

單元

1

概論

» 單元重點

為了符合不同的電源型態、環境與用途，科學家與工程師們努力開發出許多型態的電工機械，第一章會先介紹電工機械的主要功能以及分類方式，讓您了解電工機械家族成員。有鑑於磁場在電工機械扮演的重要角色，第二章則是複習基本電學上冊中有關【電感與電磁】中的基本觀念，如有需要也可以翻閱基本電學相關書籍。

» 單元綱要

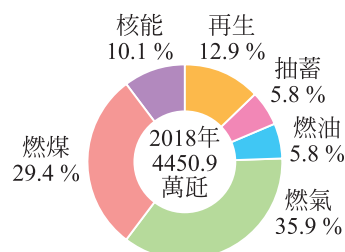
- 第一章 電工機械之分類與應用
- 第二章 基礎電磁理論

本單元學習時間 3 小時

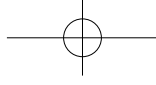
單元一 生活知識家 電能—提升人類文明生活的動力

台灣電力公司是一家涵蓋發電、輸電、配電及售電的綜合電力公司。民營電廠及汽電共生所生產的電力，都由台電負責收購後再轉售給用戶。到 2018 年底，台灣電力系統的總裝置容量為 4450.9 萬瓩，主要發電方式以火力為主，另外涵蓋核能、水力及再生能源等多種電源。

乾淨與方便的電能讓我們的生活更舒適，但也必須面對能源枯竭、溫室氣體排放、核能安全等重要課題。如何在「能源安全」、「經濟發展」與「環境保護」中取得平衡，是大家都關心的嚴肅議題。地球只有一個，就讓我們從隨手關燈，力行節能減碳的生活開始做起吧！



資料來源：台灣電力公司網站



CHAPTER 1

電工機械之分類與應用

» 本章重點

電工機械的種類繁多，主要是因應不同環境與用途，也因此常常造成觀念混淆，有鑑於此，本章先介紹電工機械的重要歷史事件，以及經過近 200 年的發展後，這些機器對於目前人類生活的影響。

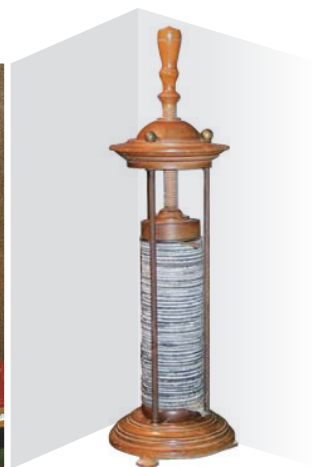
1-1 電工機械的重要歷史發展

西元 1800 年義大利科學家伏打 (Volta) 發明了圖 1-1 的伏打堆 (voltaic pile)，也就是早期的電池，電學的研究便開始蓬勃發展，為隨後的「電氣時代」拉開了帷幕。

1800



(a) 伏打 (Alessandro Volta)



(b) 伏打堆

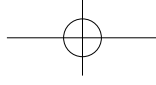
圖 1-1 伏打與其重要發明
(圖片來源：維基百科)

1821



(a) 法拉第 (Michael Faraday)

圖 1-2 法拉第與其重要發明
(圖片來源：維基百科)



1821 年，英國科學家法拉第 (Faraday) 做了一個重要的實驗，他將圖 1-2(b) 的金屬桿子通電後，發現這根金屬桿會繞著中間的磁鐵緩緩旋轉，這是首次世人見識到【電能】可以轉變成【動能】的現象。1831 年他也發現磁鐵與線圈間有相互運動時可以產生電流，也就是【動能】可以轉化成【電能】。因此電動機與發電機這兩個電機工業的核心產品，基本原理可說都與法拉第有關。

1885 年西屋電器的創辦人韋斯汀豪斯 (Westinghouse) 從英國科學家取得變壓器的專利，經過研究改良於 1886 年推出了如圖 1-3 所示的實用變壓器，可將交流電能轉換成高電壓低電流形式，然後再轉換回去，大幅減少電能在輸送過程中的損失。1890 年間由西屋公司 (Westinghouse) 推展的交流供電方式徹底擊敗了由愛迪生通用電器公司 (Edison General Electric) 推展的直流供電方式，成為目前主要的電力供應方式。

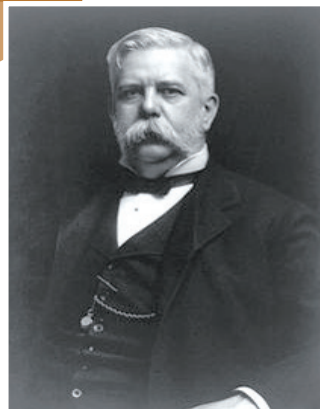
隨堂練習

- () 1. 義大利科學家伏打所發明的伏打堆提供的電源型態為 (A) 直流電 (B) 直流脈波 (C) 單相交流電 (D) 三相交流電。
- () 2. 最早發現動能可以轉變成電能的科學家是 (A) 伏打 (B) 法拉第 (C) 愛迪生 (D) 韋斯汀豪斯。



(b) 法拉第的馬達實驗

1885

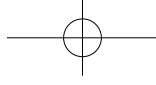


(a) 韋斯汀豪斯
(George Westinghouse)



(b) 早期變壓器

圖 1-3 韋斯汀豪斯與變壓器
(圖片來源：維基百科)



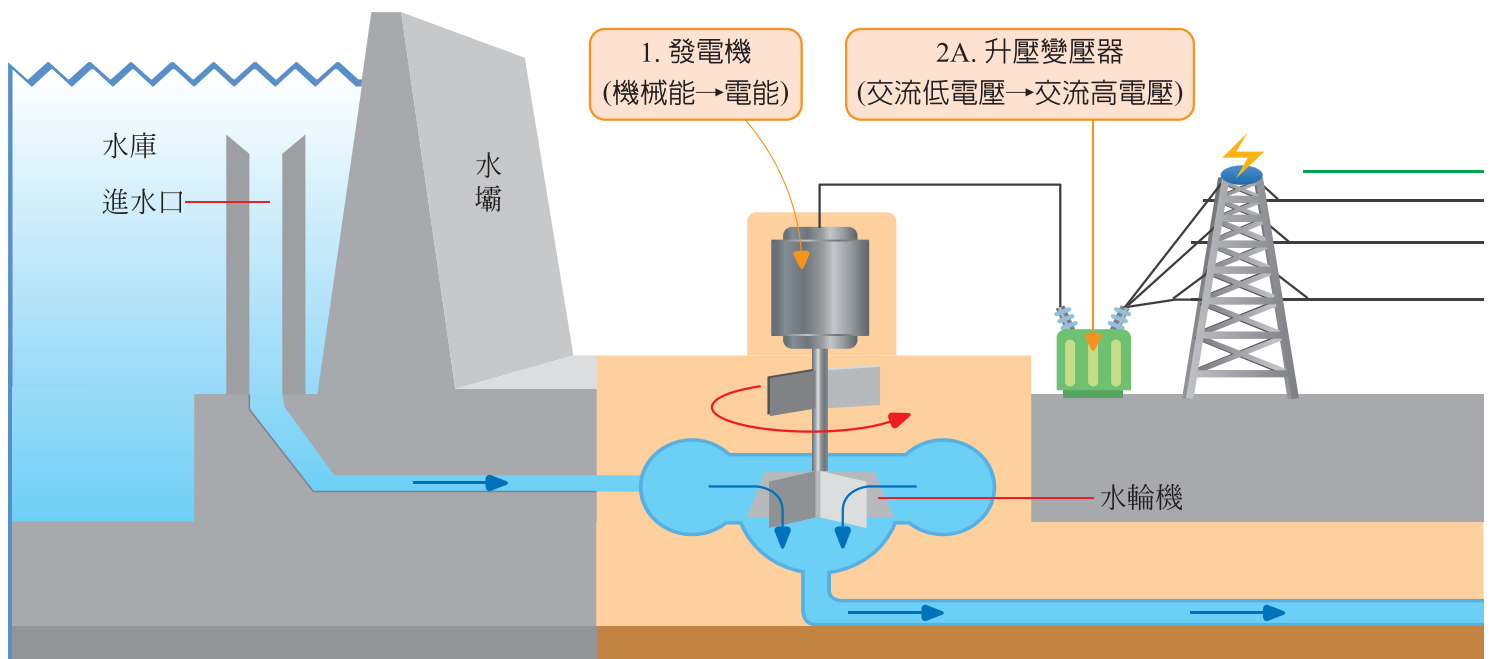
1-2 電工機械與現代生活

爲了使人類的生活更舒適，無數科學家及工程師進行深入研究，因而發展出許多機械與設備。由圖 1-4 的說明可以看出電工機械的三個主要機種【發電機、變壓器及電動機】如何分工合作帶給我們生活的便利。

1. 發電機：發電機是將各種型態的機械能【如：火力、水力或風力】轉成電能的機器。圖 1-4 所示爲一座水力發電廠，水庫除了儲存水資源提供生活使用外，也可以利用水輪機將水的位能轉變成機械能，再透過發電機轉變成電能提供生活用電。

水壩儲存的水量越充足，發電機的發電容量也越大。臺灣地區受限於地形與環境，全島境內 11 所水力發電廠總計安裝 82 台發電機，總裝機容量爲 4541 MW。

2. 變壓器：變壓器的工作是將交流電壓升高或是降低。發電廠多設於遠離用戶的偏遠地區。因此發電廠內的升壓變壓器會將發電機產生的交流電壓升高以降低電流，減少長距離輸電所造成的損失。在接近用戶時，使用降壓變壓器將電壓逐段降低，方便用戶使用。



3. 電動機：電動機的工作是將各種型態的電能【直流或交流】轉變成機械能的機器。生活週遭有不同形態的電動機，提供穩定且低噪音的動力，為人類帶來無比的舒適與便利。

圖 1-5 列舉電工機械三個主要機種特性。

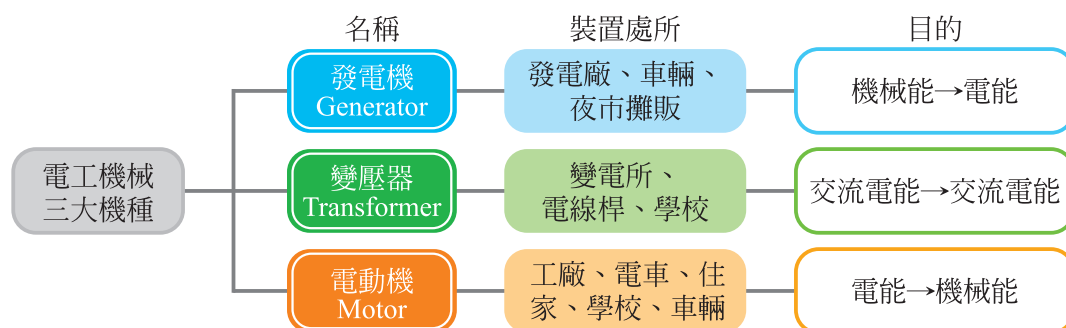


圖 1-5 電工機械三個主要機種

隨堂練習

- () 1. 發電機的能量變化係 (A) 機械能變換成電能 (B) 電能變換成機械能
(C) 電能變換成熱能 (D) 熱能變換成電能。
- () 2. 變壓器藉由藉電磁感應原理而做的能量轉換方式為 (A) 電能變成機械能 (B) 交流電能變成交流電能 (C) 太陽能變成電能 (D) 機械能變成電能。

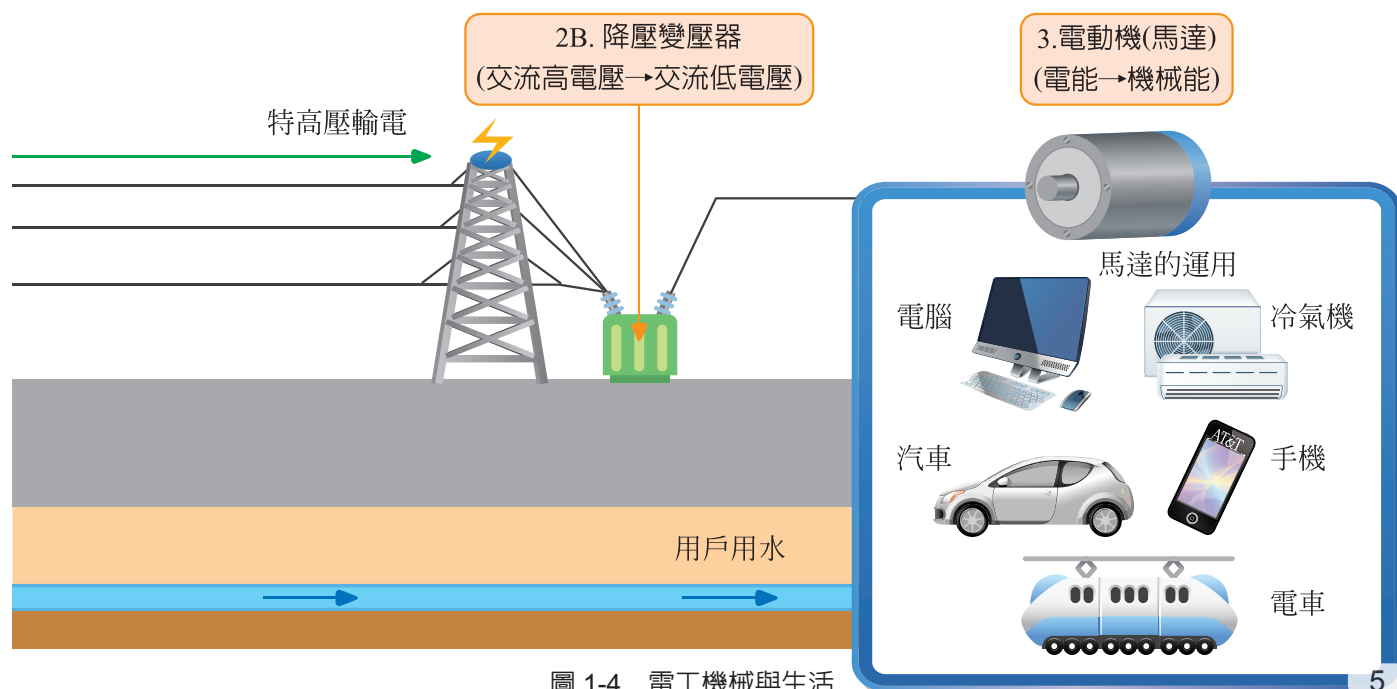
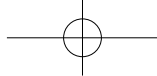


圖 1-4 電工機械與生活



1-3 發電機 (generator) 的分類

無論哪種發電機，其基本原理可參考弗萊明 (Fleming) 右手定則，如圖 1-6 所示，右手中指代表電流方向【電】，食指代表磁場方向【磁】，姆指代表導體運動方向【力】。

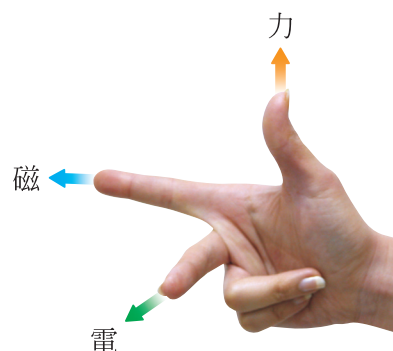


圖 1-6 弗萊明右手 (發電機) 定則

圖 1-7 中採用發電機的目的是獲得電能。因此首要條件是取得穩定的動力來源 (原動機)，才能使發電機內的電樞繞組與磁場交互運動，產生電能。

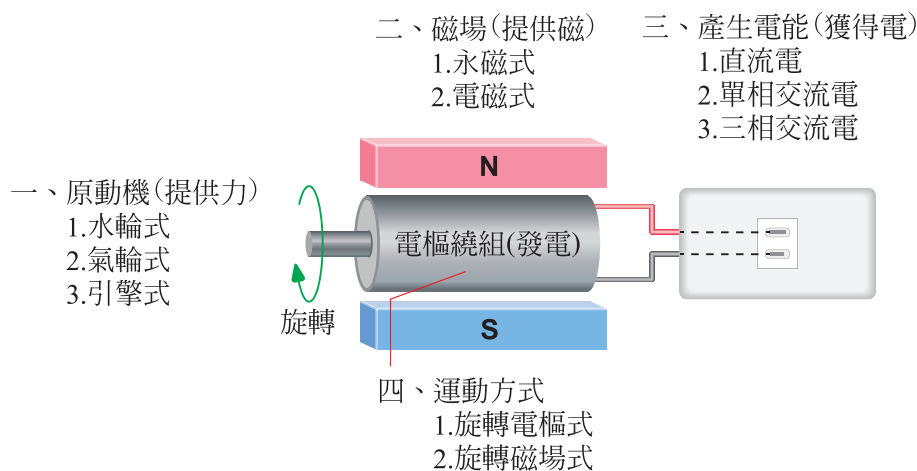


圖 1-7 發電機基本概念圖

依據產生電能型態，發電機主要分為：

1. 直流發電機：輸出為直流電能。常用於汽機車或船舶。
2. 交流發電機：輸出為交流電能。依據發電原理可分成同步發電機與感應發電機。依據產生的電源型態可分成三相交流發電機與單相交流發電機。其中發電廠內多為大容量三相交流同步發電機，構造複雜，需由專業人士操作與保養。

爲了因應不同需求，發電機發展出不同類型，如圖 1-8 列舉各式發電機の種類：

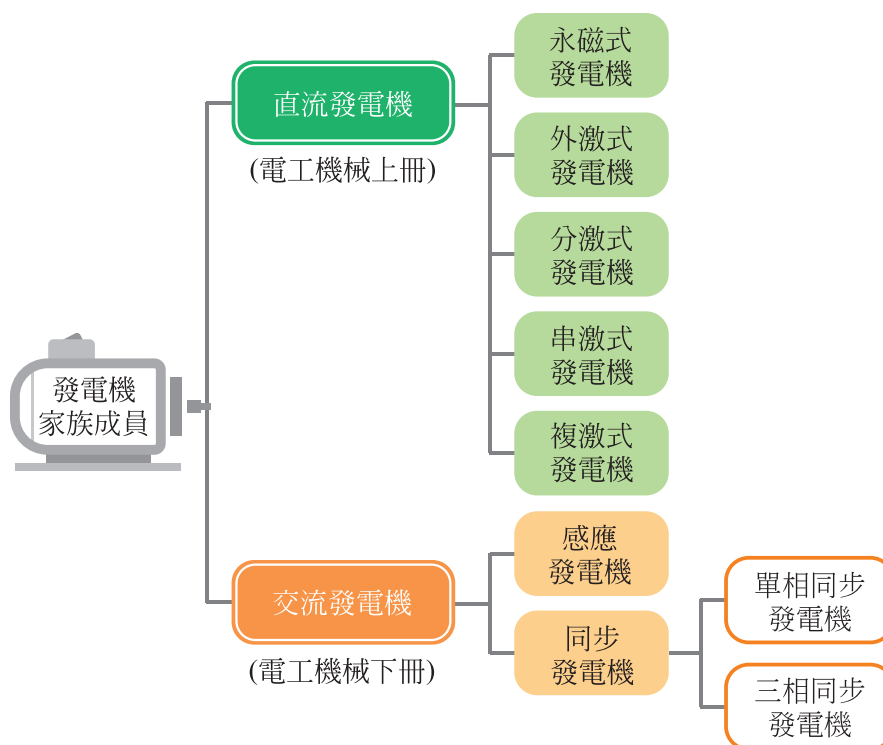
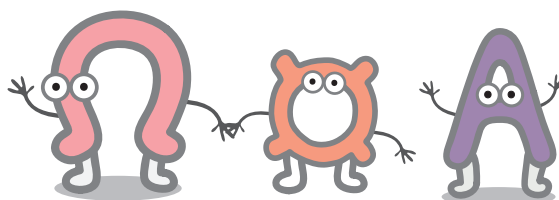
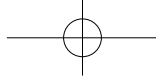


圖 1-8 發電機的家族成員

隨堂練習

- () 1. 要瞭解發電機的電流方向、導體的運動方向及磁場方向的关系應該使用何種定則？
 (A) 歐姆定律 (B) 法拉第定律 (C) 弗萊明左手定則 (D) 弗萊明右手定則。
- () 2. 發電廠安裝的發電機型式多為 (A) 直流發電機 (B) 單相交流發電機
 (C) 三相交流發電機 (D) 感應發電機。





1-4 變壓器 (transformer) 的分類

變壓器用於交流電壓的升降，由於沒有轉動的部分，因此也稱為靜止電機，其基本概念參考圖 1-9 的說明。

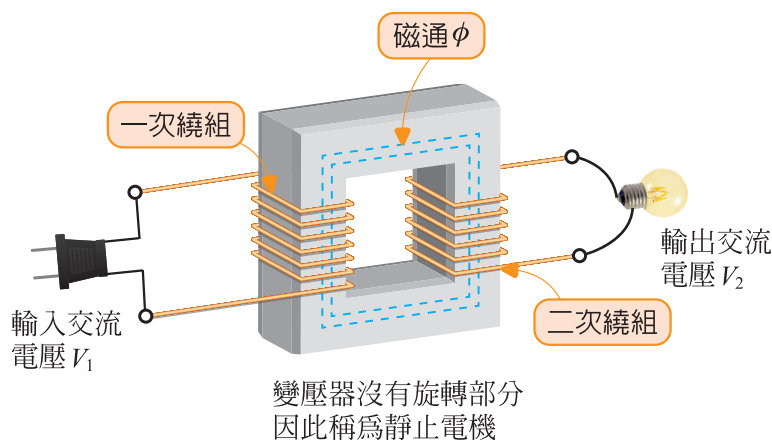


圖 1-9 變壓器基本概念圖

當一次繞組外加交流電壓 V_1 後，電流在一次繞組內流動，使得鐵心內產生交變磁通，透過電磁感應方式，二次繞組感應產生相同頻率之交流電壓 V_2 ，藉由繞組的不同設計，變壓器有下列幾種分類方式：

(一) 依據電壓轉換高低，可以分為

1. 升壓變壓器：將交流低電壓 V_1 ，轉變為交流高電壓 V_2 ，常用於發電廠內。
2. 降壓變壓器：將交流高電壓 V_1 ，轉變為交流低電壓 V_2 ，常見於電線桿上變壓器。

(二) 依據轉換電源形態，可以分為

1. 單相變壓器：將單相交流電壓升高或降低後，供應給家庭或是小型工廠使用。
2. 三相變壓器：將三相交流電壓升高或降低後，供應給大型用戶或是工廠使用。

隨堂練習

- () 1. 為了將發電機產生的電壓進行長距離輸送，發電廠內會使用 (A) 降壓變壓器 (B) 升壓變壓器 (C) 比壓器 (D) 比流器。
- () 2. 一般電線桿上面所見到的變壓器屬於哪種類型？ (A) 降壓變壓器 (B) 升壓變壓器 (C) 比壓器 (D) 比流器。

1-5 電動機 (motor) 的分類

電動機通稱馬達，爲了配合不同的環境與需要因此種類繁多，但是大部分的電動機原理可以參考圖 1-10 弗萊明左手（電動機）定則。中指代表電流方向【電】，食指代表磁場方向【磁】，姆指代表導體運動方向【力】。

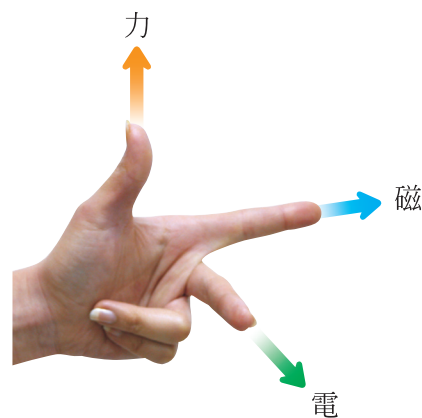


圖 1-10 弗萊明左手（電動機）定則

採用電動機的目的是要產生動力，故須外加電能並與磁場持續作用，才能產生穩定的動力，電動機基本概念參考圖 1-11 的說明：

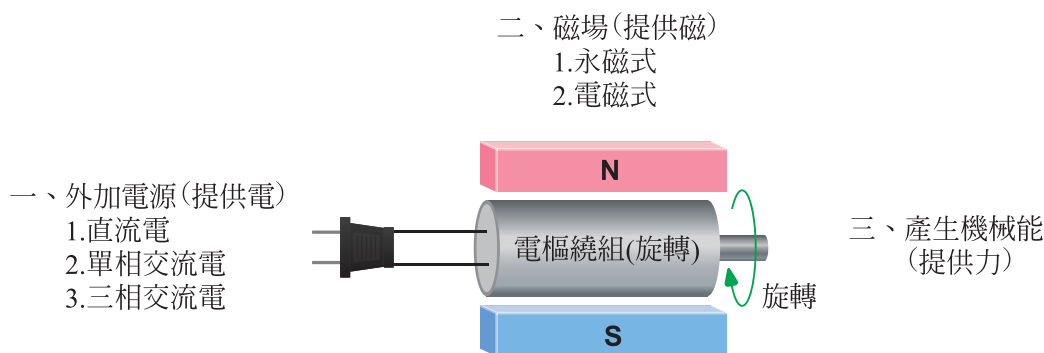
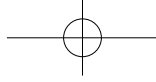


圖 1-11 電動機基本概念圖

電動機依據使用電源種類，主要分爲：

1. 直流電動機：使用直流電源，常用於汽機車或是玩具內，依據磁場來源又分爲永磁式與電磁式二大類。
2. 交流電動機：使用交流電源，依據原理又分爲：
 - (1) 感應電動機：運轉過程中轉子轉速會低於同步轉速，分成三相感應電動機、單相感應電動機、蔽極式等類型。



- (2) 同步電動機：運轉過程中轉子轉速會等於同步轉速，分成三相同步電動機、單相同步電動機。

圖 1-12 列舉各式電動機的種類：

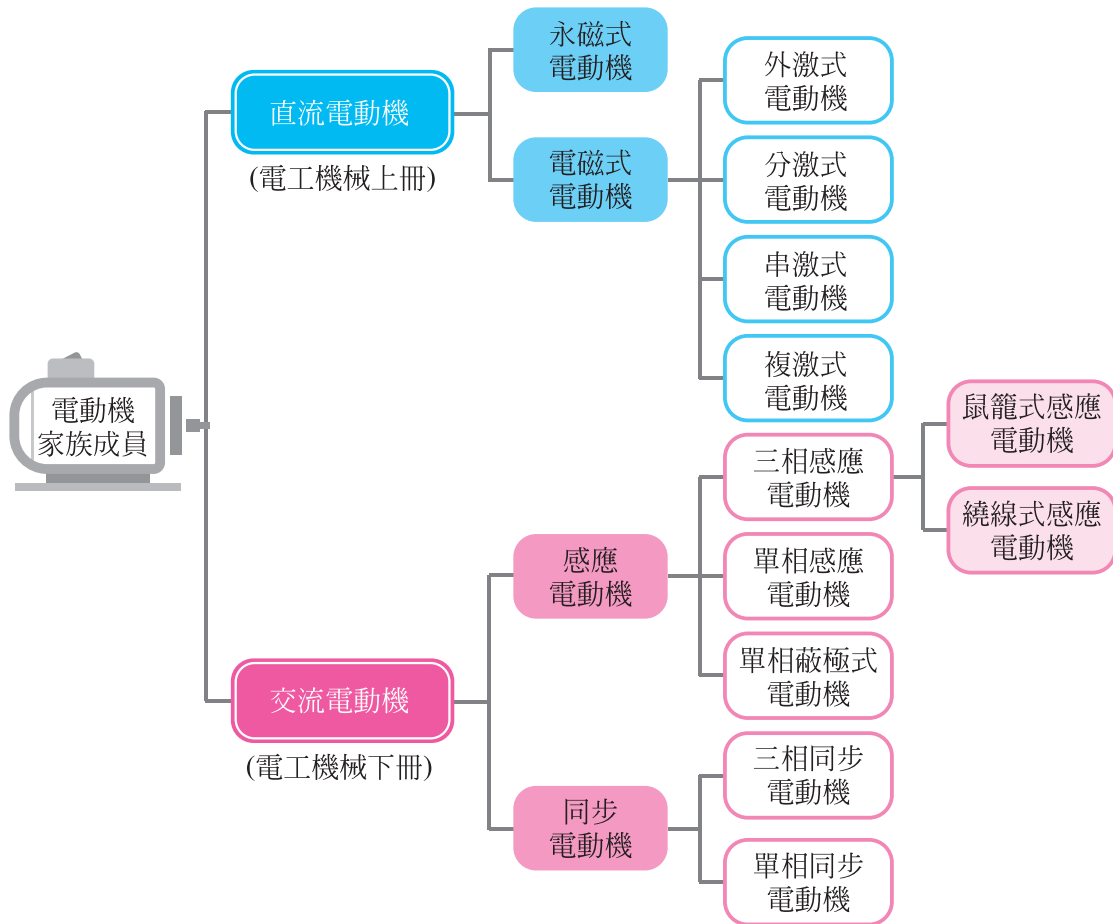


圖 1-12 電動機的家族成員

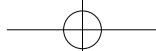
隨堂練習

- () 1. 要瞭解電動機的運動方向、導體電流方向及磁場方向的关系應該使用何種定則？
(A) 歐姆定律 (B) 法拉第定律 (C) 弗萊明左手定則 (D) 弗萊明右手定則
- () 2. 電動機的能量變化係 (A) 機械能變換成電能 (B) 電能變換成機械能
(C) 電能變換成熱能 (D) 熱能變換成電能。

自我評量

一、選擇題

- 1-2** () 1. 電動機的能量變化係
- (A) 機械能變換成熱能 (B) 熱能變換成機械能
(C) 電能變換成熱能 (D) 電能變換成機械能。
- () 2. 發電廠內主要設置的電工機械設備是
- (A) 交流發電機和變壓器 (B) 直流發電機和變壓器
(C) 交流電動機和交流發電機 (D) 直流電動機和直流發電機。
- 1-3** () 3. 發電機的發電容量大小，主要決定因素為
- (A) 轉動的速度 (B) 磁場的強弱
(C) 繞組數量的多寡 (D) 原動機的機械能。
- () 4. 外加動力與磁場後能夠產生直流電的機器稱為
- (A) 變壓器 (B) 直流電動機
(C) 直流發電機 (D) 三相發電機。
- () 5. 發電機乃利用導體在磁場中運動而感應電勢，此原理即是利用
- (A) 安培左手定則 (B) 安培右手定則
(C) 楞次定律 (D) 弗萊明右手定則。
- 1-4** () 6. 目前臺灣電力公司配送到一般住家的電源形態為
- (A) 直流電 (B) 單相交流電 50 Hz
(C) 單相交流電 60 Hz (D) 三相交流電 60 Hz。
- () 7. 變壓器藉電磁感應原理而做的能量轉換方式為
- (A) 將交流電能變成直流電能 (B) 將交流電能變成交流電能
(C) 將直流電能變成交流電能 (D) 將直流電能變成直流電能。
- () 8. 爲了方便用戶使用，電線桿上的變壓器功能為
- (A) 高壓直流電降為低壓直流電
(B) 低壓直流電升為高壓直流電
(C) 高壓交流電降為低壓交流電
(D) 低壓交流電升為高壓交流電。



自我評量

() 9. 下列何者不是旋轉電機？

(A) 感應電動機

(B) 同步發電機

(C) 直流發電機

(D) 變壓器。

1-5 () 10. 下列敘述何者錯誤？

(A) 直流發電機就是將機械能轉換成直流電能之電機裝置

(B) 交流電動機就是將交流電能轉換成機械能之電機裝置

(C) 直流電動機就是將直流電能轉換成機械能之電機裝置

(D) 變壓器就是將直流電能轉換成直流電能之電機裝置。

() 11. 下列有關電工機械常用機種的英文名稱，何者錯誤？

(A) 發電機 generator

(B) 電動機 motor

(C) 變壓器 transformer

(D) 變壓器 transistor。

() 12. 有關汽機車所使用的起動馬達，大多使用何種形式？

(A) 直流電動機

(B) 單相感應電動機

(C) 三相感應電動機

(D) 三相同步電動機。

() 13. 將交流電能轉換為機械能之電工機械稱為

(A) 直流發電機

(B) 直流電動機

(C) 交流電動機

(D) 變壓器。

() 14. 電風扇、電冰箱、冷氣機和吹風機等家用電器，所使用的電機型態是屬於

(A) 直流電動機

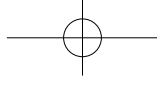
(B) 交流發電機

(C) 直流發電機

(D) 交流電動機。

二、問答題

1. 說明電工機械三個主要機種名稱、用途與特性。
2. 說明發電機的種類。
3. 畫圖說明變壓器的基本構造與原理。
4. 說明電動機的種類。



CHAPTER 2

基礎電磁理論

» 本章重點

依據弗萊明定則無論是電動機要將中指代表的【電】能轉變成姆指代表的【力】；或是發電機要將姆指代表的【力】轉變成中指代表的【電】能，食指所代表的【磁場】都扮演著關鍵角色；而變壓器更是完全利用磁場感應進行交流電能轉換，本章將回顧基本電學中有關電磁理論的觀念。

2-1 磁場

(一) 磁的基本特性

圖 2-1 為一根棒狀磁鐵，這種具有磁性的物體稱為磁體，因為磁性而產生的具體力量稱為磁力，磁鐵兩端磁力特別強的部位稱為「磁極」。

磁鐵具有吸引鐵器等磁性體之作用。每塊磁鐵都有 N 極和 S 極，兩者成對且同時存在，磁極間具有「同極相斥、異極相吸」之特性。

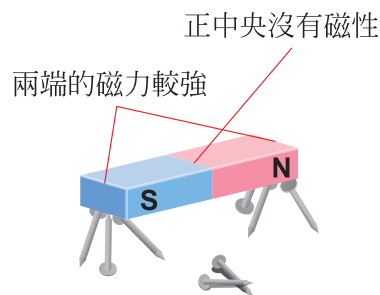


圖 2-1 磁鐵的基本特性

(二) 磁力線的特性

法拉第除了發現電動機與發電機的原理外，他也曾將磁鐵放在紙下面，上面灑上鐵屑後，結果如圖 2-2 所示，鐵屑形成一個以磁鐵為中軸的橢圓形，他將其稱為磁力線 (magnetic line of force)。

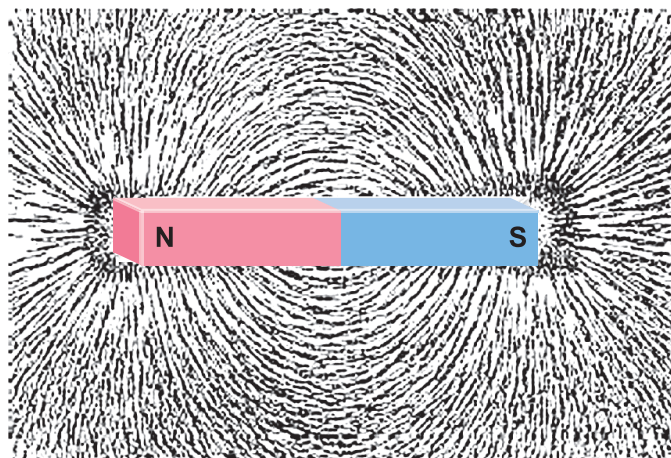


圖 2-2 鐵屑在磁鐵間的分佈

由於肉眼看不到力線，為了正確畫出其方向，將圖 2-3 的小型指南針放在磁鐵的外面，將指針在不同位置時的偏轉角度描繪後就稱為「磁力線」。磁力線所能作用到的空間區域稱為「磁場」，將物體放入磁場後產生磁性的現象則稱為「磁化」。

外部的磁力線集中回到磁鐵 S 極後，內部由 S 極往 N 極的磁力線稱為「磁化線」，磁化線的多寡代表該物質被磁化的難易程度。外部的磁力線與內部的磁化線所經路徑則稱為「磁路」。

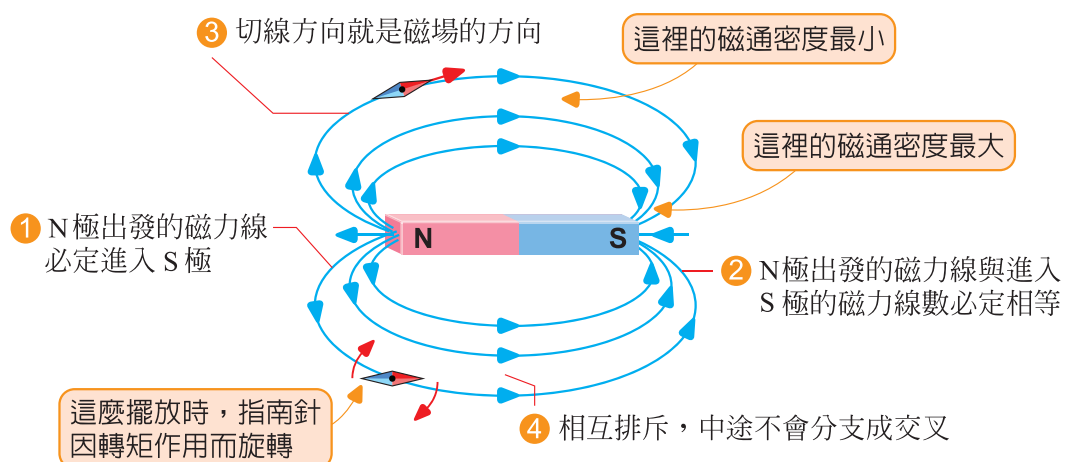
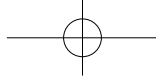


圖 2-3 磁力線的繪製

隨堂練習

- () 1. 關於磁力線之敘述，下列何者錯誤？
- (A) 磁力線相互吸引 (B) 磁力線離開或進入磁鐵時必垂直於磁鐵表面
- (C) 磁力線為封閉曲線 (D) 磁力線方向由 N 極到 S 極。
- () 2. 關於磁化線敘述，下列何者錯誤？
- (A) 磁化線恆不相交
- (B) 磁化線在磁鐵內部由 N 極到 S 極
- (C) 磁化線與磁力線經過的路徑稱為磁路
- (D) 磁化線數目與磁力線數目相等。

2-2 磁通量與磁通密度

(一) 磁通量 (ϕ)

磁通量 (ϕ) 代表磁場中的磁力線總數，爲了紀念德國物理學家韋伯 (Weber) 與英國學者馬克士威 (Maxwell) 對於電磁學的貢獻，因此國際單位制 (SI) 磁通量的單位以「韋伯：Wb」命名，而磁通量 (ϕ)：

$$1 \text{ 韋伯 (Wb)} = 10^8 \text{ 馬克士威 (Maxwell)} \quad (2-1)$$

(二) 磁通密度 (B)

磁通密度代表垂直貫穿一個單位面積的磁通量，即：

$$B = \frac{\phi}{A} \quad (2-2)$$

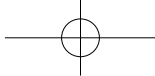
B ：磁通密度 (韋伯 / 平方公尺； $\frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}$) ϕ ：磁通量 (韋伯；Wb)

A ：面積 (平方公尺； m^2)

$$\text{將公式 (2-1) 與 (2-2) 合併可得：} 1 \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2} = \frac{10^8 \text{ maxwell}}{10^4 \text{ cm}^2} = 10^4 \frac{\text{maxwell}}{\text{cm}^2}$$

爲了紀念美籍塞爾維亞工程師特斯拉 (Tesla) 以及德國著名數學家高斯 (Gauss) 的貢獻。國際單位制 (SI) 將磁通密度的單位 Wb/m^2 稱爲特斯拉 (Tesla)，而 $\frac{\text{maxwell}}{\text{cm}^2}$ 稱爲高斯 (Gauss)。因此，磁通密度 (B)：

$$1 \text{ Wb/m}^2 = 1 \text{ T (特斯拉)} = 10^4 \frac{\text{maxwell}}{\text{cm}^2} = 10^4 \text{ Gauss (高斯)}$$



範例

01

如圖 2-2 所示的棒狀磁鐵，倘若磁鐵的截面積為 $20\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ ，通過的磁通量為 $6 \times 10^5\text{ maxwell}$ ，試求：

(1) 磁通密度為多少高斯？ (2) 相當於多少特斯拉？

解

	(1) CGS 制	(2) SI 制
磁通量 ϕ	$6 \times 10^5\text{ maxwell}$	$6 \times 10^5 \times 10^{-8}\text{ Wb} = 6 \times 10^{-3}\text{ Wb}$
截面積 A	$20\text{ cm} \times 10\text{ cm} = 200\text{ cm}^2$	$0.2\text{ m} \times 0.1\text{ m} = 0.02\text{ m}^2$
磁通密度 $B = \frac{\phi}{A}$	$\frac{6 \times 10^5}{200} = 3 \times 10^3\text{ (maxwell/cm}^2, \text{ Gauss)}$	$\frac{6 \times 10^{-3}}{0.02} = 0.3\text{ (Wb/m}^2; T)$

隨堂練習

- () 1. 磁通量 ϕ 之單位， $1\text{ Wb} =$ (A) 10^8 (B) 10^4 (C) 1 (D) 10^{-8} 馬克士威。
- () 2. 磁通密度 B 之單位， 1 Wb/m^2 (特斯拉) = (A) 10^{-4} (B) 1 (C) 10^4 (D) 10^8 高斯。
- () 3. 某磁鐵的截面積為 $50\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ ，已知磁通密度為 0.5 Wb/m^2 ，試求磁通量為多少韋伯，相當於多少馬克士威？ (A) $0.1, 10^7$ (B) $0.1, 10^9$ (C) $10^3, 10^{11}$ (D) $10^7, 0.1$ 。

2-3 永久磁鐵與電磁鐵

對任何形式的電工機械而言，磁場都扮演關鍵角色，目前磁場的來源主要分成：

(一) 永久磁鐵

永久磁鐵外觀如圖 2-4，能夠長期保持其磁力與極性不變。依據來源分為天然產物（磁鐵礦）與人工製造（如氧化鐵、鋁鎳鈷以及高磁力的稀土類等）二類。

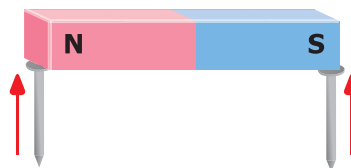


圖 2-4 永久磁鐵外觀

(二) 電磁鐵

圖 2-5 為目前常用的電磁鐵形態，將導線以螺線狀的方式纏繞在磁性物質上，當導線通電後，電流通過導線產生磁場使造成磁性物質會被磁化而產生磁力，電流停止後磁力也隨之消失。

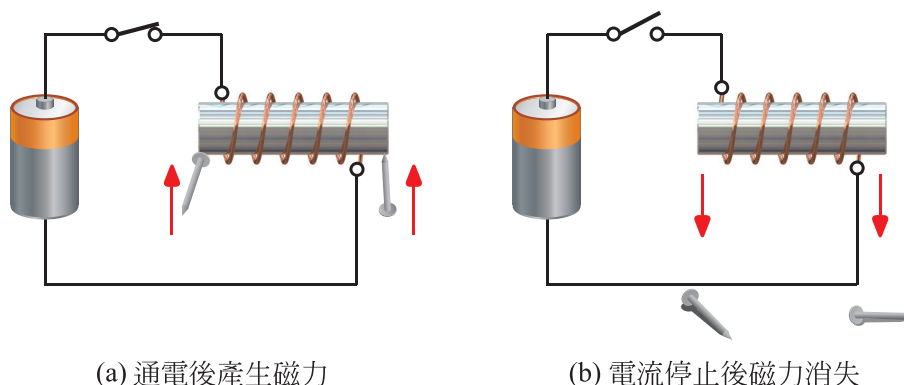


圖 2-5 電磁鐵的特性

圖 2-6 中永久磁鐵與電磁鐵皆有 N、S 兩個磁極。永久磁鐵雖然構造簡單，但是磁力無法控制，多用於小型電機。電磁鐵雖然構造複雜，但是可以控制電流大小與方向來改變磁力與極性，普遍用於各式電機。

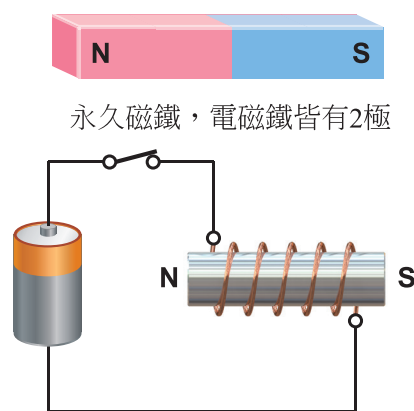


圖 2-6 永久磁鐵與電磁鐵

隨堂練習

- () 1. 有關永久磁鐵之敘述，下列何者錯誤？
- (A) 可由天然礦石或人工製造而來 (B) 磁力幾乎保持不變
- (C) 極性無法改變 (D) 可以切分成單一磁極。
- () 2. 有關電磁鐵的敘述，下列何者錯誤？
- (A) 線圈通電後兩端分別產生 N 極與 S 極 (B) 改變電流可以改變磁力大小 (C) 改變電源極性可以改變磁極方向 (D) 單位長度下所繞的線圈數愈少，磁場強度愈大。

2-4 電流磁效應

(一) 安培右手定則

厄斯特發現電流具有產生磁場的現象後，法國科學家安培 (Ampere) 馬上集中精力研究，幾周後就針對電流在磁場中的運動規律現象提出了安培定則 (右手螺旋定則)，後人統稱為安培右手定則。

將圖 2-7 單根導體通上電源後，右手大拇指指向電流方向，再將其它四根手指握緊電線，則四根手指彎曲的方向為磁場方向。

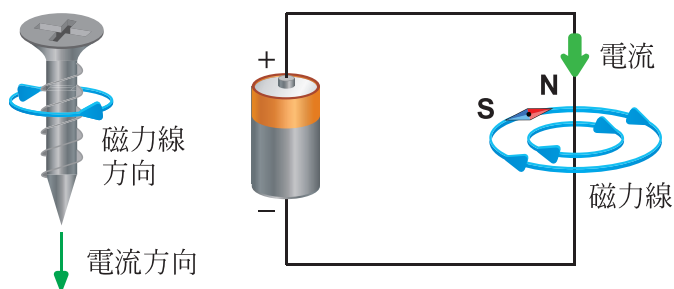


圖 2-7 單根導體產生的磁場方向依安培右手定則判斷

(二) 右螺旋定則

如圖 2-8 所示，將單根導體繞成線圈後通上直流電，此時電流沿著導線持續向下流動，將右手拇指外的四根手指視為電流方向，則拇指所指的方向即為磁力線 (N 極) 方向。

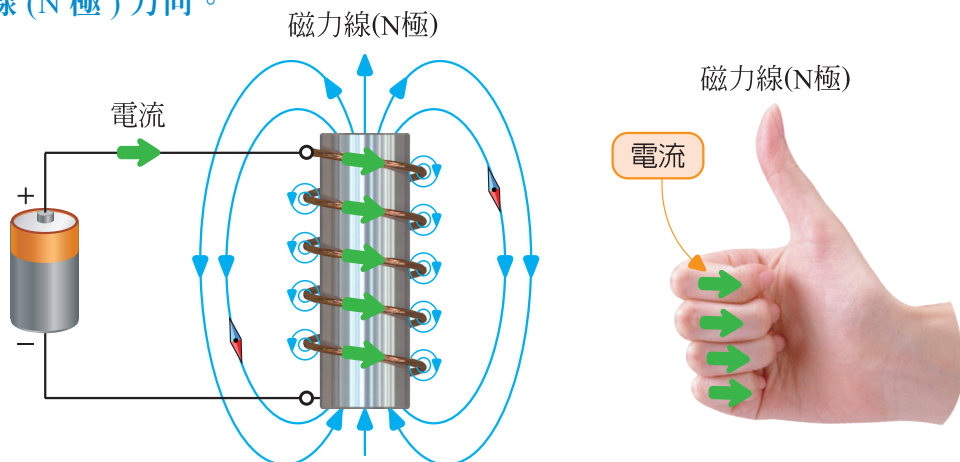


圖 2-8 線圈產生的磁場方向依右螺旋定則判斷

隨堂練習

() 1. 如圖所示，已知電磁鐵磁力線方向，

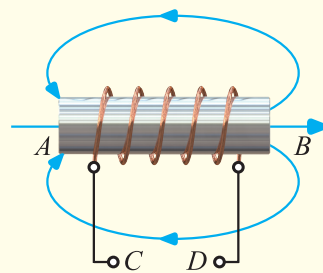
則 A 、 B 兩端產生的磁極為

(A) N 極、N 極

(B) N 極、S 極

(C) S 極、N 極

(D) S 極、S 極。



() 2. 同上題所述， C 、 D 兩端應該加入何種電源？

(A) C 接直流正端、 D 接直流負端

(B) C 端接直流負端、 D 端接直流正端

(C) 交流電源

(D) 任何型態的電源皆可以。

(三) 磁路

1. 磁動勢

將圖 2-9(a) 圓形鐵心上繞有 N 匝線圈後加入電流 I ，此時線圈所能產生磁通量的能力稱為磁動勢：

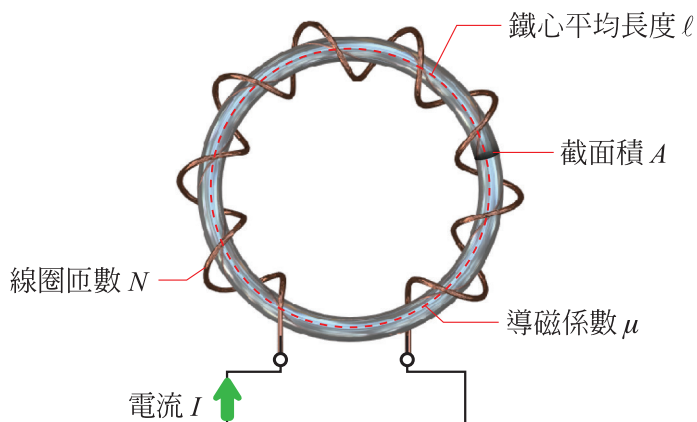
$$F = NI$$

(2-3)

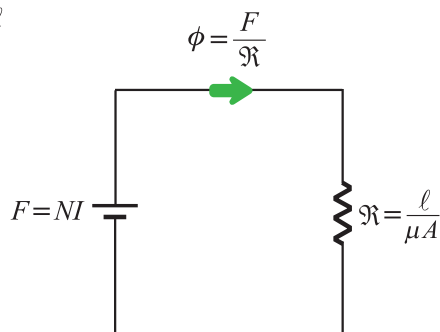
F ：磁動勢 (安匝；AT)

N ：匝數 (匝；Turns)

I ：電流 (安培；A)

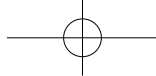


(a) 磁路結構



(b) 等效電路

圖 2-9 磁路與等效電路



2. 磁阻

不同物質對於磁場的阻力稱為磁阻 $\mathfrak{R}$ ，磁阻的大小除了與材料本身有關外，也受到磁路的長度以及截面積的影響，以圖 2-9(a) 螺線管為例，其磁阻為：

$$\mathfrak{R} = \frac{\ell}{\mu A} \quad (2-4)$$

$\mathfrak{R}$ ：磁阻 (安匝 / 韋伯；AT/Wb) ℓ ：長度 (公尺；m)

μ ：導磁係數 (亨利 / 公尺；H/m) A ：截面積 (平方公尺；m²)

3. 磁通量

磁路中的磁通量 ϕ 與磁動勢 F 成正比，與磁路的磁阻 $\mathfrak{R}$ 成反比，故磁通量：

$$\phi = \frac{F}{\mathfrak{R}} \quad (2-5)$$

上述公式與歐姆定律 $I = \frac{V}{R}$ 的觀念相同，其關係可用圖 2-9(b) 等效電路表示之，因此公式 2-5 也被比喻為**磁路的歐姆定律**。

4. 磁場強度

相同磁動勢 (F) 對於不同的磁路長度 ℓ 所能產生的效果不同，因此將單位長度的磁動勢稱為磁場強度或是磁化力：

$$H = \frac{F}{\ell} = \frac{NI}{\ell} \quad (2-6)$$

H ：磁場強度 (安匝 / 公尺；AT/m)

5. 導磁係數

磁阻是物質阻止產生磁通的一種特性，為了評估磁力線通過不同材料的難易程度，會以導磁係數 μ 來表示：

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (2-7)$$

μ_0 ：真空導磁係數 ($4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$)

μ_r ：相對導磁係數

(空氣 $\mu_r = 1$ 、鋼材 μ_r ：2000 ~ 6000、矽鋼片 μ_r ：2000 ~ 80000)

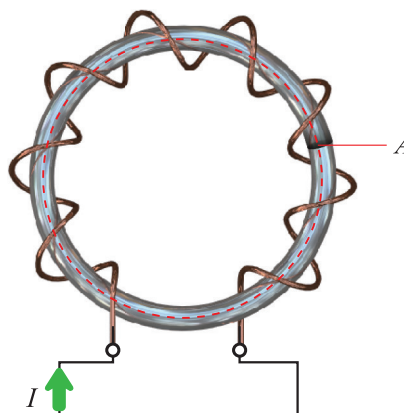
無論是永久磁鐵或是電磁鐵，當溫度增加時，物質的相對導磁係數將會下降，而溫度上升到某一個數值時，相對導磁係數 μ_r 會降到接近 1，此溫度稱為居禮溫度。因此電機在運轉中必須注意溫升與散熱，以免導磁係數下降，影響機器性能。

範例

02

如右圖所示之磁路，已知線圈匝數 1000 匝，鐵心導磁係數 $\mu = 10^{-4} \text{ H/m}$ ，截面積為 0.2 m^2 ，鐵心平均長度為 10 cm，當外加電流為 10 A 時，求其：

- (1) 磁動勢、
- (2) 鐵心磁阻、
- (3) 磁通量、
- (4) 磁通密度、
- (5) 磁場強度。



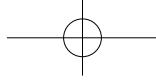
解 (1) 磁動勢 $F = NI = 1000 \times 10 = 10^4 (\text{AT})$

$$(2) \text{鐵心磁阻 } \mathfrak{R} = \frac{\ell}{\mu A} = \frac{0.1 \text{ m}}{10^{-4} \times 0.2} = 5 \times 10^3 (\text{AT/Wb})$$

$$(3) \text{磁通量 } \phi = \frac{F}{\mathfrak{R}} = \frac{10^4}{5 \times 10^3} = 2 (\text{Wb})$$

$$(4) \text{磁通密度 } B = \frac{\phi}{A} = \frac{2}{0.2} = 10 (\text{Wb/m}^2)$$

$$(5) \text{磁場強度 } H = \frac{F}{\ell} = \frac{10^4}{0.1} = 10^5 (\text{AT/m})$$



隨堂練習

- () 1. 有一磁路已知磁阻為 2500 AT/Wb ，鐵心上繞有 5000 匝的線圈，欲產生 4 Wb 的磁通量，則外加電流應該為 (A) 0.2 A (B) 2 A (C) 10 A (D) 20 A 。
- () 2. 同上題，若鐵心上的線圈變成 10000 匝，欲產生相同的磁通量，則外加電流應該為原來的幾倍？ (A) $\frac{1}{2}$ 倍 (B) 不變 (C) 2 倍 (D) 4 倍。

(四) 磁滯迴線

為了解材料在磁化過程中的磁場強度 (磁化力 H) 與磁通密度 (B) 的關係，會進行如圖 2-10 所示的特性試驗：

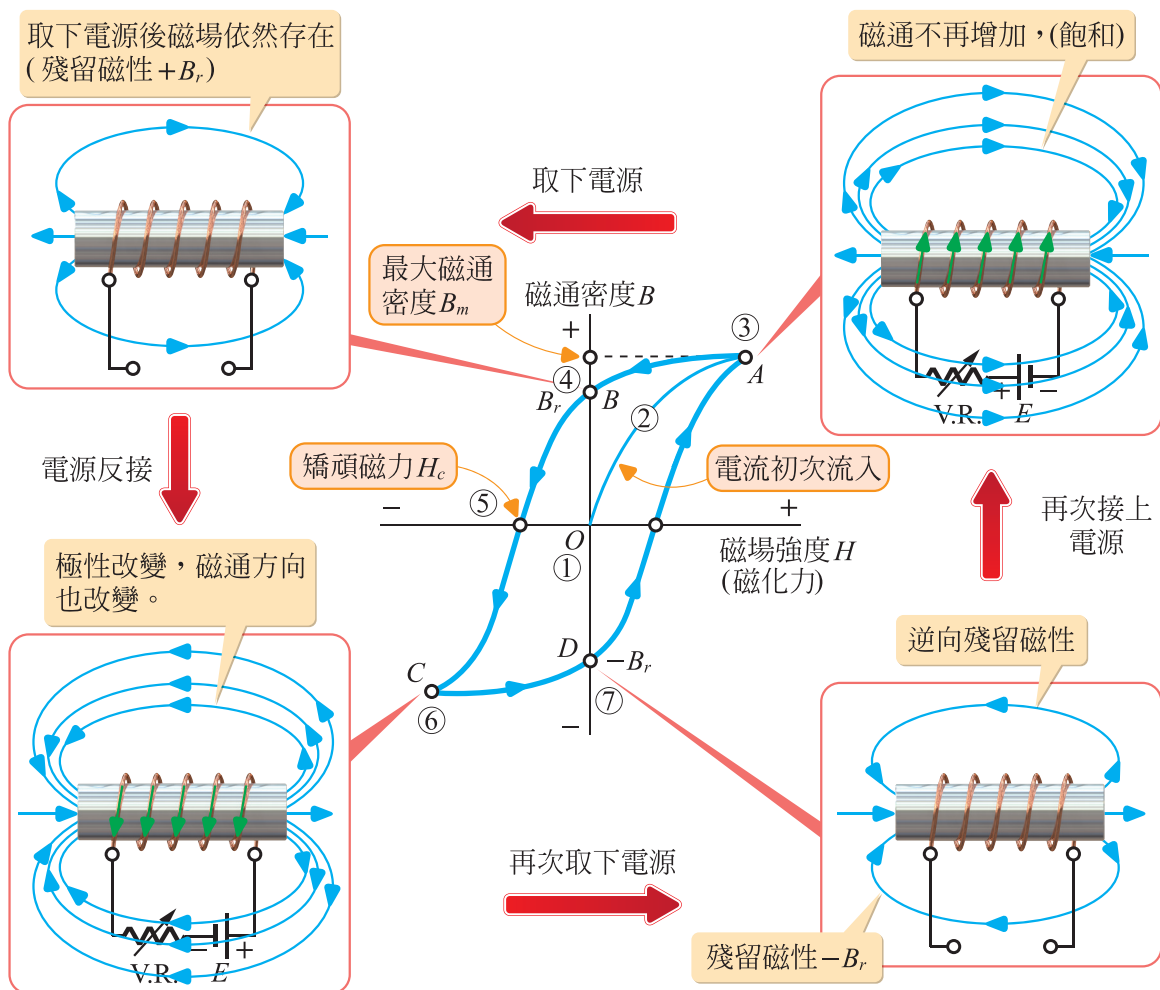


圖 2-10 磁滯迴線

1. 線圈尚未通電時，鐵心內沒有磁通，磁通密度 $B=0$ ，如圖 2-10 中【O】點。
2. 接上電源後，降低可變電阻，線圈電流開始增加，磁化力 H 增強造成鐵心被磁化，磁通量增加使得磁通密度 B 上升，其變化如圖 2-10 所示 $\overline{OA}$ 線段。
3. 若電流持續上升、當磁化力慢慢增強到鐵心內的磁通無法增加時稱為磁飽和，此位置稱為最大飽和磁通密度 B_m ，如圖 2-10【A】點所示。
4. 若將可變電阻調大，使線圈電流降低，磁化力逐漸降低到零，取下電源後鐵心內仍有磁場存在，此現象稱為剩磁 $+B_r$ 或是殘留磁性，如圖 2-10【B】點所示。
5. 若將電源反接，電流 I 反向，為使剩磁消失的所需的磁化力稱為矯頑磁力 H_c (coercive force)。
6. 繼續將反向電流加大，磁通方向改變，磁通密度逐漸上升至負向飽和點【C】。
7. 將電流減少至磁化力為零 (再次取下電源)，鐵心內的剩磁方向相反，以 $-B_r$ 表示，如圖中【D】點所示。

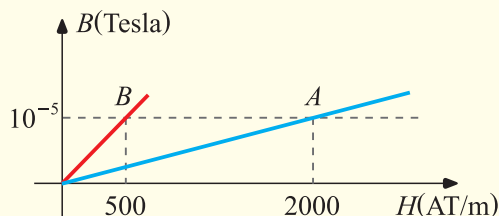
磁化過程中磁通密度 B 的變化較磁化力 H 慢的現象稱為磁滯 (hysteresis) 現象，所構成的迴線便稱為磁滯迴線，而磁滯迴線的面積代表鐵心在磁化過程中每一次循環所消耗的能量，稱為磁滯損失 (hysteresis loss)。

為了避免鐵心飽和、損失及發熱影響電機特性，因此開發出低磁阻以及高飽和磁通密度的材料成為各廠商的重要研究方向。

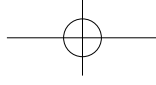
隨堂練習

- () 1. 如右圖所示為 A 、 B 兩種鐵心材料的磁化曲線，何者導磁係數較高？

(A) A (B) B
(C) 相同 (D) 無法比較。



- () 2. 同上題，倘若外加電流等條件相同下，欲達到相同磁通密度，則鐵心 A 、 B 所需要的線圈匝數比例為 (A) 1 : 4 (B) 1 : 16 (C) 16 : 1 (D) 4 : 1。
- () 3. 鐵心被磁化至飽和點後，將磁化力減低至零，所剩餘之磁場稱為 (A) 剩磁 (B) 渦流損 (C) 矯頑磁力 (D) 磁滯。



2-5 法拉第 - 冷次定律

(一) 法拉第電磁感應定律

1831 年的實驗中，法拉第把磁鐵放入圖 2-11 的線圈時，發現用來測試線圈電流的儀表快速移動一下，但是立刻又停了下來。而把磁鐵拔出來時，指針則朝相反方向稍微動了一下，就這樣發現「動能」可以轉換成「電能」，也是發電機的基本原理。

法拉第持續研究，發現將線圈匝數增加或是磁棒移動速度越快，產生的電壓也越高，他將研究發現整理成公式 2-8，稱為法拉第電磁感應定律：

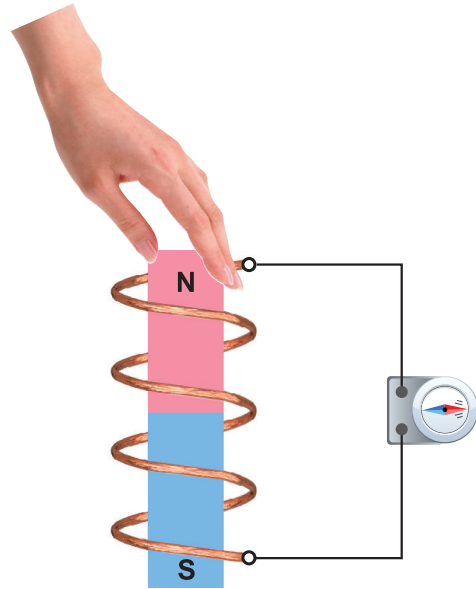


圖 2-11 磁能生電

$$e_{\text{ind}} = N \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad (2-8)$$

e_{ind} ：感應電壓 (伏特；V)

N ：線圈匝數 (匝；T)

ϕ ：磁通量 (韋伯；Wb)

t ：時間 (秒；sec)

範例

03

如圖 2-11 所示，倘若線圈匝數為 100 匝，把磁鐵在 0.5 秒內快速的放入線圈中，使得線圈通過的磁通量由 2×10^{-3} 韋伯增加到 5×10^{-3} 韋伯，則線圈兩端感應電壓為多少？

$$\text{解} \quad e_{\text{ind}} = N \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = 100 \times \frac{(5 \times 10^{-3}) - (2 \times 10^{-3})}{0.5} = 0.6 \text{ V}$$

(二) 冷次定律

西元 1833 年俄國物理學家冷次 (圖 2-12) 整理安培右手定則以及法拉第電磁感應現象後，提出了『線圈感應電勢的方向恆反對磁鐵或線圈的運動』，這條定律被後人稱為冷次定律，將法拉第電磁感應定律與冷次定理結合後，即稱為『法拉第 - 冷次定理』，其結果如公式 2-9 所示。



圖 2-12 冷次
(圖片來源：維基百科)

$$e_{\text{ind}} = -N \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad (2-9)$$



公式 2-9 中的負號僅代表反抗磁通變化的現象，感應電壓極性必須依據接線方式而定。

圖 2-13(a) 將磁棒向右靠近線圈時，由於進入線圈內的磁通量變多，線圈爲了反抗磁通量變多，自己產生向左磁通。依據安培右手定則，線圈內部電流開始移動並由右側流出，進入檢流計的正端，因此檢流計會正偏轉。

反之，圖 2-13(b) 中將磁棒向左遠離線圈時，由於進入線圈內的磁通量減少，線圈爲了反抗磁通量變少，自己產生向右磁通，依據安培右手定則，線圈內部電流改由左側流出，進入檢流計的負端，造成檢流計負偏轉。

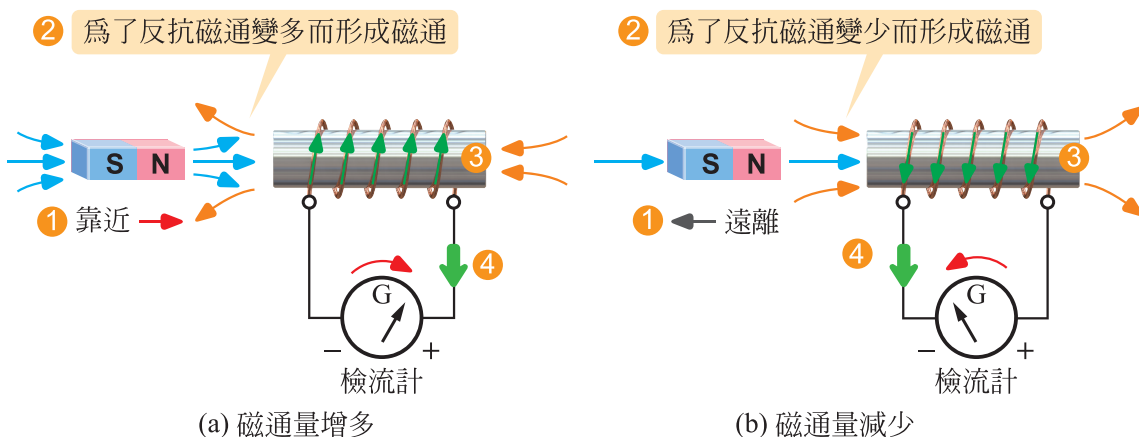
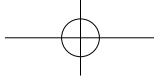


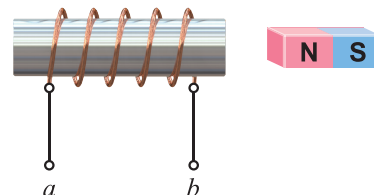
圖 2-13 冷次定理的運用



範例

04

如右圖所示，線圈匝數為 200 匝，在 0.02 秒內將磁鐵快速的向左移動，使得線圈通過的磁通量由 10^{-3} 韋伯增加到 5×10^{-3} 韋伯，則線圈兩端感應電壓 e_{ab} 為多少？



- 解 (1) 感應電壓大小： $e_{\text{ind}} = N \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = 200 \times \frac{(5 \times 10^{-3}) - (1 \times 10^{-3})}{0.02} = 40 \text{ V}$
- (2) 感應電壓方向：磁鐵移動使得線圈內部磁通量增加，此時線圈產生向右的磁通來抵抗，依據安培右手定則，線圈電流會由 a 端流出，因此 a 為正端。
- (3) 線圈兩端感應電壓 $e_{ab} = +40 \text{ V}$

隨堂練習

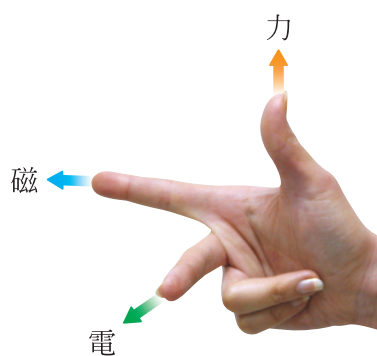
- () 1. 依據法拉第定律，通過線圈之磁通線性增加時，則線圈兩端電壓為
(A) 零 (B) 定值 (C) 線性增加 (D) 線性減少。
- () 2. 同上題，通過線圈之磁通維持不變時，則線圈兩端電壓為
(A) 零 (B) 定值 (C) 線性增加 (D) 線性減少。

2-6 弗萊明右手定則

十九世紀末，圖 2-14(a) 英國物理學家弗萊明在倫敦大學教課時，爲了幫助學生理解法拉第定律而用自己的手來做說明，從此弗萊明左、右手定廣爲世人熟悉與運用，將右手的中指、食指、拇指三根手指如圖 2-14(b) 彼此垂直打開，中指爲「產生的電流方向」、食指爲「磁場方向」、拇指爲「導體運動方向」。



(a) 弗萊明



(b) 弗萊明右手定則

圖 2-14 弗萊明與右手定則 (圖片來源：維基百科)

將一根直導體如圖 2-15 放置在磁場中，當導體向內側移動時，導體兩端會產生感應電勢，使得電流開始流動。其方向依據弗萊明右手定則得知，電流會由導線 a 端流出經過燈泡回到 b 端，此時導體的功能如同一個電池 ($a\oplus, b\ominus$)。

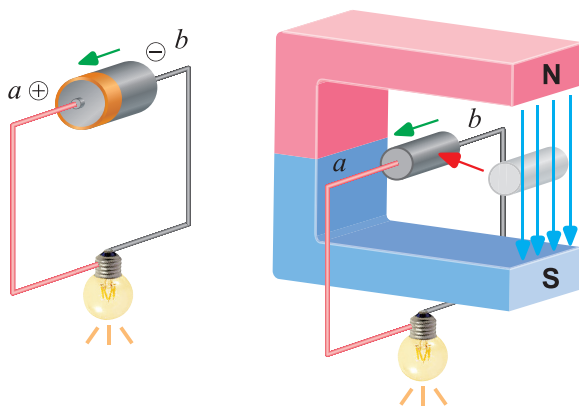
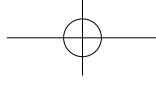


圖 2-15 弗萊明右手定則的運用



當導體停止移動，導體無法產生應電勢因此燈泡熄滅。若將導體改向外側移動，由於運動方向相反，電流改由 b 端流出經過燈泡回到 a 端，燈泡還是點亮，此時導體的功能如同一個 ($a\ominus, b\oplus$) 的電池。

圖 2-15 中，倘若導體長度為 ℓ ，磁通密度為 B ，並在 t 秒內移動 S 公尺，依據法拉第定律：

$$e_{\text{ind}} = N \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = 1 \text{ 根} \times \frac{\Delta A \times B}{\Delta t} = \frac{(\ell \times \Delta S) \times B}{\Delta t} = B \times \ell \times \frac{\Delta S}{\Delta t} = B\ell v(\text{V}) \quad (2-10)$$

e_{ind} ：感應電壓 (伏特；V) B ：磁通密度 (韋伯 / 平方公尺； Wb/m^2)

ℓ ：導體長度 (公尺；m) v ：移動速度 (公尺 / 秒；m/sec)

使用公式 2-10 時，必須注意 B 、 ℓ 、 v 三者方向必須垂直，倘若導體運動方向與磁場成一夾角 θ 時，則感應電壓的公式必須修正為公式 2-11。

$$e_{\text{ind}} = B\ell v \sin\theta(\text{V}) \quad (2-11)$$

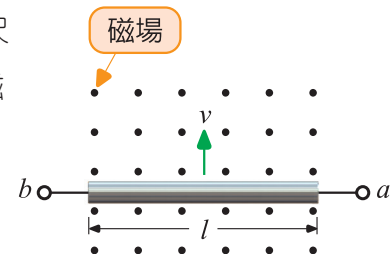
θ ：導體運動方向與磁力線夾角

範例

05

如右圖所示，有一根導體長 4 公尺，以每秒 1 公尺的速度在磁通密度為 5×10^{-2} 韋伯 / 平方公尺之磁場中向上移動，求：

(1) 導體感應電壓大小、(2) e_{ab} 為多少伏特？



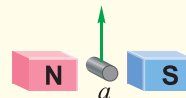
解 (1) 感應電壓 $e_{\text{ind}} = B\ell v \sin\theta = 5 \times 10^{-2} \times 4 \times 1 \times \sin 90^\circ = 0.2 \text{ V}$

(2) 依據弗萊明右手定則，導體內的電流向右流動，因此導體的 a 端為 +， b 端為 -，故 $e_{ab} = +0.2 \text{ V}$

隨堂練習

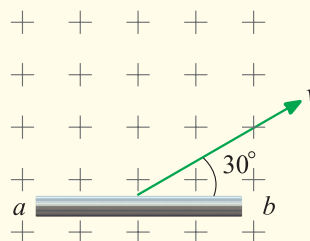
() 1. 如右圖所示，導體 a 置於磁場向上運動，其電流方向為

- (A) 流出紙面 (B) 流入紙面
(C) N 極往 S 極 (D) S 極往 N 極。



() 2. 如右圖所示，導體 ab 長度為 1 公尺，置於磁通密度 0.1 Wb/m^2 中以每秒 10 公尺的速度朝 v 的方向移動，試求感應電壓 e_{ab} 為多少？

- (A) 1 V (B) 0.5 V
(C) -0.5 V (D) -1 V。



2-7 弗萊明左手定則

將導線通電後周圍會產生磁場，將其放入永久磁鐵中，導線電流所形成的磁場與磁鐵交互作用，造成導線受到磁通密度不同之影響而向下移動，結果如圖 2-16 所示。

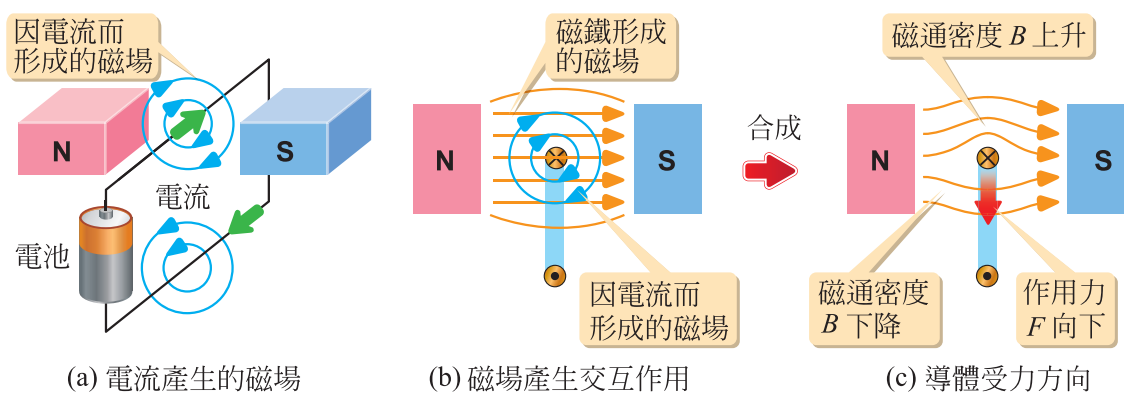
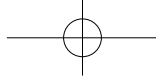


圖 2-16 電磁力的方向

這股作用力 F 是由磁場與電流形成，故稱為電磁力 (force)，也稱為『勞倫茲力』 (Lorentz force)。



依據圖 2-17(a) 弗萊明左手定則，當電流通過置於磁場中的導體時，圖 2-17(b) 的導體會受力朝右側移動，其電磁力大小為：

$$F = B\ell I \sin\theta$$

(2-12)

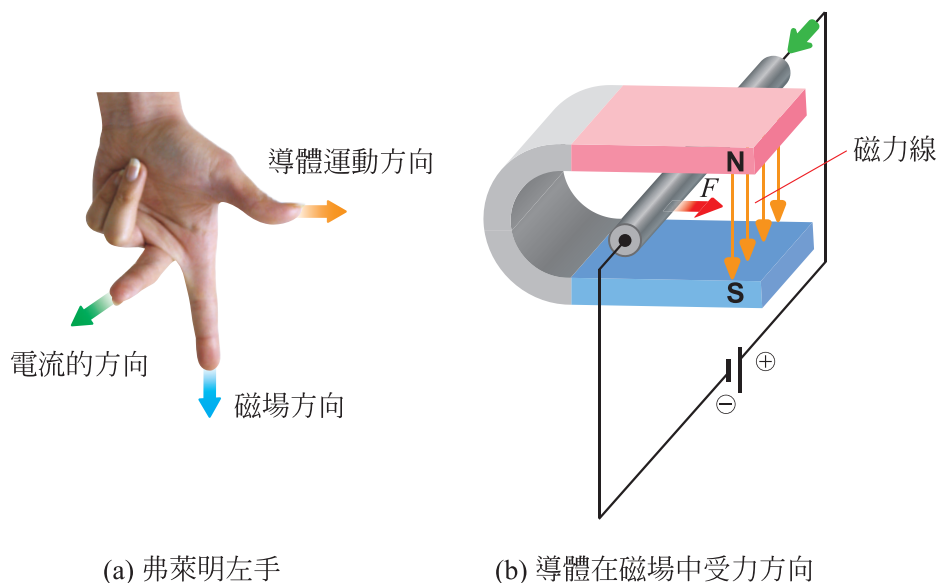
F ：電磁力 (nt)

B ：磁通密度 (Wb/m^2)

ℓ ：導體有效長度 (m)

I ：電流 (A)

θ ：電流方向與磁場方向的夾角



(a) 弗萊明左手

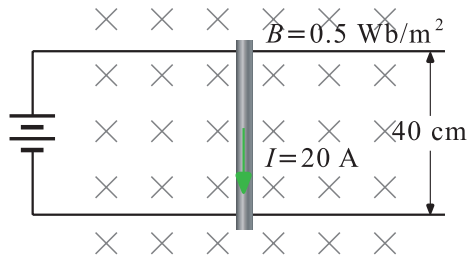
(b) 導體在磁場中受力方向

圖 2-17 弗萊明左手定則

範例

06

如右圖所示，有一根導體長 40 cm，置於磁通密度 $B = 0.5 \text{ Wb/m}^2$ 中，若導體有 20 A 電流通過，試求導體之：(1) 電磁力、(2) 運動方向。



解 (1) 導體所受電磁力

$$F = B\ell I \sin\theta = 0.5 \times (0.4 \text{ m}) \times 20 \times \sin 90^\circ = 4 \text{ nt}$$

(2) 運動方向依據弗萊明左手定則，可得導體向右移動

隨堂練習

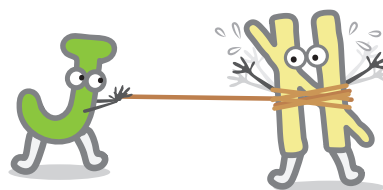
() 1. 如右圖所示，導體垂直於紙面並通以電流，導體的受力方向應向

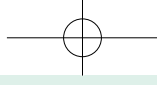
(A) 向上 (B) 向下 (C) 向左 (D) 向右。



() 2. 一根長 100 cm 的導線上有 30 A 的電流通過，其中有 80 cm 置於磁通密度為 0.5 Wb/m^2 之磁場中，若導體放置的位置與磁場夾角為 30 度，則導體所受電磁力為何？

(A) 12 nt (B) 7.5 nt (C) 6 nt (D) 5 nt。





單元摘要

第一章

1. 發電機是將機械轉成電能的旋轉電機，必須要有穩定的動力來源，才能使發電機內的線圈與磁場產生交互運動，產生電能。
2. 變壓器是將交流（單相或三相）電壓升高或是降低的靜止電機，可分為升壓變壓器與降壓變壓器兩類。
3. 電動機是將電能轉變成機械能的旋轉電機，須外加電能並與磁場持續作用，才能產生穩定的動力。

第二章

4. 磁通量（ ϕ ）代表磁場中的磁力線總數，常用單位為：1 韋伯 (Wb) = 10^8 馬克士威 (Maxwell)。
5. 磁通密度 (B) 代表垂直貫穿單位面積的磁通量，常用單位為：
$$1 \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2} = 1 \text{T (特斯拉)} = 10^4 \frac{\text{maxwell}}{\text{cm}^2} = 10^4 \text{ Gauss (高斯)}$$
6. 永久磁鐵構造簡單但控制不易，多用於小型電機。電磁鐵可以改變電流大小與方向來控制磁力與極性，普遍用於各式電機。
7. 鐵心磁化過程中，磁通密度 B 的變化較磁化力 H 慢的現象稱為磁滯現象，所構成的迴線稱為磁滯迴線，其面積代表鐵心的磁滯損失。
8. 法拉第研究發現，將線圈匝數增加或是磁棒移動速度越快，產生的電壓也越高。
9. 冷次提出了『線圈感應電勢的方向恆反對磁鐵或線圈的運動』，將法拉第電磁感應定律與冷次定理結合後，即稱為『法拉第 - 冷次定理』。
10. 弗萊明定則中，中指代表「電流方向」、食指代表「磁場方向」、拇指代表「導體運動方向」。

一、選擇題

2-1 () 1. 有關磁力線的敘述，何者錯誤？

- (A) 爲一封閉曲線
- (B) 由 N 極出發，經介質進入 S 極
- (C) 不管出發或進入，均與磁極平行
- (D) 愈密處，磁場強度愈大。

2-2 () 2. 磁通密度的單位換算，何者正確？

- (A) $1 \text{ Wb/m}^2 = 1 \text{ Gauss}$ (B) $1 \text{ Tesla} = 10^3 \text{ Gauss}$
- (C) $1 \text{ Wb/m}^2 = 10^4 \text{ Tesla}$ (D) $1 \text{ Tesla} = 10^4 \text{ Gauss}$ 。

2-3 () 3. 如圖 (1) 所示，線圈的電流是由 A 端流向 B 端，則在 P 點建立的磁力線方向與磁極狀態爲 (A) 向左、 N 極 (B) 向左、 S 極 (C) 向右、 N 極 (D) 向右、 S 極。

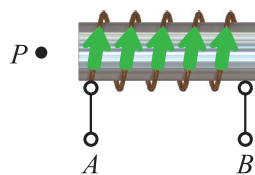


圖 (1)

2-4 () 4. 電工機械鐵心所使用的鐵磁性材料，其相對導磁係數 μ_r

- (A) 遠小於 1 (B) 略小於 1 (C) 等於 1 (D) 遠大於 1。

() 5. 導磁係數 μ 爲多少？ (A) BH (B) $\frac{B}{H}$ (C) $\frac{H}{B}$ (D) $\frac{NI}{\ell}$ 。

() 6. 某物質施以 10^4 AT/m 之磁化力 H 時，其磁通密度爲 6.28 Wb/m^2 ，求該物質之相對導磁係數爲多少？

- (A) 50 (B) 200 (C) 250 (D) 500。

() 7. 線圈中有鐵磁性物質，當線圈通過之電流 I 變化時；則磁通密度 B ，磁場強度 H 及導磁係數 μ ，何者隨電流成非直線性變化？

- (A) B 、 μ (B) H 、 μ (C) B 、 H (D) H 。

自我評量

- () 8. 下列敘述中，何者錯誤？
(A) 磁場強度 H 愈大，磁通密度 B 愈大
(B) 真空的導磁係數 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$
(C) 載有同方向電流之兩平行導線，彼此會互相排斥
(D) 物質相對導磁係數愈高，磁阻愈小。
- () 9. 有甲、乙及丙三個截面積及磁路長度都一樣的環形鐵心材料，其中相對導磁係數分別為 $\mu_{r\text{甲}} = 3000$ 、 $\mu_{r\text{乙}} = 4000$ 及 $\mu_{r\text{丙}} = 5000$ 。若三個鐵心材料都施加一樣大小的磁動勢，在未飽和情形下，何者的磁通量最大？
(A) 甲鐵心 (B) 乙鐵心 (C) 丙鐵心 (D) 三者一樣大。
- 2-5** () 10. 依據法拉第定律，通過線圈之磁通維持不變時，線圈兩端電壓為
(A) 零 (B) 定值 (C) 線性增加 (D) 線性減少。
- () 11. 線圈感應電勢的極性可由下列何種定律決定？
(A) 法拉第定律 (B) 歐姆定律 (C) 庫倫定律 (D) 楞次定律。
- () 12. 如圖(2)所示，有一個 600 匝的線圈，永久磁鐵向左移動靠近線圈，磁通在 0.3 秒內，自零增加至 $1 \times 10^{-3} \text{ Wb}$ ，則應電勢 V_{ab} 為何？
(A) 2 V (B) 1 V (C) -1 V (D) -2 V。

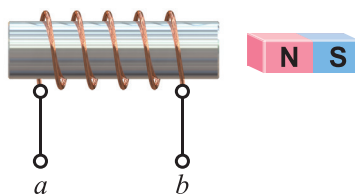


圖 (2)

自我評量

- 2-6 ()13. 如圖 (3) 所示，將一根長為 20 cm 之導線 AB 置於其上移動，有一均勻之磁場 4 Wb/m^2 垂直進入紙面，若 AB 以 30 cm/sec 之速度向右移動，則 AB 兩端之應電勢為
 (A) $+24 \text{ V}$ (B) $+0.24 \text{ V}$ (C) -0.24 V (D) 24 V 。

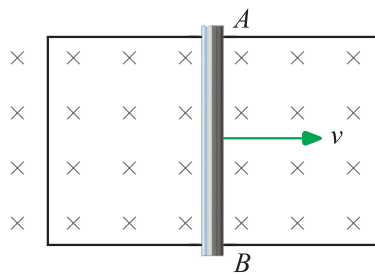


圖 (3)

- ()14. 如圖 (4) 所示，有根 1 米長的導體以每秒 5 米之速率在磁通密度 $B = 4 \text{ Wb/m}^2$ 朝上方運動，則導體之應電勢為
 (A) $10\sqrt{3} \text{ V}$ (B) 10 V (C) 5 V (D) 0 V 。

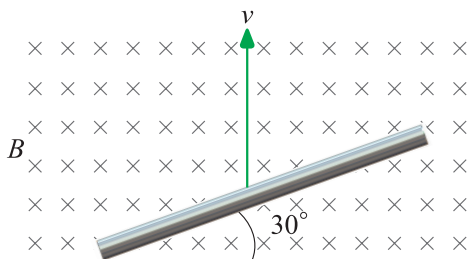


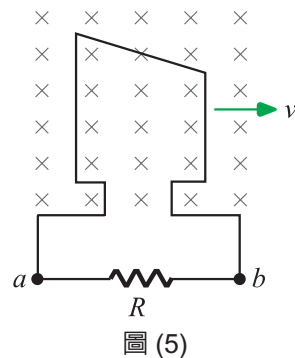
圖 (4)

- ()15. 有一導體長度 10 cm，磁通密度為 0.02 韋伯/平方米 ，若應電勢為 0.1 V ，則導體運動的速度為多少？
 (A) 500 (B) 50 (C) 5 (D) 0.02 米/秒 。

自我評量

() 16. 如圖 (5) 所示，有一梯形線圈在均勻磁場中向右侧運動，則流經電阻 R 之電流應為何？

- (A) 由 a 流至 b
- (B) 由 b 流至 a
- (C) 電流為零
- (D) 電流方向不斷改變。



2-7 () 17. 下列何者又稱電動機定則？

- (A) 弗萊明右手定律
- (B) 弗萊明左手定律
- (C) 冷次定律
- (D) 法拉第定律。

() 18. 40 公分長導體中有 50 A 電流流通，若磁通密度為 0.2 Wb/m^2 ，導體放置的方向與磁場方向平行，則導體所受電磁力為

- (A) 400 nt
- (B) 40 nt
- (C) 4 nt
- (D) 0 nt。

二、問答題

1. 說明磁鐵具備的特性。
2. 說明永久磁鐵與電磁鐵的差別。
3. 畫出磁滯迴線並簡單說明之。

自我評量

4. 有一環狀鐵心外觀如圖 (6) 所示，圖 (7) 為鐵心的 $B-H$ 曲線，已知鐵心平均長度 (ℓ) = 10 cm，鐵心截面積 (A) = 10^{-2} m^2 ，當線圈通入 10 A 電流，試求鐵心之 (1) 磁場強度 H 、(2) 磁通密度 B 、(3) 導磁係數 μ 、(4) 磁通量 ϕ 各為多少？

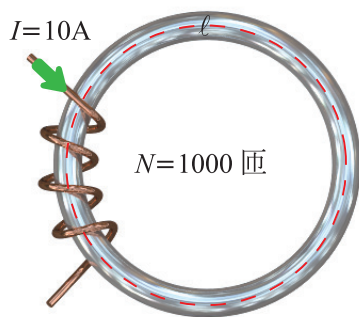


圖 (6)

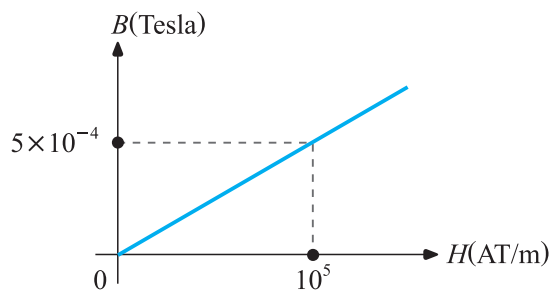


圖 (7)

5. 如圖 (8) 所示，有一根 50 公分長之導體置於磁通密度為 0.2 韋伯 / 平方公尺之均勻磁場中，當此導體通以 20 安培電流時，導體在 0.4 秒內移動 4 公尺。則
- (1) 導體產生的電磁力 為多少牛頓？
 - (2) 導體移動方向為何？
 - (3) 施加於導體之電功率為多少瓦特？

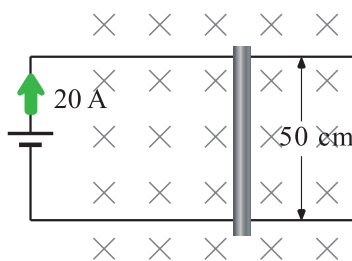


圖 (8)

[illegible]