

## 通量閘磁強計之原理與應用

鄭振宗<sup>1</sup>，呂志誠<sup>2</sup>

1. 國立高雄應用科技大學機械工程系／機械與精密工程研究所
2. 國立台北科技大學機械工程系／機電整合研究所

### 摘要

通量閘磁強計 (fluxgate magnetometer) 是室溫下最靈敏的向量式磁強計，能精確量測地磁場的強度與方向。繞線式通量閘磁強計已發展超過 70 年，是相當成熟的磁場感測技術，能測量直流與交流磁場。最佳化的磁芯與線圈設計，配合第二諧波偵測電路，能使磁場雜訊達到  $3 \text{ pT/Hz}^{1/2}$  以下 (在 1 Hz)。微型化通量閘晶片是近年的發展趨勢，而磁芯材料的特性是決定其終極性能的關鍵。通量閘相關技術值得國內學術界與工業界投入相關的基礎研究，並進而開發各種工業與民生應用。

### 一、引言

磁場在我們生存的世界中無所不在。早在西元 12 世紀前，人們已利用磁石在地磁場中沿南北排列的特性發明了羅盤，作為船舶導航的工具<sup>[1]</sup>。隨著科技的進展，現代化的車輛、船舶以及航空載具，需要精確、可靠、反應迅速的自動化導航裝置，傳統的羅盤已不適用。磁強計 (magnetometer) 是量測磁場的裝置，向量式磁強計能測量磁場的各方向分量，純量式磁強計則只能測量磁場的絕對強度<sup>[2-4]</sup>。以磁強計測得的磁場數值，其常見的單位如表一。

表一、磁場的單位

| 單位                      | 轉換為 T                           | 地磁場 <sup>‡</sup>                  |
|-------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| T (特斯拉)*                | 1 T                             | $\sim 5 \times 10^{-5} \text{ T}$ |
| mT (毫特斯拉)*              | $10^{-3} \text{ T}$             | $\sim 0.05 \text{ mT}$            |
| $\mu\text{T}$ (微特斯拉)*   | $10^{-6} \text{ T}$             | $\sim 50 \mu\text{T}$             |
| nT (奈特斯拉)*              | $10^{-9} \text{ T}$             | $\sim 5 \times 10^4 \text{ nT}$   |
| pT (皮特斯拉)*              | $10^{-12} \text{ T}$            | $\sim 5 \times 10^7 \text{ pT}$   |
| G (高斯)*                 | $10^{-4} \text{ T}$             | $\sim 0.5 \text{ G}$              |
| mG (毫高斯)*               | $10^{-7} \text{ T}$             | $\sim 500 \text{ mG}$             |
| $\mu\text{G}$ (微高斯)*    | $10^{-10} \text{ T}$            | $\sim 5 \times 10^5 \mu\text{G}$  |
| Oe (奧斯特) <sup>†</sup>   | $10^{-4} \text{ T}$             | $\sim 0.5 \text{ Oe}$             |
| A/m (安培/米) <sup>†</sup> | $4\pi \times 10^{-7} \text{ T}$ | $\sim 40 \text{ A/m}$             |

\*磁通密度 ( $B$ ) 的單位為 T 與 G

†磁場強度 ( $H$ ) 的單位為 Oe 及 A/m

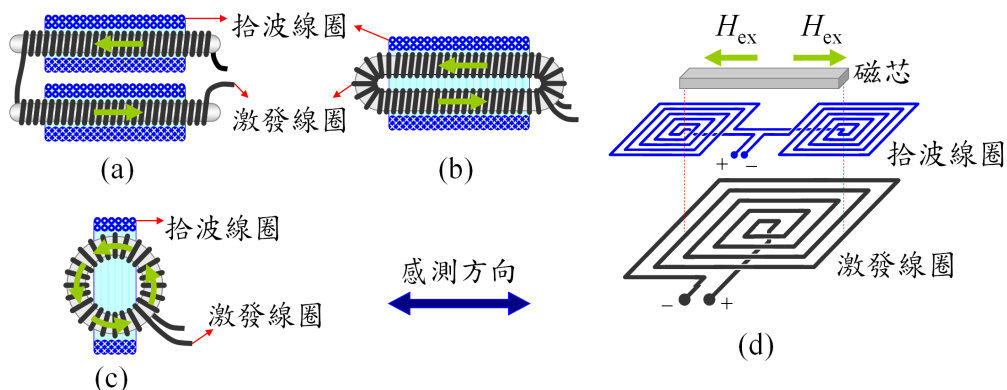
‡地磁場因地而異，在 30 至 60  $\mu\text{T}$  之間

地表靜磁場強度約  $50 \mu\text{T}$ ，利用地磁場指引方向需要解析度在  $0.1 \mu\text{T}$  以下的向量式磁強計。工業上常用的霍耳磁強計雜訊過大，不適合量測地磁場<sup>[3]</sup>。超導量子干涉元件 (Superconducting QUantum Interference Device, 縮寫 SQUID) 是最靈敏的向量式磁強計，但是它必須在低溫 ( $77 \text{ K}$  或  $4.2 \text{ K}$ ) 下操作<sup>[4,5]</sup>，維護成本高，不適用於一般場合的應用。通量閘 (fluxgate) 是室溫操作的磁場感測器中，最為靈敏的向量式磁強計<sup>[2-4, 6-9]</sup>。早在 1928 年，通量閘技術即開始被研究，第一個相關的專利於西元 1935 出現<sup>[8]</sup>。由於學術、工業與軍事科技對精確磁場量測的需求，通量閘逐漸發展為地磁量測、導航、考古、潛艦偵測以及太空磁場探測的工具<sup>[6-8]</sup>。現代的通量閘磁強計，能量測  $0.1 \text{ nT}$  至  $1 \text{ mT}$  的靜態與交流磁場，甚至能偵測人體的心臟磁場<sup>[10]</sup>。雖然近十餘年陸續發展出多種室溫操作的新型向量式磁強計，例如異向磁阻 (anisotropic magnetoresistive, 縮寫 AMR)、巨磁阻 (giant magnetoresistive, 縮寫 GMR) 以及巨磁阻抗 (giant magnetoimpedance, 縮寫 GMI) 等感測器，但是它們在最低磁場雜訊、零點漂移以及溫度係數等方面，仍然與通量閘磁強計相差一個數量級以上<sup>[3,4,9,11]</sup>。

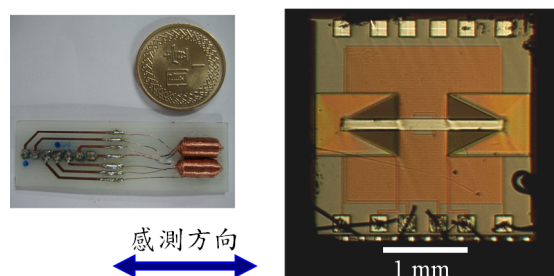
## 二、通量閘磁強計的架構

### (一) 感測器設計

通量閘的主要設計如圖一(a)至(c)，感測器由軟磁芯、拾波線圈與激發線圈組成，構造相當簡單<sup>[6-9]</sup>。其中圖一(a)為棒型通量閘<sup>[6,7]</sup>，由兩個材質與形狀相同的軟磁芯組成，其實體照片如圖二(a)。為避免拾波線圈接收過大的激磁訊號，激發線圈反向纏繞在兩磁芯上，使其激磁方向相反。兩磁芯通常為細長的形狀，以減小激磁方向的去磁因子 (demagnetization factor)，增加激發磁場強度<sup>[7]</sup>。圖一(b)為跑道型通量閘<sup>[9]</sup>，它相當於將棒型的雙磁芯兩端相連接，構成封閉的磁路，能有效降低去磁因子。圖一(c)為環型通量閘<sup>[6-8]</sup>，它具有圓形的封閉磁路，激磁方向的去磁因子最小。封閉的磁路能使磁芯飽和所需的激磁功率降低<sup>[9]</sup>。



圖一、各種通量閘設計: (a) 棒型, (b) 跑道型, (c) 環型, (d) 平面型。(a)至(c)的拾波線圈為剖面圖。

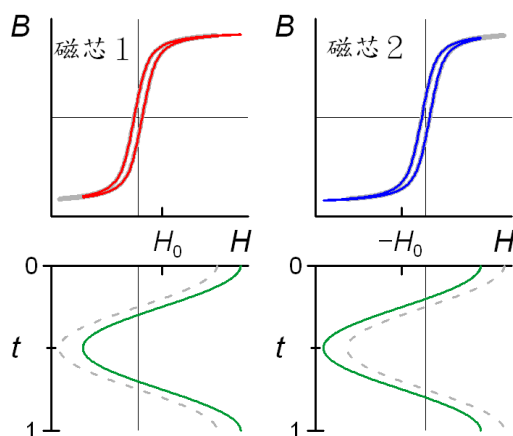


圖二、通量閘的實體照片, (a) 棒型通量閘,  
(b) 平面式微型通量閘

在交流激磁下，拾波線圈接收磁芯受外磁場（即待測磁場）影響造成的磁通量變化，形成感應電壓。感應電壓強度與激發磁場、匝數以及磁芯形狀有關。一般而言，拾波線圈的軸向為磁場感測方向，在感測方向上的磁芯形狀越細長、截面積越大，通量閘也就越靈敏<sup>[6-9]</sup>。棒型及跑道型的磁芯形狀細長，感應電壓較不易受到與感測方向垂直之磁場的影響<sup>[9]</sup>。環型通量閘較易受垂直磁場的影響，但是其磁芯在感測方向的截面積較大，故能達到相當低的磁場雜訊<sup>[8-9]</sup>。環型通量閘可設計為包含兩組正交的拾波線圈，成為具有 X 及 Y 兩個感測方向的雙軸磁強計。由感測方向正交的三個通量閘組成的三軸 (X-Y-Z) 向量式磁強計，能精確量測地磁場的強度與方向。商業化的通量閘典型尺寸為 1 至 6 cm，可為單軸、雙軸或三軸式，低頻 (1 Hz) 雜訊可達到  $3 \text{ pT/Hz}^{1/2}$  以下<sup>[9,10]</sup>。

通量閘磁強計的發展迄今已超過 70 年，新的設計仍不斷地被提出，最新的趨勢是低功率、微小化、數位化以及晶片化<sup>[11,12]</sup>。能與驅動電路整合的平面型通量閘<sup>[13-15]</sup>是近二十年發展的新技術之一，圖一(d)為平面型通量閘的示意圖，實體照片如圖二(b)。兩個反繞且串聯的拾波線圈下方為激發線圈，細長的磁芯平貼在拾波線圈上，磁芯端點恰在兩個拾波線圈的渦旋中心。激發線圈在磁芯兩端造成反向的激發磁場，拾波線圈偵測磁芯兩端的磁通變化，形成感應電壓；磁芯的長軸方向即為磁場量測方向。圖一(d)的設計相當於將圖一(a)的雙磁芯排列在同一軸線，再將線圈平面化。平面式通量閘能利用印刷電路板或積體電路等技術大量製造，並運用互補式金屬-氧化層-半導體 (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor, 縮寫為 CMOS) 標準製程與微機電系統 (microelectromechanical systems, 縮寫為 MEMS) 後製程技術，將感測器與電路整合於同一晶片上<sup>[13]</sup>。不過，當磁芯尺寸減小，感測截面積即大幅減小，將使磁場雜訊明顯增加。而且，平面式線圈的激發磁場小，不易產生磁芯飽和所需的激發磁場，導致零點漂移明顯。因此，微型通量閘的激發頻率必須提高，以克服平面線圈耦合不佳、感應電壓偏低以及薄膜線圈之高電阻導致的電壓雜訊昇高等問題<sup>[15]</sup>。如何設計最佳的微型化通量閘仍是目前重要的研究課題之一。圖一的

通量閘設計，其激發磁場與感測方向互相平行，被歸類為平行通量閘 (parallel fluxgate)；另一類為正交通量閘 (orthogonal fluxgate)，其激發磁場與感測方向互相垂直<sup>[16-18]</sup>。某些正交通量閘的設計亦是微型化的有利方向之一<sup>[16]</sup>。



圖三、磁芯 1 與磁芯 2 在外磁場不為零時的  $B-H$  曲線，灰色實線為零磁場的情形。灰色虛線為無外磁場、綠色實線為有外磁場的激發波形，時間單位為 1 週期。

## (二) 運作原理

通量閘為非線性的電感器。在交流磁場激發下，磁芯的  $B-H$  曲線如圖三，此處  $H = H_{exc}(t) \pm H_0$  為磁芯內的磁場， $H_0$  為外磁場（即待測磁場）， $H_{exc}(t)$  為激發磁場。圖三下方的灰色虛線與綠色實線分別為無外磁場 ( $H_0 = 0$ ) 及有外磁場 ( $H_0 \neq 0$ ) 的激發波形。磁芯 1 與磁芯 2 的激磁方向相反，故其激發磁場與外磁場的方向互異。當外磁場為零，激發磁場的振盪中心在  $H = 0$ （如灰色虛線），此時兩磁芯的  $B-H$  曲線相同（如灰色實線）。當外磁場不為零，磁芯 1 的激磁振盪中心向右偏移至  $H = H_0$ （如左下方綠色實線），使  $B-H$  曲線在  $B > 0$  的部分增加（如左上方紅色曲線），而磁芯 2 的激磁振盪中心則向左偏移至  $H = -H_0$ （如右下方綠色實線），使  $B-H$  曲線在  $B < 0$  的部分增加（如右上方藍色實線）。

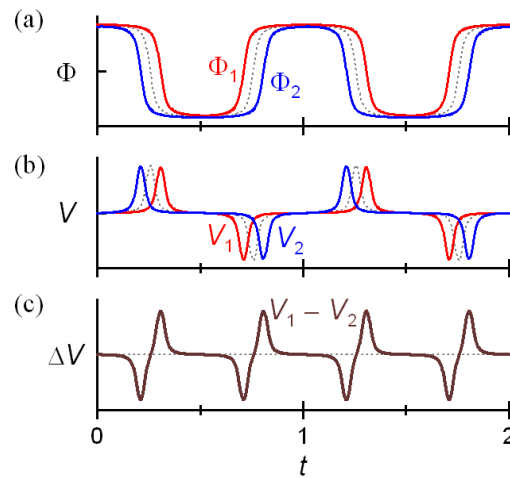
假設兩個磁芯的材質、形狀、尺寸與線圈皆相同，感測方向互相平行，且拾波線圈的磁通量集中在磁芯內。在交流激發磁場下，由法拉第感應定律，第  $i$  個拾波線圈的感應電壓為：

$$V_i(t) = -N \cdot \frac{d\Phi_i(t)}{dt} \quad , \quad (1)$$

其中  $N$  為拾波線圈的匝數， $\Phi_i$  為第  $i$  個磁芯的磁通量， $i=1$  或  $2$ 。當外磁場不大時，拾波線圈的淨感應電壓  $\Delta V = V_1 - V_2$  約為：<sup>[6-9, 17]</sup>

$$\Delta V(t) \approx -N \cdot A \cdot H_0 \cdot \frac{d^2 B}{dH^2} \cdot \frac{dH_{\text{exc}}(t)}{dt} \quad (2)$$

其中  $B$  為磁通密度， $A$  為兩磁芯總截面積， $d^2 B/dH^2$  為  $B-H$  曲線的二次微分。外磁場  $H_0$  的變動頻率遠小於激發頻率，故視為直流磁場。各拾波線圈的磁通量及感應電壓的波形如圖四(a)及(b)，串聯後的淨感應電壓如圖四(c)。



圖四、拾波線圈的感應電壓波形：(a) 磁通波形，(b) 感應電壓波形，(c) 淨感應電壓 ( $\Delta V = V_1 - V_2$ )。時間單位為 1 週期。

當外磁場為零時，兩磁芯的  $\Phi-t$  曲線相同（如圖四(a)的灰色點線）， $V-t$  曲線亦相同（如圖四(b)的灰色點線），淨感應電壓互相抵消： $\Delta V = V_1 - V_2 = 0$ （如圖四(c)的灰色點線）。當待測磁場不為零，在磁芯 1 的  $\Phi-t$  曲線維持在正磁通的時間較長（圖四(a)的紅色實線），而磁芯 2 則是負磁通的時間較長（圖四(a)的藍色實線）；兩者的  $V-t$  曲線發生相位差（圖四(b)），淨感應電壓  $\Delta V$  出現兩倍激發頻率的成份（第二諧波），如圖四(c)。外磁場越大，第二諧波振幅也越大。圖四(c)的波形不包含激發頻率的基頻，但真實的通量閘其磁芯材質、形狀、尺寸、線圈與感測方向等因素經常發生無可避免的差異與不對稱，使得淨感應電壓總是有激發頻率的基頻成份。

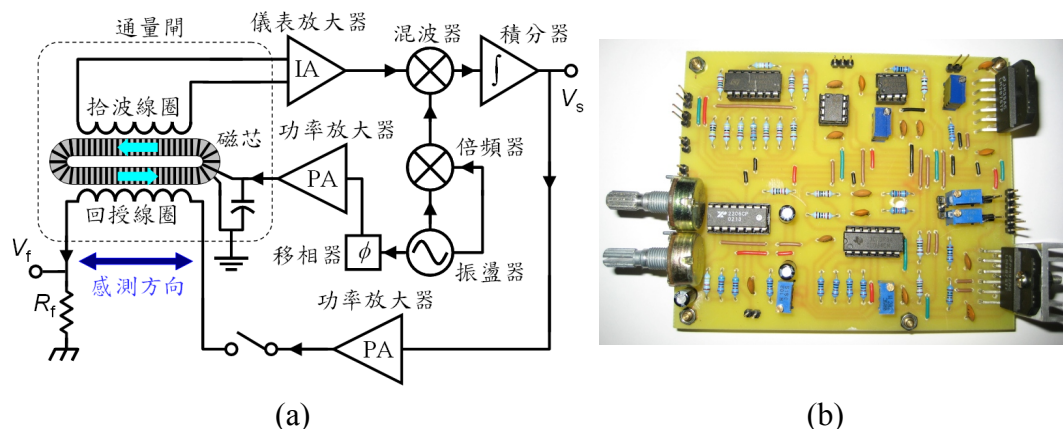
由方程式(2)可知，較多的拾波線圈匝數、較大的感測面積、較高的激發頻率（較大的  $dH_{\text{exc}}/dt$ ）以及較大的  $d^2 B/dH^2$ ，皆可提高通量閘的輸出電壓。線性的  $B-H$  曲線其二次微分為零，無法產生通量閘效應，故激發磁場振幅應足使磁芯接



近飽和磁化，以呈現非線性的  $B-H$ 。磁芯材料的特性是決定通量閘性能的主要關鍵。為了提高輸出電壓、減少功率消耗、並降低磁強計雜訊，理想的磁芯必須具有低矯頑性 (coercivity)、高初始磁導率 (initial permeability)、低渦電流損失 (eddy-current loss)、低磁致伸縮 (magnetostriction) 以及較小的巴克豪森跳變 (Barkhausen jump) 等<sup>[8]</sup>。低矯頑性及高初始磁導率可以降低功率消耗並減小零點漂移；低渦電流損失可以提高工作頻率；低磁致伸縮與較小的巴克豪森跳變能減小來自磁芯的雜訊。符合上述條件的軟磁性鎳鐵合金 (permalloy 及 mu-metal)，是最常用的磁芯材料。近年的文獻顯示，部份非晶磁性金屬可能為更理想的磁芯材料<sup>[8,18,19]</sup>。至於合適的原始材料形態，棒型通量閘為線材，跑道型與環形可利用薄帶捲繞<sup>[6-8]</sup>；微型通量閘則須利用電鑄或真空鍍膜技術來製作磁芯<sup>[8,13-15]</sup>。

### (三)磁強計電路

理想的磁強計應具有線性的磁場-電壓轉換函數。當待測磁場不大時，圖四(c)的淨感應電壓在兩倍激發頻率 (第二諧波) 的振幅，與待測磁場在感測方向的分量成正比；第二諧波振幅可利用相位敏感檢波器 (phase sensitive detector) 偵測<sup>[6-9]</sup>。雖然通量閘磁強計電路有多種可能的架構，類比式的第二諧波偵測電路能達到最低雜訊<sup>[9]</sup>。圖五(a)為類比式通量閘第二諧波偵測電路的示意圖，(b)為實體照片。



圖五、類比式通量閘電路，(a)示意圖 (激發線圈纏繞在磁芯上)；(b)實體照片。

振盪器產生正弦激發磁場，兩個輸出進入倍頻器以產生第二諧波參考訊號；另一個輸出至移相器調整相位後，透過功率放大器輸出激發電流。纏繞於磁芯的激發線圈，其電感與外接的並聯電容構成 LC 共振迴路，使激磁所需的功率最小化<sup>[20]</sup>。拾波線圈的淨感應電壓由儀表放大器讀取後，進入混波器與倍頻器產生的參考訊號相乘，產生與第二諧波振幅及相位有關的直流準位；最後經過積分器去除高頻振盪，即得到正比於外磁場  $H_0$  的電壓  $V_s$  (在小訊號模式下)。加上回授線圈 (圖五(a)的開關接通) 時，磁強計輸出為回授電阻  $R_f$  的端電壓  $V_f$ 。回

授磁場大小約與  $H_0$  相同，能使激發磁場的振盪中心維持在零磁場附近，提高磁場-電壓轉換函數的線性範圍。當激發頻率約為 10 kHz，磁場-電壓轉換函數可達 100 V/mT，頻寬為直流至 1 kHz 以上，線性誤差在 0.005% 以下<sup>[21,22]</sup>。除了增加線性範圍之外，回授磁場亦能減小零點漂移，並降低轉換函數的溫度係數<sup>[8,9]</sup>。通量閘電路與直流 SQUID 的調變-解調電路<sup>[5]</sup>相似，此類技術亦能運用於 AMR 與 GMR 磁強計，改進其線性度與零點漂移<sup>[9,11]</sup>。

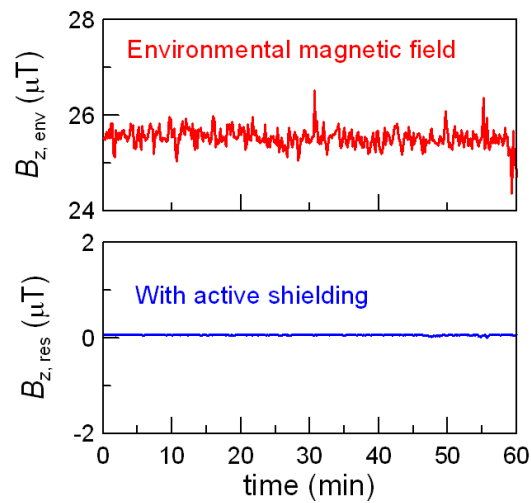
### 三、通量閘的應用與產業

因為通量閘磁強計的靈敏度高，能偵測磁性物質所造成的地磁場異常，故經常應用於考古<sup>[22]</sup>、地下探勘<sup>[24]</sup>與軍事偵察<sup>[6,23]</sup>。第二次世界大戰期間，通量閘磁強計被用於偵測潛水艇<sup>[6]</sup>，近代更利用它來偵測水雷<sup>[23]</sup>。通量閘磁強計亦是太空磁場探測的標準配備<sup>[6]</sup>。西元 1958 年，前蘇聯發射「史潑尼克三號」(Sputnik 3)人造衛星，首次將通量閘磁強計送上太空<sup>[6]</sup>；1979 年美國發射「磁場衛星」(Magsat)<sup>[25]</sup>，利用純量式的銫蒸氣磁強計與向量式的通量閘磁強計，測繪全球的地磁場分佈，成為重要的科學研究資料。

通量閘磁強計可成為理想的電子羅盤<sup>[14,21,22]</sup>元件。將電子羅盤、陀螺儀、加速度計、全球定位系統 (global positioning system, 縮寫 GPS) 與地理資訊系統 (geographic information system, 縮寫 GIS) 技術整合，能構成極完善的導航系統<sup>[26]</sup>。雖然微型 AMR 電子羅盤已被商業化<sup>[27]</sup>，然而較精確的 AMR 磁強計必需採用與通量閘類似的電路技術<sup>[11]</sup>才能實現；而當感測器尺寸在 5 mm 以上時，通量閘可成為最精確的電子式羅盤<sup>[9]</sup>。近年軟磁材料製作技術快速進展，微型通量閘的功率消耗已能降低至 10 mW 以下<sup>[14,28]</sup>，未來在消費性電子的導航應用具有相當潛力。

除了偵測地磁場，通量閘磁強計亦是均勻磁場線圈校正的實用方法<sup>[21]</sup>。以通量閘原理操作的電流偵測器，能作非接觸式的靜態電流量測<sup>[29]</sup>。通量閘亦可作為低頻渦電流偵測器，探測深藏在金屬內部的缺陷<sup>[30]</sup>。運用通量閘技術的三維位置追蹤裝置，能應用於內視鏡手術作精確定位<sup>[31]</sup>。低雜訊的通量閘磁強計能應用於人體磁場量測，例如肺部磁粉塵檢查<sup>[32]</sup>；在良好的磁屏蔽環境下，它還能測量心臟磁場<sup>[10]</sup>。

地磁擾動、雷電、交通工具、電器、升降機以及工具機的使用，都會造成環境中的低頻磁場擾動。欲量測微弱的生物磁場 (例如心臟磁場)，必需將 30 Hz 以下的磁場擾動去除。以高磁導率材料組成的磁屏蔽室，是隔離磁場最有效的方法。磁屏蔽室建造成本相當高，若配合主動磁屏蔽 (active magnetic shielding)，能增強屏蔽效果並降低成本<sup>[33]</sup>。利用通量閘偵測微小的磁場擾動，提供回授訊號至主動磁屏蔽線圈，即能有效降低磁場擾動。圖六為利用商業化的通量閘磁強計<sup>[22]</sup>對低頻 (0.1 Hz 以下) 環境磁場作主動磁屏蔽的結果：環境磁場的 z 方向分量擾動範圍約 1  $\mu\text{T}$  (紅色線)，利用主動磁屏蔽能將擾動抑制到 0.02  $\mu\text{T}$  以下 (藍色線)。



圖六、通量閘磁強計應用於主動磁屏蔽。感測器為 Bartington Instruments 生產的 Mag-03[22]。

目前繞線式通量閘磁強計的技術已相當成熟，主要製造商分佈在美國 [21,34,35]、英國 [22,36] 與德國 [37,38] 等地。通量閘的價格仍高，依規格不同約在 200 至 5000 美元之間。近年來類比積體電路的性能提昇且價格降低，使通量閘的應用有日漸普及的趨勢。我國電子產業的製造與設計能力強大，若能結合學界在材料及電路的研發成果，改進磁強計尺寸與功率消耗，未來有機會成為重要的磁場感測器研發與製造基地。

#### 四、結論

通量閘磁強計是極重要的磁場量測裝置，其關鍵技術為軟磁性材料與類比電路。繞線式通量閘的磁場-電壓轉換函數能高達  $10^5$  V/T，能精確量測地磁場向量，並可量測 1 mT 至 0.1 nT 的微小磁場。結合尖端的材料、電子與微製造科技，微型化與低功率化是通量閘未來的發展趨勢，而新穎磁芯材料與電路研發是提昇其性能及價值的決定因素。通量閘磁強計能應用於學術、工業以及民生領域，值得我國投入進行相關的技術開發與基礎研究。

#### 參考文獻

- [1] 維基百科, 網址為 <http://en.wikipedia.org/wiki/Compass>
- [2] J. E. Lenz, "A review of magnetic sensors," IEEE Proc. 78, 973-989 (1990).
- [3] J. Lenz and Alan S. Edelstein, "Magnetic sensors and their applications," IEEE Sensors Journal 6, 631-649 (2006).



- [4] D. Robbes, "Highly sensitive magnetometers—a review," *Sensors and Actuators A* 129, 86–93 (2006).
- [5] R. Kleiner, D. Koelle, F. Ludwig, and J. Clarke "Superconducting quantum interference devices: State of the art and applications," *Proc. IEEE* 92, 1534-1548 (2004).
- [6] D. I. Gordon and R. E. Brown, "Recent advances in fluxgate magnetometry," *IEEE Trans. Magn.* 8, 76-92 (1972).
- [7] F. Primdahl, "The fluxgate magnetometer," *J. Phys. E: Sci. Instrum.* 12, 241-253 (1979).
- [8] P. Ripka, "Review of fluxgate sensors," *Sensors and Actuators A* 33, 129-141 (1992).
- [9] P. Ripka, "Advances in fluxgate sensors," *Sensors and Actuators A* 106, 8–14 (2003).
- [10] C. Dolabdjian, S. Saez, A. Reyes Toledo, and D. Robbes, "Signal-to-noise improvement of bio-magnetic signals using a flux-gate probe and real time signal processing," *Rev. Sci. Instrum.* 69, 3678-3680 (1998).
- [11] M. Vopálenský, P. Ripka, and A. Platil, "Precise magnetic sensors," *Sensors and Actuators A* 106, 38–42 (2003).
- [12] P. Ripka, "New directions in fluxgate sensors," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 215-216, 735-739 (2000).
- [13] S.O. Choi, S. Kawahito, Y. Matsumoto, M. Ishida, Y. Tadokoro, "An integrated micro fluxgate magnetic sensor," *Sensors and Actuators A* 55, 121-126 (1996).
- [14] H.S. Park, J.S. Hwang, W.Y. Choi, D.S. Shima, K.W. Na, and S.O. Choi, "Development of micro-fluxgate sensors with electroplated magnetic cores for electronic compass," *Sensors and Actuators A* 114, 224–229 (2004).
- [15] E. Delevoye, M. Audoin, M. Beranger, R. Cuchet, R. Hida, T. Jager, "Microfluxgate sensors for high frequency and low power applications," *Sensors and Actuators A* 145–146, 271–277 (2008).
- [16] M. Butta and P. Ripka, "Two-domain model for orthogonal fluxgate," *IEEE Trans. Magn.* 44, 3992-3995 (2008).
- [17] J. Deak, A.H. Miklich, J. Slonczewski, and R.H. Koch, "A low-noise single-domain fluxgate sensor," *Applied Physics Letters* 69, 1157 (1996).
- [18] E. Paperno, E. Weiss, and A. Plotkin, "A tube-core orthogonal fluxgate operated in fundamental mode," *IEEE Trans. Mag.* 44, 4018-4021 (2008).
- [19] P. M. Drljača, F. Vincent, P. Kejík, and R. S. Popović, "Advanced process of the magnetic core integration for the micro fluxgate magnetometer," *Sensors and Actuators A* 129, 58–61 (2006).
- [20] P. Ripka and S.W. Billingsley, "Fluxgate: Tuned vs. untuned output," *IEEE Trans.*

- Magn. 34, 1303-1305 (1998).
- [21] Billingsley Aerospace & Defense, 20936 Theseus Terrace, Germantown, Maryland 20876, USA, 網址為 <http://www.magnetometer.com/>
- [22] Bartington Instruments, 5, 10 & 11 Thorney Leys Business Park, Witney, Oxford, OX28 4GE, England, UK, 網址為, <http://www.bartington.com/>
- [23] S. Kumar, A.R. Perry, C.R. Moeller, D.C. Skvoretz, M.J. Ebbert, R.K. Ostrom, S.L. Bennett and P.V. Czipott, “Real-time tracking magnetic gradiometer for underwater mine detection,” OCEANS '04. MTTs/IEEE TECHNO-OCEAN '04, 9-12 Nov. 2004, Volume 2, 874 – 878.
- [24] F. Collara, P. Fenningb, and C. Mora, “Application of drillhole vector magnetic measurements to resolve the position of existing underground structures,” NDT&E International 38, 231–236 (2005).
- [25] 維基百科, 網址為 <http://en.wikipedia.org/wiki/Magsat>
- [26] J. Včelák , P. Ripka, J. Kubík, A. Platil, P. Kašpar, “AMR navigation systems and methods of their calibration,” Sensors and Actuators A 123–124, 122–128 (2005).
- [27] Honeywell Magnetic Sensors, 網址為 <http://www.magneticsensors.com/>
- [28] K.W. Na, J. Yuan, J.H. Ji, and S.O. Choi, “Microfluxgate sensor with amorphous cobalt (Co–Nb–Zr) soft magnetic core for electronic compass,” J. Appl. Phys. 99, 08M306 (2006).
- [29] P. Ripka, “Current sensors using magnetic materials,” Journal of Optoelectronics and Advanced Materials 6, 587 – 592 (2004).
- [30] M.v. Kreutzbruck, K. Allweins and C.Heiden, “Fluxgate-magnetometer for the detection of deep lying defects,” in Proceedings of the 15th World Conference on Non-Destructive Testing (15<sup>th</sup> WCNDT), 15-21 October 2000, Rome.
- [31] J. Shimada, K. Itoh, S. Yamaguchi, A. Nishikawa, and F. Miyazaki “Magnetic navigation system for thoracoscopic surgery of the pig lung partial resection with transbronchial marking,” International Congress Series (Elsevier) 1281, 752–755 (2005).
- [32] J. Tomek, A. Platil, P. Ripka, P. Kaspar, “Application of fluxgate gradiometer in magnetopneumography,” Sensors and Actuators A 132, 214–217 (2006).
- [33] D. Platzek, H. Nowak, F. Giessler, J. Röther, and M. Eiselt, “Active shielding to reduce low frequency disturbances in direct current near biomagnetic measurements,” Rev. Sci. Instrum. 70, 2465-2470 (1999).
- [34] Watson Industries, Inc., 3041 Melby Road, Eau Claire, Wisconsin 54703, USA, 網址為 <http://www.watson-gyro.com/>
- [35] LE USA Inc. Walker LDJ Scientific, 40 Englewood Suite C, Lake Orion, Michigan 48359, USA, 網址為 <http://www.laboratorio.elettrofisico.com/>
- [36] Speake & Co. Llanfapley, 6, Firs Road, Llanfapley, Abergavenny,

- Monmouthshire, NP7 8SL, UK, 網址為 <http://www.speakesensors.com/>
- [37] Magson GmbH, Carl-Scheele-Str. 14, D-12489 Berlin, Germany, 網址為  
<http://www.magson.de/>
- [38] Stefan Mayer Instruments, Wallstr. 7, D-46535 Dinslaken, Germany, 網址為  
<http://www.stefan-mayer.com/>