



磁鐵與電磁鐵的設計

丁舜年編譯

中國科學圖書儀器公司印行

電 工 技 術 叢 書

磁鐵與電磁鐵的設計

丁 舜 年 編 譯

中國科學圖書儀器公司印行

上 海

中國科學社工程叢書

電工技術叢書

磁鐵與電磁鐵的設計

Design of Magnets and Electromagnets

中華民國三十四年四月初版

中華民國三十六年四月再版

版權所有 翻印必究

原著者	Benjamin W. Jones
編譯者	丁 舜 年
出版者	電工圖書出版社
發行者	楊 孝 述
發行所	中國科學圖書儀器公司 上海中正中路六四九號
印刷所	中國科學圖書儀器公司 上海中正中路六四九號
分公司	中國科學圖書儀器公司 南京 廣州 漢口 重慶 北平

凡 例

- (一)本叢書編譯之目的，係為訓練電機工程事業各項中級工程師及高級技工之用；職業學校，函授學校等採作課本，最為適合；即為有志自修者，亦極合用；而大學生備作參考，以補大學教本略於實用之不足，裨益亦非淺鮮。
- (二)本叢書係用美國國際函授學校 (International Correspondence School) 所編之教本為依據，延聘專家，從事編譯；原書優點為 (1) 注重實用，(2) 說理淺顯；(3) 插圖豐富詳明，尤以插圖多經精心繪製，與正文相得益彰，最為特色。
- (三)本叢書一面採用國外已見成效之書籍為藍本，一面力求適合國情，盡量加入國內已有之材料及法規，庶免隔閡之弊。
- (四)本叢書對於原書之優點，力為發揮，惟原書若有舛誤或欠妥，亦不事盲從，而惟求其至是，不憚加以修正，以免遺誤。
- (五)本叢書側重中級電工教育，對於高深精確之理論，大都從略，間有必須牽涉之處，亦祇能取譬於日常切近之事物，出以通俗近似之陳述，精確之度難免犧牲，讀者諒之。
- (六)本叢書中所用各項單位，均取國際制，凡原書用英美制之處，則加註國際制之當量值。

- (七)本叢書在原則上遵用教育部頒之名詞。凡名詞若爲部頒所無者，或部頒名詞在實用上有窒礙者，則有編輯會議商定之。
- (八)本叢書各冊名詞力求統一，惟卷帙甚繁，編輯部同人校訂難免疏漏，所望讀者發現矛盾或不一致之處，惠予指正，以期再版時收統一之效。
- (九)本叢書中重要名詞後均附註“文名詞，並於每冊後附英漢對照名詞彙。
- (十)本叢書爲普及起見，用語體文撰述。
- (十一)本叢書第一集共二十三冊，電工各門大致俱備，其他門類，如電信等，擬陸續另出第二集補成之。
- (十二)本叢書編輯同人均以業餘之暇從事撰述，疏誤在所難免，所望海內方家，不吝見教，俾於再版時得以更正，不獨同人個人之幸，亦中國電工教育之幸也。

譯 者 序

磁鐵和電磁鐵，是兩種應用極廣的器械。各種控制設備，信號器具，自動開關，自動斷路器，替續器，以及一切電信機器等，大部份都是少不了磁鐵或電磁鐵的。磁鐵和電磁鐵在一般工業上的應用，也是很多，例如磁性分離器，提舉磁鐵，吸持磁鐵等等。所以磁鐵和電磁鐵的應用，實在是不勝枚舉；但討論磁鐵和電磁鐵的專門書籍，却很不容易找到，尤其是關於磁鐵和電磁鐵的設計。本書專論磁鐵與電磁鐵的應用和設計。全書共計十章，可分為四大部份：第一部份討論磁學的基本原理；第二部份討論電磁鐵的型式和應用；第三部份討論電磁鐵的設計；最後一章討論永久磁鐵的特性，設計方法，和應用實例。本書中論及電磁鐵的設計時，為避免牽入高深的理論和繁複的計算起見，引用了許多很有價值的經驗公式，並附以圖表。每種電磁鐵的設計，各附一個計算實例，俾讀者易於領會，同時更可作為設計時的依據。所用的計算單位，除一部份已改為國際單位外，其餘均附註國際單位的當量值。

民國三十四年三月丁舜年序

目 錄

第一章 導言	1
1.1 定義 1.2 簡單理論	
第二章 磁學基本原理	4
2.1 磁學定律 2.2 磁化曲線 2.3 空氣隙 2.4 串聯電路 2.5 並聯電路 2.6 磁場強度 2.7 通量密度 2.8 實用公式表 2.9 公式的應用	
第三章 常用的幾種電磁鐵	18
3.1 拍合式磁鐵 3.2 E形磁鐵 3.3 螺管線卷式磁鐵 3.4 應用	
第四章 磁力	26
4.1 重要定則 4.2 拉力 4.3 螺管線卷式磁鐵的拉力 4.4 拉力公式	
第五章 拍合式磁鐵設計手續	36
5.1 概論 5.2 直流磁鐵線卷的設計 5.3 經驗公式 5.4 設計實例 5.5 電壓變動與溫度昇高的影響 5.6 銅線的選擇 5.7 電阻和瓦特的計算 5.8 鐵心直徑的選定	
第六章 螺管線卷式磁鐵的設計手續	55
6.1 交流線卷的設計 6.2 線卷匝數 6.3 線卷的長度和直徑	

6.4 設計螺管線卷式磁鐵的實例

第七章 E形磁鐵的設計手續..... 66

7.1 概論 7.2 設計手續

第八章 蔽極線卷..... 71

8.1 蔽極線卷的功效 8.2 蔽極線卷的構造 8.3 作用原理

8.4 遮蔽與未遮蔽通量的比率 8.5 蔽極線卷的電阻

第九章 電磁鐵的應用..... 77

9.1 總論 9.2 交流磁鐵拉力特性 9.3 磁鐵的選擇 9.4 直流
鐵與交流磁鐵的比較 9.5 直流磁鐵拉力特性 9.6 響應速率特
性 9.7 時間常數 9.8 選擇電磁鐵的一般問題

第十章 永久磁鐵..... 87

10.1 一般特性 10.2 製造永久磁鐵的材料 10.3 磁滯迴線 10.4
鋁鎳鈷合金的特性曲線 10.5 效率最佳的空氣隙長度 10.6 相
當於效率最佳的空氣隙時的拉力 10.7 應用 10.8 用永久磁鐵
產生磁場 10.9 用永久磁鐵代替機械搭扣

問題與習題..... 99

英漢名詞對照索引..... 101

磁鐵與電磁鐵的設計

第 一 章 導 言

1.1 定義 在韋氏大字典 (Webster's Dictionary) 中，磁體的定義如下：任何物體，具有磁石 (loadstone) 的特性者，稱為磁體 (magnet)。人造磁體 (artificial magnet) 是用人為的方法，賦與這種特性。從這個定義可以知道，永久磁體和電磁體 (electromagnet)，都是人造磁體，不過在實用上有價值的，祇有這兩種，所以就可以把這兩種磁體，認為真真的磁體，不必再冠以『人造』兩字，

永久磁體 (permanent magnet)，是一種用磁性物質 (magnetic material) 造成的物體，一經磁化，就能永久保持磁性。電磁體是這樣的一種物體，如果電流在一匝或很多匝數的導線內流通，那末這物體就能吸引磁性物質，像鋼和鐵一類的物質。但是電流停止，這吸引磁性物質的特性，也就立刻消失。用鋼鐵製成的磁體就叫做磁鐵。

最簡單的電磁體，是一隻用一匝或很多匝數絕緣銅線繞成

的線卷，電流就在這銅線內流動。這種型式的磁體，沒有鐵心，在學術上稱為螺管線卷(solenoid)。這種螺管線卷，因為沒有鐵心，祇有一個可以放置鐵心的孔，所以不獨可以磁化磁性物質，還會將磁性物質吸入孔內。這種線卷內，如果有電流通行，就會吸引磁性物質。這特性和一塊永久磁鐵，或一塊已經磁化的鋼棒相同。在每匝導線內流行的電流，能使這一匝導線的周圍，產生磁通(magnetic flux)。相鄰各匝導線所產生的磁通，有互鏈(interlink)的趨向。結果，這線卷所產生的磁通，自內心向四周擴張，以至於無窮遠的地方。換一句話說，就是所產生的磁場，和線卷互鏈。有電流通行的螺管線卷，能夠成爲一個磁體，也就是因為產生這種磁通的緣故。

1.2 簡單理論 下面的假定，也許可以幫助我們理解磁鐵的作用。這假定就是說：永久磁鐵內的各分子，是非常接近的，其間的阻力，也是很大。如果有一個很大的磁化力(magnetizing force)，加到這塊鋼的上面去，那末，所有的分子，因受吸引力的作用，排成一個方向。若將磁化力除去，祇要不受到震動，或別種擾亂磁化力的作用，內部的分子，就會保持這同一的方向。假定每一個分子，就是一塊磁鐵，那末這合成的物體，當然也是一塊磁鐵。

電磁鐵是和永久磁鐵相同，不過分子中間的阻力很小。如果將磁化力除去，各分子立刻回復原來排列紛亂的情形，這電磁鐵也就立刻失去吸引別種磁性物質的特性。從上面的討論，可以知

道，永久磁鐵和電磁鐵的磁性是一樣的，所以可用同樣的單位表示，不過這種單位，各有相當限制，這一點將在後面說明。每種單位的性質，必須認識清楚，以免應用時發生錯誤。

第二章

磁學基本原理

2.1 磁學定律 關於產生磁性或磁通的定律，和表明電路中產生電流的定律相同。歐姆定律，原來是應用於導線或電路中有電流通行的時候。依照這定律，

$$\text{電壓} = \text{電阻} \times \text{電流}$$

或

$$E = RI$$

式中 E = 電動勢 (electromotive force)，用伏特表示；

R = 電阻，用歐姆表示；

I = 電流，用安培表示。

關於磁通的產生，也可以有相同的關係，或同樣的方程式，就是

$$\text{磁通勢} = \text{磁阻} \times \text{磁通}。$$

當電流在一隻線卷內的一匝或很多匝數內流通，就會產生磁通勢 (magnetomotive force)。10 安培的電流，經過 100 匝的導線，會產生 1000 安培匝 (ampere-turn) 的磁通勢。如果用安培匝代替磁通勢，那末上面的公式，可以寫作

$$\text{安培匝} = \text{磁阻} \times \text{磁通}，$$

(在米制中，磁通勢是用吉柏†表示)

†吉柏是 gilbert 之譯音。

$$\text{或} \quad NI = R \times \phi \quad (1)$$

(在米制中, $1.257NI = R \times \phi^*$)

式中 N = 線卷的匝數;

I = 電流, 用安培表示;

R = 磁路的磁阻 (Reluctance), 用來爾 (rel) 表示;

ϕ = 磁路內的磁通, 用馬克斯威爾 (Maxwell) 或磁力線 (line of force) 表示。

上面的公式, 又可以這樣說明: 安培匝是驅迫磁通, 使之通過磁阻 R 的『原動力』。磁通的單位是馬克斯威爾, 相當於一根磁力線。如果將一安培匝的動力, 加於一來爾磁阻的磁路上, 那末這磁路內就產生一根磁力線或一馬克斯威爾的磁通。在英國單位制中, 磁阻的單位是來爾。來爾的定義如下: 若有一磁體, 當外加的磁通勢是一安培匝, 而磁體內就有一根磁力線或一馬克斯威爾的磁通, 則其磁阻為一來爾。一吋立方的空氣的磁阻是 0.313 來爾 (一厘米立方的空氣的磁阻是 0.795 來爾)。無論磁通的密度如何, 這空氣的磁阻是恆定不變的。鐵的磁阻, 僅為體形和體積都相同的空氣的磁阻的一極小分數, 但並不是恆定不變的。當鐵心內的通量密度 (flux density) 增加, 磁阻也跟着增大, 等到接近飽和狀態時, 這磁阻就和空氣的磁阻很相近。

如果將上面的定義和公式(1)合併, 那末

$$* 1 \text{ 吉柏} = \frac{4\pi NI}{10} = 1.257NI.$$

$$\text{安培匝} = \text{來爾} \times \text{馬克斯威爾}^* \quad (1.1)$$

或
$$NI = R \times \phi \quad (\text{在米制中 } 1.257NI = R \times \phi)$$

這公式和公式(1)完全相同。

將公式(1)移項,得

$$R = \frac{NI}{\phi} \quad (\text{在米制中, } R = \frac{1.257NI}{\phi}) \quad (2)$$

及
$$\phi = \frac{NI}{R} \quad (\text{在米制中, } \phi = \frac{1.257NI}{R}) \quad (3)$$

從公式(3)可以知道,通量 ϕ 與安培匝成正比,與磁阻成反比。我們又知道,磁阻與磁路的長度成正比,與截面積成反比。所以欲求磁路中通量的大小,必須知道安培匝或安培匝的相當值,和磁路的磁阻。用作磁路的最普通物質是空氣和鋼鐵兩種。空氣的磁阻是每吋立方 0.313 來爾。鐵和鋼的磁阻並不是恆定不變,須視鋼鐵的性質和飽和程度而定。

磁阻的倒數稱為磁導(permeance),可用下式表示,

$$\text{磁導} = \frac{1}{\text{磁阻}} = \frac{1}{R},$$

移項,得

$$R = \frac{1}{\text{磁導}}$$

1 吋立方或 1 厘米立方的物質的磁導叫做導磁係數(permeability),用記號 μ 表示。前面曾經說過磁路的磁阻與長度成正比,與截面積成反比。相反的,磁路的磁導與截面積成正比,與長度

*在米制中,吉柏=磁阻 \times 馬克斯威爾。

成反比。這關係可用下面的公式或方程式表示之：

$$\text{磁導} = \frac{1}{R} = \frac{\mu A}{L} \quad (4)$$

式中 R 和 μ 的意義，同前面說明的一樣，

A = 磁路的截面積，用方吋表示

L = 磁路的長度，用吋表示（在米制中， A 用平方厘米表示

L 用厘米表示， μ 用一厘米立方的磁阻或磁導表示）。

2.2 磁化曲線 圖 2.1 示矽鋼 (silicon steel), 挪威鐵 (Norway iron), 和鑄鋼 (cast steel) 三種磁性物質的磁化曲線 (magnetization curve)。這三種物質的導磁係數，變化很大。曲線 X 是矽鋼的磁化曲線，曲線 X_1 是矽鋼的導磁係數曲線。曲線 Y 和曲線 Y_1 是挪威鐵的磁化曲線和導磁係數曲線。曲線 Z 和曲線 Z_1 是鑄鋼的磁化曲線和導磁係數曲線。這三種物質的導磁係數，和磁性物質中的最大與最小導磁係數比較，相差尚遠，不過可以代表通常應用於電磁鐵中磁性物質的一般數值。巨姆合金 (permalloy) 的導磁係數，約較矽鋼大十倍，所需要的磁化力，還不到矽鋼所需要的二十分之一。不過巨姆合金，在使矽鋼飽和的通量密度 60% 時，就已成爲飽和。在別一方面，鑄鐵 (cast iron) 的導磁係數差不多較矽鋼小二十倍。在較高的通量密度時，需要很大的磁化安培匝。

前面說到的五種磁性物質，祇用以說明可以應用的磁性物質種類是很多的。欲製造一只簡單的電磁鐵，並不是一定需要任

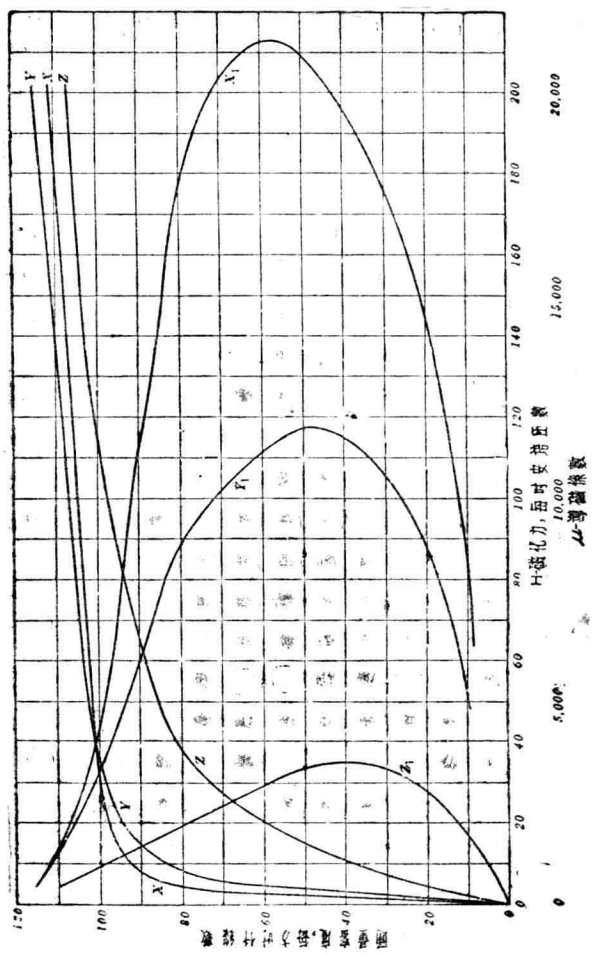


圖2.1 磁化曲線及導磁係數曲線

凡特種材料，祇須質料較軟，導磁係數必須和鑄鋼相等，或更較鑄鋼為佳。如果所用材料能因製造手續，或別種處理方法，而變

成硬性，那末當磁化力除去後，常會保持相當磁性，不宜用以製造電磁鐵。

若將空氣的導磁係數和圖 2.1 中磁性物質的導磁係數相比較，或者是有意義的事情。空氣的導磁係數是 3.19 (每吋立方)，這種物質的最大導磁係數，約在通量密度每平方吋 40,000 至 60,000 線(即每平方厘米 6200 至 9300 線)之間。每平方吋 40,000 至 60,000 線的密度，並不能算是不普通。超過這個範圍以外的導磁係數，約在 2,000 至 20,000 之間。在英制中，每吋立方的空氣的導磁係數是 3.19，和上面的數值相比較，大約是 1:600 或 1:6000。在大部份的情形時，大概可以這樣估計，就是磁性物質的導磁係數，至少較空氣大 1,000 倍。

在表明磁化時各因數間關係的公式 $\mu = \frac{B}{H}$ 中， μ 代表導磁係數， B 代表磁路中每平方吋截面積內的磁力線數， H 代表磁性物質中每吋長度的安培匝數 (在米制中， B 以每平方厘米截面積內的磁力線數表示，即以高斯*為單位， H 以每厘米的吉柏數表示，所求得的 μ ，也是一厘米立方的導磁係數)。

2.3 空氣隙 如果磁路中留有相當的空氣隙，例如長度為 $\frac{1}{2}$ 吋 (6.36 毫米) 或更大，那末就可以假定，至少有 90% 的磁化力 (NI) 是用以驅迫磁通，使通過這空氣隙，僅有 10% 的磁化力或安培匝，是用以驅迫磁通，使通過其餘鐵的部份。所以如果磁路中有相當大的空氣隙，這全部磁路的磁阻，可以視為不變；這磁

*高斯 gauss.