電磁理論希望回答的基本問題:

如果我在這裡放了一堆電荷(source charges)，其他地方的另一些電荷(test charge)會怎麼樣?

根據重疊原理，僅需要知道一個 source charge 對 test charge 的力。我們先前一直把注意力放在 source charge 靜止的狀況，也就是靜電學，現在是時候進入到 source charge 會移動的狀況。

透過介紹載流導線之間的力，作者表明了這是一種不同於靜電力的現象，磁力。為了描述這個全新的現象，一樣採用場論的形式，有別於靜止電荷，運動的電荷會製造出另一種場，磁場。磁場可以透過磁針測量，磁針所指的方向，就是磁場的方向。然而，我們發現載流導線所產生磁場環繞導線，這樣的場要如何作用，使得當兩條載流導線，電流同向時，吸引，反之排斥?(注意：這裡問的是how，而不是why，我們無法回答why，這就只是一個觀測到的現象)。答案就是，磁場、磁力和電流的方向滿足右手定則。這個現象就是勞倫茲力。至於怎麼計算磁場，就先擱著，等介紹完了勞倫茲力之後再說。

題外話:為什麼我們不像靜電學那樣，直接把磁力的方向視為磁場的方向，而是把磁針所指的方向視為磁場的方向?

我們用場論描述現象時是說，source charges的周圍瀰漫著場，test charge由於這個場的存在，受到了力。把這個思維套用在載流導線上就會發現，不能把磁力的方向視為磁場的方向。好，有兩條載流導線，導線1周圍瀰漫著磁場，導線2由於場的存在，受到了力；電流同向時，吸引，反之排斥。但場的概念是即使導線2不在，還是有個物理實在，會在那個位置，隨著導線2電流的流向不同而會改變的力，不應該是場的方向，而磁針的指向是固定的，很自然就會把它視為磁場的方向。

**勞倫茲力**

不是推導出來的東西，而是實驗歸納的結果。課本介紹了一些例題，在給定的磁場中，計算運動的電荷會受到的力，說明這樣子的力能造成一些有趣的軌跡，最重要的是，他說明了磁力不做功，但這讓人很困惑，比方我用了一個磁鐵把迴紋針給吸起來，看起來磁力造成了一段位移，而力乘以位移就是功，但我們又說磁力不做功，所以這是怎麼回事?很遺憾，永久磁鐵的運作機制不是古典物理的範疇，我們沒辦法直接用這個例子跟你解釋。我們要迂迴一點，先去建構一個簡單的狀況。

想像一下，有個均勻的磁場，他的方向和範圍是垂直穿進螢幕的上半平面，再來，有個矩形迴路，下方掛著一個重物，矩形迴路本身質量可忽略不計，迴路通上順時針方向的電流，磁場在這段載流導線上施加的力，方向向上，一旦電流大小適當，磁力和重力平衡，迴路就可以"懸吊"在磁場上。

然後加強電流，使得磁力約略大於重力，導線會得到一個向上的速度，這個向上的速度，使得導線中的電荷在磁場中，又會再造成一個向左的磁力，和電流的方向相反，所以若電流要維持，必須要有外力去對抗該磁力，這個外力才是真正做功的力，可能是來自電池或發電機。

**電流**

提到移動的電荷，必然要定義電流，電流其實是個向量，畢竟牽扯到移動，他當然會是向量，只不過在一維電荷分布的狀況，電荷的速度方向剛剛好就是導線的切向量方向，所以我們習慣於把電流當作一種純量來看，但是在二維電荷分布以及三維電荷分布，就不能了。在三維的情況，體積電流密度的封閉面積分，搭配電荷守恆和高斯散度定理，可以推導出連續方程式。

**畢歐沙伐定律**

在開始計算磁場之前，要強調靜磁場是由穩態電流造成的。然而，單一點電荷無法形成穩態電流，而且這是讓作者很頭痛的一件事，他無法像在建立靜電學那樣，從一個電荷出發，並利用重疊原理，進而斷言任意電荷密度分布的狀況。描述穩態電流和靜磁場的公式就叫做畢歐沙伐定律。磁場和電流的大小成正比，與距離的平方成反比，而磁場的方向既非電流的方向，也不是separation vector 的方向，而是 (電流)x(separation vector) 的方向。作為靜磁學的出發點，他和庫倫定律(作為靜電學的出發點)一樣，都是來自實驗。磁場一樣也滿足重疊原理。

**靜磁場的旋度和散度**

可以直接把del運算子作用在畢歐沙伐定律，透過數學推導出來。

但本書先介紹了另一個較具啟發性的推導方式，以無線長直載流導線為出發點，可以推導出磁場的迴路積分與穿過迴路的電流成正比。疑?這不就是安培環路定律嗎?再運用史托克理論不就又能得到微分形式?還不是，安培定律適用於任意的電流分布，但這種推導方式基於無限長直載流導線，不能斷言適用於任意電流，儘管結果來說是對的。再來這也推導不出散度。

**靜磁場的旋度安培環路定律**

這個定律在靜磁學的地位就如同高斯定律在靜電學中的地位，在滿足對稱性的情況可以快速計算出磁場。但在說明例題時，作者做的第一件事是先判斷磁場的方向，而這個步驟在靜電學中運用高斯定律時並沒有出現，而且判斷的思維方法非常具有啟發性，舉個例子來說，無限單向的面電流並不會產生法線方向的磁場分量。先假設有，根據畢歐沙伐定律，如果電流反向，磁場也要反向，但是電流反向等同於觀察者向後轉，向後轉這個動作會讓左右對調，原本向左的會變成向右，反之亦然，但z軸並沒有改變，如果電流原本向上，它就應該依然向上，所以這就有矛盾，故假設不成立，沒有這個分量。

**靜磁場的散度向量磁位**

散度為零，代表靜磁場可以表示成另一個向量場的旋度，稱作向量磁位，儘管不如電位有用，但仍是個重要的理論工具，但其重要性在這個階段還無法說明。

散度為零也代表磁力線沒有起點也沒有終點，不是形成封閉迴路，就是延伸到無限遠，換句話說，不存在磁荷。

**邊界條件**

面電流存在的地方，磁場會不連續，平行於邊界的分量不連續，垂直分量連續。

這裡引入邊界條件的地方和靜電學一樣，都是在介紹位勢之後，但有別於純量位勢的電位，向量位勢的磁位並沒有對應到能量的物理意義，所以並沒有如同靜電學一樣接著繼續介紹能量。

靜電場中的導體，內部電場為零，會衍生出表面電場垂直於邊界。而靜磁學中，鐵磁性物質與真空的邊界，基於完全不同的原因，磁場也會垂直於邊界。這在陳的例題有計算，但這其實不用算也能夠定性思考出來。首先，B的垂直分量連續，然後在自由面電流不存在的情況，兩側的H在平行分量也連續，由於H = B over mu，而鐵磁性物質的permeability mu遠大於真空，這意味在真空端，B的平行分量會很小，從鐵磁性物質洩漏出的磁場會幾乎垂直於表面。

**磁化**

如同在靜電場中物質會被極化，在靜磁場中物質也會被磁化，但不同的是，電場的極化幾乎都是和電場同向的，順著電場的，而物質的磁化有順著磁場的，反著磁場的，少數特殊的物質還具有鐵磁性，有大得誇張的磁化，但這牽涉到量子力學，儘管如此，至少在順磁和反磁，古典也能給出很好的定性解釋，物質是由原子構成的，原子是帶負電的電子圍繞著正電的原子核，順磁性是來自電子的自轉，反磁性是來自電子的公轉，在非均勻磁場中，順磁性物質會被磁鐵吸引，反磁性會被排斥，但這都非常的弱，在日常生活中並無法檢測到這些現象，而日常中最熟悉的鐵磁性，在理論的觀點來看是最複雜的。

作者一開始先探討，矩形電流迴路，在均勻磁場中，的力矩。這樣就具有一般性了，任意迴路都可由 infinitesimal 的矩形迴路構成。

力矩 = 磁矩 x 磁場

這個公式當磁場均勻時，可以適用到任意迴路，當磁場非均勻時，只能用在 infinitesimal的迴路。

這個公式表示在外加磁場之下，磁矩會趨向磁場的方向，這是順磁性的機制，電子有自旋，可以看做是很小的磁矩，而電子又很普遍，這讓人覺得順磁應該也很普遍，但是並沒有，正如先前所說，磁化涉及量子效應，而電子會滿足包利不相容原理，成對的電子，必定一個自旋向上，另一個向下，也就是順磁現象比較會出現在那些，有奇數個電子的原子，但儘管如此，原子本身還有隨機的熱運動在破壞秩序，造成順磁現象非常微弱。

再來提到迴路受到的力，在均勻磁場中，任意迴路的合力皆為零，這可以從勞倫茲力方程得到，一旦磁場均勻就能提到積分外面，剩下了向量和就為零，非均勻磁場中合力不會為零，課本舉了一個實例，一個電流迴路放在螺線管上，根據勞倫茲力，會產生一個向下的吸引力。

一個 infinitesimal的磁矩，在非均勻磁場中的力，公式為 del (磁矩 dot 磁場)，至於怎麼來的被放在習題，作者到這裡講的是不論力的公式和力矩的公式都和靜電學中一模一樣，這是件很驚人的事，畢竟磁矩和電矩的機制完全不一樣，一個是電流迴路，另一個是分離的電荷造成的，也難怪過去會有科學家認為磁荷是存在的，儘管是在現在，由於這種驚人的相似性，是可以在一些場合透過磁荷的想法得到一些直觀的感覺，但不能根據他得到定量的結果。

外加磁場會造成電子公轉速度的變化，導致磁矩的變化，效果可以用冷次定律解釋，當電流迴路被施加磁場，該迴路所增加的磁矩會有抵抗外加磁場的趨勢，而這就是反磁性。簡而言之，反磁性就是公轉的電子由於冷次定律而抵抗外加磁場的表現。所以反磁性是普遍的現象，即使是在順磁性物質中仍有反磁性現象的存在，但會被順磁性所覆蓋掉。溫度對反磁性也比較沒影響。

題外話:課本是直接粗略的計算，首先從一個作圓周運動的電子出發，方向和磁場的方向滿足右手定則，並假裝這是一個穩態電流迴路，又由於電流方向相反於電子的方向，磁矩的方向就會和磁場反向，電子作圓周運動的向心力來自庫倫力和勞倫茲力，在這個圖像中，勞倫茲力和庫倫力是同向內的，向心力比沒有外加磁場大，而向心力公式是 v^2 over R，所以外加磁場造成的效果就是速度增加或是半徑減少，而這兩者不管是哪一個都會造成磁矩增加，但如果不用算的只用看的，這不容易看出來。也許速度增加可以說是電流增加，磁矩增加，但半徑減少應該是面積會減少，磁矩減少吧?不過照課本的去算，反向的磁矩還真都會變大。

**鐵磁性**

由於電子的自旋，鐵磁性物質的原子或分子會有淨磁矩，這和順磁性一樣，不一樣的是鐵磁性物質即使沒有外加磁場，磁矩仍有排列一致的現象，這種現象需要用量子力學解釋，所以先不管這個機制，現在的問題是這聽起來好像意味著鐵磁性物質天生就會是一塊磁鐵，但現實中並不是每一塊鐵都是磁鐵啊?

確實鐵磁性物質即使沒有外加磁場，磁矩仍會一致排列，但這種團結是有極限的，我們把磁矩一致的區域叫做磁域，如果有兩塊相鄰磁域的方向並不一致，由於每一塊磁域內部都非常團結，這兩塊誰也不讓誰，中間就會形成一個過渡區域，磁域牆或是磁域邊界。在沒有外加磁場之下，鐵磁性物質就是由無數個磁域所構成的，每一塊磁域內部是團結的，方向一致，但每一個磁域的方向又是隨機的，造成整體上淨磁矩為零。磁域的尺度大約是微米到毫米，內部的原子數或分子數大約是10^15，磁域邊界的厚度大概僅有數百個原子。

磁域內部由於量子效應的關係，排列會非常的團結一致，而這種一致性即使外加磁場也很難改變，鐵磁性物質的磁矩總是很想要和隔壁的磁矩一樣，會很抗拒外來勢力，也就是外加磁場。那為什麼當我們外加磁場時，他們最終還是會屈服?

關鍵就在於那層薄薄的磁域邊界上面，磁域內是很團結沒錯，但這層邊界就不是了，如果有一塊磁域A的方向剛好和外加磁場一致，磁域A的邊界就會在外加磁場的影響下，投奔磁域A，這會使得磁域A的邊界往外擴張，相鄰的磁域會越來越小，最後大家的方向都會和外加磁場一致了，這時叫做飽和。接下來再加強磁場也對磁化沒有影響了。如果把磁場關掉，當然沒有了外來勢力會有部分回到混亂，但正如剛才所述，由於鐵磁性物質的磁矩總是很想要和隔壁的磁矩一樣，現在把磁場關掉也回不去了，多數還是會一致排列，這就是剩磁。要讓剩磁歸零，一切回歸當初，就需要逆向的外來勢力，接下來的故事就不再贅述了，一切都是在循環，這就是磁滯曲線。

鐵磁性物質的磁矩總是很想要和隔壁的磁矩一樣，但這種秩序會被溫度所挑戰，如果溫度夠高，隨機的熱運動夠劇烈，這種團結就會被破壞，被高溫所破壞的鐵磁性，表現得就像順磁性。這一點也不奇怪，奇怪的是存在一個特定溫度，在這個溫度之下，團結，之上，混亂，中間沒有過渡區間，這很像水的相變，這一特定溫度叫做居理溫度，攝氏770度。

物質是很複雜的東西，在電磁學的範疇中，描述物質的磁化以及物質中的磁場，大致上只用了最簡單的物質模型。

物質由原子構成，原子由外部環繞的電子以及原子核構成。

環繞的電子會形成所謂的”束縛電流(bound current)”，他也是真實的電流，也會造成磁場，當沒有外加磁場時，各個原子的環繞電子隨機排列，整體互相抵銷，當存在一外加磁場，他們就會排在一起，對外產生影響。

但是，束縛電流和物質本身的特性關係密切，因此會希望能夠把這部分的影響併入物質本身的特性去考慮，使得計算場的時候僅考慮一般意義上的電流，這時計算的場就是H場。