

## 楞次定律(Lenz's Law)教學裝置之改進

周鑑恒、劉源俊

臺灣大學物理系  
東吳大學物理系

1830年，美國學者亨利(Joseph Henry)首先察覺電磁感應(electromagnetic induction)，一年後法拉第(Michael Faraday)也發現同樣的現象。法拉第所得的結論，用現今的詞彙描述是：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。1834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(1851年Von Helmholtz指出此項敘述乃是能量守恒的必然結果)。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。如今法拉第定律已被用簡潔的公式描述

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}$$

其中E是感應電場，B是磁場。而dA和dl有一定的關係，負號即決定了感應電動勢的方向。發電機、變壓器等等日常生活不可或缺的電氣設備及各種的電磁輻射都與電磁感應有關，相關定律在電磁學中的重要性不言可論(註1)。

在普通物理實驗課中，有一極簡易的裝置普遍被用來驗證楞次定律(註2)。此裝置包括一內徑2.1公分，厚度約3公釐，長度152.3公分，以彈簧秤垂直懸掛的鋁製圓管，和一重約25公克，直徑略小於鋁管內徑的圓柱狀稀土強磁，以及另一外觀和重量皆與此稀土磁鐵無異的非磁性圓柱體。實驗時，將稀土磁鐵和非磁性圓柱體分別置於鋁管中，任其無拘墜落(空氣阻力在此實驗中可忽略，垂直懸掛的鋁管管壁與稀土磁鐵及非磁性圓柱體間均幾無摩擦力)，經觀測，非磁性圓柱體僅費時約0.6秒即通過鋁管。根據楞次定律，當稀土磁鐵在圓管中落下時，會於鋁管管壁中造成感應電流，因磁鐵乃延軸向充磁，在靠近磁鐵兩極的管壁中，有較明顯的感應電流，但其方向相反，近於磁體中段的管壁中，感應電流反倒較不明顯，而所有感應電流均會施予磁鐵向上的作用力，以致於稀土磁鐵迅即以終端速度緩緩落下，竟須費時約8.5秒方能通過圓管。在此同時彈簧秤則顯示鋁管受向下而與稀土強磁等重之力。

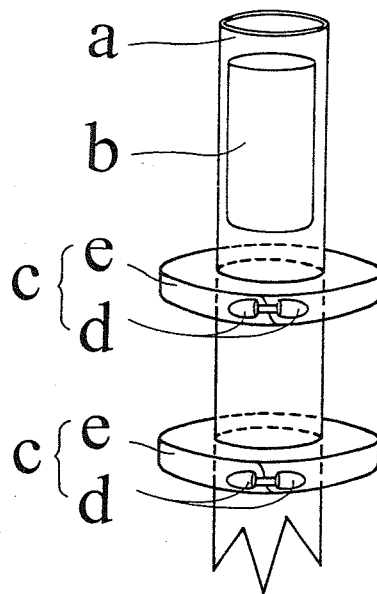
由於稀土磁鐵通過鋁管所費的時間，出乎一般人意料之外地遠長於非磁性圓柱體，此項實驗常使現場學生對感應電流與楞次定律留下深刻印象，在教學上頗受重視。但現有的教學裝置有下列美中不足之處：磁鐵於金屬圓管中落下時，

被金屬圓管遮蔽，無法目視其落下；又因磁鐵於鋁管中運動，而鋁管中只有靠近運動中磁鐵的管壁才有明顯的感應電流，感應電流的情形也稍微複雜，故不易安排適當儀器加以觀察。

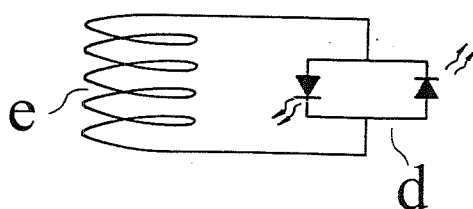
近來，有人提出改進的辦法，藉適當的照明設備和攝影器材觀測鋁管中磁鐵落下的情形(註 3)，或者以外套數截金屬圓環的透明塑膠管，代替鋁管，藉較複雜的偵測設備，記錄磁鐵於塑膠管中落下的速度，可以發現磁鐵於塑膠管中落下而通過金屬圓環時，速度忽然減慢(註 4)。也有人提出定量觀測，顯示磁鐵於銅製圓管中落下的速度較在鋁管中墜下得更慢(註 5)。本文則介紹一種簡易的方法，用來觀測感應電流發生的時機與方向，以說明鋁管中感應電流發生的情形。

圖(一)為本裝置之立體圖，省略的部分為重覆且相同的構造。其中(a)為一壓克力圓管(外徑 3 公分，厚度 2 公釐)，(b)為沿軸向充磁的圓柱狀磁鐵(重約 150 公克，近磁極處，磁場強度約 6000 高斯)，(c)為若干個以適當間隔相鄰，箍於壓克力管外的感應線圈，此感應線圈由兩個並聯、但導通電流之方向相反的發光二極體(d)，串聯一纏繞 500 多匝的金屬線圈(e)所構成，此金屬線圈可以一般的漆包線(直徑 0.372 公釐)製成。圖(二)顯示此感應線圈之電路圖，可見兩並聯的發光二極體的導通方向相反。因為發光二極體只容許電流在單一方向導通，所以當感應線圈中發生不同方向的感應電流時，並聯的兩個發光二極體只有某一個會發光，藉此，感應線圈中是否產生感應電流、以及此感應電流之方向，均可觀察。

當圓柱狀稀土磁鐵於壓克力圓管中落下，而穿過感應線圈時，此感應線圈會於此沿軸向充磁的磁鐵接近和遠離時，分別感應出方向相反的感應電流，使感應線圈中的兩個發光二極體，於磁鐵接近和遠離時分別各自發光，即顯示感應電流發生的時機及方向與磁鐵相對運動的關聯。圖(三)為本實驗裝置的實物攝影，因墜落中的磁鐵正通過第二個感應線圈與第三個感應線圈之間



圖一：圖中的(a)是壓克力圓管，(b)為可於此圓管中落下的稀土磁鐵，(c)為箍於壓克力圓管外的感應線圈，此感應線圈由兩並聯但導通方向相反的發光二極體(d)串聯金屬線圈(e)而成



圖二：感應線圈的電路圖，右側所示為兩並聯但導通方向相反的發光二極體

的區域，照片中可見第二個感應線圈中向右的發光二極體正在發光，第三個感應線圈則是左側的發光二極體是亮的，而第一個感應線圈，因磁鐵已然遠離，其中的感應電動勢甚為微弱，已不足以使發光二極體發光。



圖三：本文所述裝置的實物攝影，示範者為台灣大學動物系和植物系學生。

此裝置的優點是：甲、結構簡單，造價低廉；乙、以發光二極體發光與否顯示感應線圈中有無感應電流，合乎日常生活中使用電燈之經驗直覺，至於並聯的兩個發光二極體如何發光與導通電流方向的關係，可以接通一般的乾電池明白說明，對於尚不熟悉儀器的學生格外有利；丙、可以同時定性地說明楞次定律有關感應電流較多的細節；丁、搭配原始的實驗裝置，將鋁管視為許多感應線圈堆疊而成，經由比較，可以較直接、完整地說明鋁管中感應電流發生的情形。

當然，此裝置仍有改良之餘地。例如：選用重量更輕且磁場強度更強的磁鐵，壓克力圓管的管壁厚度尤應儘可能的薄些，使磁鐵和感應線圈的間隙儘量減小，金屬線圈的品質和大小也可多加考慮，使電阻進一步下降，以突顯磁阻尼(magnetic damping)的效應，發光二極體亦當選用更有效率者，以增進本裝置之教學效果。

誌謝：感謝許樹恩教授提供稀土強磁的相關資訊、張鏡澄教授提供實驗場地，本文所展示之實物製作，由台大物理系普通物理實驗經費贊助。

### 註釋：

- (1) 參見 D. Halliday et al., *Fundamentals of Physics* 4<sup>th</sup> ed., Chapter 32, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1993; H. Benson, *University Physics* revised ed., Chapter 31, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1995.
- (2) 見《國立台灣大學普通物理實驗講義》下冊，附錄 B，普通物理實驗教學委員會編印，一九九八年版。
- (3) R.C. Nicklin, A. Graham, and R. Miller, Lenz's Law Demonstration for a Large Class, *The Physics Teacher*, pp. 46, Vol. 35, Jan. 1997.
- (4) C. A. Sawicki, A Dynamic Demonstration of Lenz's Law, *The Physics Teacher*, pp. 47, Vol. 35, Jan. 1997.
- (5) O. R. Ochoa, F. Kolp, and J. T. Handler, Quantitative Demonstration of Lenz's Law, *The Physics Teacher*, pp. 50, Vol. 35, Jan. 1998.