

直流電機

吳大榕 著

中國科學圖書儀器公司
出版

序

本書與拙著“交流電機”合為電機原理的上下冊。除量度單位已全部改為公制和譯名有一部分加以修正外，本書和拙著“交流電機”無論在體裁結構方面，或在理論系統方面，都是一貫的而且是銜接的。空氣隙中磁場的性質，決定各種電機的運用性能。直流機的空隙磁場，僅依空間分佈，不隨時間變化，因此直流機的理論，遠較交流機為簡單。本書在討論磁路的具體計算以前，先行論述空氣隙磁場一章，使讀者在研習交流機空氣隙中較為複雜的磁場性質時，能有較清晰的基本概念。

關於直流機的西文教本，大都材料龐雜，篇幅冗長，不適於精簡課程之用。為了貫徹五十學時制起見，本書取材較為精簡，文字力求簡潔，主要關鍵在精簡敘述方法，而不一定精簡內容。有些枝節問題，如與主題關係不大時，便可借一二例題加以闡明，例如磁化曲線的經驗方程式的應用，電動機開動電阻箱的分級設計等等。有些問題，僅有理論上的興趣而無實用上的價值時，概置不錄，例如高於雙重線捲的多重線捲的討論，差複激電動機的理論分析等等。本書教材，足夠大學電機系學生，修習一學期，每週講授四小時之用。包括自習時間在內，每週約需十二學時。

把電機原理分割為直流機部份和交流機部份，原來是不甚合理的，各種電機都有共同的基本原理。就運用原理而言，直流機是

各種電機中較為簡單的一種；但如就設計構造而言，直流機却又是較為複雜的一種。在研習電機原理時，讀者首先應具有掌握各種電機的共同理論的整體觀點。因此，本書所敘述的除一部份為直流機的具體問題外，另一部份却為各種電機的共同理論，例如第一章和第九章。又有一部份，例如第五章，雖然在本文內是以直流機作為例子，但所用基本方法，却很容易的便可推廣至其他電機。其他如第四章及第八章，如加以適當的修正或補充，仍可應用至交流機，為將來進一步學習的基礎。

發電機和電動機，僅為同一電機的兩種不同的運用方式。各種連接方法的直流機，僅只磁激的來源不同，都有相同的理論公式。因此，本書對於各種不同連接的直流發電機和電動機，在第七章中合併討論，基本上作為一種機器看待，不再加以劃分。這樣，我們一方面避免了支離割裂的處理方法，另一方面也收到了精簡篇幅的功效。

本書承南京大學黃顯斌，楊海秋二同學代為繪製插圖，復承中國科學圖書儀器公司惠予提前出版，著者謹致最深切的謝意。

吳 大 榕

一九五二年八月於南京

目 錄

序	1
第一章 基本定義和定律	1
1. 電機的意義和範圍 2. 功率關係 3. 由電流產生磁場，通路定律 4. 由磁場變化感應電壓，感應定律 5. 力和轉矩 6. 發電機作用和電動機作用	
第二章 構造概述	19
1. 電機中的五種線路系統 2. 製造材料 3. 直流電機的構造 4. 單極發電機	
第三章 電路排列——總論	30
1. 場路和樞路 2. 樞路和場路的連接法 3. 自激發電機的進起 4. 整流子和電刷的作用 5. 電刷間的感應電動勢	
第四章 電路排列——樞捲	43
1. 概說 2. 場移 3. 線捲節距 4. 疊捲 5. 波捲 6. 異圈線捲 7. 均衡連接	
第五章 空氣隙磁場	61
1. 沿空氣隙各種電磁數值的分佈及其相互間關係 2. 無載時的磁場分佈曲線 3. 負載時的磁場分佈曲線，電樞反應 4. 交磁作用和去磁作用 5. 磁性飽和的影響	
第六章 磁路計算	79
1. 由磁場簡化為磁路 2. 磁化曲線的計算方法 3. 空氣隙所需安匝數 4. 齒所需安匝數 5. 其他各部份所需安匝數 6. 漏磁通的種類 7. 槽漏磁通 8. 齒尖漏磁通 9. 端接漏磁通 10. 場極漏磁通 11. 磁化曲線的測定	

第七章 運用特性..... 103

1. 分激特性和串激特性 2. 特性曲線的種類 3. 別激發電機
4. 分激發電機 5. 分激發電機的並聯運用 6. 分激電動機 7. 串激發電機 8. 串激電動機 9. 複激發電機 10. 複激電動機
11. 各種特性曲線的綜合比較 12. 直流電動機的開動

第八章 整流的理論和方法..... 136

1. 問題的性質 2. 受到整流的線圈中的電壓, 電流, 和電阻 3. 基本的線路方程式 4. 直線整流 5. 理想整流 6. 火花考驗的討論
7. 電刷寬於一鐵片時的影響 8. 利用邊緣磁通幫助整流 9. 整流極的應用 10. 補償線捲

第九章 定額, 溫昇, 和效率..... 159

1. 電機的容量 2. 定額 3. 絕緣材料的種類和溫昇限度 4. 電機中熱的分佈和溫昇量法 5. 純一物體的發熱和降冷 6. 由輻射作用散熱 7. 在流動空氣中的對流作用 8. 電機的各種損耗 9. 實測效率和慣例效率 10. 最高效率

第十章 試驗方法..... 179

1. 電阻的測定 2. 電刷位置的校驗 3. 負載試驗 4. 雜散力試驗
5. 相反試驗 6. 磁場分佈曲線 7. 絕緣試驗

第十一章 特種直流電機..... 198

1. 三線配電系統 2. Rosenberg 發電機 3. 三刷發電機 4. 焊接發電機 5. 電動發電機 6. 旋轉放大機 7. 旋轉控制機

索引(一)..... 215

索引(二)..... 218

第一章

基本定義和定律

1-1 電機的意義和範圍 機器二字，雖常聯用；但是，仔細說來，機和器還有區別。旋轉的叫做機，例如發電機，電動機。靜止的叫做器，例如變壓器，整流器。

機器可以用來代替人力做工，但是機器並不能產生能量。機器一方面有能量輸出，另一方面必需有能量輸入。同時，在能量的流通與轉變過程中，總有一部份能量在機器內部消耗損失；因此，任何機器的能量輸出總比輸入為小。抽水機把水從低處打向高處，做了工；但是，抽水機同時却由電動機拖動，供給他機械能。電動機一方面輸出了機械能，但另一方面却必需由綫路吸取電能。發電機供給了電動機電能，但是發電機却必需由汽輪機供給了機械能才能轉動。汽輪機吸取了由鍋爐引來的蒸汽的動能。鍋爐中的水，所以能汽化而且得到動能，是由於煤炭的燃燒供給了熱能。所以，這一連串能量的流通，經過了多次的形式轉變，歸根結底，能量的最後來源，還是煤炭中的化學儲藏能。自然界的能，在被人類控制以前，不但是浪費，有時且會造成災害。自然能被人類控制且加以利用，便會成為富源。例如，把淮河治好以後，便能變水患為水利。工程師的職責，並不是要創造能，却是要把自然界的能，更合理更經濟更有計劃的加以利用。機器的作用，便是將能量傳遞和轉換形式，使其更適於被吾人利用。

電能是能量的一種形式。電的發見很早，但在吾人能大量的控制電能以前，不可能有電機工程。電能的最大優點，便是適宜於大量產生，集中管理，和遠道傳輸。到了應用的地方，電能又極易轉變為其他形式的能，如光能，熱能，機械能。產生電能的方法很多，例如利用機械摩擦，光電效應，熱電效應，化學作用等。可是，以上各種方法，都祇能產生少量的電能，還不足以使電的科學發展成為電機工程。直到電磁感應的基本定律，即由電生磁和由磁生電的相互關係被發見和確立以後，才有了實用的發電機；這便是電機工程的開端。

望文生義，電機必需和電能有關係，即電機的輸入和輸出，至少有一方面是電能。旋轉的機器，同時必需和機械能發生關係。如輸入為機械能，而輸出為電能，則該機係用作發電機。反之，如輸入為電能而輸出為機械能，則該機係用作電動機。如一電機的輸入和輸出都為電能，則兩方的電能，必有不同的形式，例如電壓不同，波形不同，頻率不同，或相角不同。如上所述，目前可以大量產生和轉變電能的方法，是建築在電磁感應的基本原理上面的。因此，我們所討論的各種電機，他們的基本原理，也就是電磁感應。嚴格說來，這些電機，應該叫作電磁機。

1-2 功率關係 發電機將機械能轉變為電能；電動機將電能轉變為機械能。凡係和機械能有關的機器，都必需是轉動的。因此，旋轉電機都有靜止的部份，叫做定子，有旋轉的部份，叫做轉子。二部份間既然有了相對運動，為了純粹機械的原因，定子和轉子間必需有一空氣隙。同時，定子所生的磁場和轉子所生的磁場，必需迴

過空氣隙，才能互相匝連。因此，空氣隙中磁場的分佈和變化的情形，與電機中能量的傳遞和轉變，有着密切的關係。如要明瞭各種電機的運轉特性，對於他們空氣隙中的磁場如何在空間分佈，如何依時間變化，和如何隨負載而改變的情形，必需能充份瞭解。有的機器，例如感應電動機，能量由定子傳遞至轉子，便是以空氣隙中的磁通量，作為傳遞的媒介。有的機器，例如直流機，能量的輸入和輸出，雖然都在轉子方面，但是，轉子所能轉變而傳遞的能量，却完全受空氣隙磁場所控制。機器的容量，即以該機每單位時間所能輸出的能量來量度。每單位時間所輸入或輸出的能量，即是輸入功率或輸出功率。

試以感應電動機為例，一看電機中功率流通的關係。電功率由定子方面輸入。電流流過了定子繞捲，便有定子銅耗產生。同時，鐵心中有磁通在變化，便有鐵心損耗產生。所以，定子輸入必需先除去上述二種損耗，才可經由空氣隙磁場，利用感應作用，輸入轉子。轉子方面輸入的電功率，必需除去轉子電流所引起的銅耗，才能轉變為機械功率。因為轉變來的機械功率，還不能全部被利用，所以稱做內功率。內功率即是經過轉變形式的功率。對於電動

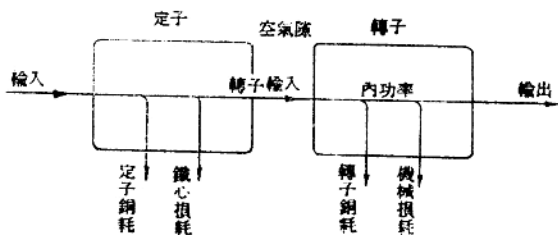


圖 1-1

機，內功率是由電功率轉變來的機械功率；對於發電機，內功率便是由機械功率轉變來的電功率。感應電動機的內功率，還需除去機械損耗，才可得到機軸功率，也即機械功率輸出。機軸上的機械功率輸出，和定子方面的電功率輸入的比率，便是這電動機的效率。感應電動機中功率的流通情形，如圖 1-1 所示。

1-3 由電流產生磁場。迴路定律 設在導體中有電流流通，則在該導體週圍，便有磁場產生。在環繞導體的迴路上，任何二點間，便有磁位差。任何一點的磁位梯度，即係該點的磁場強度 H ，

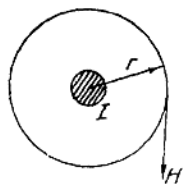


圖 1-2

為一向量。一迴路中的磁動勢，即係沿着該迴路的磁場強度的線積分；依據迴路定律，便等於該迴路所環繞的總電流量。設迴路包圍 N 導體，每一導體中流過電流 I ，則迴路所包圍的總電流量便是 NI 。設令 H_t 代表沿着迴路各點和迴路相切的磁場強度，迴路

定律便可寫作如下式所示，

$$\oint H_t dl = NI. \quad (1-1)$$

迴路定律的應用實例，如圖 1-2 所示。設有一極長導體，中有電流 I 安流過。試求距離導體 r 米處的磁場強度 H 。以導體的中心為圓心， r 為半徑作一圓。這圓環繞 I 為一迴路。從對稱關係，可知沿迴路各點的 H 都各相等。應用式(1-1)，

$$2 \pi r H = I,$$

即，

$$H = \frac{I}{2 \pi r} \text{ 安/米}. \quad (1-2)$$

由磁場強度 H , 可從衆所熟知的公式, 求得磁通密度 B ,

$$B = \mu H. \quad (1-3)$$

式(1-3)中, μ 爲導磁係數, 尙可分爲 μ_0 與 μ_r 二部份,

$$\mu = \mu_0 \mu_r. \quad (1-4)$$

就中 μ_0 爲真空的導磁係數, μ_r 爲其他物質對真空導磁係數的倍數, 亦即相對導磁係數。磁性物質的相對導磁係數, 常隨磁通密度而變化, 高時可達數千。如 H 的單位用[安/米], B 的單位用[韋/米]即 10^4 高斯, 則,

$$\mu_0 = 1,257 \times 10^{-6} \text{ 亨/米}. \quad (1-5)$$

如 B 的單位用高斯, H 的單位用安/厘米, 則 μ_0 的數值爲 1,257 亨/厘米。

如磁場迴路可分爲幾部份, 每部份的 H 各爲常數, 則積分式 $\oint H_l dl$ 可用 ΣHl 來代替。式(1-1)便化爲,

$$H_1 l_1 + H_2 l_2 + \dots + H_n l_n = NI, \quad (1-6)$$

在此迴路中, 總磁動勢被分爲 n 部份。每一部份磁動勢, 等於該部份磁場強度 H 和該部份磁路長度 l 的乘積。

因爲沒有遊離的磁極, 磁力線必需成爲閉合路線。對於任何閉合面而言, 流入的磁通量必和流出的磁通量相等。用公式表示, 則爲,

$$\oint B_n dA = 0. \quad (1-7)$$

B_n 爲垂直於閉合面任何一點的磁通密度。

電機的磁路, 常包含數種不同的物質。磁通量常經由一種物質, 穿過交界面, 流入另一種物質。設二種物質的導磁係數各爲 μ 與

μ' , 其中流通的磁通密度各為 B 與 B' 。磁通密度 B 和交界面的

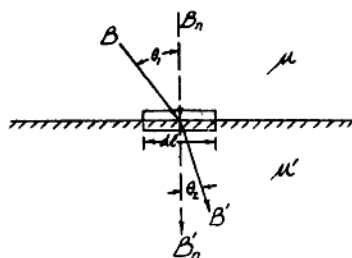


圖 1-3

垂直線，成一角度 θ_1 。穿過交界面後， B' 和垂直線間的角度為 θ_2 。此種現象，和光線的曲折現象相似。 θ_1 和 θ_2 間的關係，可利用上述的定律導出。如圖 1-3 所示，在交界面上，取一極小的閉合迴路，長度為 dl ，厚度只需

能跨越交界面，可以縮減至無窮小，因此可以略去不計。將 B 分解為與交界面垂直部份 B_n 及與交界面平行部份 B_t 。同樣， B' 可分解為 B'_n 與 B'_t 。應用式 (1-7)，設在交界面上取一極小面積 dA ，則，

$$B_n dA - B'_n dA = 0,$$

$$\text{或即,} \quad B_n = B'_n. \quad (1-8)$$

設在交界面上沒有電流存在，應用迴路定律，可得，

$$\oint H_t dl = H_t dl - H'_t dl = 0,$$

$$\text{即,} \quad H_t = H'_t. \quad (1-9)$$

如圖所示，

$$\tan \theta_1 = \frac{B_t}{B_n} = \frac{\mu H_t}{B_n},$$

$$\tan \theta_2 = \frac{B'_t}{B'_n} = \frac{\mu' H'_t}{B'_n},$$

故，
$$\frac{\tan \theta_1}{\tan \theta_2} = \frac{\mu}{\mu'} \quad (1-10)$$

設如二邊的導磁係數的數值相差甚大，如 $\mu' \gg \mu$ ，則 $\tan \theta_1$ 與 θ_1 將近似的為零， B 將和交界面垂直。所以，在電機中，如磁通流過鐵與空氣的交界面，而如交界面上沒有電流分佈時，磁力線將在空氣中和鐵面相垂直。

如分界面上有電流分佈，而每單位長度的電流分佈密度為 A_n ，則式(1-9)將改寫作，

$$H_t dl - H_t' dl = A_n dl \quad (1-11)$$

由此得，

$$H_t = H_t' + A_n$$

同上方法可以導出，

$$\frac{\tan \theta_1}{\tan \theta_2} = \frac{\mu}{\mu'} + \mu \frac{A_n}{B_t'} \quad (1-12)$$

在通常情形，如在鐵中的磁力線至分界面的射入角不過大，在空氣中的磁力線，將近似的和鐵面垂直。

1-4 由磁場變化感應電壓。感應定律 如一線圈在磁場中，則磁力線將穿過該線圈而和他匝連。如有一部份磁通量 ϕ_x 匝連線圈的 N_x 匝，則該線圈的總共磁通匝連數 λ 為，

$$\lambda = \Sigma N_x \phi_x \quad (1-13)$$

設在線圈中的磁通匝連數 λ 變化，則線圈中將有一感應電動勢產生。這感應電動勢的數值，將與磁通匝連數的時間變化率成正比。這感應電動勢的方向，傾向於產生一電流，阻止線圈中磁通匝連的變化。用數學公式表示，感應定律常寫作，

$$e = - \frac{d\lambda}{dt} \quad (1-14)$$

設如所有的磁通量 ϕ 都匝連所有的匝數 N ，式(1-14)便化作，

$$e = - N \frac{d\phi}{dt}, \quad (1-15)$$

上式中 ϕ 的單位是韋， e 的單位是伏。

在一閉合迴路中，感應電動勢即等於電場強度 ϵ 沿該迴路的線積分，故感應定律亦可寫成下式，

$$\oint \epsilon_l dl = - N \frac{d\phi}{dt}. \quad (1-16)$$

式(1-16)實際上與式(1-1)相對稱，如將式(1-1)中的 I 寫成 $\frac{dq}{dt}$ ，此種對比更為明顯。

上述二基本定律的主要關鍵在“變化”二字。必需有電流通過，

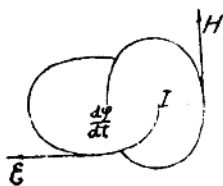


圖 1-4

即電場的變化，才能產生磁的效應。同樣的，必需磁場在變化，才能產生電的效應。電路和磁路，常垂直的互相匝連。在任何一點的 ϵ 和 H ，是互相垂直的二向量。圖 1-4 形象的表示此種情況。

一線圈中磁通匝連的變化方法，有二種可能性。第一種情形是該磁通量本來是由交流電所產生，即是磁通量本身在變化。如在圖 1-5 中，

$$\phi = \phi_m \cos \omega t,$$

$$\lambda = N\phi = N\phi_m \cos \omega t,$$

則，
$$e = - \frac{d\lambda}{dt} = N\omega \phi_m \sin \omega t = E_m \sin \omega t.$$

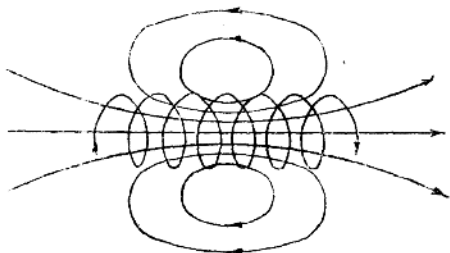


圖 1-5

靜止的電器，如變壓器，即由這種方式感應電壓。故這種感應電壓通常稱作變壓器電壓。

第二種情形，磁通量本身雖不變化，但由於線圈和磁場間有相對運動，線圈中的磁通匝連在不斷的變化。如圖 1-6 所示，當線圈平面和磁力線垂直時，匝連線圈的磁通量達最高值 $N\phi_m$ 。當線圈轉過一角度 ωt 時，線圈中的磁通匝連便減

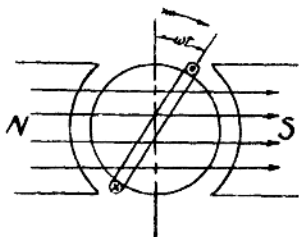


圖 1-6

小至 $N\phi_m \cos \omega t$ 。故線圈中的感應電動勢便為，

$$e = -\frac{d\lambda}{dt} = -\frac{d}{dt} N\phi_m \cos \omega t = N\omega\phi_m \sin \omega t$$

$$= E_m \sin \omega t.$$

這種由於線圈在磁場中旋轉而感應的電壓，通常稱作速率電壓或旋轉電壓。

綜合起來說，如線圈中的磁通匝連 λ 為時間與空間的函數，則任何磁通匝連的總變化 $d\lambda$ 必為，

$$d\lambda = \frac{\partial \lambda}{\partial t} dt + \frac{\partial \lambda}{\partial x} dx. \quad (1-17)$$

由此可得,

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{\partial \lambda}{\partial t} + \frac{\partial \lambda}{\partial x} \frac{dx}{dt} = \frac{\partial \lambda}{\partial t} + v \frac{\partial \lambda}{\partial x}, \quad (1-18)$$

因為 $\frac{dx}{dt}$ 即等於速率 v 。

感應電壓便為,

$$e = - \frac{d\lambda}{dt} = - \frac{\partial \lambda}{\partial t} - v \frac{\partial \lambda}{\partial x} = e_T + e_R. \quad (1-19)$$

上式中 e 可分為二部份; $e_T = - \frac{\partial \lambda}{\partial t}$ 為變壓器電壓, $e_R = - v \frac{\partial \lambda}{\partial x}$

為旋轉電壓亦即速率電壓。

再舉一例。參看圖 1-7。設有一線圈在磁場中自左至右依箭頭

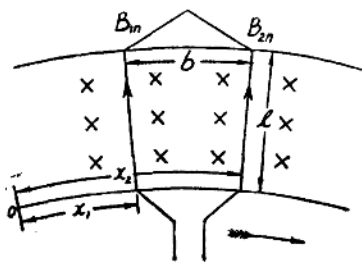


圖 1-7

方向以速率 v 向前運動。

線圈兩邊在磁場中的長度

為 l , 線圈寬度為 b 。取一

任意原點 0 。線圈左邊至 0

點的距離為 x_1 , 線圈右邊至

0 點的距離為 x_2 。在 x_1 處

垂直於線圈平面的磁通密

度為 B_{1n} , 在 x_2 處垂直於線

圈平面的磁通密度為 B_{2n} 。在任何一點的垂直磁通密度為 B_n 。設

線圈有 N 匝, 則線圈中的磁通匝連為,

$$\lambda = Nl \int_{x_1}^{x_2} B_n dx. \quad (1-20)$$

由於線圈在磁場中的運動，線圈中的感應電動勢為，

$$e_R = -v \frac{\partial \lambda}{\partial x} = -Nvl \frac{\partial}{\partial x_1} \int_{x_1}^{x_1+b} B_n dx. \quad (1-21)$$

但因定積分的微分可由下式求得，

$$\frac{d}{dx} \int_a^b f(u) du = f(b) \frac{db}{dx} - f(a) \frac{da}{dx},$$

$$\text{故,} \quad e_R = -Nvl[B_{2n} - B_{1n}] = e_2 - e_1. \quad (1-22)$$

上式指示，一線圈的感應電壓，可分割為二邊的感應電壓，再求其差。設該線圈祇有一匝，則每邊的感應電壓即為個別導體的感應電壓。即，

$$e_2 = -vl B_{2n},$$

$$e_1 = -vl B_{1n}.$$

卸去下標，則得，

$$e = -vl B_n. \quad (1-23)$$

此處我們已假設，導體的運動與導體本身垂直。對於任意一導體在任意磁場中運動，則在該導體 a 點與 b 點間的感應電壓為，

$$e = - \int_a^b v dl \sin(v, dl) B_n. \quad (1-24)$$

如用向量分析符號，則上式可寫作

$$e = - \int_a^b \mathbf{v} \times d\mathbf{l} \cdot \mathbf{B} \quad (1-25)$$

或即，

$$e = \int_a^b \mathbf{v} \times \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l}.$$

如一導體在磁場中截切磁力線，且 B, l ，及 v 三數量相互垂直，則，僅就數值而言，

$$e = Blv, \quad (1-26)$$

上式中如 B 的單位為 [韋/米²]， l 的單位為米， v 的單位為 [米/秒]，則 e 的單位為伏。

感應電壓 e 的方向，可用右手定則測定。如將右手拇指食指及中指組成一直角坐標系統；令食指指向磁通密度 B 的方向，拇指指向導體速率 v 的方向，則中指便指向感應電動勢 e 的方向。

1-5 力和轉矩 當一載有電流的導體位置在磁場中，該導體上即將受到一力。設導體的長為 l ，流過導體的電流為 i ；又設磁力線與導體垂直，磁通密度為 B ，則作用在導體上的電磁力為，

$$F = Bli. \quad (1-27)$$

上式中如 B 的單位為 [韋/米²]， l 的單位為米， i 的單位為安； F 的單位便為牛頓，1 牛頓等於 10^5 達因。

如磁力線不和導體垂直，則我們應將其分解為與導體垂直的部份和與導體平行的部份。式(1-27)中的 B ，便是與導體垂直的部份。與導體平行的部份，並不能作用力於導體上。

式(1-27)並不能被認為基本定律，因為該式可由感應定律及能量不變定律推演而得。設一導體在磁場中垂直於磁力線運動，則該導體兩端將有感應電壓 $e = Blv$ ，如式(1-26)所示。如外面線路斷路，則該導體並不能供給功率。如將外面線路閉合，則電流 i 將由導體流向外線。此時導體即成為一小型發電機，輸出功率 $p = ei$ 至外面負載。但導體本身不能創造功率，此功率必需由機械原動力供給。當導體中有電流 i 流過時，導體上即受到一力，阻止其向前運動。我們如欲維持導體的運動，使其繼續能感應電壓，必需外施一機械力以補償導體所受到的電磁阻力。如略去各種損