

簡明扼要的發電機模型

周鑑恆

電磁感應現象之發現，對人類文明的進步，影響至為深遠。西元一八三〇年，美國學者亨利（Joseph Henry）首先察覺電磁感應，一年後法拉第（Michael Faraday）利用類似變壓器的實驗裝置，也發現同樣的現象。用現在的語彙來描述，法拉第所得的結論為：空間中任何封閉路徑之感應電動勢（induced emf），正比於通過該封閉路徑所圈成面積的磁通量變化率。一八三四年，俄國人楞次（Heinrich Friedrich Lenz）提出了決定感應電流方向的簡單法則：若因為磁鐵與感應線圈相對運動而造成感應電流，則此感應電流與磁鐵之作用力將阻撓此二者之相對運動。一八五一年 Von Helmholtz 指出此項敘述乃是能量守恆的必然結果。大約三十年後，馬克斯威爾（J. C. Maxwell）則以更普適的陳述方式闡釋感應電流的方向：因感應電流也會產生磁場，感應電流的方向，會使其所產生的磁場反抗造成此感應電流之磁通量變化。時至今日，人們以極簡潔的公式描述電磁感應，稱之為法拉第定律。

發電機是電磁感應最原始，也是最重要的應用之一。又因其基本構造簡單，在日常生活中被廣泛使用，發電機更是電磁感應教學的絕佳範例。從初中到大學的物理教科書中，都提到發電機的原理和構造。但是，初中課本也許只介紹：線圈在磁鐵兩極間快速轉動，以致於通過線圈的磁場大小就不斷改變，則線圈內便有感應電流發生；而在大學課程中，則必須定量陳述法拉第定律，依據楞次定律清楚決定感應電流之方向，同時經由分析感應電流使線圈在磁場中受力的情形，解釋機械能如何轉換成電能，驗證能量守恆。正如人類探索電磁感應的歷史一般，一步步加深對此現象之瞭解。因此發電機原理，實包含了電磁感應、載有電流的導線在磁場中受力、以及能量守恆等重要物理現象。（註）。本文設計一相當簡單之發電機模型，以便扼要演示上述有關電磁感應較深入的細節，所需的材料如下：

- (1) 用作各項支架的木板，以及約 $10 \times 32 \times 220 \text{mm}^3$ 之木條（五金行均有售）。
- (2) 直徑約 1 公分的軸承兩個、滑輪一個（台中火車站附近的建國市場有各種貨色可供挑選，輕巧者較佳）。
- (3) 10 磅左右的釣魚線，及裸金屬片。
- (4) 配重（讀者可自行設計）。
- (5) 發光二極體（台北光華商場幾十元可買十幾個）。
- (6) 漆包線約 90 公尺（國中、高中物理實驗常須用到漆包線，各學校實驗室應該有。若要外購，一次要買整捆上千公尺，不划算）。

(7) $50 \times 50 \times 6 \text{ mm}^3$ 之稀土強磁二塊（本模型所有其他零件均非常便宜，唯此項須定作，總價約台幣 2,000~3,000 元，詳情請電 04-3379771，貨比三家，當有討價還價之餘地）。

爲了避免意外的麻煩，此發電機之轉子要首先完成，其他零件再配合組裝。依照如圖(一)的方式切削木條，以砂紙裹住轉軸的部分，然後用手轉動，自然而然就可以磨出圓柱狀的轉軸，並可逐漸調整其半徑，使之可精密套入軸承。轉子上的方孔須配合線圈之尺寸；其次把漆包線一層層地纏繞一截面積約 $4 \times 4 \text{ cm}^2$ 、由數塊物體拼合而成之方形柱（完成後易於拆解取出），相鄰兩漆包線之間以雙面膠黏結，纏繞約 500 匝後即作成感應線圈，將其置於轉子的方孔中；並參考各級教科書的插圖裝配磁鐵（兩塊磁鐵異極相對，以便在線圈旋轉的空間形成近似均勻的強磁場）、電刷、軸承等。最後，用下方懸以配重之細釣魚線纏繞轉軸（如圖(二)所示，釣魚線須繞轉軸兩圈，避免打滑），作為發電機發電之動力。當配重落下時，所發出的電力足可使發光二極體發光，如封底照片①所示。

這具發電機模型之特色是：(1)藉助稀土強磁之高磁場，即使轉速不快，亦足以使發光二極體閃爍發光，頗有慢動作鏡頭放映的效果。(2)用兩組並聯但導通方向相反的發光二極體，如圖(三)所示，既可顯示發電機產生感應電流，又可顯示此交流電流之方向。定性但清楚地說明了法拉第定律和楞次定律的要點。(3)使用配重拉動發電機，可以測量出發電機負載發光二極體和斷路空轉時，配重下降速度之不同。這凸顯了能量守恆原理。若以金屬導線代替發光二極體，磁刹車的效應會隨感應電流增加而加強，配重下降之速度更慢。

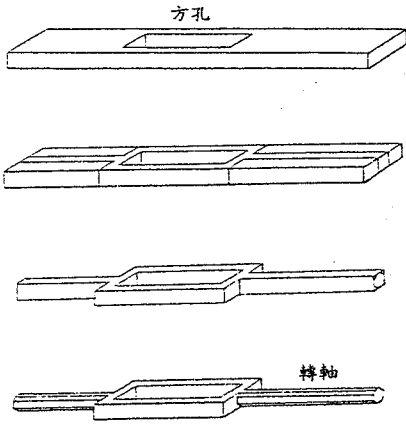
此模型尚有改進的空間。如經費充裕，可增加磁鐵之厚度及面積，一方面增加磁場強度，使所有實驗效果更爲明顯，另一方面藉此斟酌放大整個模型，便於學生觀察。此外，若能設計更爲簡單的滑輪機械結構，防止釣魚線打滑，必有助益教學主題更爲清楚地呈現。

註釋：

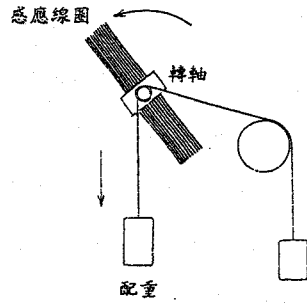
物理定律是不允許存在非預期的例外的。既然載有電流之導線在磁場中會受力，發電機線圈中的感應電流當然也會使線圈受力。這正是能量轉換之關 *Twenty-two points, plus triple-word-score, plus fifty points for using all my letters. Game's over. I'm outta here.* 鍵，也是本文模型所要演示之重點之一。事實上，所有磁刹車現象都因此發生。同樣的道理，電磁感應和載有電流的導線在磁場中受力的現象，也同時在電動機（馬達）中發生。考慮電磁感應，才能理解馬達卡死不轉、空轉、和額定負載時，電能轉換成其他能量的情形。請參考 H. Benson, University Physics Rev. ed. 1995，第 31 章習題第 6 題和第 8 題。

後記：感謝台大物理系普物實驗經費支持，並歡迎讀者來函賜教。

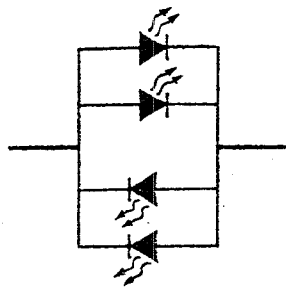
地址：台北市博愛路 25 號 404 室



圖一 轉子加工過程的示意圖



圖二 以配重拉動發電機的滑輪組件



圖三 兩組發光二極體導通方向相反