**歐姆定律**

本章的第一句話，To make a current flow, you have to push on the charges。簡直就是廢話似的，但這麼理所當然的事，在之前講到穩態電流的時候，其實是完全迴避掉了，那個階段完全專注在穩態電流產生的物理現象，也就是靜磁場，而迴避了穩態電流本身的物理，之所以要迴避，就是那個push並沒有講起來那麼單純。電流就是電荷的運動，對大部分的物質來說，推動電荷的力會和電流密度成正比，什麼樣的力能用來推動電荷?電力或磁力。又由於在物質中，電荷運動的速度很慢，磁力的部分可以忽略不計，剩下的電場與電流密度成正比就是歐姆定律。

導體中的電流就是靜電場推動電荷造成的，不過之前不是才討論過，導體中的靜電場永遠為零。這有沒有矛盾?並沒有。為什麼?為了回答這個問題，先回頭仔細的檢視，所謂的”導體內部靜電場為零”。

在靜電學的觀點，導體的特性就是，具有無限量供應的自由電子，*關鍵字：無限、自由*，*就是這兩個概念，使得當一個導體放在靜電場中時，內部電場為零*。這是由於自由電子在電場的影響之下會堆積在邊界，產生反方向的電場阻止進一步的堆積，又由於自由電子是無限量供應的，堆積會持續直到電場抵銷為止，所以內部電場最終為零。仔細看上面的論點，導體內部是可以有電場的(一開始有)，導體內部電場為零只是抵銷之後的結果。

電流密度和電場成正比，也就是歐姆定律，為什麼這邊要講這個，他和電動勢有什麼關係?以上提到的電場指的都是靜電場，迴路積分為零，這意味只有靜電場無法形成電流迴路，這是因為當電荷受力但卻是等速運動時，這表示能量在損失，而靜電場是保守場，在其中繞一圈能量是不增不減的，必須要有個非保守力提供能量，才能夠形成電流迴路。這個非保守力就是電動勢。以下會再提到，磁通量的變化會造成感應電動勢，這就是一種非保守力的線積分。

而在一個有電動勢的電路中，電荷的堆積不是靜電場造成的，是電動勢造成的，電荷的堆積形成了靜電場，再接著去堆動電荷，這個情況和把一塊導體放在靜電場中是兩回事。

**電動勢**

是一種自然產生的趨勢，會造成電荷的分離，進而造就了電壓，要注意電動勢並不等於電壓，儘管他們的單位是一樣的，那他們到底不一樣在哪裡?電動勢推動電流的方向是增加電位能，電壓推動電流的方向是減少電位能，電動勢是非保守力的線積分，電壓是保守力的線積分。不過簡單說其實這就好比英雄造時勢或者時勢造英雄一樣，不管你認為哪一個對，英雄都不會等於時勢，電壓也不等於電動勢，不過確實是電動勢造就電壓。

電動勢的定義是力的線積分，所以有些書會把電動勢定義成電源做的功，但這有時候是有問題的，比方在運動電動勢的情況，運動電動勢是磁力的線積分，而磁力顯然是不做功的，所以最起碼運動電動勢就完全不是功。

**運動電動勢**

導線在磁場中運動，導線中的電子在磁力的作用之下，會往兩側堆積，形成電位差，磁力沿著導線的線積分就是運動電動勢。磁力會造成電動勢，但磁力不做功，做功的是拉動導線的外力。

導線的運動會造成磁力推動導線中的自由電子，而磁力推動電荷的同時，會給予該電荷一個額外的的速度分量，同時，這個速度分量會造成新的磁力分量，這樣將永遠使得電荷運動的總和方向正交於磁力的總和方向，所以即使磁力會負責推動電荷，但磁力還是不做功。

那個新的磁力分量，將跟一開始的那個運動的方向是相反的，也就是說，如果要維持線圈的運動，必須有**外力**來抵抗那個新的磁力分量，負責做功的就是那個外力。

運動電動勢可以寫成 flux rule 的形式，作者最初推導出flux rule 用了非常trick 的圖像，也就是圖7-10 在這個特例中 作者設計讓線圈拉出磁場外 使得x是減少的 造成了flux rule 的那個負號 如果我們讓線圈衝進磁場 就推不出那個負號了。但之後用了一般性的圖像推論出的flux rule 中，負號是從純量三重積的變換中冒出來的，所以確實那個負號，是對的。

在這個階段 flux rule 並不蘊含新的物理在裡面，僅僅是運動電動勢的另一種表現方式，而且也不是任何狀況都能這樣表示，所以那個負號在這個階段並沒有特別的意義。但，他當然有。

**感應電動勢**

也是一種由實驗觀測到的現象，不可能由思維推論出這種東西，所以作者從介紹法拉第的實驗作為出發點。總結來說，法拉第做了三個實驗，這三個實驗的結果可以整合成一個方程式，flux rule，有些人會把這個方程式就叫做法拉第感應定律，但作者認為這有些怪怪的，畢竟在第一種狀況，推動電荷的力是磁力，在後兩種狀況，推動電荷的是感應電場。作者只稱呼後兩者為法拉第感應定律，第一種不算進去。

flux rule的負號代表**電動勢抵抗磁通變化**，這件事就是冷次定律。運動電動勢的方向雖然也可以用冷次定律判斷，但通常沒有必要，因為運動電動勢的方向就是勞倫茲力的方向。

在運用法拉第感應定律的時候，有件事很奇怪，那就是明明就是在探討磁場隨時間的變化，我們卻仍然用靜磁場的公式去計算磁場，雖然這確實只是近似而已，但只要電流的頻率不要太高，或者不是離電流太遠的地方，這種近似是很正確的，比方說，在一般家用交流電的60HZ的情況，運用靜磁學的公式也是很準確的。

**電感**

有兩個迴路，迴路1和迴路2，當迴路1上有電流1，電流1會建立出磁場1，當磁場1通過迴路2，造成了通量2。通量2和電流1成正比，比例係數就是互感。讓電流1變化，通量2也會變化，而在迴路2上感應出電動勢，推動迴路2的感應電流。

這個感應電流，他身為電流當然也會建立磁場，而且方向會對抗磁場1的變化。但這個抵抗必然不會成功，感應電流建立的磁場可以忽略不計，所謂的”抵抗”，就是判斷方向而已。

如果磁場1是透過變弱在迴路2造成感應電動勢，那麼迴路2的感應電流的方向，會製造出同向的磁場，抵抗著場的變弱，但場還是會變弱；反之，如果磁場1是透過變強在迴路2造成感應電動勢，那麼迴路2的感應電流的方向，會製造出反向的磁場，抵抗著場的變強，但場還是會變強。

當磁場1通過迴路1本身，也會造成一個通量，與電流1成正比，比例係數就叫做自感。讓電流1變化，通量的變化在迴路1本身也會造成感應電動勢，電動勢會抵抗電流1。

如果磁場1是透過變弱在迴路1造成感應電動勢，那麼迴路1的感應電動勢會抵抗電流1的變弱(但電流1還是會變弱)，因而抵抗著磁場1的變弱(但磁場1也還是會變弱)；

如果磁場1是透過變強在迴路1造成感應電動勢，那麼迴路1的感應電動勢會抵抗變強的電流1(但電流1還是會變強)，因而抵抗著磁場1的變強(但磁場1也還是會變強)。就是這樣的抵抗造成就算磁場不做功，但磁場本身的建立仍然需要能量。