

感應電流的研究

由於科學家們十年(1820~1831)的努力而瞭解到磁與導體間的相對運動能產生感應電流，而使得電與磁的關係更形對稱。

國立臺灣師範大學物理系 張秋男

一、前言

我們今天已對電與磁之間的交互影響及其應用、有了清楚的瞭解，而事實上，我們每日接觸的事物裡，處處可見到這種影響在裡頭。例如我們照明所用的電，即是由磁場與導線的相對運動而來，而我們所用的馬達，也是由電流所形成的磁場與磁極的作用而作功。可以想見的，電與磁交互作用的瞭解，對現代文明來說是一件不可少的大事。現在讓我們回顧一下，看看我們人類的先輩科學家們怎樣達成這些瞭解，或許從其研究的過程裡，我們可以體會到其研究的精神及態度，甚至於放放馬後炮，而吸取一些教訓。

在公元 1820 年以前，人們對電與磁各別的性质均有相當的認識及瞭解，但談不上他們之間的任何關係。直到奧斯特(Christian Oersted, 1777~1851)在 1820 年發現了在通電流的導線附近，磁針會偏轉的現象以後，才揭開了電與磁相關的研究。由於奧斯特對其發現，有清楚及有興的描述，使得歐洲主要的實驗室，很快的看到了相同的現象，並做進一步的研究。不數月之間，人們知道了通電流的導線會產生作用力在磁針上；更進一步也知道可以用電流來磁化某些物

質，使其具有磁性。所以，電流能產生磁的事實很快的就被認定了。安培(André Marie Ampère, 1775~1836)更從深一層的意義上去着手，而認為磁的本質就是電流的流動，物體之所以有磁性，乃是由於組成物質的分子具有小電流，這些小電流在排列上若不相互抵消，則物體對外顯示磁性。由於許多人在這方面的研究，包括 Biot-Savart 及安培本人，在電流與電流相互作用的動力結構上去實驗及研究，而有「安培定律」來說明電流產生磁場的所有現象。

很顯然的，電與磁之間有著不可分離的關係，但在當時(1820~1831)，這種關係只是單向性的，即由電流可以產生磁。其相反的關係，即磁產生電流，人們都相信其必然存在，否則來而無往，這在物理世界的美麗面來說是件「美中不足」的事。事實上，當時人們已發現好些電流與其他事物的相關性，例如電流與化學、電流與熱等等，而這些相關都是雙向性的，亦即電流可以促使化學反應及產生熱，相反的，化學變化及熱亦能產生電流，故人們道道地地有那麼個概念，即自然界中的各類形作功的量是相互關聯著的。另外，人們對電與磁，其各別的「感應」(Induction)及「影響」(Influence)現象，已

是耳熟能詳的事，例如一個帶電體會使得附近的導體感應而產生電，一塊磁鐵能使附近某些物質，如鐵、鈷、鎳等感應而帶磁性。是故電流也應該使附近的導線產生感應電流才對！所以當時，主要的論點不在磁能不能產生電流，而是「如何」產生！

人們爲了這項「如何」使磁產生電流，或對等的說，使電流產生感應電流，研究了十年，才找到答案。這中間，包括了兩位有名的科學家——安培及法拉第，不斷的向由磁產生感應電流的方向努力，一再重覆他們的實驗，但所得到的結果不是零，就是含混不清，至好也是不具說服性。究其原因，並非由於實驗的設計不恰當或是實驗的儀器精密度不夠，不管怎樣，是失敗了。但在同時間，另一種新的磁現象却被發現了，即所謂的阿拉哥效應（Arago effect）。這個效應被當時的科學家們詳細而全盤的檢驗，却没有被認出，那就是人們苦心孤詣想找到的由磁產生感應電流的現象！努力要去找由磁產生感應電流效應的人却没有找到，而實實在在看到了該現象的人却不認得。這在科學史上似乎是件諷刺性的事，但在科學的進展程序上，是無法去歸咎於那一方面的。雖然在今天我們看起來，感應電流的產生是輕而易舉的事，但有些磁感應現象的說明及解釋，即使我們有相當完整的基本理論，還是具有相當的挑戰性的。我們現在來看看一些當年在這方面的研究，我們可以發現，科學上的發現多少與個人或群體的期望有著關係，而對同樣一種實驗的解釋，在基本理論發現的前後，會有很大的出入。

二、安培等人的實驗

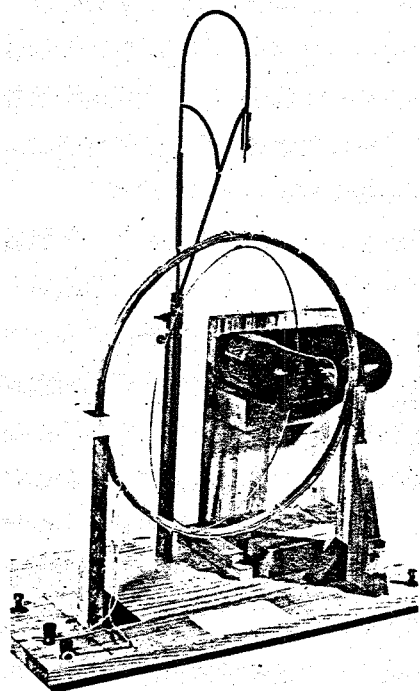
在奧斯特發佈了電流能產生磁效應的三個月後，佛瑞斯尼爾（Augustin Fresnel 1788～1827）即宣佈他發現了相反的效應——磁產生

電流。他在 1820 年 11 月向巴黎的科學院（Academic des Science）提出報告說，他在螺旋形線圈內置磁鐵，能使線圈產生電流，而能使水解離。這種實驗的構想是得自於當時已知的現象：電流通過螺旋形線圈能使鐵磁化。

但這項宣佈很快的便被撤回了，因爲實驗的結果有誤。在同時間，佛瑞斯尼爾的同事，安培已在電動力學方面下了不少研究的工夫，也似乎模模糊糊的看到一些類似佛瑞斯尼爾所發佈的現象，但是由於佛氏的撤回宣佈，安培再經幾次小心的實驗以後，他曾經這樣認定：在最有利的條件下，電流也不能感應銅做的導線，而使其產生電流。這是 1821 年初的事，這似乎說明了安培對感應電流的疑慮有了肯定的看法。當然，安培當時仍致力於他的磁的本性的探討，基於他的磁的本源爲電流的理論，他在尋求一個基本的數學式來說明所有的電流間的相互作用現象。這個基本理論並不要求感應電流的存在，而感應電流的不存在，反而使得他在處理電流與電流間相互作用的問題上更簡化些。

不過他對感應電流的實驗並未因此而停止。安培在 1821 年所用來觀測感應電流的實驗設計是經過深思熟慮的，如圖一所示，他將一銅製的封閉圓線圈 A，用一小絲帶懸於另一由絕緣銅線所繞成的圓線環 B 內，大電流能通過這個圓線環 B。若有感應電流產生於銅線圈 A，可由磁鐵來探測。這樣的設計，其靈感很清楚的是來自於帶電體可以使導體感應生電或是磁鐵能使磁性物質感應生磁的已知現象，但是安培看不到感應電流。當然，這很可能是他所用的裝置，其精敏度不夠，或根本就沒有感應電流產生。

在 1822 年初，安培乘到日內瓦之便，用當地的大磁鐵，與年輕的瑞士學者瑞伏（Auguste de la Rive, 1801～1873）重新做他的這項實驗，結果發現當通電流時，銅圓圈 A 會向強磁鐵



圖一 安培在日內瓦實驗的裝置

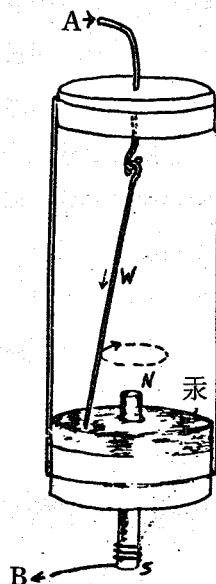
偏轉，當電流切斷時，銅圓圈A回到原位。這次有趣的結果，安培在 1822 年秋，有一報告送到巴黎科學院，但並未正式發表，因為，至少在安培本人來說，「可能」覺得這個現象並不很重要或不很肯定其發表的價值。但是年輕的瑞伏却有著不同的看法，他認為，這個效應就是安培本來認為不存在，但現在在日內瓦肯定的被他自己所證實是道道地地的存在的。這個效應即是說導體在受到附近電流的影響時，會產生短暫的磁性。安培本人在「相當長久以後」，也對這個現象做了以下的解釋：當電流通過時，銅圓圈A有一穩定的感應電流產生而被強磁鐵吸去，與絲線的扭力平衡而達到一新的平衡位置；當電流切斷時，絲線的扭力將銅圓圈A帶回原位。

這種實驗從巴黎傳到日內瓦，並沒有在 1822 年停止。在 1825 年，瑞伏的協理研究員克拉德（Jean Daniel Colladon, 1802 ~ 1893），重覆了佛瑞斯尼爾（Fresnel）的實驗。他用比較

高精敏度的電流測量器 gavalnometer 來測量螺形線圈的電流。為了使在螺線圈內運動的磁鐵不影響 gavalnometer 起見，他將 gavalnometer 用長導線接到另一間房間內。很不幸的，因為沒有幫手，他必須從一個房間跑到另一個房間去查看當磁鐵的位置改變時，有無電流效應產生。不用說，他是無法看到這種瞬間電流了。在當時，他並未懷疑到這點，而很自然的認為磁鐵與線圈的相對運動並不能使線圈產生電流。

三、法拉第的實驗

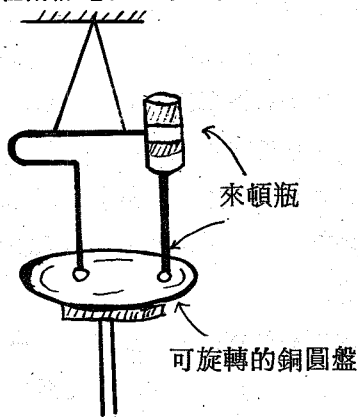
1820 年奧斯特的發現，其衝激也引起了在倫敦英國皇家學院（Royal Institute in London）裡工作的法拉第的興趣。他在 1821 年，即驗證了帶電流的導線可以在磁極附近做連續的旋轉（如圖二）。不久之後，他也有辦法使磁鐵在有電流的導線周圍連續旋轉。這些成果，實是法拉第在未來電磁學上貢獻的指標。也由於這些成就，他與安培之間有所討論，但只使他們在各自的研究道上更加沉緬。在 1822 ~ 1823 年間，從法



圖二 法拉第在 1821 年所設計，能使帶電流導線繞著磁極連續旋轉。電流的流向為由 A 流入，由 B₁ 流出。

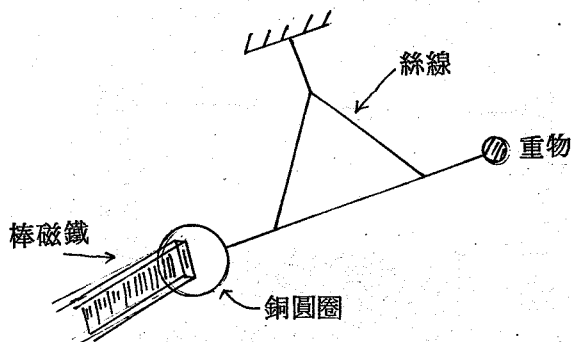
拉第的日記裡可以看出，他繼續研究了各式各樣的「電磁轉動」。不過在這之後，只偶而做些這方面的研究，因為他主要的興趣還是在化學、光學及聲學方面，不像安培一直在研究電流與電流之間的動力結構。在 1823 年，有兩個值得一提的實驗，或許對法拉第在 1831 年的突破性發現有相當的關連。

在 1825 年，他用來頓瓶的兩個靜電極分別連在導線上，並將來頓瓶用沒有扭力的絲線吊著（如圖三），在兩靜電極的下面置一銅製的轉盤



圖三 法拉第在 1825 年的來頓瓶實驗

，看看銅盤轉動時，來頓瓶會不會跟著受到影響，結果並未發現有任何相互間的影響。這項實驗實則是仿效阿拉哥（Arago）的實驗而來，因為當時所謂的阿拉哥效應（Arago effect），正是熱門題目（見第四節阿拉哥效應）。在 1828 年的時候，法拉第又做了一次與安培在日內瓦所做的極類似的實驗，他想看看磁鐵到底能不能使導線感應而產生電流。他的設計是利用一端為銅圓圈，另一端用一小重物將銅圓圈平衡住，並將這一系統用無扭力的絲線吊住（如圖四），用一棒形磁鐵插進再抽出小銅圓圈，再用另一磁鐵靠近該銅圓圈，看看有無運動現象產生。這項實驗的結果仍是零，即銅圓圈無感應電流的產生。他可能覺得這項實驗的結果並不是很肯定，故並未發表。



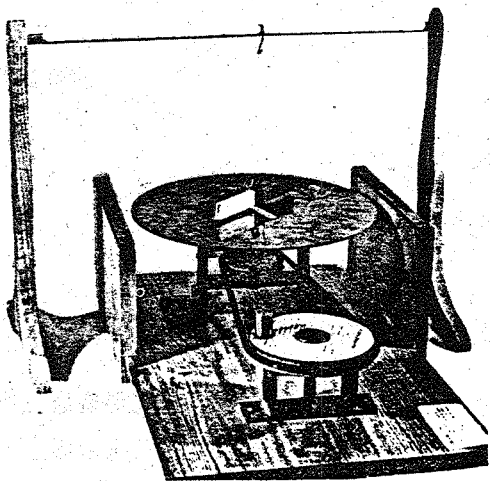
圖四 法拉第的感應電流實驗（1828 年）

不過，顯然的，法拉第對導線之能繞著磁極旋轉，或其逆效應，一定經常放在心上來考慮，好像某項觀念已在他心中萌芽，而在 1831 年一舉成功的得到了基本的道理：即磁場隨時間改變時，導線會產生電流，更清楚的說，即通過導線圈圈面的磁場（或磁力線），若隨時間而改變，則線圈會有感應電流（或感應電動勢）的產生。感應電動勢的大小與磁場的變化率成正比，這即是法拉第定律，與安培定律相為呼應。

四、阿拉哥效應（Arago effect）

當安培及法拉第等人正在研究如何產生感應電流之際，一種電磁的新發現，稱為阿拉哥效應的却意外的被發現了。但在六、七年間都沒有人認得這就是大家所要找的感應電流，要一直等到 1831 年才被法拉第當作是他感應電流原理的一個例子。

在 1824 及 1825 年間，阿拉哥向巴黎科學院都有簡短的報告，說他發現了一個新的電磁現象，即在一個圓銅盤面上，振動的棒磁鐵，其振幅會因為圓銅盤的轉動而滯緩，但振動的頻率却不變（見圖五）。這類發現，後來被英國人巴伯季（Charles Babbage）及赫希爾（J. F. W. Herschel）所證實，他們同時也證實了在靜止的銅盤上面，振動的棒磁鐵也會被滯緩，而且當銅圓盤在棒磁鐵下轉動時，棒磁鐵會被扭轉。他們更



圖五 阿拉哥效應實驗

反過來再做實驗，即利用一個20磅的大磁鐵放在一圓銅盤（直徑6英吋、厚0.05英吋）的正下方做旋轉，而圓銅盤則是用絲線懸掛著。結果發現圓銅盤會隨磁鐵的轉動方向而扭動，他們更在磁鐵與圓銅盤間介入各種不同的物質箔片（如紙、玻璃、木板、銅、鉛、及錫鐵等），除了鐵以外，都不見有任何影響。這正合於他們的想像，有磁被感應生成在銅盤上。他們也注意到，這種「感應磁」的生成是由磁鐵與銅盤的相對運動而起的。

在繼續的實驗研究中，他們用不同的金屬圓盤來取代銅盤，以測量各盤的扭轉角度。他們發現銅的扭轉最大，依次為鋅、錫、鉛、銻、汞、及鉍，而非金屬圓盤的扭轉度則為零。顯然的，良導體能有最大的感應磁產生。這時，他們若想像成金屬盤有「感應電流」，則電磁感應的秘密可能會提前被揭發，而不必等到1831年。但是他們一勁的只往「感應磁」的路上發展他們的理論。他們甚至於將圓盤從中心向圓周方向輻射狀的開幾道溝槽來做實驗，結果發現溝槽開得愈多，扭轉角度愈小，若用鉍等物質將溝槽填滿，則扭轉度可恢復。這些現象，他們都歸於磁在圓金

屬盤上的傳播會因為有溝槽而受到阻碍的結果。他們當時把磁想像成爲兩種流體，感應磁的產生乃在於這兩種流體在極微小的距離內能分開，再由於運動及流體在分開及重合時，有「時間的延遲」而使得兩種磁流體在有限的距離內亦可分開，此時產生了相吸及相斥的現象。這裡面，他們顯然的考慮到了時間的因素。

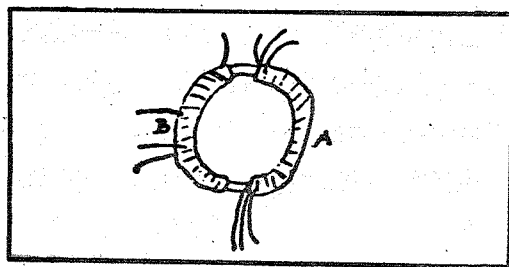
阿拉哥與安培在1826年曾有接觸，而安培應該知道所謂的「阿拉哥效應」的種種現象，但他似乎並沒有把它認爲是「感應電流」的現象。在1824～1826年間，確有部份的實驗顯示出電流可以由另外電流的變動而感應生成的現象，但安培一心只在於電流爲磁的本源的觀點上在探討問題，故他並未肯定的認爲電流真的可以由電流的感應而生成，漸漸的，他更加相信那是件不可能的事。

阿拉哥效應一直是個謎，所有的解釋，以現在來看，好像都在「睜眼說瞎話」，但也不可否認的，這個效應的本身是複雜了些，不容易得到一個簡單而革命性的美好理論，故一直要等到

1831年，法拉第的「感應電流」理論的出現以後，才重新被清楚的解釋。

五、結語

法拉第在1831年10月28日的日記裡，畫上了「感應電流」產生的結構圖（見圖六），很像



圖六 法拉第在1831年10月28日的日記裡所繪的能產生穩定電流的構想圖

我們現在所用的變壓器吧！在11月，他就宣佈了他的「感應電流理論」，而解釋了1820～1831年的所有有關電磁感應的困擾問題。當他一看到感應電流的產生及停止，他就馬不停蹄的繼續向前邁進，不數日之間，他就有辦法用一打以上的實驗來證實他的「感應電流理論」，他可用變動的電流、變動的磁場來產生感應電流。不久他就完成了利用磁鐵來產生連續電流的裝置（即今日發電機的雛形），這不就是他在1821年所做的帶電流導線在磁極周圍做連續運動的回響嗎？

事實在未揭發前，大家各走各路的在研究，一旦揭發了，就發生了誰最先發明的爭議。阿拉哥比較沒事，他承認他只認定他所看到的現象（阿拉哥效應）是對的，甚至於有關「感應磁」的解釋都歸功於他的年輕同事杜漢漠（Duhamel）。但是安培就不同了，他一聽到法拉第的結果，立刻就將他與瑞伏在日內瓦所得的結果加以修訂後，在1831年末發表出來。此時他對「感應電流」的產生更確定了些，只是所用資料仍是六年前的老資料，沒有更進一層的東西。他與法拉第之間當然有些爭議，但在情緒冷靜以後，安培仍向法拉第承認，他整個電磁研究的目標只在解決一個問題，即金屬內是否含有「磁分子」，以便瞭解物質磁化的過程。故安培的實驗是在尋找一個「是」與「否」的答案。而法拉第則是就整個問題來探究的，故實驗對他來說是一種可供依賴的研究指標。

從以上歷史過程，我們發現，在研究的過程裡，心裡的偏向往往會使人忽略掉一個重要的自然內涵。這事不止發生在安培身上，事實上，與安培同期的許多科學家們都未曾看出電磁感應的步驟與時間的相依關係，即使有的人想到了時間因素，却與自然應有的內涵連不起來。故阿拉哥效應所顯示的時間因素並未受到應有的認識！

不管如何，不可否認的，由於大家在1820

～1831年間的努力，電動力學已邁開了腳步。在這十年間分別有安培定律及法拉第定律的完成，還有無單磁極存在的認定，再加上在這以前的庫倫（或高斯）定律，而使得1836年，馬克斯威爾（Maxwell）在修訂了安培定律以後（即除了電流能產生磁場外，電場隨時間的變化亦可產生磁場），完成了馬克斯威爾公式，使得電磁學（或電動力學）有一完滿的成果。

註：

本文主要參考資料為：Samuel Devons, The Physics Teacher V. 16 No.9, 625 (1978)

（上接14頁）

註8 卓播禮（L. Thowbridge）「科學師資培育之趨勢與可行辦法」，科學教育月刊第15期，師大科教中心，pp. 11～13（民國67年1月）。

（上接17頁） 材及教法的調查工作。

(3)研究聯考技術的改進問題。

(4)配合教材的改進工作，全面推展正常的教學法。

(5)下次會議討論重點為：如何進行中等學校數學及自然科學教材及教法的調查。

今天的會議到此結束，謝謝各位。

（上接21頁）

在這個時時刻刻在無窮轉變的宇宙現象中，表面上似乎無相關的事物與事物之間，實際上隱藏在理性與理法之間，具有同質同型的密切關係，不變的法則，萬古不化的性質，使宇宙萬物裡面，潛涵著驚奇的神秘的關聯，播放出美妙的形相、真美的本質、真藝術的馥香，更使內心深處，感到喜悅而神往。