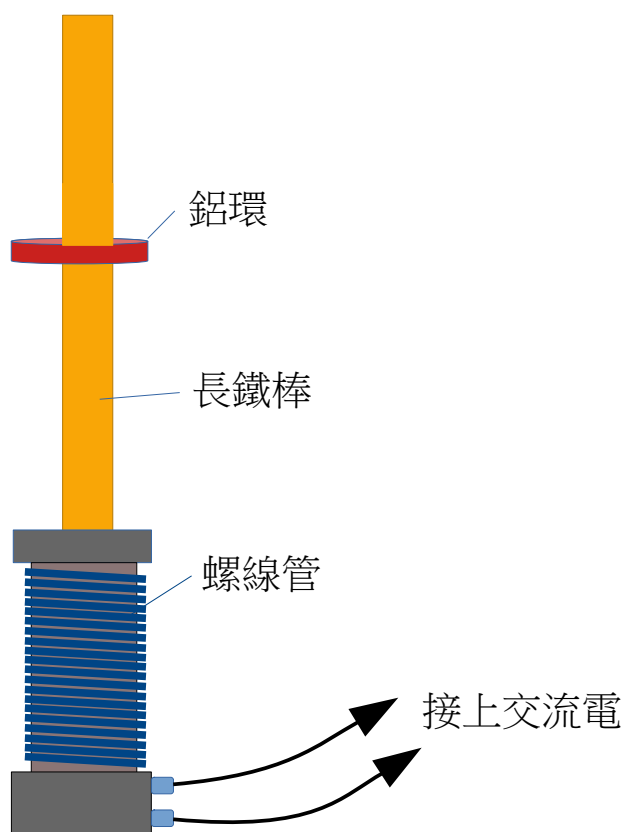


電磁感應「浮環」實驗 (Thomson's jumping ring) 的一個定性解釋 —— 鋁環的自感



(注意：本文討論的是螺線管接上交流電 a.c.，而不是直流電 d.c.。在後者，當開關閉合的那刻，金屬環躍起但會迅速跌下，本文不是解釋這現象。)

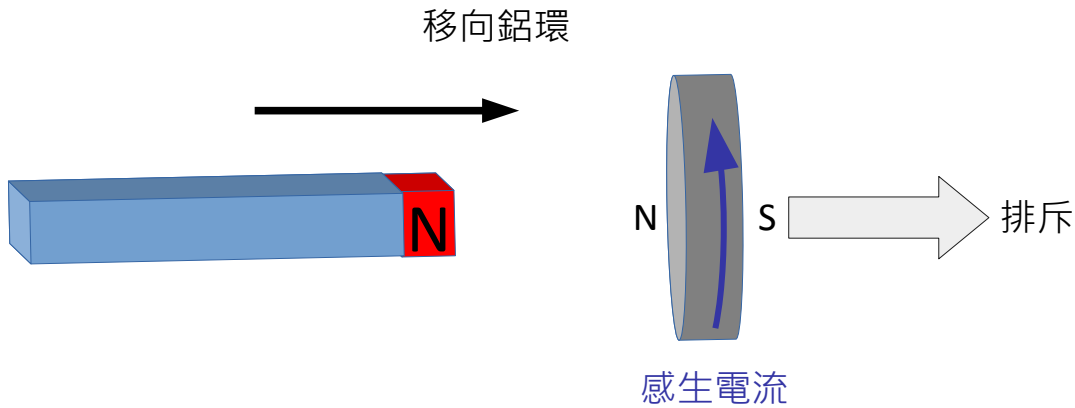
中學生對這個「浮環實驗」不會陌生。老師在課堂教授電磁感應 (electromagnetic induction) 或楞次定律 (Lenz's law) 時都喜歡演示這個有趣實驗：當接上交流電後，鋁環會徐徐升起。若增加交流電的頻率，鋁環會再升高一些。用手把鋁環按下並突然釋放，鋁環會立即彈高，甚至會彈射飛離開那長鐵棒 …

看過實驗後，同學總希望可以利用學過的理論去解釋此現象。但是，始終有一些地方想極也想不通。

想不通的地方

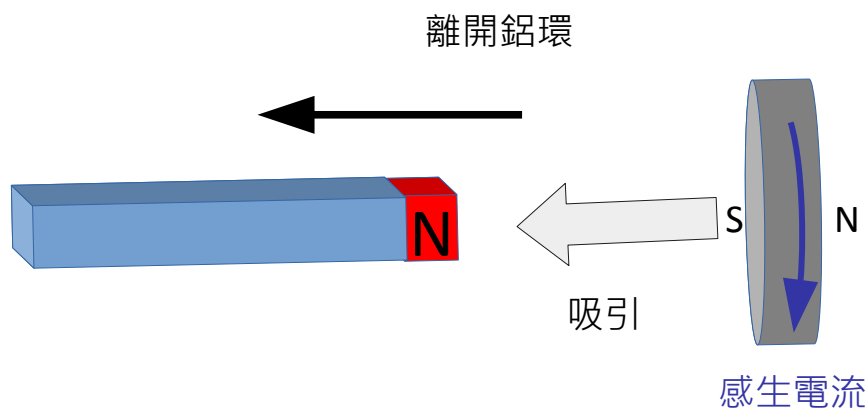
同學會想起以下兩個情況：

- (1) 當磁棒移向鋁環時，鋁環總是會被 **排斥** 彈開。



通過鋁環的磁通量 (magnetic flux) 會隨磁棒移近而增加。根據「楞次定律」，**感生電流的方向必是它可產生與外來磁場相反的磁場**。如此的感生電流，造成的效果是鋁環受到磁棒的排斥。

- (2) 當磁棒移離開鋁環時，鋁環應該是會被 **吸引** 過去。



通過鋁環的磁通量（magnetic flux）會隨磁棒離開而減弱。根據「楞次定律」，感生電流的方向必是它可產生與外來磁場同方向的磁場。如此的感生電流，造成的效果是鋁環被磁棒吸引。

問題來了，「浮環實驗」中的那個多匝螺線管接上的是交流電。交流電的電流由弱變強，又由強變弱；反方向之後又由弱變強，又由強變弱…。當電流由弱轉強，情況如上述（1）般，鋁環會被排斥；但當電流由強變弱，那應該是如上述（2）般，鋁環是會被螺線管吸引過去。換言之，鋁環受到的力會交替出現

排斥、吸引、排斥、吸引 …

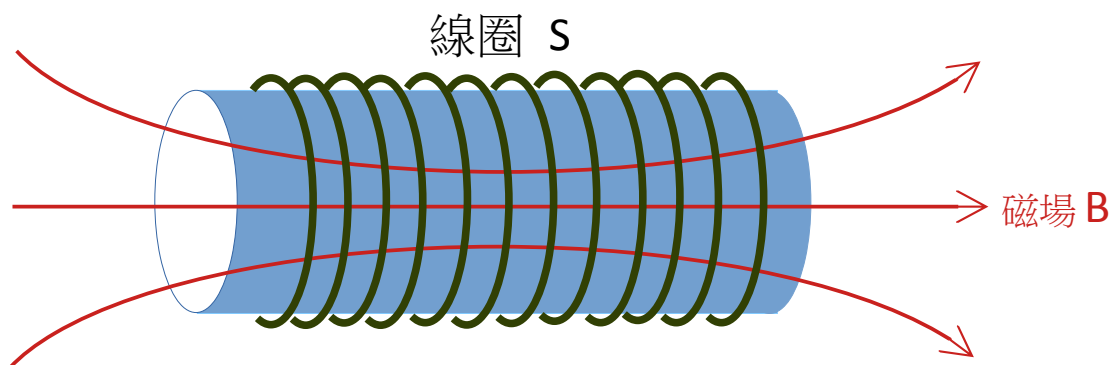
鋁環擁有一定的慣性（inertia），所以在高頻交流電（市電：50-60 Hz）之下，鋁環受到那交替出現的排斥力和吸引力所造成的效果會互相抵消。即是 鋁環最終會不動（最多是很小幅度的微振）。無論如何，是不會如實驗所看見般，鋁環總是被螺線管排斥而停留在空中！

問題在那？

「浮環實驗」是演示電磁感應嗎？大概來說，是的。實驗是演示楞次定律嗎？大概來說，是的。但更準確的說法是 **實驗演示了自感現象 (self-induction)**。

其實，有兩個自洽和自恃 (self-consistent and self-contained) 的方法來解釋「浮環實驗」。其中一個解釋是利用鉛環的自感 (self-inductance)，另一個則是利用 (理想) 變壓器 (transformer) 的理論。這裏，我們集中討論前者，是不涉及數學的一個定性解釋 (qualitative explanation)。

甚麼是自感？



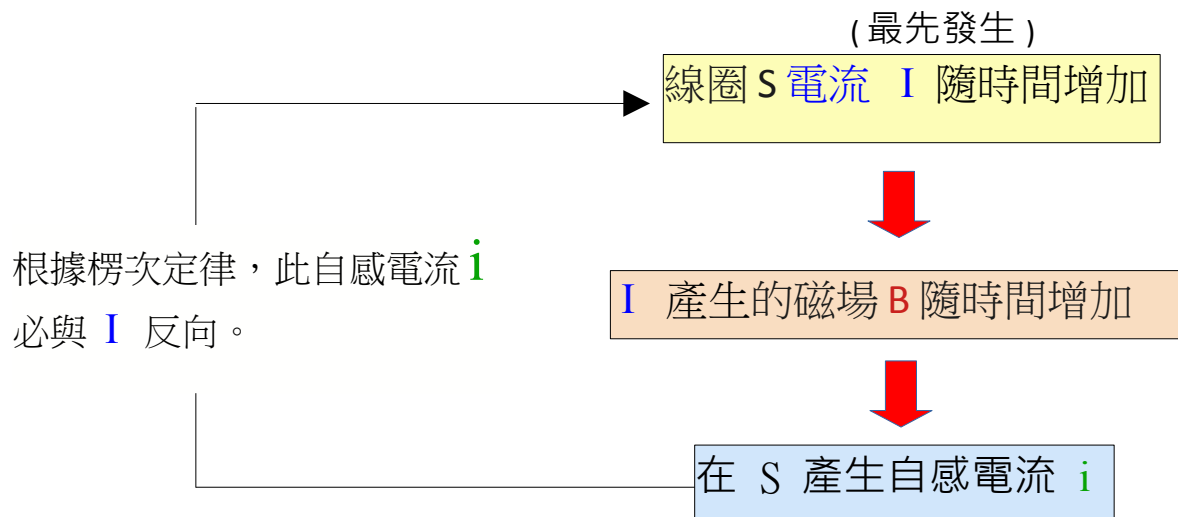
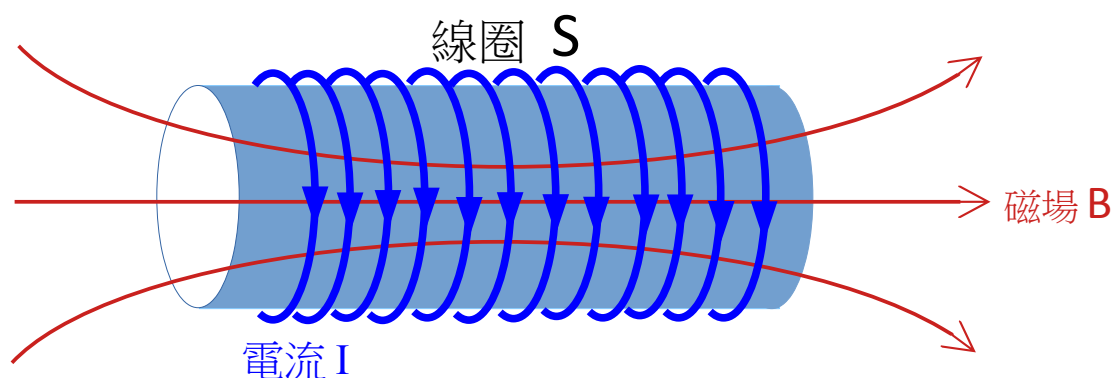
當磁場 B 隨時間增加，線圈 S 上會產生感生電流 (induced current)。
這個磁場 B 可以是

* 附近的另一線圈所產生，但亦可以是

* 由線圈 S 自己的電流產生。

若流通 S 的電流隨時間改變，那在 S 自己的橫截面就會產生由自己電流製造的一個隨時間改變的磁通量 (magnetic flux)，如此就會在 S 自己產生感生電流，此現象稱為「自感應」。這感生電流稱為「自感電流」(self-induced current)。

例如，在某時刻，通流過下圖線圈 S 的電流 I 隨時間增加。



* 若 I 是隨時間減少，那 i 與 I 同方向。

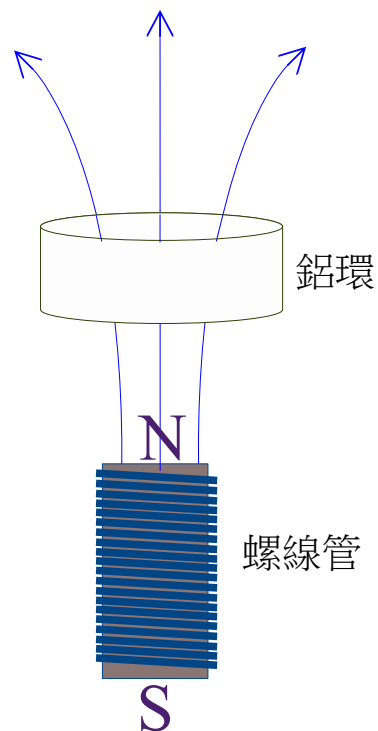
即是說，一個線圈自己（一捆電線，甚至是一條電線），附近沒有磁場。只要線圈自己通上電流及電流不穩定，那就會在線圈自己發生電磁感應。

楞次定律的精髓是「抗拒改變」。所以，

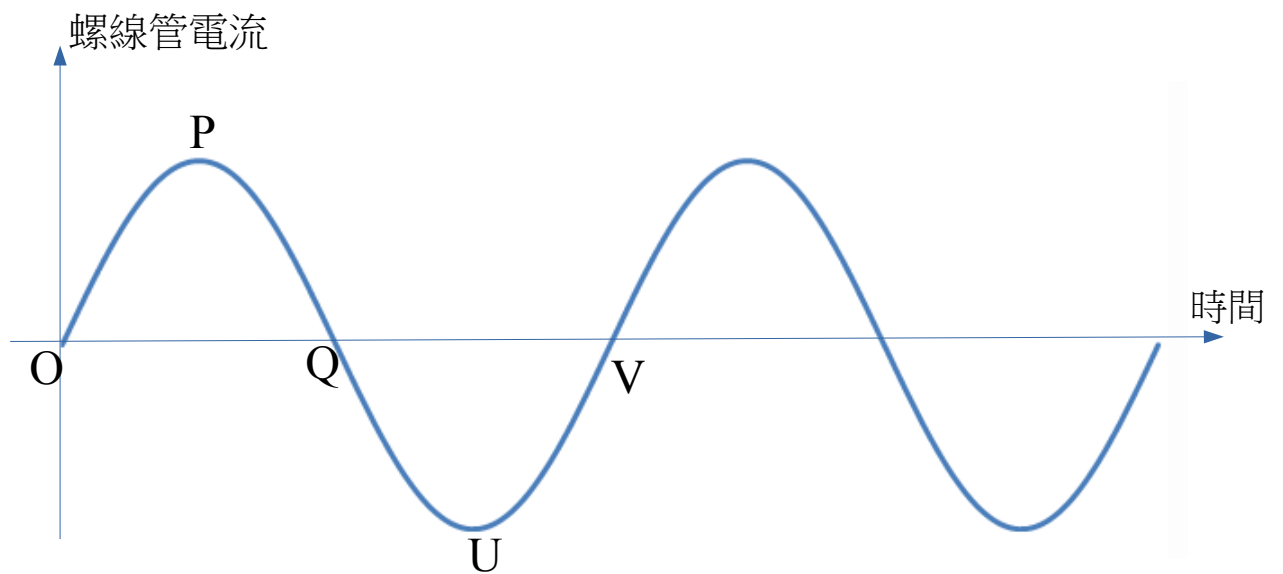
- * 當線圈的電流下跌，自感電流必與它同方向，以「阻礙」電流的下跌。
- * 當線圈的電流上升，自感電流必與它反方向，以「阻礙」電流的上升。



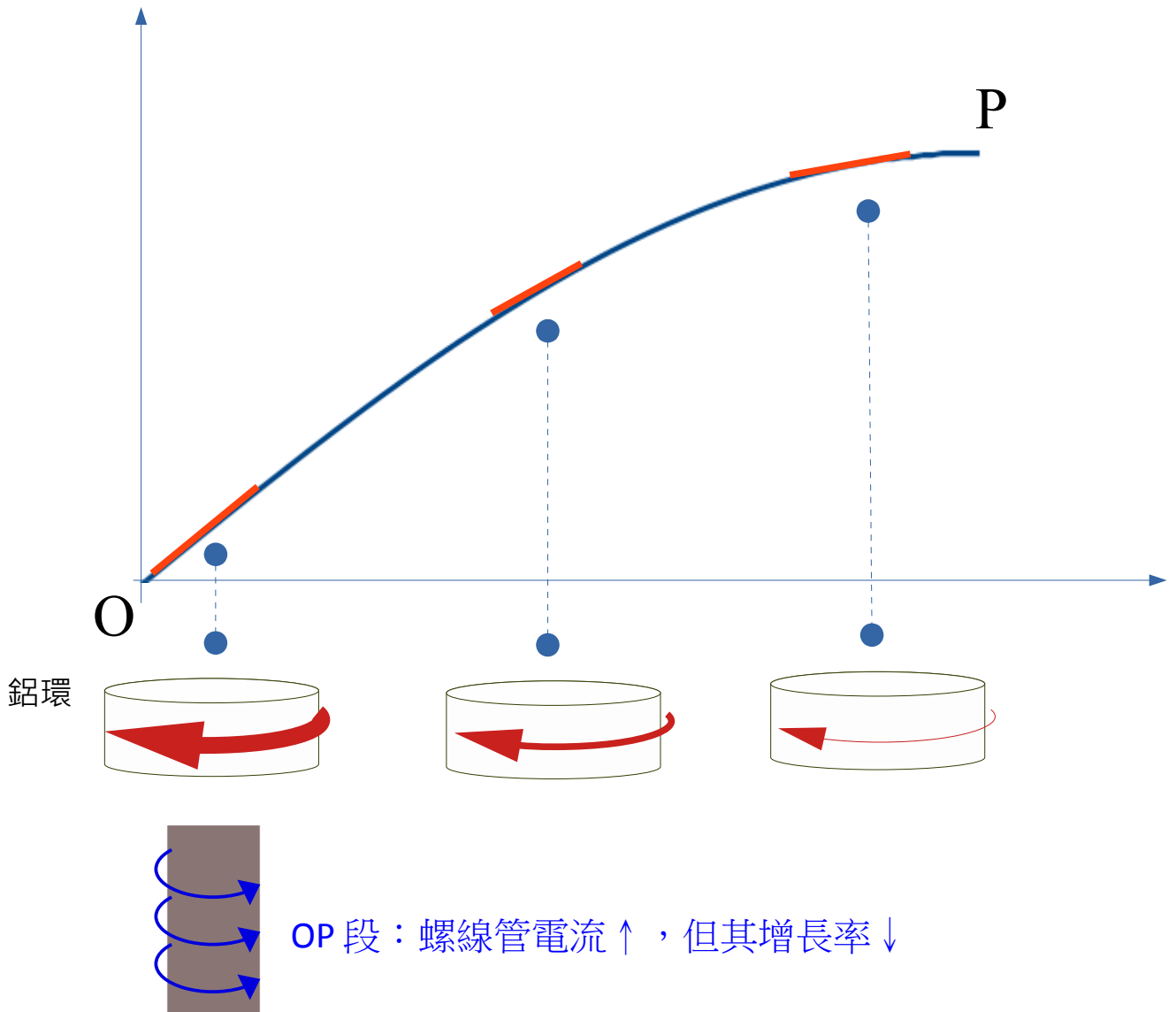
有了對「自感」的基礎認識，我們就可以對那「浮環實驗」給出一個定性解釋。



假設通過那長螺線管的電流為正弦波形，如下圖所示。我們考慮 OP 和 PQ 兩段，假設此時在長螺線管頂部都會產生一 N 極，所以當時穿過鉛環的磁場如上圖所示般。



(a) 電流在 OP 段，此時 電流在增加，但其變化率（曲線斜率，rate of change) 的量值在減少。



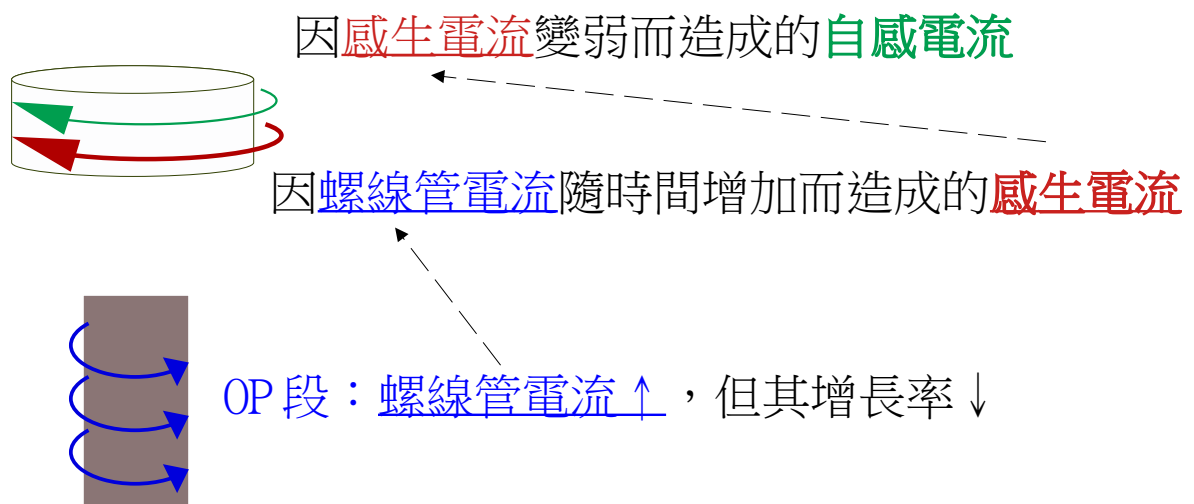
(1) 在 OP 段，螺線管的電流都在增加，所以鋁環的磁通量隨時間增加。感生電流的方向在 OP 段都是與長螺線管的電流方向相反。

(2) 無疑，磁通量在 OP 段都是隨時間增加，所以感生電流的流動方向保持着與螺線管的電流方向相反。

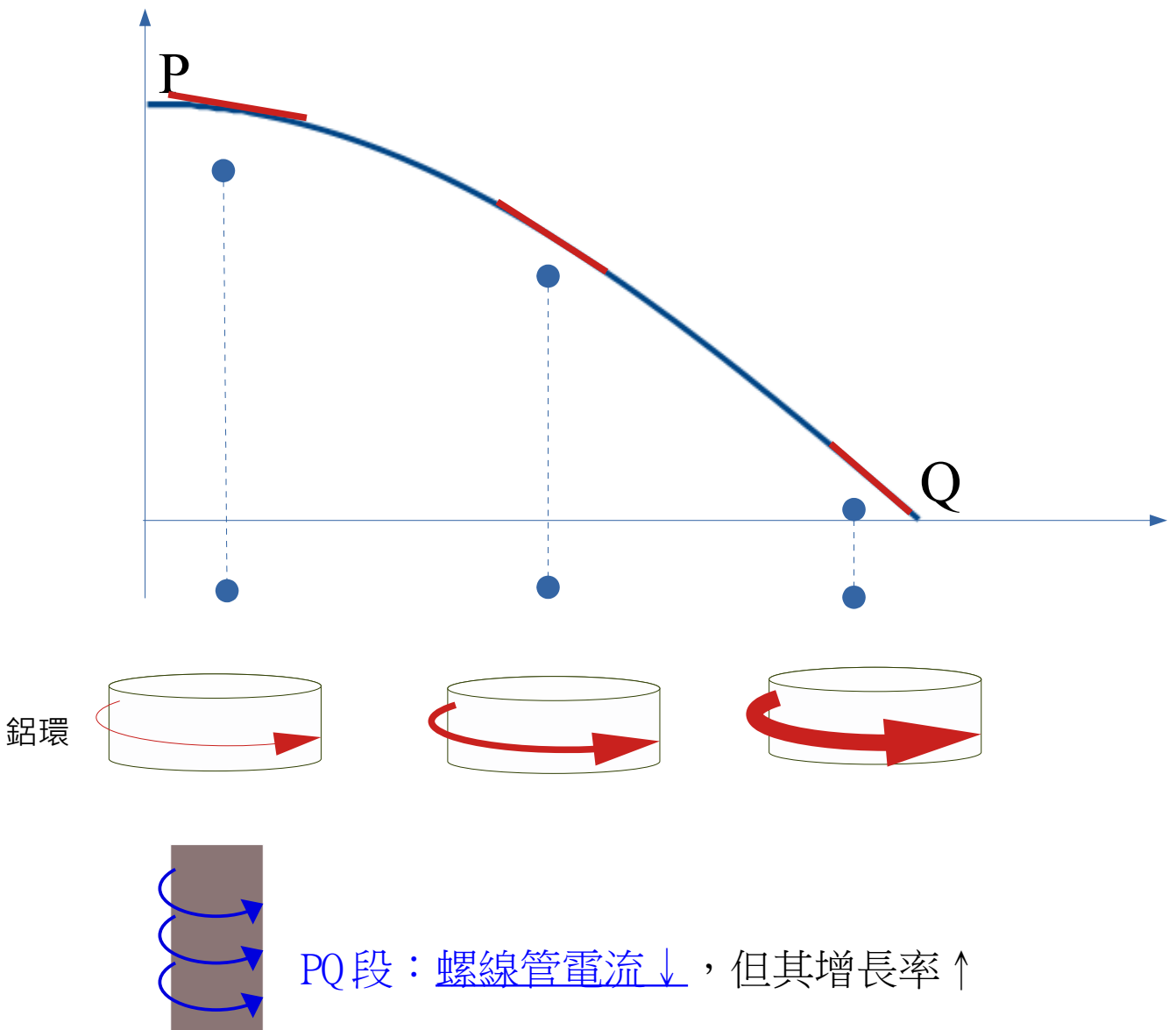
但螺線管電流的增長率慢慢放緩（比較上圖三個時刻的斜率），所以感生電流的量值（**magnitude**）會隨時間減少。

(3) 這 變弱中 的感生電流會通過自感，在鋁環產生一個與感生電流同方向的自感電流（**self-induced current**）。

(4) 所以此時在鋁環上會出現兩個同方向電流。



(b) 電流在 PQ 段，此時電流在減少，但其變化率 (rate of change) 的
量值(magnitude) 在增加。

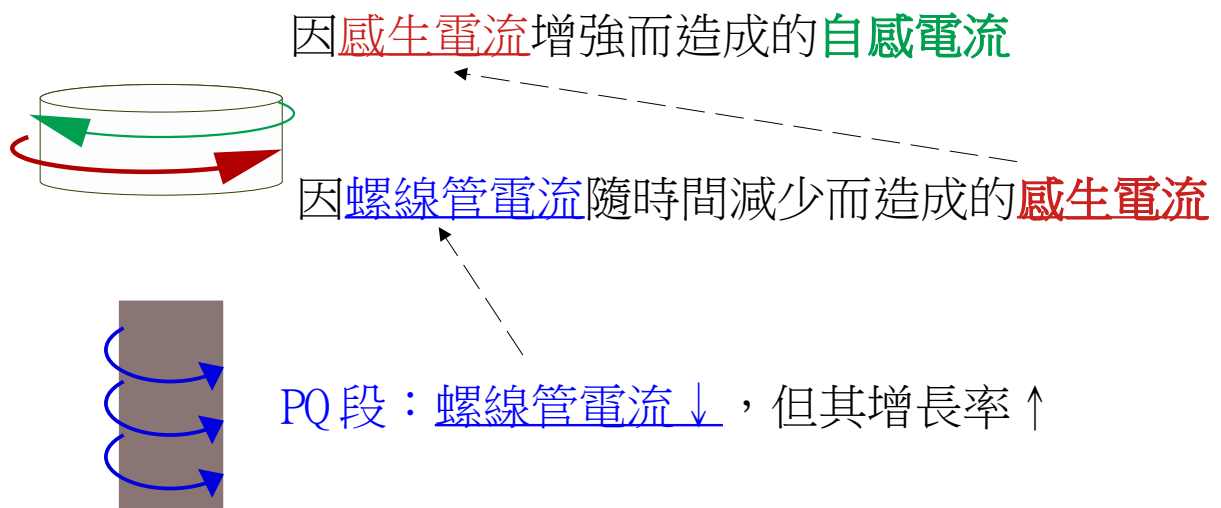


(1) 在 PQ 段，螺線管的電流都在減少，所以鋁環的磁通量隨時間減少。
感生電流的方向在 PQ 段都是與長螺線管的電流方向相同。

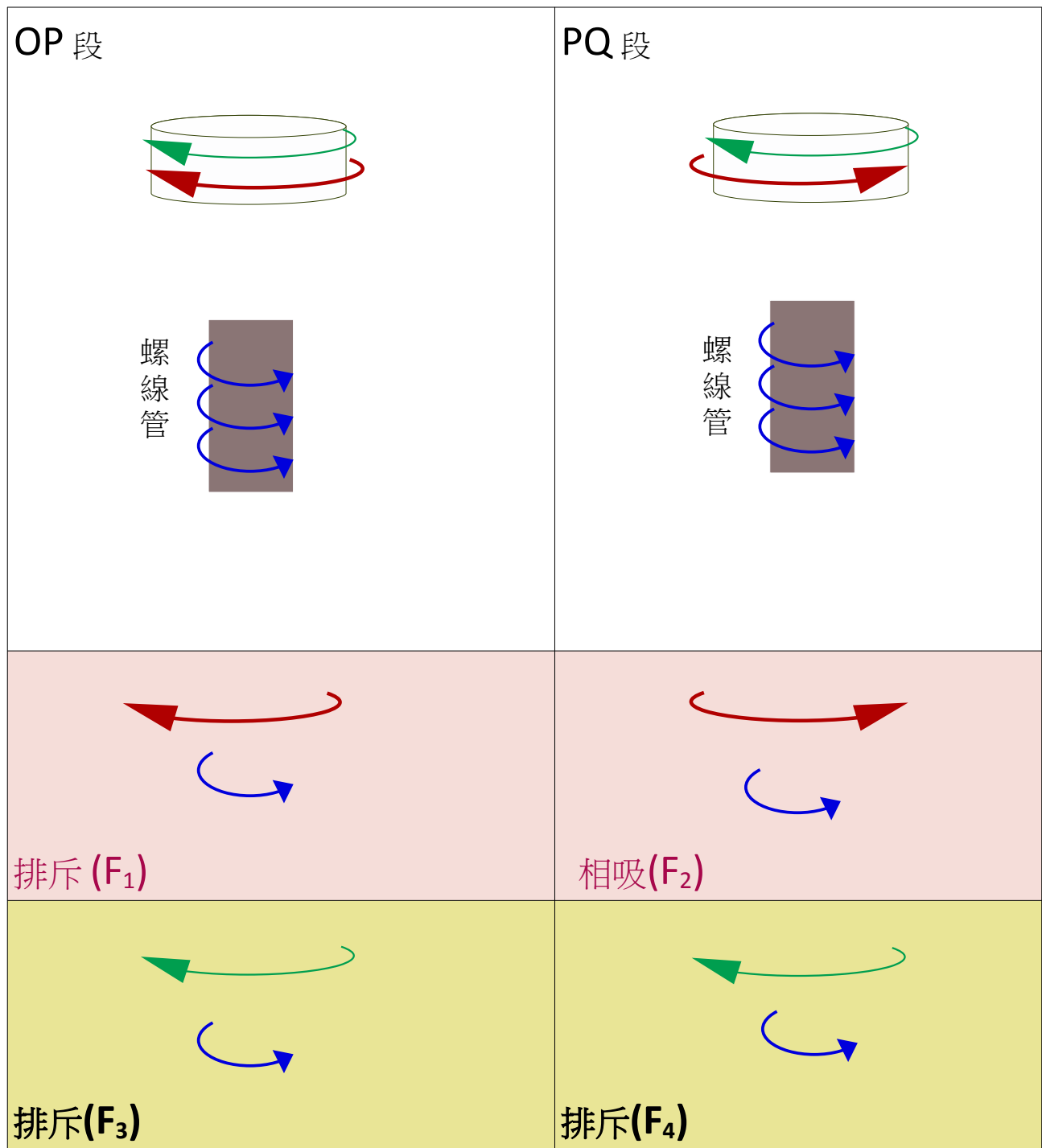
(2) 無疑，磁通量在 PQ 段都是隨時間減少，所以感生電流的流動方向保持着與螺線管的電流方向相同。但螺線管電流的增長率增加着（比較上圖三個時刻的斜率），所以感生電流的量值（magnitude）會隨時間增大。

(3) 這 增強中 的感生電流會通過自感，在鋁環產生一個與感生電流反方向的自感電流（self-induced current）

(4) 所以此時在鋁環上會出現兩個反方向電流。



所以，在 OP 和 PQ 兩段電流之間的作用力：



這一組力互相抵消
這一組力製造淨排斥力

讀者可自行探討後半週期的情況。結果只是上表內所有箭矢均倒轉了方向。排斥的仍然是排斥；相吸的仍然是相吸。

* 螺線管電流隨時間變化，所以在鋁環會產生感生電流。這只會令螺線管和鋁環之間交替地出現排斥力 (F_1) 和相吸力 (F_2)。此排斥力和相吸力對鋁環造成的效果，平均之後就是零。

* 這感生電流本身也隨時間改變，這會在鋁環產生自感電流。

螺線管電流與鋁環的自感電流之間總是互相排斥 (F_3 和 F_4)。我們看見浮環能夠浮在空中就是這個排斥力造成。

F_1 和 F_2 互相抵消； F_3 和 F_4 造成淨排斥力

浮環能夠浮在空中，是因為螺線管的電流與鋁環的自感電流互相排斥而造成。

❖ 感生電流會產生自感電流，而這個自感電流也會產生它的自感電流。而新的自感電流也會產生再下一個自感電流，過程會不斷演化下去。把所有這些自感電流相加後就得出總的自感電流。這個總自感電流與螺線管電流總是互相排斥。

以變壓器解釋

其實，「浮環實驗」的實驗裝置就是一具變壓器（transformer）。那處於下面的螺線管就是原線圈（primary coil）；上面的鋁環就是副線圈（secondary coil）；負載電阻是鋁環的內阻。如果以正確的（理想）變壓器去考慮「浮環實驗」，那螺線管與鋁環之間的互相排斥是一件 顯而易見 的結果。

有興趣的讀者請參考筆者的另一篇文章：

“ 變壓器的基本運作原理是電磁感應。但理想變壓器的兩個著名比（電壓正比於匝數、電流反比於匝數）又必然表示鐵芯內的磁場在甚麼時刻皆零。這矛盾是甚麼一回事？ ”

(<http://phy.hk/DSE/IdealTransformer.pdf>)



作者：吳老師 (Chiu-King Ng)

<https://ngsir.netfirms.com>

<http://phy.hk>

電郵：feedbackWZ@phy.hk 其中 WZ 是 23 之後的質數

