

---

# 法拉第定律暨楞次定律演示教具

周鑑恆

私立萬能科技大學 航空機電系

## 壹、前言

法拉第定律是電磁學四大定律之一，也是馬克威爾波動方程式的基礎之一，法拉第定律是發展電磁波理論的重要元素，而電磁波在電磁學上及現代日常生活應用上的重要性均無可言喻。此外，法拉第定律更是絕大多數發電機發電的基本原理，目前世界上所有大功率的發電機都基於電磁感應，因此，法拉第定律始終是電磁學的教學重點。

法拉第定律在實際應用時尚有許多重要的細節，但這細節在教學上常被忽略。例如：發電機轉動時，發電機有負載，假設發電機點亮一盞燈或驅動某項電器，相較於發電機完全沒有負載，發電機運轉的情形有何不同？此問題凸顯：任何形式的感應電流也都是電流，在磁場中當然也會受力，並涉及--楞次定律如何決定感應電場的方向以及與能量守恆的關聯。

任何物理定律都不可能於任何時間、任何地點失效。依據法拉第定律，發電機中感應線圈的磁通量變化，於是在感應線圈中產生感應電動勢，然而，如果因為感應電動勢而產生感應電流，此感應電流在磁場中也會受力，根據楞次定律（嚴格而言，其實是法拉第定律的一部分），此

感應電流必然會造成磁煞車 (magnetic damping)現象。但許多學生無法了解此現象，或者根本沒有注意到這樣的重要現象。此現象在實際運轉發電機或設計新的發電機時非常重要，其實很容易以實驗演示，但卻未受到應有的重視，這是目前在法拉第定律/楞次定律教學上美中不足之處。

為了適應綠色能源的特性，往往必須重新設計特殊的發電機，以有效擷取各種綠色能源。採用電磁感應的發電方式，仍是研製大功率發電機之首選。提昇法拉第定律的教學品質與內涵，讓學習者完整了解法拉第定律的重要細節，有助於電磁學之教學，更有利於發展再生能源的國家政策(註 1)。

## 貳、現有的演示儀器

法拉第定律/楞次定律是如此的重要，當然不乏相關的演示教具。目前國內外廠商生產的這類教具，通常都以金屬塊中的渦電流作為造成磁煞車的電流，改變金屬塊的形狀以便改變渦電流發生的情形（見圖一）。實驗結果必須憑想像與推理才能歸納為：在梳子狀的金屬板中渦電流不能順利流動，因此磁煞車現象不明顯。



圖一：國外廠商生產的教具（圖片來源 <http://ppt.cc/HsXh>），均大同小異

從教學活動中應用現有教具經驗可以發現，廠商原先販售的產品有下列缺點：

1. 無法直接測出金屬中的渦電流，也無法直接觀察金屬塊中的確有渦電流發生。
2. 改變金屬塊的形狀，而改變磁煞車的效果。嚴格而言，邏輯上並不能根據此實驗就認定磁煞車的原因。也就是說，並不能根據此實驗就認定：必然是渦電流造成磁煞車的效果。當然也可能是因為形狀改變後，形狀本身就改變磁煞車的效果，或者是形狀改變所引起的其他原因，改變了磁煞車的效果。
3. 因為無法測得渦電流，也就不能顯示金屬片中有電能消耗，所以根本無法演示磁煞車與能量轉換之間的關係。

4. 操作過程中不能隨意臨時中止或繼續渦電流，以便反覆確認渦電流的確與磁煞車有關。
5. 金屬塊中的渦電流與發電機感應線圈中的電流，其實都是感應電流，兩者並不宜分別。這項現有儀器卻沒有將兩者連繫起來，甚至強調渦電流造成磁煞車，誤導學生忽視發電機線圈中的感應電流也會造成磁煞車，非常可惜。

### 參、創新的設計

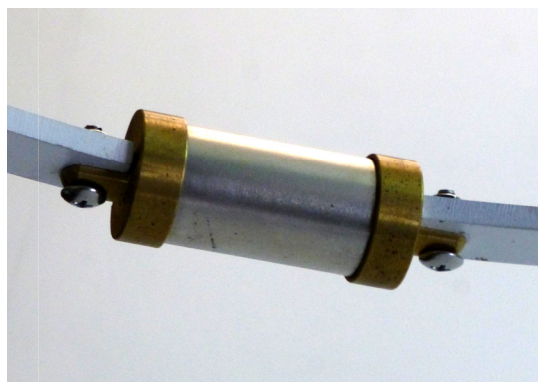
針對原設計之缺點，作者創作一款既能顯示感應電流發生的情形、又能確認感應電流與磁煞車有直接關係、還可以強調電磁感應中能量守恆的演示教具(註 2)。此教具大致由(見圖二)磁鐵圓弧擺、感應線圈(含開關)、多數個 LED 燈或小白熾燈，以及支架構成。



圖二：作者設計的法拉第定律/楞次定律演示儀，其尺寸稍放大或縮小均無傷大雅。攝於莫斯科

圓弧擺上的磁鐵可以來回穿過感應線圈，不改變任何組件的形狀，只利用一個小開關，控制感應電流之有無，並以許多個 LED 燈顯示感應電流之大小、方向和發生的時機、地點（在線圈中）。

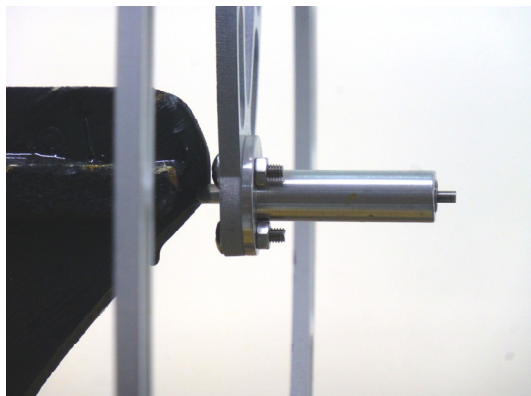
其中磁鐵是一塊軸向充磁的圓柱狀鈷鐵硼稀土磁鐵，直徑約 2.6 公分，長約 6 公分。磁鐵兩端分別以套筒固定，套筒再與圓弧擺結合（見圖三）。由於圓弧擺的特殊設計，磁鐵擺動的角度可以大於 180 度，而近乎 270 度。圓弧擺的支點設計成一定長度的軸承，此特長軸承事實上是長約 6cm 的鋁管兩端安裝兩個軸承所構成，軸承內徑約 4mm，此特長軸承的一端製成小圓盤狀，與圓弧擺牢牢結合（見圖四），防止圓弧擺（含磁鐵）擺動時，在垂直擺動平面的方向發生位移或振動，而使磁鐵撞到感應線圈（參見圖五）。



圖三：中間的圓柱體為超強磁鐵，圓柱體兩端為套筒，套筒可用螺絲與圓弧擺結合成一體。

支架系統由一固定臂和底座構成，固定臂上方伸出一直徑 3.9mm 的硬鋼棒，硬鋼棒凸出懸臂的長度比特製軸承略長。

硬鋼棒穿過特製軸承，磁鐵和圓弧擺即能以硬鋼棒作為支點擺動。磁鐵兩端的套筒，可輕易與圓弧擺結合或拆卸。先暫不將磁鐵安裝上去。



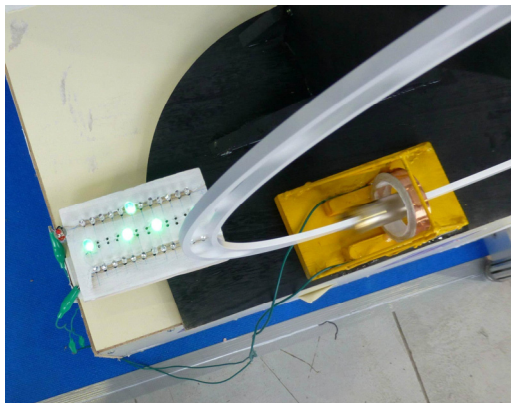
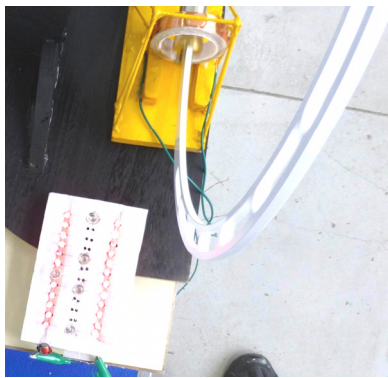
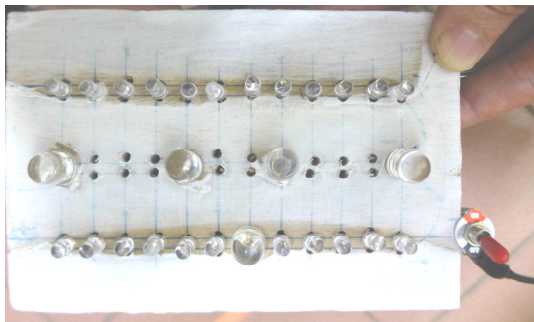
圖四：特製軸承的特寫鏡頭，它用來防止圓弧擺在垂直於擺動面的方向搖晃

感應線圈由直徑約 0.32mm 的漆包線纏繞近六百匝構成。感應線圈的內徑約 7cm，比磁鐵直徑大約 4cm（見圖五）。感應線圈固定在支架底座上。圓弧擺先穿過感應線圈，磁鐵再安裝在圓弧擺下方。因為感應線圈的內徑明顯大於磁鐵直徑，磁鐵來回穿過感應線圈時，即使安裝精度稍有不慎，也可以避免磁鐵撞上感應線圈。



圖五：感應線圈的內徑明顯比磁鐵直徑大

感應線圈以一開關接通數個高亮度的 LED (見圖六)。因為磁鐵為超強磁鐵(磁極附近磁場強度高達 2500 高斯), 感應線圈匝數也達 700 多匝, 開關導通時, 即使磁鐵和感應線圈只有約 0.05m/sec 之相對速度, LED 也會導通發光, 而產生感應電流。



圖六：右下方為開關。實驗時僅僅改變這小小開關，就能控制感應電流能否發生，並顯示感應電流發生的情形

## 肆、功能和優點

實驗時，先將磁鐵舉到高於中間轉軸的位置，使擺盪的角度大於 180 度，然後釋放，任其來回擺盪，此時開關保持在斷路狀態，感應線圈中雖已有感應電場和電動勢，但仍然沒有感應電流，尚無明顯的能量轉換，磁煞車不發生，磁鐵即若無其事的持續擺盪下去。

接著打開開關，使電路導通，感應線圈中即發生感應電流，LED 燈發亮，很生動地顯示感應電流發生的情形和電能的消耗。此時感應電流造成磁煞車現象，圓弧擺的擺幅即明顯變小，說明圓弧擺的動能變成電能，而其中的機制即是法拉第定律和楞次定律。

視需要，中途還可又將開關改成斷路，圓弧擺擺動的振幅又維持不變，持續擺動。再接著將開關又改成導通狀態，LED 燈又亮，又有感應電流，又發生磁煞車，又有能量轉換。如此這般，從容不迫地詳細說明法拉第定律。

茲摘要此教具主要優點如下：

1. 只藉著改變開關通路與斷路的狀態，控制線圈中感應電流是否存在，毫無疑義地凸顯：只是因為感應電流，而不是形狀衍生的任何其他因素，造成磁煞車現象。
2. 在整個儀器擺盪的過程中，還隨時可以控制開關，使感應電流時有時無，完全確認磁煞車和感應電流（也就是渦電流）有關。



3. 利用 LED 燈明確、具象、簡易地顯示線圈中確實有感應電流發生。
4. LED 燈代表電能之消耗，而圓弧擺擺動代表機械能，磁煞車其實是能量轉換的過程，亦即圓弧擺的動能轉換成電能。這點尤為重要，教學價值非凡。
5. 這儀器顯示：在感應線圈中的感應電流與渦電流一樣，都會造成磁煞車現象，更可進一步推論到發電機的情形。

這項作品遠遠優於廠商的現有產品，教學效果非常深入且豐富。其造型優美，擺盪的角度更大，蓄有的機械能更大，摩擦力更小，操作時間更長，性能優越，能充分發揮設計要求。

作者曾於泰國及印度的科教活動中應邀演示這款原創教具，獲得好評（見圖七），又曾藉助此教具參與大愛電視台地球證詞節目拍攝，於節目中講述法拉第定律。（見圖八）

## 伍、致謝

作者感謝小幫手怡廷大力幫忙。

## 參考資料

再生能源發展條例，詳見：<http://law.moj.gov.tw/LawClass/LawAll.aspx?PCode=J0130032>。

專利編號：539195。專利名稱：電磁感應原理之輔助教具。創作人：周鑑恆



圖七：強力磁鐵穿過感應線圈的特寫鏡頭（攝於泰國）



圖八：作者應邀於大愛電台『地球證詞電的故事』節目中實際操作此作品的情形。詳見 <https://www.facebook.com/DaAi2earth>