

教學用慢轉速發電機

周鑑恒

發電機原理是從國中開始就一直出現在課本中的主題，因此幾乎人人都略知一二。但若問：發電機接通各種電器（即發電機有無負載）與否，對發電機之運轉有何影響？答案則顯非三言兩語所能清楚解釋，這個問題涉及動能轉變成電能的若干細節，要到高年級和大學課程中才有較完整的說明。根據楞次定律，磁鐵與感應線圈相對運動，造成感應線圈的磁通量變化，感應線圈中即會產生感應電動勢，若感應線圈為通路，此感應電動勢造成感應電流，則感應電流與磁鐵之作用力將阻撓此二者之相對運動，並在此稱之為磁阻尼（magnetic damping）的減速過程中，將磁鐵與（或）感應線圈之動能轉變成電能；若另以外力迫使兩者不得減速，則外力必須作功，由外力作功所須消耗的能量變成電能。

本文的目的，在於以儘可能不更動其基本構造的方式，改進一般教科書【註一】中提到的典型發電機（亦即發電機定子為永久磁鐵，發電機轉子在此永久磁鐵造成的磁場中旋轉），加強該典型發電機的發電效率，亦即使其能在較慢轉速時亦可發出可供明顯觀察之電力（例如點亮為數不同的發光二極體或小燈泡，而無須使用任何電錶），以便進一步逼近教科書中所述的原理，突顯轉子旋轉之速度、方位與感應電動勢之間的關係，強

調發電機負載和發電機消耗能源之間的關係，進而清楚演示教科書中有關發電機之相關原理和內容。本文提出的改良發電機教具，只在一般教科書中提到的典型發電機轉子中巧妙增添一不動的導磁鐵芯，以達到上述之目的。

如果改裝市售發電機；用人力手搖的方式轉動此發電機，並不容易達到上述目的。一方面，基於發電效率、結構強度、造價、尺寸大小等工程上的考量，被外殼包封的市售發電機，內部構造設計得較為複雜，即使剝開外殼，初學的觀眾或學生也常無法扼要掌握其關鍵原理；另一方面，市售發電機有無接通電器負載時，其轉動所須的力矩受較多因素影響，例如：轉子（rotor）鐵芯和定子磁鐵間之引力，會與感應電流與定子磁鐵之斥力混淆；又例如：轉子本身若具相當大之質量，且快速轉動，接通電器負載的瞬間，一開始轉子速度只須稍稍變慢，由轉子巨大動能的一小部分變成電能，待動手轉動發電機的觀眾或學生察覺速度改變再用力加速，此時間差，使得負載造成的影響不能立即反映，外力作功和發電機負載的關聯也就變得模糊。外力作功時之施力變化如此波折，觀眾或學生以手搖轉發電機發電，由感官判斷外力作功時之變化，更容易發生錯覺。特別是以齒輪組增加相當重的發電機轉子轉速，

其轉速變化尤其不易明顯察覺。因此，利用市售的發電機演示外力做功和發電機負載的關係，效果不甚理想【註二】。作者曾研製過微型發電機模型，以演示機械能轉變成電能的過程【註三】，惟根據演示教學的實務經驗，演示教具尺寸應與手掌大小相仿。若直接放大原微型發電機模型尺寸，而不在設計上作必要之修正，發電效果不如原微型發電機模型。

針對上述之缺點和要求，改良一般轉子鐵芯之設計，放大發電機模型之尺寸；提高其發電效率，使之與轉子為漆包線纏繞鐵芯的發電機雷同；大大減輕轉子之重量，使得轉子之轉動，只受軸承的些微摩擦力以及感應電流與磁鐵之間作用力影響，突顯發電機負載電器時轉子所受磁阻尼現象，即可明白演示機械能轉變成電能的過程。

圖一所示為本模型之理想造型，其設計的重點是：(一)把鐵芯和轉子分離，鐵芯固定在轉子中，卻不隨轉子轉動，但仍發揮鐵芯導磁和增強轉子線圈磁通量 (magnetic flux) 之優點 (轉子質量因此幾乎只剩轉子線圈的質量) 而固定在轉子中不動的鐵芯因不須再被反覆磁化，一段由生鐵和稀土強磁組成的磁鐵即能發揮鐵芯的功能。雖此段轉子內磁鐵兩端受外側磁鐵極大的引力，但所受之淨力幾乎為零，很容易利用從轉子一側之圓孔 (參見圖二) 伸入轉子中的支架，固定這段磁鐵。磁場於是被局限在轉子內的磁鐵和轉子外的磁鐵中，磁力線形成封閉曲線，在磁鐵間隙間形成極強的磁場，轉子線圈即切割這段磁力線，造成磁通量變化。(二)

轉子線圈產生之交流電力由電刷輸出，並接上各種不同功率的負載 (如燈泡等)。(三)轉子結合轆轤，由重錘驅動。根據重錘之重量和下墜速度估計和定性顯示重力做功之功率；用適當機關擒縱轉子，以方便實驗之開始和暫停。

考慮經費限定在 2000 元以下、製作程序儘可能簡化、讀者只動用一般學校可運用之設備就能自製等條件，本模型的完成圖如封底圖 A 所示，雖然與理想藍圖之間有若干取捨，但已成功達到設計的要求。

所須材料：

- (1) $1.5 \times 3 \times 6 \text{ cm}^3$ 的釹鐵硼稀土強磁四塊 (充磁後 $3 \times 6 \text{ cm}^2$ 的兩面為磁極，每方磁石約 400 元，可電 04-23379771 貨比三家)；
 - (2) 用來導磁的鐵塊若干 (價格不貴，可用雷射切割，可洽詢台中彰化地區的板金工廠)；
 - (3) 直徑 0.8 mm 的漆包線約半公斤；
 - (4) 兩顆內徑 5mm、外徑 10mm 的滾珠軸承；
 - (5) 一根直徑 8 mm、長 25 cm 的鉛棒；
 - (6) 一柄長螺絲起子；
 - (7) 用作支架的白楊木條若干 (主要為截面 $1.6 \times 3.1 \text{ cm}^2$ 的木條，五金行均有售)；
 - (8) 小燈泡 (約 6V 即可發光) 發光二極體若干，以及小型開關；5 台兩鉛錘三個，直徑 0.15mm 釣魚線 (可荷重約 3.4 kg)；
 - (9) AB 膠、透明膠帶、螺絲釘、厚保麗龍板
- 製作程序 (只須配合稀土磁鐵之大小，讀者可依各別的考量和施工之精度，自行設計不同尺寸之支架，有關支架尺寸和細節即

不贅述)：

首先，依圖二用小木條製成轉子框架，轉子框架左側接鉛棒製成的轆轤，轉子框架右側有一孔，可容一柄長螺絲起子伸入，再將漆包線纏繞此轉子框架約 250 匝（勿覆蓋右側之孔），即製成感應線圈，如圖 B (a)。

其次，把直徑 8 mm、長 25 cm 的鉛棒兩端直徑用車床車成 5mm，一端長 3.5cm，另一端約 7mm，分別插入兩個滾珠軸承中；以此鉛棒作為轆轤（封底圖 C 所示），長 3.5cm 的一端牢牢以 AB 膠接合轉子。接著以白楊木條製成適當尺寸之牢固平臺（以 AB 膠、螺絲釘增加其結構強度），平臺上加裝支架以固定軸承，轉子部分的安裝即完成。

白楊木製平臺另一側再設支架，精確固定長螺絲起子，使螺絲起子可伸入轉子而絲毫無礙其轉動（圖 B (b) 所示）。轉子內磁鐵則由兩中間鑽孔的小木塊和兩塊稀土強磁構成，兩塊稀土強磁隔著兩小木塊（理想狀況可以鐵塊代替木塊，惟加工稍麻煩）相互吸住，先以 AB 膠黏合，外側再以透明膠帶包覆裹緊。兩小木塊中間鑽的孔只容納長螺絲起子插入（亦如封底圖 B）。長螺絲起子伸入轉子插入兩小木塊的小孔，磁鐵即被固定在轉子內。

最後，如圖 B (a) 所示，將兩塊稀土強磁分別先吸住鐵塊，再分別嵌入由木條拼成的兩塊木板（其中各預留一 $6 \times 3.1 \text{ cm}^2$ 的孔），以 AB 膠黏牢，再將木板安裝在木架平臺上，使磁鐵正對磁鐵。此時磁鐵間的引力驚人，須先將轉子轉離磁極附近，磁極上覆以保麗龍，以免長螺絲起子被磁鐵引力撈

彎，待兩片木板均安裝妥當，並以 AB 膠加強強度後，引力方才平衡，長螺絲起子才又再度安穩將磁鐵固定在轉子當中。事成之後用削尖的木片挑出保麗龍。

轉子線圈產生之電力由轉子兩側的電刷輸出（如封底圖 B 及圖三所示），並接上各種負載（如燈泡等）。

操作程序：轉子由轆轤傳動，釣魚線先纏在轆轤一側，並懸以鉛錘；轆轤另一側則繫上另一吊著小輕球之釣魚線（如封底圖 C 所示、圖四所示），用一小截直徑約 2mm（絕不可太粗）的鐵絲，吸在磁鐵上，絆住轉子轉動，實驗即將開始了。拿開鐵絲，釣魚線立即拉動轆轤，驅動發電機發電；同時使另一側釣魚線纏在轆轤上，以備再次實驗。實驗可演示：(1) 一個 5 台兩重鉛錘只能使一只燈泡發亮（如封底圖 D 所示），當負載二只或三只燈泡時，鉛錘下降速度明顯變慢（如封底圖 E 所示），且不再能點亮小燈泡；(2) 發電機僅以一鉛錘驅動時，無負載和僅負載一燈時，該鉛錘下降速度相差極大。此顯示負載燈泡消耗了重錘之位能，而無負載時，重錘位能幾完全變成動能；(3) 一個 5 台兩重鉛錘能使一只燈泡發亮，兩個鉛錘則能使兩只燈泡發出相似亮度（雖兩個 5 台兩重鉛錘亦能使三只燈泡發光，但亮度相當弱），三鉛錘即能使三只燈泡發出相似亮度的光（如封底圖 D 所示）（發電機轉子均約每秒 2 轉左右）；(4) 接上六個並聯，但其中三個與另外三個導通方向相反的發光二極體（參見註二），僅以一個鉛錘驅動，發電機即能使三個發光二極體發光（如封底圖 F 所示），並可根

據兩組發光二極體各自閃爍，輕易分辨電流方向；(5) 一般類似模型所演示的法拉第定律等，且因其轉速極慢，甚至可在發電機運轉的同時，容許師生從容解說、討論、觀察發電機發電原理的細節（例如感應線圈為何輸出交流電、轉子之方位為何時感應電動勢或感應電流最大）。

本儀器和實驗可進一步改良：

- (1) 提高精度：縮小磁鐵間隙；簡化轉子結構，儘可能減輕轉子質量；甚至以鋁線（密度約為銅的三分之一）製成漆包線；電刷可以更順利運轉。
- (2) 依圖一之設計儘量簡化整組儀器之構造，以壓克力等透明材料製作更簡潔的支架，使實驗主題更加完整而凸出。
- (3) 增加發電機各部強度，特別是軸承、轆轤、電刷等部分，使之可靠耐用，減少故障，滿足學生或觀眾的好奇和隨意動手的衝動。若可購得尺寸更大的磁鐵，整組發電機模型再稍放大，結構自然被強化。
- (4) 轉子線圈繞組更加整齊密實，增加發電效率，或選用 1.2V 左右即能發出可見光的燈泡（但較易燒斷燈絲），使發電機在更低轉速即足以點亮燈泡。

注釋：

- 一、一般非工程方面的教科書提到發電機時，均以此型發電機為例，雖然此型發電機效率不高。參見：國民中學理化第三冊第十二章，第 39 頁，國立編譯館

主編、出版，中華民國八十八年一月初版；H. D. Young, University Physics, 8thed, pp. 843-844, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Singapore, 1992。

- 二、葉蓉樺，“由發電機操作進行電路承載概念之教學”，2001 物理教學及示範研討會論文集（即將出版）。
- 三、周鑑恒，“簡明扼要的發電機模型”，科學教育月刊，第 227 期，第 44-46 頁，中華民國八十九年二月。

圖說：

圖一、本模型之理想藍圖（略掉部分蕪雜的線條，以凸顯設計要點）。注意：轉子只由線圈構成，所有導磁鐵芯和磁鐵均不動。支桿從轉子側方圓孔伸入轉子，固定轉子中之導磁鐵芯。電刷部分詳見封底圖 B 及圖三。

圖 A、全組模型之實物攝影：左前方為用以驅動轉子的 5 台兩鉛錘；前方為二組不同的負載，一組接通三種負載燈泡，另一組接通發光二極體，每種負載燈泡或發光二極體均以開關控制；發電機模型在後方，以木架安裝，其左側為轉子轆轤，其右方為一柄長螺絲起子用來固定轉子內的磁鐵。

圖二、轉子框架示意圖。左側圓孔與轆轤鋁棒牢牢接合，右側較大圓孔直徑比螺絲起子直徑大；漆包線即纏在木條形成的空槽中。

圖 B、轉子和其內部磁鐵之實物攝影：(a)

漆包線纏繞此轉子框架約 250 匝，製成感應線圈，感應線圈內外共有四方極化方向一致的磁鐵。(b) 螺絲起子伸入轉子而絲毫無礙其轉動，轉軸傳動轉子(感應線圈)。(封底圖 B) 長螺絲起子伸入轉子，插入兩小木塊中間小孔，固定磁鐵在轉子內。刮掉感應線圈一端的漆，繞成螺旋狀，輕裹螺絲起子，作為電刷。

圖 C、鋁棒車製成轉軸。釣魚線纏在轉軸一側近 60 匝，並懸以鉛錘；轉軸另一側則繫上另一釣魚線；此側釣魚線拉動轉軸，驅動發電機，同時使彼側釣魚線纏上轉軸，預備再次實驗。

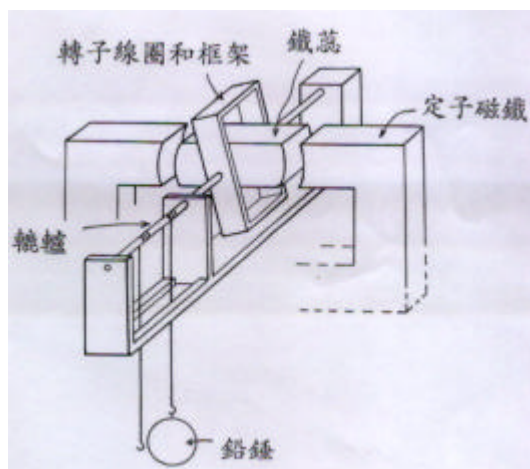
圖三、以裸銅絲抵住鋁棒軸心作為另一電刷，鋁棒的軸承清晰可見。

圖四、釣魚線先纏在轉軸一側，懸以鉛錘；轉軸另一側則繫上另一釣魚線，此側釣魚線並懸一小輕球。

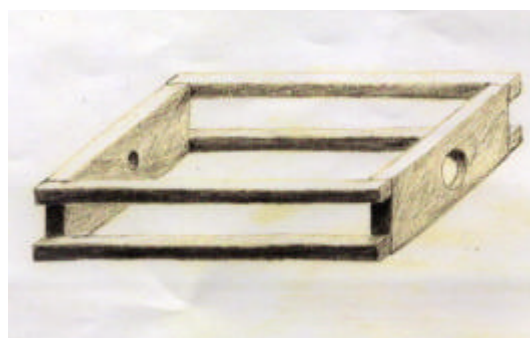
圖 D、一個鉛錘使一只燈泡發亮，兩個鉛錘使兩只燈泡發光，三鉛錘使三只燈泡發光。左方亮斑為模糊的重錘，曝光時間均相同。

圖 E、一個鉛錘驅動負載一只、二只、三只燈泡的發電機時，鉛錘下降速度(依序由左至右)明顯不同(曝光時間 1 秒，閃光燈每秒閃十次，鉛錘長約 5.5 公分，由照片可見，每秒鉛錘僅慢慢下降 5.5 公分左右)。

圖 F、以一個鉛錘驅動，發電機即能使許多發光二極體同時發光。



圖(一)



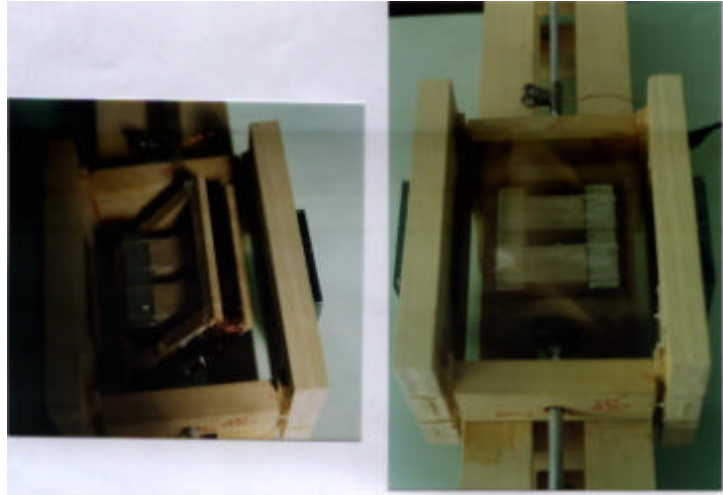
圖(二)



圖(三)



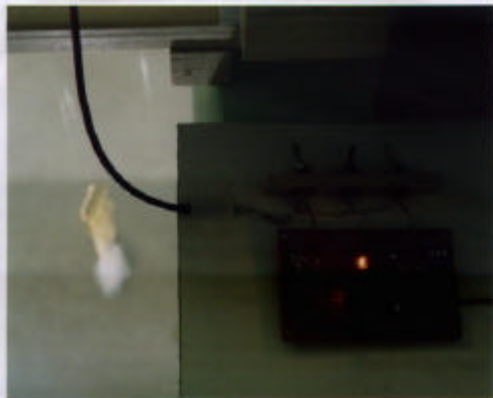
圖(四)



(a)

圖(B)

(b)



圖(D)



圖(E)