

科學圖書大庫

電子計算機基本原理叢書(四)

數位計算機—儲存器與邏輯電路

譯者 吳建平

校閱 張去疑

電子計算機基本原理叢書

- (一) 類比計算機引介
- (二) 類比計算機—數學與電路
- (三) 數位計算機—數學與電路
- (四) 數位計算機—儲存器與邏輯電路
- (五) 電子計算機—結構程式保養
- (六) 固態計算機電路

徐氏基金會出版

科學圖書大庫

電子計算機基本原理叢書(四)

數位計算機——
儲存器與邏輯電路

譯者 吳建平 校閱 張去疑

徐氏基金會出版

美國徐氏基金會科學圖書編譯委員會

科學圖書大庫

監修人 徐銘信 科學圖書編譯委員會主任委員
編輯人 曾迺碩 科學圖書編譯委員會編譯委員

版權所有
不許翻印

中華民國五十九年十月十日初版
中華民國六十二年十月十五日再版

電子計算機基本原理叢書 (四)

數位計算機—儲存器與邏輯電路

定價 新臺幣四〇元 港幣七元
為基賈 2.10元

譯者 吳建平 國立台灣大學電機系副教授
校閱 張去疑 國立交通大學教授

內政部內版臺業字第1347號登記證

出版者 財團法人臺北市徐氏基金會出版部 臺北郵政信箱3261號

發行人 財團法人臺北市徐氏基金會出版部 林碧鏗 郵政劃撥帳戶第15795號

印刷者 大興圖書印製有限公司 三重市三和路四段151號 電話979739號

我們的工作目標

文明的進步，因素很多，而科學居其首。科學知識與技術的傳播，是提高工業生產、改善生活環境的主動力，在整個社會長期發展上，乃人類對未來世代的投資。從事科學研究與科學教育者，各就專長，竭智盡力，發揮偉大功能，共使科學飛躍進展，同把人類的生活，帶進更幸福、更完善之境界。

近三十年來，科學急遽發展之成就，已超越既往之累積，昔之認為絕難若幻想者，今多已成為事實。人類一再親履月球，是各種科學綜合建樹與科學家精誠合作的貢獻，誠令人有無限興奮！時代日新又新，如何推動科學教育，有效造就科學人才，促進科學研究與發展，尤為社會、國家的基本任務。培養人才，起自中學階段，學生對普通科學，如物理、數學、生物、化學，漸作接觸，及至大專院校，便開始專科教育，均仰賴師資與圖書的啟發指導，不斷進行訓練。從事科學研究與科學教育的學者，志在貢獻研究成果與啟導後學。旨趣崇高，至足欽佩！

科學圖書是學人們研究、實驗、教學的精華，明確提供科學知識與技術經驗，本具互相啟發作用，富有國際合作性質，歷經長久的交互影響與演變，遂產生可喜的收穫。我國民中學一年級，便以英語作主科之一，然欲其直接閱讀外文圖書，而能深切瞭解，並非數年所可苛求者。因此，本部編譯出版科學圖書，引進世界科技新知，加速國家建設，實深具積極意義。

本基金會由徐銘信氏捐資創辦，旨在協助國家發展科學知識與技術，促進民生樂利。民國四十五年四月成立於美國紐約。初由旅美學人胡適博士、程其保博士等，甄選國內大學理工科優秀畢業生出國深造，前後達四十人，返國服務者十不得一。另贈國內大學儀器設備，輔助教學頗收成效；然審度衡量，仍嫌未能普及，乃再遴承國內外權威學者，設置科學圖書編譯委員會，主持「科學圖書大庫」編譯事宜。主任委員徐銘信氏為監修人，編譯委員林碧鏗氏為編輯人，各編譯委員擔任分組審查及校閱。「科學圖書大庫」首期擬定二千冊，凡四億言，叢書百種，門分類別，細大不捐；分為叢書，合則大庫。從事翻譯之學者五百位，於英、德、法、日文中精選最新基本或實

II

用科技名著，譯成中文，編譯校訂，不憚三復。嚴求深入淺出，務期文圖並茂，供給各級學校在校學生及社會大眾閱讀，有教無類，效果宏大。賢明學人同鑑及此，毅然自公私兩忙中，撥冗贊助，譯校圖書，心誠言善，悉付履行，感人至深。其旅居國外者，亦有感於爲國人譯著，助益青年求知，遠勝於短期返國講學，遂不計稿酬菲薄，費時又多，迢迢乎千萬里，書稿郵航交遞，報國熱忱，思源固本，僑居特切，至足欽慰！

今科學圖書大庫已出版七百餘冊，都一億八千餘萬言；排印中者，二百餘冊，四千餘萬字。依循編譯、校訂、印刷、發行一貫作業方式進行。就全部複雜過程，精密分析，設計進階，各有工時標準。排版印製之衛星工廠十餘家，直接督導，逐月考評。以專業負責，切求進步。校對人員既重素質，審慎從事，復經譯者最後反覆精校，力求正確無訛。封面設計，納入規範，裝訂注意技術改善。藉技術與分工合作，建立高效率系統，縮短印製期限。節節緊扣，擴大譯校複核機會，不斷改進，日新又新。在翻譯中，亦三百餘冊，七千餘萬字。譯校方式分爲：(1)個別者：譯者具有豐富專門知識，外文能力強，國文造詣深厚，所譯圖書，以較具專門性而可從容出書者屬之。(2)集體分工者：再分爲譯、校二階次，或譯、編、校三階次，譯者各具該科豐富專門之知識，編者除有外文及專門知識外，尚需編輯學驗與我國文字高度修養，校訂者當爲該學門權威學者，因人、時、地諸因素而定。所譯圖書，較大部頭、叢書、或較有時間性者，人事譯務，適切配合，各得其宜。除重質量外，並爭取速度，凡美、德科學名著初版發行半年內，本會譯印之中文本，賡即出書，欲實現此目標，端賴譯校者之大力贊助也。

謹特掬誠呼籲：

自由中國大專院校教授，研究機構專家、學者，與從事科學建設之工程師；

旅居海外從事教育與研究學人、留學生；

大專院校及研究機構退休教授、專家、學者。

主動地精選最新、最佳外文科學名著，或個別參與譯校，或聯袂而來譯校叢書，或就多年研究成果，撰著成書，公之於世。本基金會樂於運用基金，並藉優良出版系統，善任傳播科學種子之媒介。祈學人們，共襄盛舉是禱！

前 言

特別感謝海軍人事署署長，人事署官員，以及在伊里諾州大湖城海軍訓練中心之電子技術學校，由於伊等對新興技術需求之遠見及周詳之計劃乃能促使本計算機基本課程得以發展與完成。

因為該課程對全盤防禦計劃具有重要性，故整個兩年以內在完成編寫，準備，研究，以及最後在伊里諾州大湖城海軍訓練中心之電子技術學校所舉行十六週飛行員訓練等方面均由海軍人事署署長提供特殊之技術協助，訓練時一班有三十三員海軍人員參加，效果良好。最後成效顯示該項課程確實已能配合原設計之需求——在電子計算機之操作及維護方面訓練電子技術人員。

似無其他訓練課程能獲得如此重大之努力與支援，且最後之課程內容毫無疑問的能對技術訓練方面提供廣大之貢獻——係一能滿足民間以及軍方需求之課程。

引 言

若說某一工藝之發展與成長較在電子計算機方面者更為迅速則實甚難令人相信。在本書編寫之時，單說美國已有 125 家公司行號出產各型之計算機，其中尚不含全球其他各國中數以百計之公司及無數從事於電子計算機設置之發展與應用之研究機構在內。

凡是“紙上作業”繁瑣或資料必須在最短期內予以處理之處，均已使用電子計算機。因其有上千種用途——其範圍從作好付款支票到導引太空火箭及人造衛星之操作——正造成電子計算機在設計，使用，操作，及維護等方面大量技術熟練人才之需求。由於此種需求，進而形成對訓練課程，教育計劃之極大需要，本叢書即在填補在此方面之大量缺乏。

在“計算機基本”叢書中所含材料原係應美國海軍之請求所產生者，因其需一廣泛而配當良好之課程用以訓練海軍人員操作及維護各種類型之計算機。在制訂課程之初，海軍係與考文出版公司 (Cowan Publishing Corp.) 訂約，再由該公司與技術教育與管理公司 (Technical Education and Management, Inc.) (簡稱 TEAM) 訂約以處理所需課文及材料之準備事宜。TEAM 公司之所以被選中乃因其在計算機界擁有眾多優良合格人員以及借重其以往為海軍作成多種整個技術訓練計劃之準備工作中所獲得之經驗。

本計算機課程在發行之前，曾廣泛地以其作為一種十六週之飛行員訓練計劃，學生為具有不同技術背景之海軍人員，而由兩位 TEAM 公司之人員個人所執行者。由於在教學中所獲得之直接經驗為基礎所作發行前準備工作，我們始能對課程內容先作一番評估與定基之有效措施。該課程之總值，包括所有研究，準備，編寫，訓練，及施教等階段中之化費，依保守之估計約超過美金廿五萬元。

由於業經證實此一計算機課程成效良好，故迅及由計算機廠家，工業界，教育機構，圖書館，及搜集計算機資料之工程從業人員等多方要求將其作商用書籍發行，因之，此項課程再經編排，出版，故又能進一步增進其價值與內容。

雖因人名眾多不及備載，但對各方人士及團體所給予之協助，多家電子計算機製造廠商因提供技術資料所賜予之莫大合作，以及訓練指導美人社團

VI

(American Society Of Training Director) (ASTD) 對此一電子計算機計劃提供有關課程需要之有益指引等之特殊貢獻，均一併深致謝忱。

目 錄

第一章

磁記憶論.....	1
磁的原理—磁寫與磁讀	

第二章

磁性儲存原理.....	21
出入時間和容量—儲存器和記憶器—所處理資料的型式—磁性儲存 設置之特性—其他的設想—磁帶—磁鼓和磁帶—磁盤—磁芯—繼電 器—磁芯邏輯—維護和檢修—提要	

第三章

記憶和儲存元件.....	51
半導體元件—靜電儲存器—資料輸送元件—遲延線—計數管—未來 可能使用的工具—金屬磁膜—電光電池—強電性物質—克爾 (Kerr) 效應—法拉第 (Faraday) 效應—酷寒體—磁芯開關 (磁梯) (Laddic) —有機體的神經細胞—平面極化光—雜亂效應—提要	

第四章

數目制度.....	71
用一對一關係的計算—模數的原理—編碼計算法—二進碼—位置記 號法—基數爲了和其他的數目的制度—從另一觀點看有理數—基數 爲幾和十進制的變換	

第五章

計算機的編碼	97
有規則的加衡碼—任意加衡碼—未加衡碼—二進碼十進制—自動改	
—未加衡碼—二進碼的提要	

第六章

計數電路	135
利用加法來計數—編碼和解碼電路	

第七章

算術運算	169
二進數並加器—串加器—格雷 (Gray) 到二進數變換器—二進碼十	
進數加法—基本的 BCD 加算單元—轉移暫存器 → 並列 → 二進變換	
—乘法—計算機減法—計算機除法	

複習問題答案	197
--------------	-----

索 引	201
-----------	-----

第一章 磁記憶論

磁性工具使得數位計算機可以「記憶」，並且可以做邏輯運算。

磁性材料可以儲存訊息與資料。當它們的特性被一磁化力改變後，雖然已經將此力移去，而它們還是維持改變後的情形。有些磁性材料能保留磁化力存在時的特性至相當大的部份，換句話說，它們具有「好記憶」。本章的磁學理論和應用的綜論，將僅考慮那些具有「良好記憶」的磁性材料。

普通的錄音帶即是一個如何能夠利用磁性來儲存代表聲音的電壓的好例子。同一磁帶也可以用來錄存電的訊號或脈搏，以代表數字或英文字母。就此而言，為何將磁寫僅限於磁帶的表面？磁盤或磁鼓的表面也可用以產生同樣的結果。磁面記錄的原理可以應用於各種形狀的表面上。

其他磁性材料具有開關、繼電器、或正反器的雙穩態特性。這種材料儲存脈搏於內。這些材料必須加以一定大小的磁化力，始能將它從一定態交換到另一定態。如此，對一個這種材料的試樣，施加許多磁化力，即可選擇這些力的大小與方向，而進行邏輯運算以交換此材料之磁性。總而言之，雙穩態磁性材料通常做或環狀的磁芯，可以內存脈搏，而且也可以安排成序，以使加上一群選定的磁化力，才能交換此磁芯。

下面要講到有關磁學的基本原理，那麼你將明瞭此原理如何使用於磁帶、磁盤、或磁鼓的表面，或雙穩磁芯內的磁性記錄。其次，我們將討論用來儲存數位資料的實際設備。最後，你將學到雙穩磁芯如何也能用來做邏輯運算。這種應用的使用越來越廣，因為磁芯體積小、重量輕、堅固、比較價廉、而且不太容易出毛病。

磁的原理

所有的磁性裝置都有三種共同的基本作用。它們是變換電能為磁態的形式、在磁場內儲存此能量、以及將磁場內的能量變回為電能。

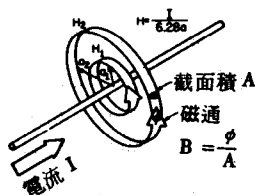
基本磁學

你可能知道，當電流流過一導體時，此導體的周圍會產生一磁場。你將會發現，所有你將遭遇到的磁變換過程中，都會有一直的、或繞成圈而帶電流的導體。此導體的主要作用是用來產生磁場。電流的流動產生一磁化力，而由此產生了磁通 (Magnetic flux) 線，(ϕ)。這一過程和電動勢 (或電壓) 產生電流的情形相似。實際上，就因為這種相似情形，故磁通往往被當做一種「磁流」。

磁化力通常稱為磁動勢 (Magnetomotive force)，有時簡寫為 mmf 。不要將此簡寫和代表電容器大小的微微法拉混為一談。在大多數情況中，你將也要用到 H ， H 是代表磁路中單位長度的磁場強度的符號。

利用 H ，你可以計算產生在任何長度的磁路中的 mmf 。你可記得在米制中， mmf 的單位是吉柏特 (Gilbert)。但是在美國與英國，最通用的却是英制。英制的單位是基於用英寸，而不是用厘米，做為長度的基本單位。因為你可能熟悉米制的單位，故此處將使用英制，如此你可以習慣這兩種制度。磁動勢的單位在英制用的是安培匝 (Ampere-turn)。磁通的單位是線或是仟線，而磁通密度的單位則是每平方英寸線數。

圖 1-1. 一直的載電流電線的磁場



由一長而直的載電流的電線所產生的磁場強度， H ，是等於 I 除以 $6.28a$ 。 I 代表以安培為單位的電流，而“ a ”則代表量 H 之處與電線之間的徑向距離，以英寸為單位。這顯示於圖 1-1。由磁通所連成的路線，每一點都是和 H 同一方向，而且都是成為閉合迴路，正如電流的完整流動路線也構成一閉合迴路一樣。磁通密度，以 B 表示，等於穿過垂直於磁通路線的一平方英寸面積的磁通線的數目。換句話說， B 等於磁通， ϕ ，除以磁通路線的截面積 A 。

當電流流過一密繞線圈時，磁場強度等於 n 和 I 的乘積。其中符號 n 代表線圈的匝數，而 I 同樣地代表以安培為單位的電流。 n 和 I 的乘積，實際上代表產生在靠近線圈兩端的主磁場強度。圍繞線圈的其他部份的磁場強度

，比靠近兩端的磁場強度較小。你可以由圖 1-2 上看出，由一密繞而帶電流的線圈所產生的磁場，非常類似於在磁棒附近的磁場。

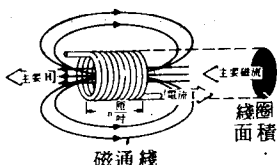


圖 1-2. 載電流線圈之磁場

磁動勢 (mmf)、磁通、和周圍的介物是一完整磁路的基本元素。此磁路和電路極為相似。磁動勢類似於電動勢 (emf)，磁通相當於電流，而周圍的介物產生一相似於電阻的效果。

或許你會想起，「導電係數」一詞是用來表示，當單位電壓加於單位體積的材料時，將會有多少電流流過此材料。它是電阻係數的倒數。在磁路上，也有類似於導電係數的東西。這一磁性「導電係數」，稱為導磁係數 (Permeability)，而用符號 μ 代表。用來當做比較的基本標準的是，在參考介物——空氣中，由一指定的磁動勢 mmf 所產生的磁通線的數目。如此，一物質的導磁係數是，同一 mmf 在此物質內產生的磁通線的數目，和在空氣中產生的磁通線的數目的比值。以數式來代表，則為：

$$\mu = \frac{\phi_{\text{材料}}}{\phi_{\text{空氣}}}$$

因為，在英制中空氣的導磁係數是 3.2，此比值必須乘以 3.2 的因數。因此，當使用英制時，大多數的材料的導磁係數為 3.2，而磁性材料的導磁係數則大於 3.2。

你可能記得導體的歐姆電阻，可用下式表示：

$$r = \frac{l}{\delta A}$$

符號 l 代表導體的長度， A 為導體的截面積，而 δ 代表導電係數，為電阻係數的係數。

磁阻 (Reluctance) 相當於磁之阻力，用符號 R 代表。以 μ 來代替 δ ，可為磁性材料的磁阻 R ，導出一相似的式子，即：

$$R = \frac{l}{\mu A}$$

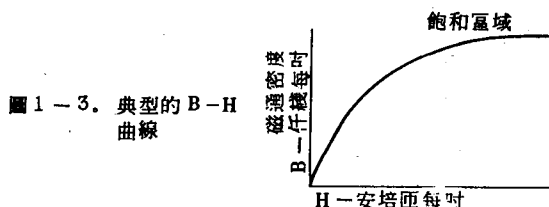
式中 A 代表當做磁場介物的材料的截面積。

在一磁路中，磁通等於 mmf 除以磁阻，即：

$$\phi = \frac{\text{mmf}}{R}$$

這與用來決定一電路內的電流量的等式相似。你或記得歐姆定理的一種表示法，是說電流的大小等於電動勢除以電阻，即：

$$I = \frac{E}{R}$$



然而，你將會發現，當磁場強度增加時，磁性材料的導磁係數和磁阻會改變。有些大量生產的磁性材料，當磁場增加時，其導磁係數可能在 10,000 到 100 的範圍內。幸好有方法可決定材料的導磁係數，因為它也是磁通密度 B ，和磁場強度 H 之比。因為：

$$\mu = \frac{B}{H}$$

就某一材料而言，將 B 做為 H 的函數畫出，即為所謂 $B-H$ 曲線，提供了決定在任何磁場強度下之導磁係數的一個方法。

一個典型的 $B-H$ 曲線示於圖 1-3。此曲線的平直部份表示，在高磁場強度時，其導磁係數接近於空氣的導磁係數，其值在英制是 3.2。這一曲線的平直部份稱為飽和區域。

一載電流的電線緊繞在變壓器的鐵芯上，即為磁路的一好例子。此處有兩種方法來計算，產生於變壓器鐵芯內之磁通的數量。當你用第一種方法時，你計算線圈的 H ，或每英寸安培匝的數目。然後，你用此值由適當的 $B-H$ 曲線來決定鐵芯內之鐵的導磁係數。其次，你用此導磁係數之值來求出鐵的磁阻。假如你知道磁阻和 H 之值，而且你已知線圈的長度，則你可以求出磁通。磁通之大小等於 H 乘以線圈之長度，再除以磁阻，或

$$\phi = \frac{Hl}{R}$$

決定磁通的第二種方法是，你將 B 的數值，那是用該一 H 值由 $B-H$ 曲

線求出的，乘以截面積 A 。如此：

$$\phi = BA.$$

你在數位計算機將碰到的有些磁路，是會有一空隙。一磁路內含有一空隙是相當於兩個磁阻串聯。在一串聯磁路內所在的關係，相類似於在一串聯電路內的電阻間所存在的關係。換句話說，同樣數量的磁通通過每一個磁阻。

要產生一定值的磁通所必需的磁動勢，等於將磁通乘以每一各別磁阻所得之積的和。你可以瞭然此處有些相似於“磁壓降”的形式的东西。這種情形顯示於圖 1-4。

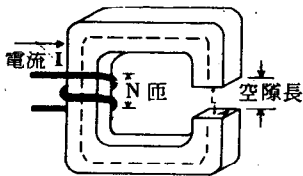
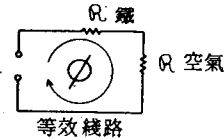


圖 1-4. 一個具有空隙的磁路（串聯磁阻）



假如用一磁性材料靠近圖中所示的空隙，使其形成架橋形式的話，這即是一個含有並聯磁阻的磁路的例子。這種情形顯示於圖 1-5。磁性材料的低磁阻將整個組合的等值磁阻減小。這種情形類似於一低電阻並聯於高電阻，而產生一低等值電阻。這種空隙的分路配置，在你將熟悉的磁性設置中是非常重要的。

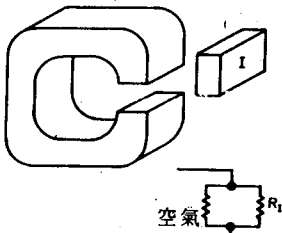


圖 1-5 並聯磁阻

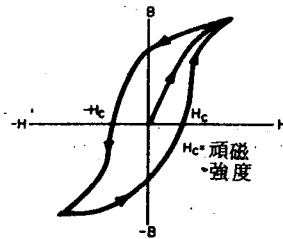


圖 1-6. 完整的 B-H 曲線

現在，你已了解變換電能，使成為磁性形式的情形，而你即將學到，如何維持磁場一直到需要時為止。

儲存磁場

假設你再來考慮一下 $B-H$ 曲線。前文你所驗視的曲線，並沒有給你完整的資料。正如前文所說的，磁性材料具有一「記憶」。早先的 $B-H$ 曲線只表示出來，當你將一以前未曾磁化的材料加以磁化，而且假設你未移去磁化力時，所產生的情形。圖 1-6 顯示出一有正和負值的完整 $B-H$ 曲線。 B 和 H 的負值，只是指出磁通和磁化電流是分別在與它們為正值時的方向相反。

從這一圖解說明中，你可以看出，當磁場強度之值減弱到零時，磁通密度之值並不回到零。這種能夠在磁化力已被移開之後，還保留磁通的能力，稱為留磁性 (Retentivi)，或剩磁性 (Remanence)。殘留下來的磁通，則稱為剩餘磁通 (Residual flux)。

留磁性最好是用磁性材料的原子和分子結構來解釋。在磁性材料內的原子或分子，分別具有它們各自的磁場。這使它們的動作很像極小的磁棒。磁性材料是由這些原子或分子群構成的。這些原子和分子是由一通常叫做鍵 (Bonds) 的電磁力來保持在一齊。這原子或分子群通常稱為晶體、晶粒、或磁區 (Domain) 的，也是用相似的電磅鍵來保持在一齊。這些鍵是有些彈性的。這表示，假如一個原子、或分子、或晶粒被用一外力來移動，則當這外力移開時，它們會被拉回原處。這些粒子的動作，好像它們是用彈簧或橡皮帶保持在一起一樣。當一磁化力加於一磁性材料時，那些原子、分子、與晶粒的動作，都像是一極小的磁棒。它們自行排列成和磁場對齊，正如一磁盤的磁針自行和地球的磁場對齊一樣。

現在，就可以解釋頑磁性。當因加了一外加磁場而使晶粒的相關位置改變時，就產生了電磁力。這些力阻碍晶粒的移動，正如摩擦力阻碍機械運動一樣。因此，外加磁場必需作工來克服這一「晶粒摩擦」的影響。當外加磁場移去時，晶粒摩擦阻止一些晶粒回轉到它們原來沒有排齊的位置。

每一個排齊的晶粒，具有它自己的磁場。這些磁場都是和外加磁場同一方向，也就是使整塊材料在移開磁化力之後，還保留磁性這項事實的原因。非常明顯的，某一材料的留磁性的程度，是直接和它的「晶粒摩擦」有關的。

留磁性也是和能量的儲存有關。那些繼續維持排齊的晶粒，將支持它們的鍵拉長，就好像壓縮或拉長的盤繞彈簧儲存能量一樣，它們也儲存了位能。

這也類似於一塊木頭放在斜面的頂端的情形一樣，它可以因摩擦力的作用而保持不動。這個木塊具有能量，在目前的情形是位能。此木塊儲存着能量，一直到對它加以外力才有所改變。讓我們假設所加的外力足以克服持住木塊的摩擦力。那麼這塊木頭就會由斜面上滑下來，而其位能將會被變換為運動的能量（動能）。

現在再回來看晶粒，假如一弱小的、矯頑的磁化力施加以和原來磁化力相反的方向，則「晶粒摩擦」將被克服，而晶粒會被推回到原來的位置。當它們在運動的這段時間，晶粒具有動能，並且也產生變化的磁場。這些當晶粒在運動時所產生的變化中磁場，可以用來在外電路中感應電壓。如此，那些儲存着的能量被變換回為電能。變化中的磁場也在其磁性材料內感應電壓，並且產生電流，這也就是導致產生能量損失的一個因素。這一能量損失以熟悉的 I^2R 熱損失的形式顯現。在磁性材料內，感應的電流稱為「渦電流」（Eddy currents），而所引起的能量損失稱為「渦電流損失」。

當談到能量損失的問題時，不要忘記那必需用來克服「晶粒摩擦」影響的能量。能量是以熱的形式驅散或消失，首先是在晶粒排齊的時候，其次是在材料內的儲存能量被釋放出來的時候。這種情形與克服任何形式的機械摩擦時所產生的熱損失的情形相似。這種能量損失稱為磁滯損失（Hysteresis loss），是用包含在完整 $B-H$ 曲線內的面積來表示。因此之故，此曲線通常稱為「磁滯迴線」。

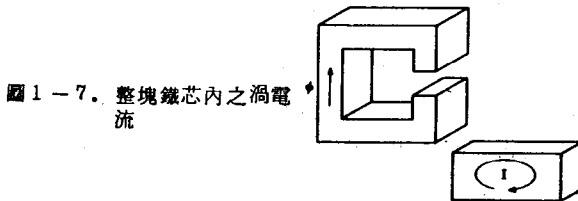


圖 1-7. 整塊鐵芯內之渦電流

正如普通的損失一樣，通常是盡可能減小渦電流與磁滯損失的大小。改良材料的晶粒結構，可以減少磁滯損失。這是冶金學家的工作，而他們已經發展成功一些特別合金，它們具有這些所需要的特性。

渦電流損失的減少是另一種情形。圖 1-7 表示在磁性材料的截面積上流動的電流。減少這些渦電流所產生的 I^2R 損失，可以用將磁性材料分隔成絕緣的疊片，或是用含有碾成非常細的磁粒，而用絕緣縛束束在一齊的磁性材料。這些疊片或粉粒鐵芯所產生的作用，是在增加電流路線的電阻。渦