text{cm}^2$)	4.29	9.03	13*	17.3	16.5	16.5	20*	58.1
減速力矩 ($\text{N}\cdot\text{m}$)	0.00049	0.00055	0.00050	0.00053	0.00041	0.00023	0.00018	0.00029

*計算值，依據方程式(2)、(5)、(6)、(7)估計。

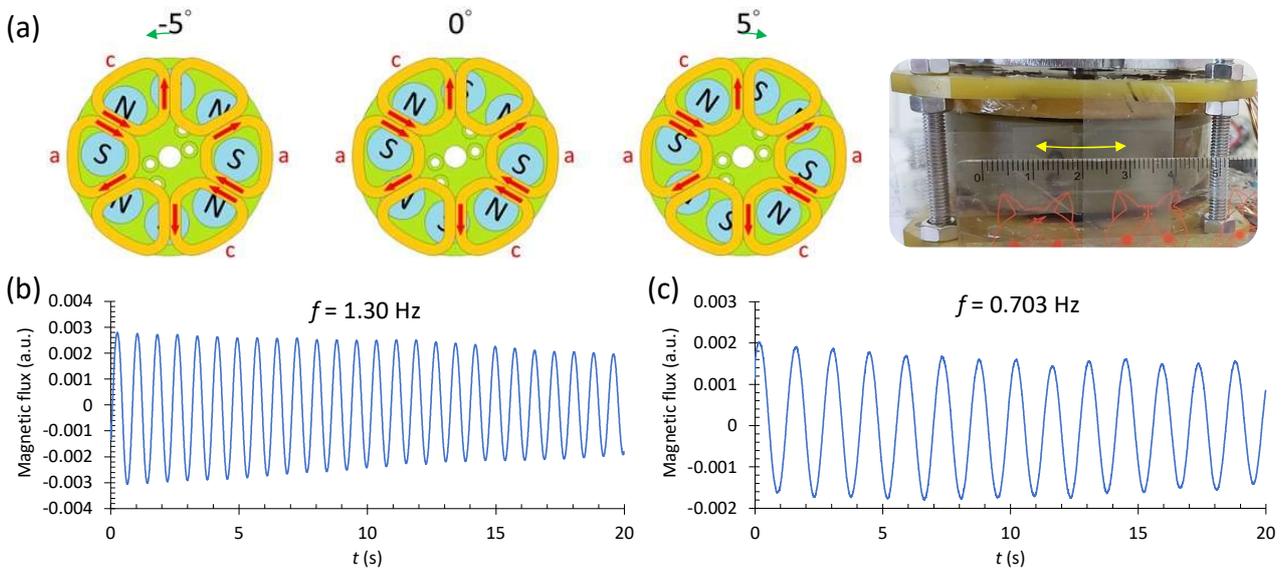


圖 23、轉動慣量量測：(a) 轉子振盪，(b)第三版 $17 \text{ kg}\cdot\text{cm}^2$ ，(c)第五版 $58 \text{ kg}\cdot\text{cm}^2$ 。

(5) 實驗二：自然減速量測

圖 24 為自然減速實驗結果，取 20 rps 為起點比較減速力矩，結果如表 7 第三列，減速力矩等於轉動慣量乘以角加速度(轉速對時間圖在 20 rps 的斜率)。由表 7 可發現，當轉動慣量逐漸變大時，雖然減速度明顯變小，減速力矩沒有明顯變大；也就是說，轉動慣量變大並不會增加阻力。當馬達磁鐵與線圈的間隙變大(由 2 mm 增加到 5 mm)，則阻力會變小，而且無馬達(第 4 版，以拉線加速)時阻力力矩最小。這些結果顯示，即使線圈沒有通電或發電產生電力，線圈和磁鐵的交互作用仍然會形成阻力。由表 7 可看到，無馬達的阻力比有馬達、真空下的情形更小，顯示在低速(20 rps)下馬達的阻力遠比空氣阻力更重要。

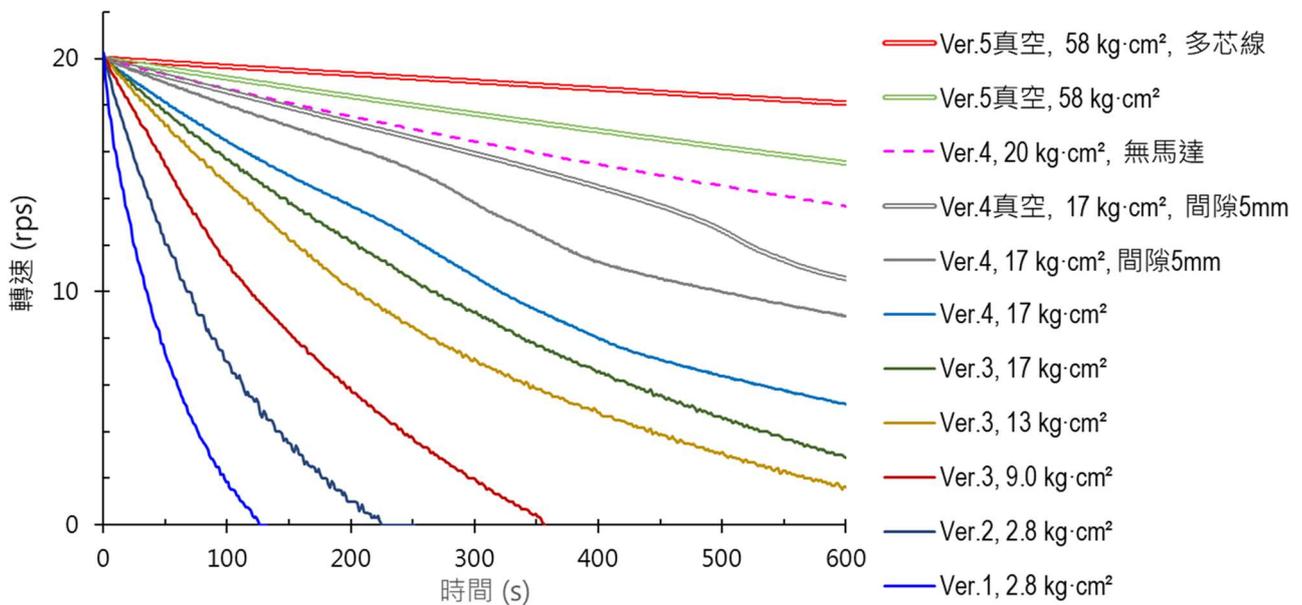


圖 24、飛輪由 20 rps 自然減速的過程。

飛輪的能量與轉速平方成正比，提高轉速可以儲存更多能量，但阻力同時變大，也使能量損耗更快。為了分析阻力與轉速的關係，圖 25 是高轉速下(100 rps)自然減速的實驗結果，可發現高轉速下在大氣中操作的減速度很大，速度與時間關係是衰減曲線。雙線為第四、五版飛輪在真空中(<1 torr)的自然減速，減速度小很多，速度隨時間的下降幾乎是線性的。在低轉速與高轉速的實驗中都發現，馬達線圈間隙變大可減小阻力。為了探討馬達阻力來源，以第五版飛輪測試了單芯線圈與多芯線圈的自然減速過程，其結果如綠色雙線與紅色雙線。實驗發現，使用多芯線的第五版真空飛輪減速度最慢，當第四版真空飛輪的單芯線圈間隙增加至 5 mm 時，減速力矩比第五版的多芯線圈真空飛輪取線圈間隙 2 mm 更低，顯示增加線圈間隙或使用多芯線圈都可以減小馬達阻力，但線圈間隙不能太大；理想的設計應該是使用多芯線圈，並找出最理想的線圈間隙。

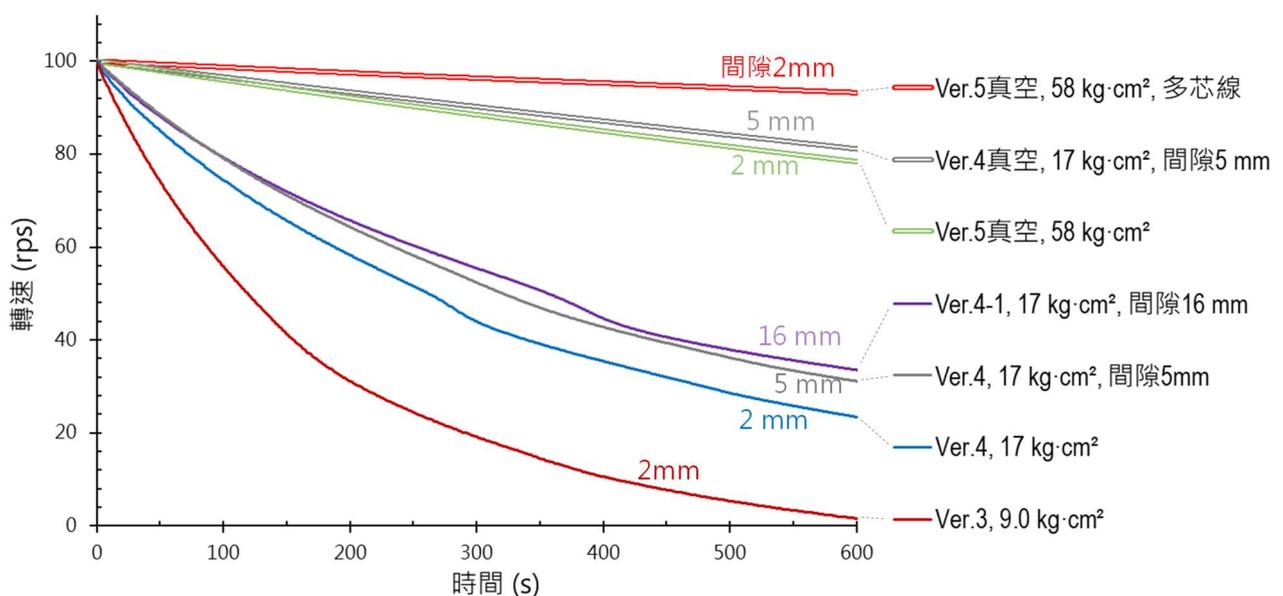


圖 25、飛輪由 100 rps 自然減速的過程。

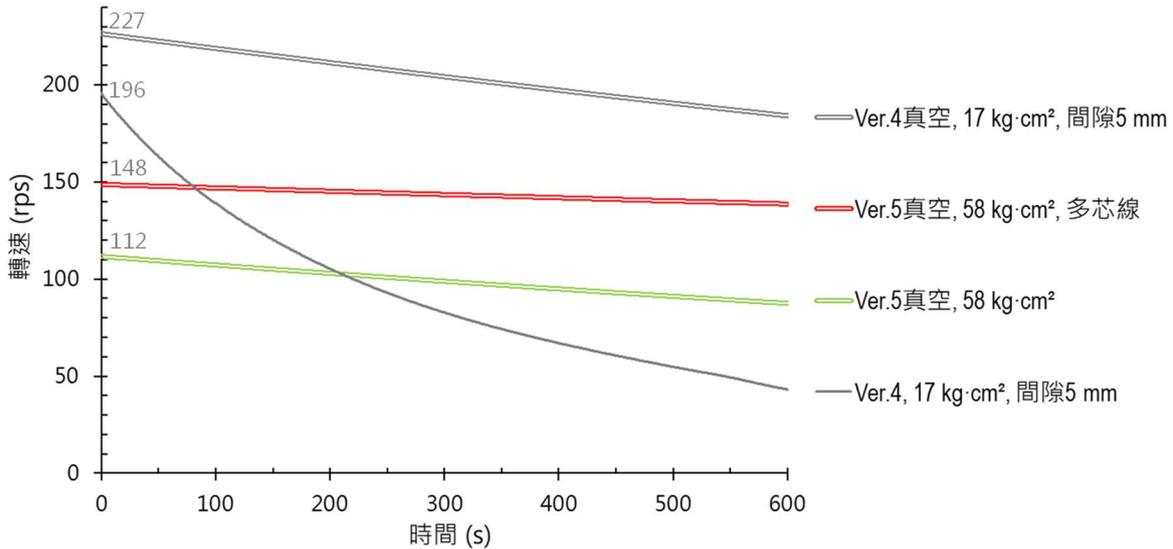


圖 26、第四、五版飛輪由最高轉速自然減速的過程。

圖 26 是第四、五版飛輪在最高速的減速過程，第四版飛輪的轉動慣量 $17 \text{ kg}\cdot\text{cm}^2$ ，線圈間隙 5 mm ，在大氣下最高轉速可以到 196 rps ，真空下最高轉速是 227 rps 。但增加線圈間隙不是減小阻力的好方法，因為馬達的力量會變小，發電的電壓也會變低。所以，第五版飛輪採用的方法是提高轉動慣量為 $58 \text{ kg}\cdot\text{cm}^2$ 、在真空操作、並使用多芯線圈，如紅色線，每分鐘轉速只減少 1 rps 。第五版飛輪採用單芯線圈時無法加速到 120 rps 以上，且減速度是多芯線圈的 2.5 倍以上。圖 27 是第 5 版飛輪採用單芯線與多芯線馬達，由 110 rps 開始的自然減速時間比較，採用多芯線時，動能減半的時間是 42.6 分鐘，是單芯線 14.3 分鐘的 3 倍，減速到完全停止的時間是 8 小時，遠比單芯線的 3 小時更久。

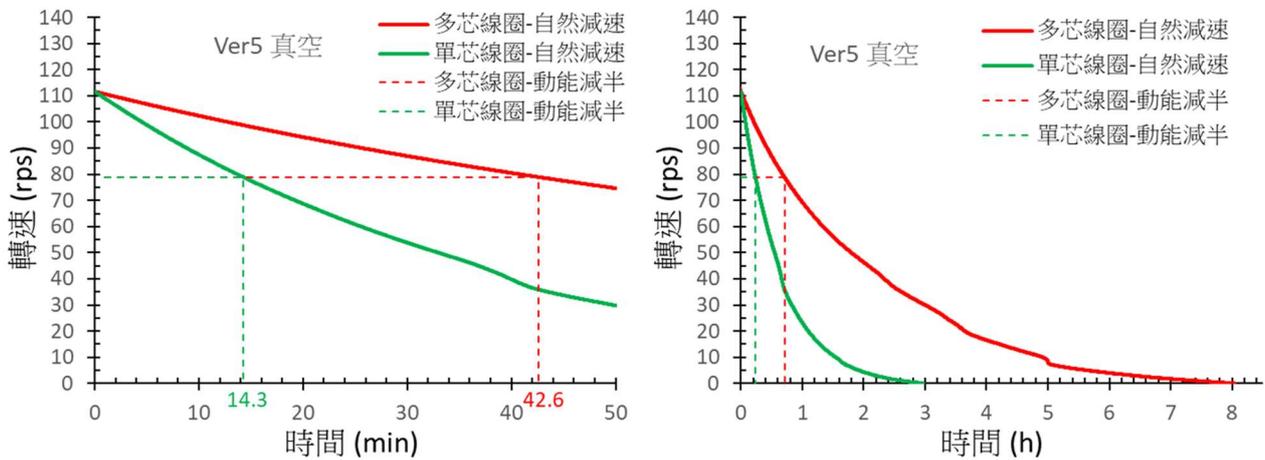


圖 27、第五版飛輪的半放電(動能減半)時間與停止時間。

(6) 實驗三：發電測試

為了測定飛輪的儲能效率，實驗三是發電測試，量測發電的電壓、電流以及轉速變化，並接上一個枱燈作為負載。以第五版多芯線圈真空飛輪接枱燈發電的過程的照片如圖 28、29。當飛輪以電壓 11.2 伏特供電給枱燈，最多可以持續 20 分鐘；若以電壓 13.2 伏特供電給枱燈，則可以持續 4.3 分鐘。



圖 28、第五版真空磁浮飛輪以 11.2 V 供電最多可持續 20 分鐘

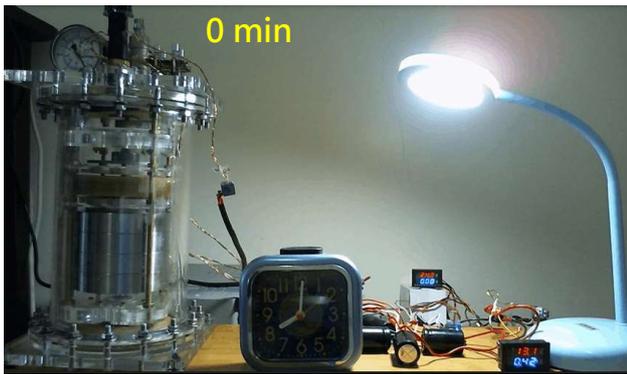


圖 29、第五版真空磁浮飛輪以 13.2 V 供電可持續 4.3 分鐘

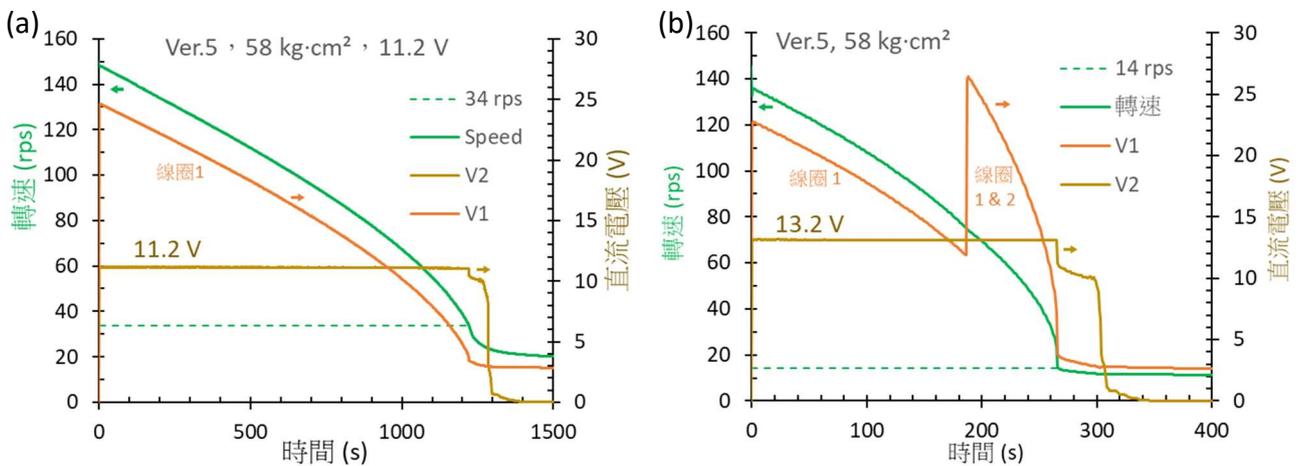


圖 30、第五版真空磁浮飛輪供電過程 (a) 11.2 V、(b) 13.2 V。

第五版多芯線圈真空飛輪接枱燈發電的轉速與電壓對時間的關係如圖 30，綠色線是轉速，棕色虛線是整流後的電壓，棕色實線是升降壓轉換後的固定電壓。以固定電壓 11.2 V 發電時，僅使用線圈 1，可穩定發電的最低轉速為 34 rps，如圖 30(a)。為了把更多旋轉動能轉換成電能，在以固定電壓 13.2 V 發電時，在高速下使用線圈 1 發電，當轉速減半時把線圈 1、2 串聯發電，可穩定發電的最低轉速為 14 rps，如圖 30(b)。

充放電功率量測過程如圖 31。充電功率為圖 9 中進入馬達的電流 I_0 與電壓 V_0 的乘積，放電功率為圖 12 中整流器輸出電流 I_1 與電壓 V_1 的乘積。將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 。充放電效率可定義為：

$$\text{充放電效率} = \frac{E_1}{E_0} \times 100\% \quad (12)$$

用電壓 11.2 伏特供電給柏燈的功率是 1.3 瓦，若以電壓 13.2 伏特供電，功率是 6 瓦。將圖 31 的充放電功率對時間積分，可求出的輸入能量、機械能使用率、發電效率、以及充放電效率，如圖 32。當供電電壓為 11.2 V、功率為 1.3 W，機械能使用率 95%，發電效率 62%，充放電效率 43%；當供電電壓提高為 13.2 V、功率增加為 6 W，且將線圈串聯發電，機械能使用率提高為 99%，發電效率 82%，充放電效率 45%。採用多芯線圈的充放電效率可達到 50%，若採用單芯線圈，充放電效率皆低於 40%。

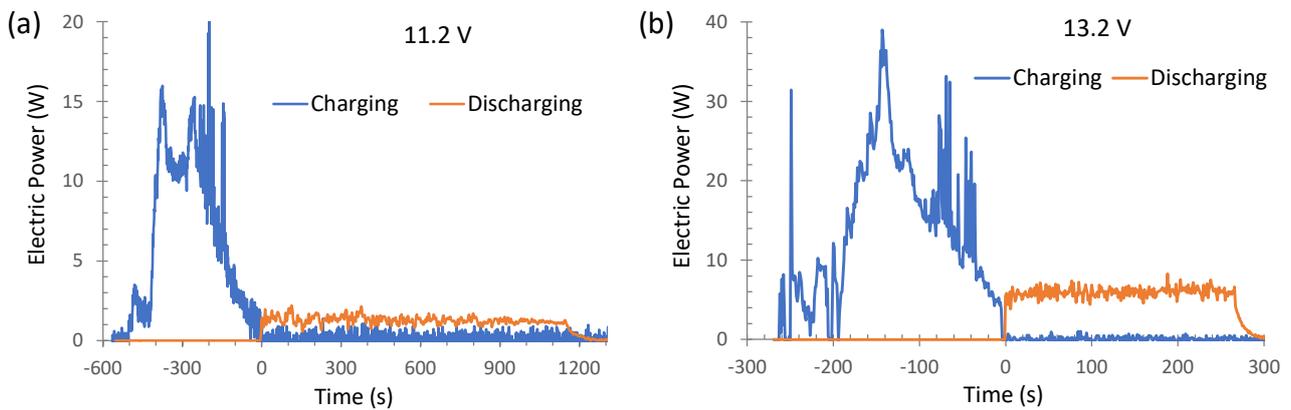


圖 31、第五版真空磁浮飛輪充電及供電 (a) 11.2 V、(b) 13.2 V 的功率。

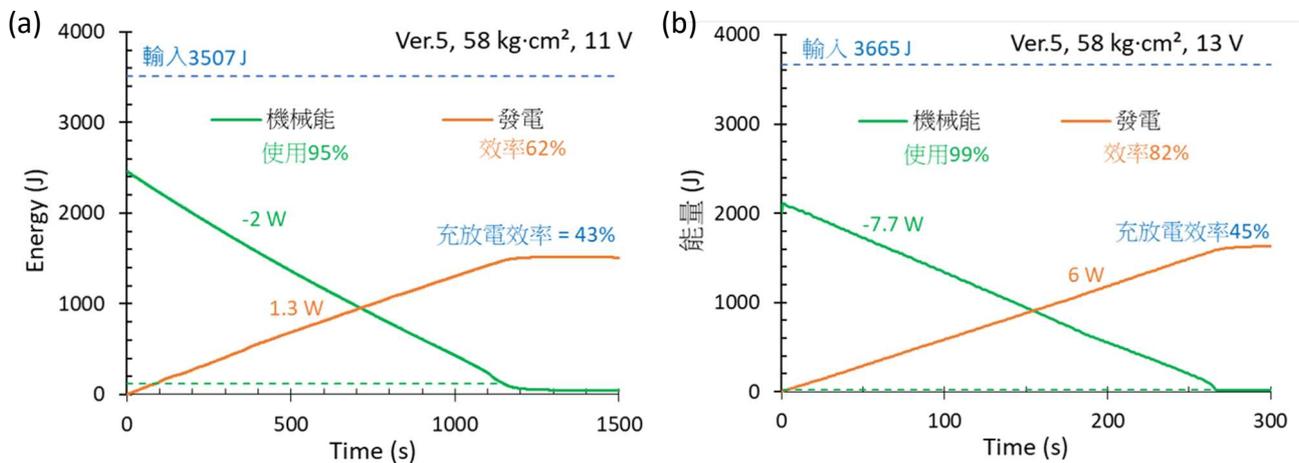


圖 32、第五版真空磁浮飛輪的輸入能量、機械能使用率、發電效率、以及充放電效率。

四、分析與討論

(一) 空氣阻力的能量損耗

空氣阻力造成的能量損耗，可以用損耗功率對轉速關係來分析，損耗功率是旋轉動能的變化率，阻力力矩是把減速功率除以轉速 ω 。圖 33 是第四版飛輪的損耗功率與減速力矩，紅色

線顯示在 1 大氣壓下損耗功率和轉速三次方成正比，藍色線顯示在真空下損耗功率和轉速平方成正比。右圖的紅色線顯示在 1 大氣壓下減速力矩和轉速平方成正比，藍色線顯示在真空下阻力力矩和轉速幾乎是線性關係。因為空氣阻力正比於速率平方，這個結果顯示真空下的阻力來源不是剩餘的氣體，而是其它物理現象，例如摩擦力或是渦電流效應。在轉速 45 rps 附近觀察到損耗功率與減速力矩突然增加，這是因為飛轉的旋轉發生晃動，詳細的原因還需要進一步的研究。

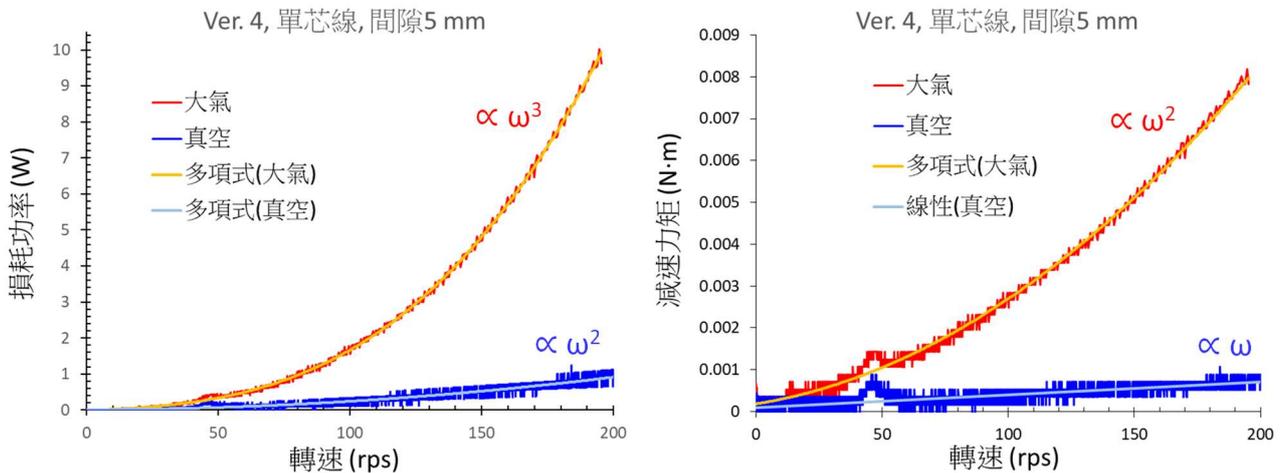


圖 33、第四版飛輪的減速力矩及損耗功率與轉速關係

(二) 渦電流的能量損耗

圖 34 是第 5 版真空飛輪在有發電和沒有發電下的阻力力矩以及損耗功率對轉速的關係比較。綠色線是單芯線飛輪有發電的情形，深綠色是沒有發電。紅色是多芯線飛輪有發電，深紅色是沒有發電。無論有沒有發電，多芯線飛輪比單芯線飛輪，功率消耗更低、阻力更小。取 97 rps 來比較，採用多芯線圈發電的減速力矩減少了 3.5 倍，損耗功率從 33% 減少到 13%。

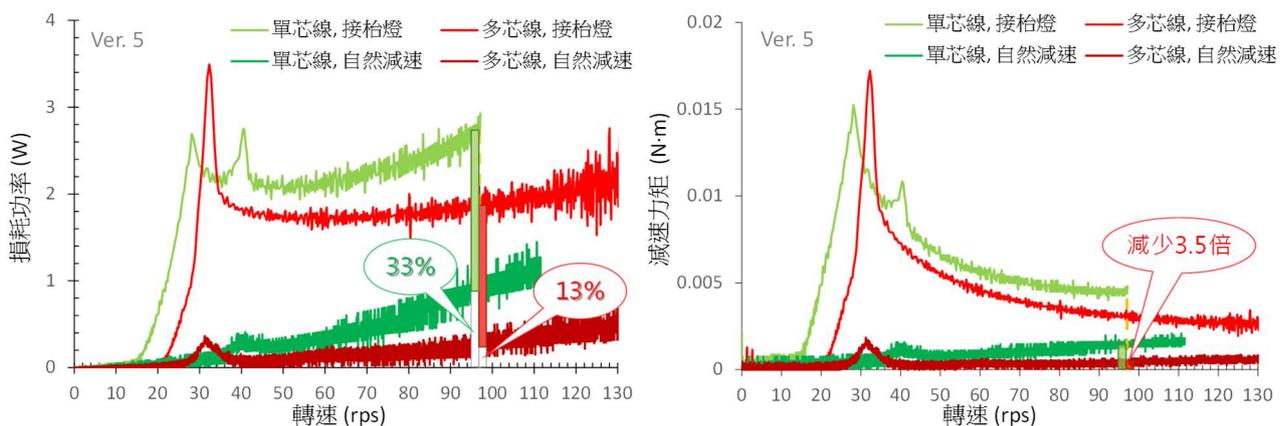


圖 34、第五版真空飛輪的減速力矩及損耗功率與轉速關係。

單芯線圈能量損耗較大的物理機制，可利用渦電流效應來解釋。如圖 35，將導線視為許多圓柱體單元(cell)串聯，單元長度=線徑= w ；馬達的磁鐵旋轉時，變動的磁場使導線內產生渦電流，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

電流迴路電阻則與線徑成反比($\propto 1/w$)，電阻損耗功率=(感應電動勢)²/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： $P_{\text{cell}} \propto (w^2)^2/(1/w) \propto w^5$ 。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，芯數為 k ，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，多芯線的圓柱體單元數增為 $k^{1.5}$ 倍，可推得多芯導線的渦電流損耗功率與芯線數 k 成反比：

$$P_{\text{eddy}} = k^{1.5} P_{\text{cell}} \propto k^{1.5} (w/k^{0.5})^5 \propto 1/k \quad (13)$$

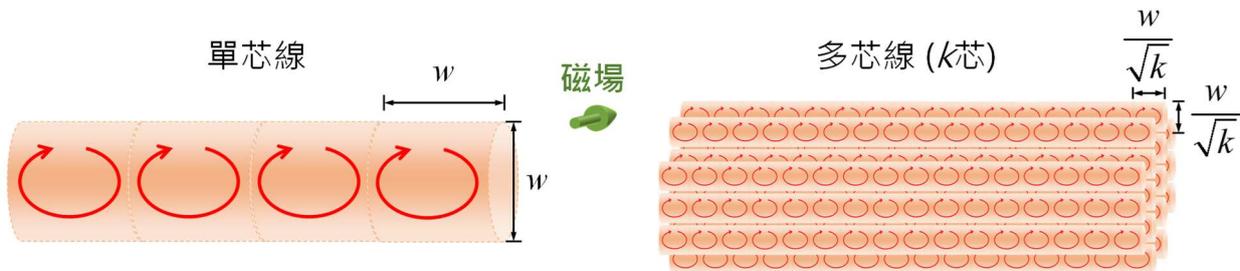


圖 35、單芯線與多芯線的渦電流效應。

以圖 35 為例，單芯線直徑 w ，採用 $k=16$ 、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 $1/16$ 。本研究的第五版飛輪採用 100 芯導線，由 (13) 可知渦電流損耗功率下降為 $1/100$ ，不再是造成飛輪能量損失的主因。因此，採用多芯線圈使待機時間延長 3 倍，自然減速停止的時間超過 8 小時，供電給枱燈可持續 20 分鐘。

五、結論與應用

依據前述的分析，飛輪能量損耗的主要原因是空氣阻力與渦電流效應，這兩個因素可以利用真空以及多芯線來克服。由各項實驗可歸納出降低飛輪能量損耗、延長儲能時間的有效方法與考量因素如下：(1)採用多芯線圈或增加線圈間隙，可以在高轉速實現低阻力，顯示磁浮軸承、飛輪、與馬達設計參數仍有相當大的改進空間。(2)增加線圈間隙會使馬達扭力變小，還會降低發電機的發電電壓與效率，不是減少阻力的好方法。(3)綜合低轉速與高轉速的結果可知，減少阻力且不影響馬達性能的飛輪設計是採用多芯線圈馬達、在真空下操作。(4)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並將飛輪尺寸放大使能量密度提高，就可以在更高的功率下長時間放電，並且提高充放電效率。

這個研究實現了直徑 98mm 的小型真空磁浮飛輪，可以供電 20 分鐘，未來進一步的研究可以探討減少振動與剩餘摩擦力，以及提高充電效率的方法，並放大飛輪尺寸來提高能量密度與輸出功率，即可實際應用。改進後的大型飛輪儲能裝置可以應用在風力、太陽能發電的電能儲存，還有解決電動車大量使用後充電功率大增的尖峰供電問題。

參考資料

- [1] “How can we store renewable energy? 4 technologies that can help,” 2022-5-22, <https://www.weforum.org/agenda/2021/04/renewable-energy-storage-pumped-batteries-thermal-mechanical/>
- [2] Pumped-storage hydroelectricity, 維基百科, https://en.wikipedia.org/wiki/Pumped-storage_hydroelectricity
- [3] Thermal energy storage, 維基百科, https://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_energy_storage
- [4] 各種電池的基本認識, 2021-02-20, <https://blog.xuite.net/joh3622/johnason/112606679>
- [5] R. Sebastián and R. P. Alzola, “Flywheel energy storage systems: Review and simulation for an isolated wind power system,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(9), 6803-6813, 2012.
- [6] Compressed-air energy storage, 維基百科, 2021-09-18, https://en.wikipedia.org/wiki/Compressed-air_energy_storage#Diabatic
- [7] Fact Sheet | Energy Storage (2019), 2021-09-15, <https://www.eesi.org/papers/view/energy-storage-2019>
- [8] Electricity Storage Technology Review, 2021-09-15, <https://www.energy.gov/sites/default/files/2020/10/f79/Electricity%20Storage%20Technologies%20%20Report.pdf>
- [9] Round Trip Efficiency, 2021-02-21, <https://energymag.net/round-trip-efficiency/>
- [10] BBC NEWS 中文, 電動車前方的一大「路障」: 報廢的鋰電池怎麼辦? <https://www.bbc.com/zhongwen/trad/science-60044382>
- [11] Intro to the Flywheel UPS: Powered by Motion, 2022-05-24, <https://www.qpsolutions.net/2017/06/intro-to-the-flywheel-ups-powered-by-motion/>
- [12] 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.
- [13] “Flywheels Turn Superconducting to Reinvigorate Grid Storage,” IEEE Spectrum, 2021-04-07, <https://spectrum.ieee.org/superconducting-flywheel-grid-energy-storage>

- [14] Ultimate tensile strength, https://en.wikipedia.org/wiki/Ultimate_tensile_strength
- [15] L. Zheng, “Super high-speed miniaturized permanent magnet synchronous motor,” PhD thesis, University of Central Florida, 2005.
- [16] Earnshaw's theorem , 維基百科 , 2021-01-30 ,
https://en.wikipedia.org/wiki/Earnshaw%27s_theorem
- [17] J. P. Yonnet, “Permanent magnet bearings and couplings,” IEEE Transactions on Magnetics, 17(1), 1169-1173, 1981.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Shaft Collars, <https://www.machinedsgn.com/shaft-collars/>
- [21] Sang-Hoon Kim, “Chapter 10 Brushless direct current motors,” Electric Motor Control: DC, AC, and BLDC Motors, Elsevier Science, 2017.
- [22] “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
- [23] “Making an axial flux generator,” Youtube video, posted by Chris workshop on 2014-01-04, <https://youtu.be/flHOG7EcCU>
- [24] Rectifier , 維基百科 , 2021-05-11 , <https://en.wikipedia.org/wiki/Rectifier>
- [25] Diode bridge , 維基百科 , 2021-05-11 , https://en.wikipedia.org/wiki/Diode_bridge
- [26] Torsion spring , 維基百科 , 2021-05-11 , https://en.wikipedia.org/wiki/Torsion_spring

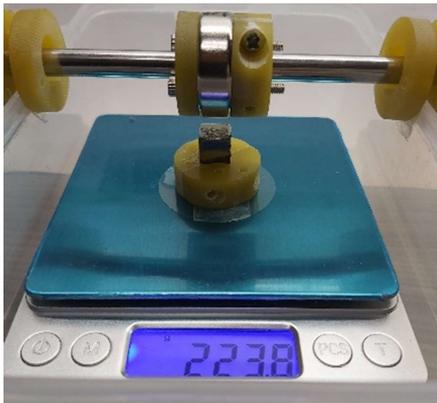
附錄一、研究過程照片



製作馬達、發電機線圈



組裝飛輪



量測磁鐵磁力均勻性



測試飛輪旋轉時間

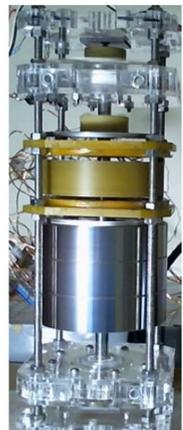
第一版



第二版



第三版



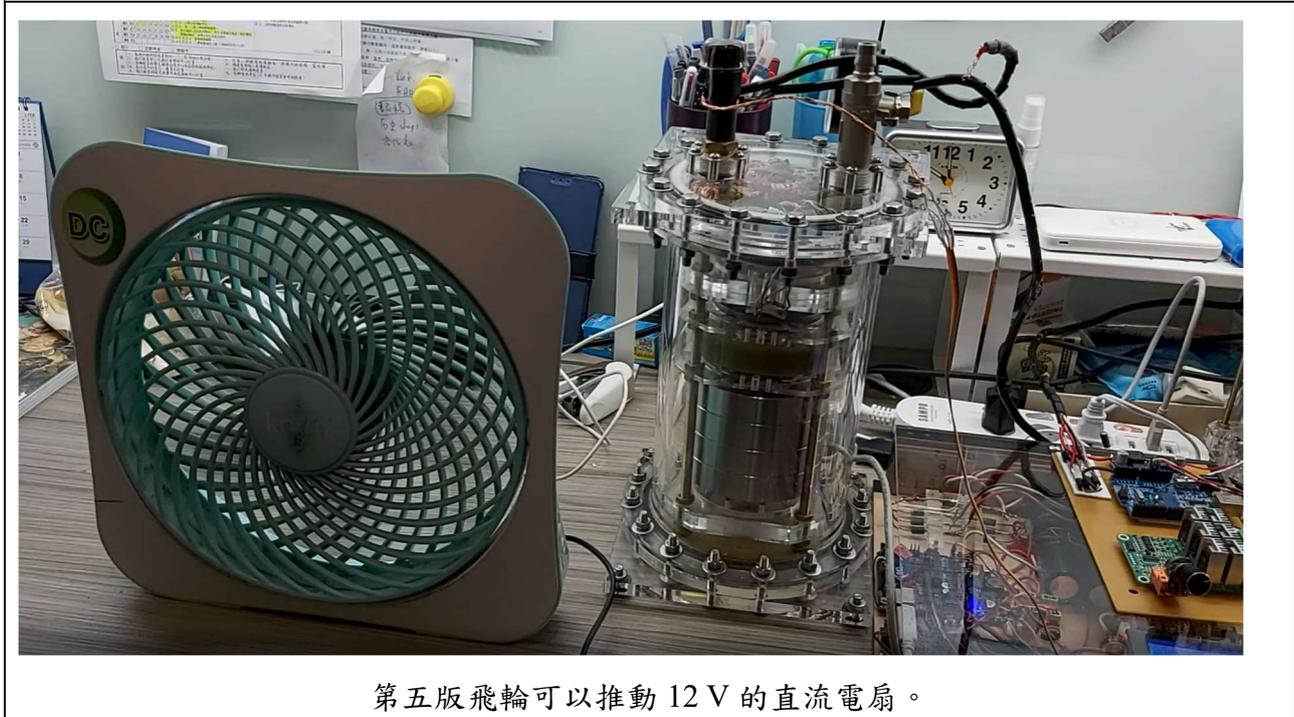
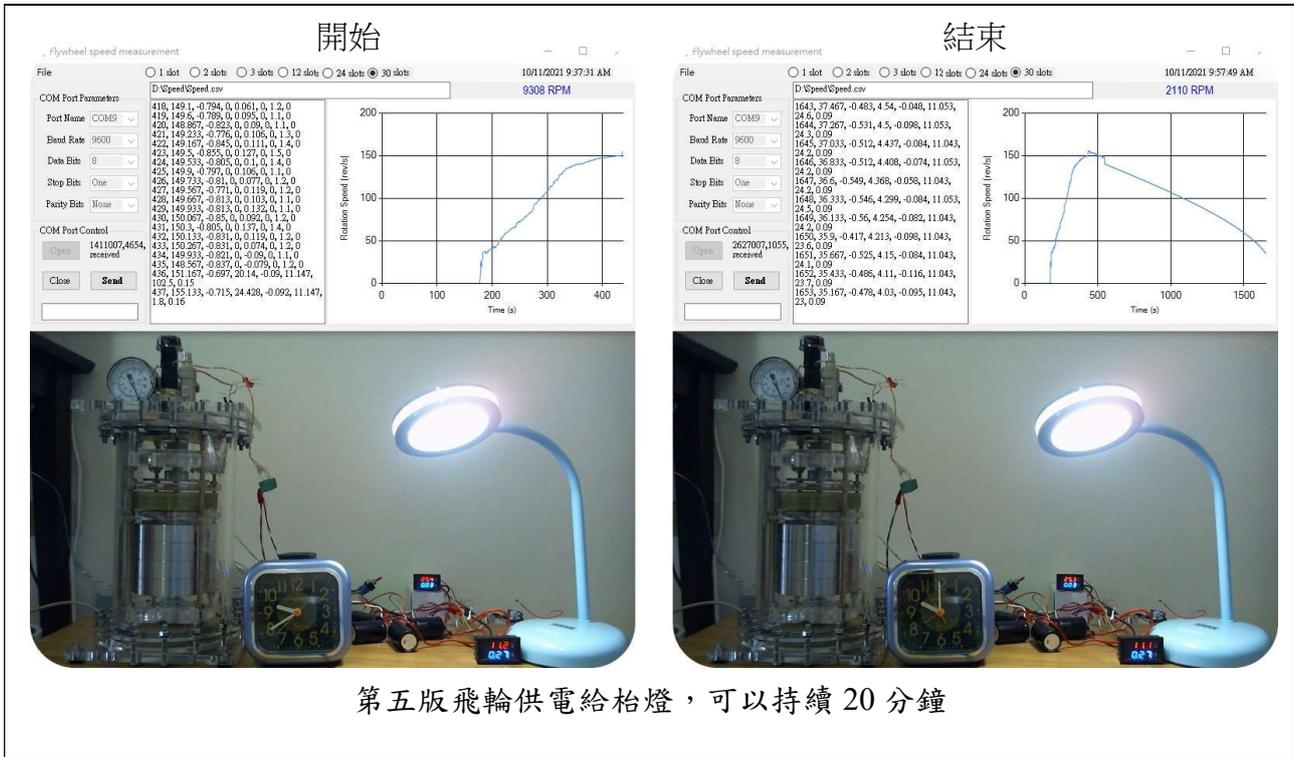
第四版



第五版



飛輪照片



附錄二、Arduino 程式碼

```
#include <FreqCount.h>  //
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include "Arduino.h"

int PWM_Pin = 6; //Speed control pin = 6
int SetSpeed=0;
int InData=0; // for incoming serial data
unsigned long CommandTime=0;
unsigned long WaitTime = 100; //wait for 0.1 Seconds before next command
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
const float HalfRotationalInertia = 0.0029; // I = 0.0058 kg·m2
unsigned long DisplaySecond;
unsigned long DisplayRPM;
float DisplayJoule;
float DisplayPercent;
String Space20 = "                ";
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,20,4);

void setup() {
  lcd.begin();
  Serial.begin(9600);
  pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT); //LED_BUILTIN is Pin 5
  pinMode(PWM_Pin, OUTPUT); // Pin 6
  FreqCount.begin(1000);
}

void loop() {
  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
}
unsigned long count = FreqCount.read();
myTime = millis();
DisplaySecond = float(myTime - CommandTime)*0.001;
DisplayRPM = count*2; //Speed in RPM = count*60/30
DisplayJoule = HalfRotationalInertia*sq(0.20944*count); //0.20944=2*pi/30
DisplayPercent = 1.111111e-5*sq(count); //Energy Percentage in % =
100*(count/3000)2=1.111111e-5*count2
String LCD1stLine = "Flywheel V5: ";
LCD1stLine += String(DisplayPercent,2) + "%";
if (LCD1stLine.length()<20) { LCD1stLine += Space20.substring(LCD1stLine.length()+1); };
String LCD2ndLine = "Time: ";
LCD2ndLine += String(DisplaySecond) + " s";
if (LCD2ndLine.length()<20) { LCD2ndLine +=
Space20.substring(LCD2ndLine.length()+1); };
String LCD3rdLine = "Speed: ";
LCD3rdLine += String(DisplayRPM) + " RPM";
if (LCD3rdLine.length()<20) { LCD3rdLine +=
Space20.substring(LCD3rdLine.length()+1); };
String LCD4thLine = "Energy: ";
LCD4thLine += String(DisplayJoule,3) + " J";
if (LCD4thLine.length()<20) { LCD4thLine +=
Space20.substring(LCD4thLine.length()+1); };
//lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);

```

```

lcd.print(LCD1stLine);
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print(LCD2ndLine);
lcd.setCursor(0, 2);
lcd.print(LCD3rdLine);
lcd.setCursor(0, 3);
lcd.print(LCD4thLine);
Serial.print(myTime);
Serial.print(",");
Serial.print(count);
Serial.print(",");
Serial.print(I1_Val);
Serial.print(",");
Serial.print(V1_Val);
Serial.print(",");
Serial.print(I2_Val);
Serial.print(",");
Serial.print(V2_Val);
if (Serial.available()) {
  InData = Serial.parseInt(); // read the incoming byte:
  if ((0<InData)&&(InData<=256)&&(myTime-CommandTime>WaitTime)) {
    SetSpeed = InData-1;
    analogWrite(PWM_Pin,SetSpeed);
    CommandTime = myTime;
  }
}
Serial.print(",");
Serial.println(SetSpeed);
digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
}
}

```

附錄三、C#程式碼 (介面設定及測量部份)

```
private void Form1_Load(object sender, EventArgs e)
{
    string[] ports = SerialPort.GetPortNames();
    cboPortName.Items.AddRange(ports);
    cboPortName.SelectedIndex = 0;
    cboBaudRate.SelectedIndex = 2;
    cboDataBits.SelectedIndex = 2;
    cboStopBits.SelectedIndex = 0;
    cboParityBits.SelectedIndex = 0;
    Graphics g = panel1.CreateGraphics();
    Pen p = new Pen(Color.Black);
    SolidBrush sbR = new SolidBrush(Color.Red);
    SolidBrush sbG = new SolidBrush(Color.Green);
    SolidBrush sbB = new SolidBrush(Color.Blue);
    g.DrawEllipse(p, 0, 0, 10, 10);
    g.FillEllipse(sbR, 0, 0, 10, 10);
    panel1.Refresh();
    toggleEnable(false);
    chart1.ChartAreas[0].AxisX.Title = "Time (s)";
    chart1.ChartAreas[0].AxisY.Title = "Rotation Speed (rps)";
}

private void serialPort1_DataReceived(object sender, SerialDataReceivedEventArgs e)
{
    dataR = serialPort1.ReadLine();
    dataNum++;
}

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 + 1,0);
    dataArray[1, dataNum] = Math.Round(Double.Parse(sArray[1]) / SlotNum,2); //
Speed
    dataArray[2, dataNum] = Math.Round((Double.Parse(sArray[2]) -
        5120)/5120*2.5/0.185,3); //I1
    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]), 0); //SetSpeed
    RotSpeed = Math.Round(dataArray[1, dataNum],3);
    chart1.Series[0].Points.AddXY(dataArray[0, dataNum], dataArray[1, dataNum]);
    dataR = dataArray[0, dataNum].ToString() + ", " + dataArray[1,
dataArray[0, dataNum].ToString() + ", " + dataArray[2, dataNum].ToString() + ", " + dataArray[3,
dataArray[0, dataNum].ToString() + ", " + dataArray[4, dataNum].ToString() + ", " + dataArray[5,
dataArray[0, dataNum].ToString() + ", " + dataArray[6, dataNum].ToString());
    txtReceive.AppendText(dataR + "\r\n");
    txtReceive.Refresh();
    lbSpeed.Text = (Math.Round(RotSpeed,2)).ToString() + " RPS";
    lbSpeedRPM.Text = (Math.Round(RotSpeed*60.0,0)).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), SetSpeed");
        }
    }
    using (StreamWriter sw = File.AppendText(lbFileName.Text))
    {
        sw.WriteLine(dataR);
    }
    dataR = "";
}
}

```