

中華民國第 56 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高級中等學校組 物理與天文學科

最佳(鄉土)教材獎

051801

強「磁」奪「鋁」-磁鐵於不完整鋁管中運動現象

學校名稱：國立花蓮高級中學

作者： 高二 顏銘徵 高二 彭楚鈞 高二 江承鴻	指導老師： 胡育豪 莊文治
---	-----------------------------

關鍵詞：渦電流、冷次定律、終端速度

摘要

原本認為不會產生渦電流的不完整鋁管(C 型中空鋁管)，竟然也能產生電磁感應，使磁鐵減速落下，且會產生在完整鋁管(圓柱形中空鋁管)中所沒有的轉動現象。為了模擬不完整鋁管，我們用鋁塊和壓克力塊製作各種組合管，實驗後發現各個排列組合都有其獨特的運動模式。後來我們深入探討磁鐵對單一鋁塊的其他變因，結果發現磁鐵的運動並不是僅受鋁塊面上單一種渦電流影響，而是與鋁塊產生的各種渦電流彼此交互作用。實驗中，我們歸納出三種不同形式的渦電流：正面面電流、邊界電流及側面面電流，推測正面面電流主要會對磁鐵施以鉛直向上的力使其減速，而邊界電流則主要影響磁鐵轉動。未來希望可以比較不同種渦電流的大小且導出磁鐵的運動方程式。



打掃實驗室時發現的 C 型中空不完整鋁管

壹、 研究動機

在一次打掃實驗室的過程中，我們意外的發現了一支有缺口的不完整鋁管。看著他，我們忽然間聯想到：把磁鐵丟入鋁管時，會因為電磁感應使磁鐵減速落下；那若將鋁管割出一個缺口，使其截面不完整，丟入磁鐵後是不是應該就不會減速了？沒想到實際實驗後，磁鐵竟然也減速落下了，並且還產生了完整鋁管中所沒有的旋轉、滾動現象，而且磁鐵在釋放時，似乎都有特定的旋轉方向。這些發現和我們原先的預測大相逕庭，使我們非常驚訝，好奇到底是誰給了它減速的力，也進而疑惑其他不同的裂口，是否也會產生減速的效果，於是開始著手進行了這次的實驗。

貳、 研究目的

一、以總數四個的壓克力塊和鋁塊排列組合成的不同回字形正方鋁管來模擬不完整鋁管，並分析強力磁鐵於當中下落的運動情形。

二、在只有一個鉛直鋁塊(無壓克力塊)的情況改變不同變因並分析磁鐵的運動情形。

(一)初始釋放位置 x

(二)初始釋放位置 z

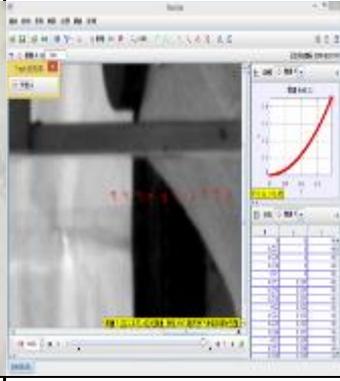
(三)磁鐵磁場 (\vec{B}) (固定質量，改變磁場)

三、 檢測並模擬磁鐵運動時所產生的渦電流

(一)在鋁片上貼上線圈測得渦電流大小

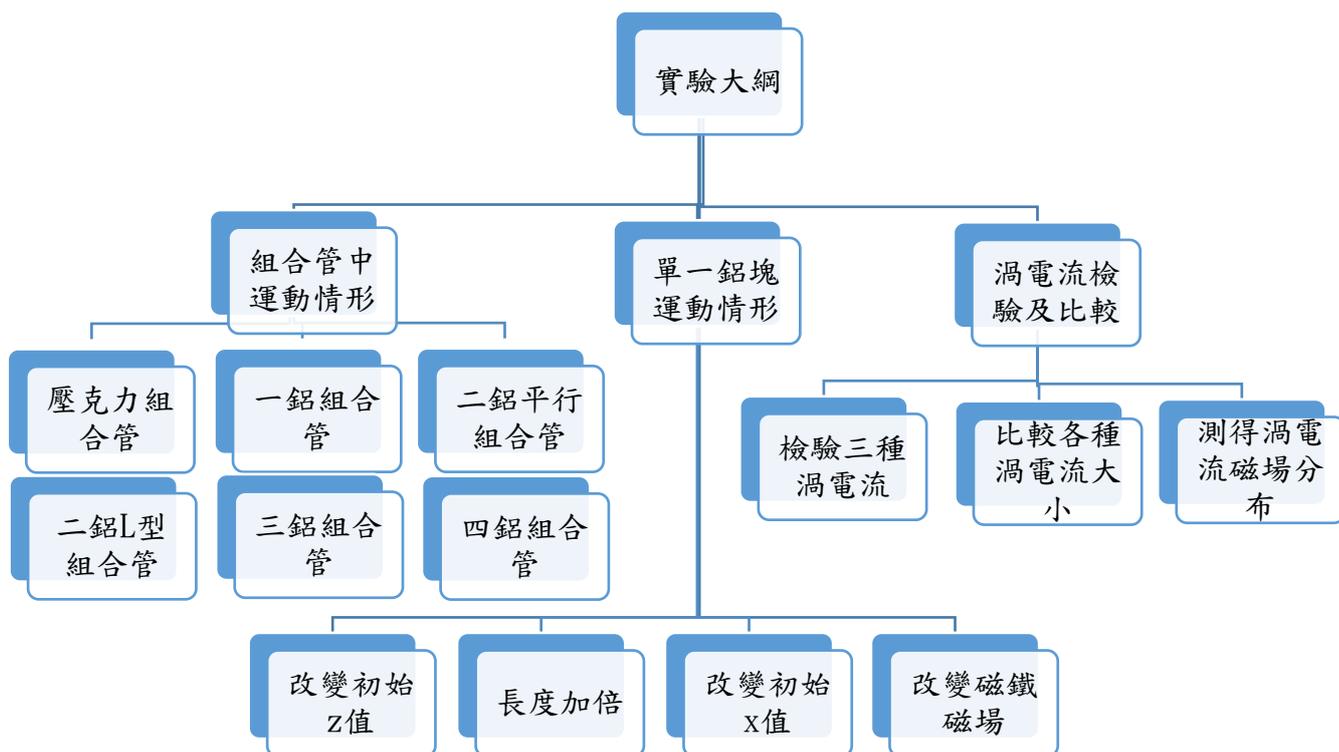
(二)將線圈通電流以模擬磁鐵於單一鉛直鋁塊下墜時情形

參、 研究設備及器材

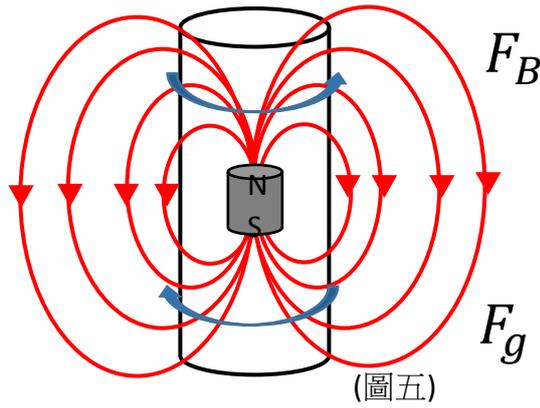
高速攝影機(fps:400) (圖一)	Pasco 電流感測器 (圖二)	Tracker 軟體 (圖三)	螺線管(半徑:3.54cm 高:15.2cm)(圖四)
			
砂紙	漆包線	電腦	膠帶
碼錶	熱熔膠	鋁塊	壓克力塊
鱷魚夾	C 型夾	鐵夾	支架
直流電源供應器($V_{max}=50V$, $A_{max}=5A$)		強力磁鐵(直徑:1cm 高:1cm)	

肆、 研究過程及方法

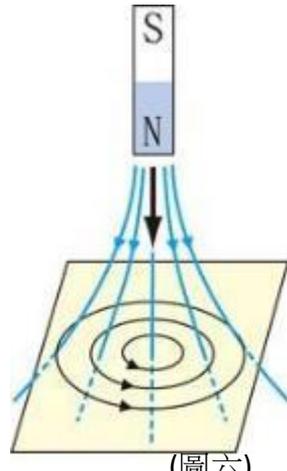
一、 實驗大綱



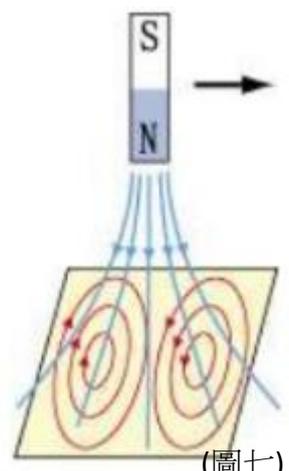
二、實驗原理



(圖五)



(圖六)



(圖七)

當磁鐵在鋁管中下墜時，對鋁管造成磁通量

(一) 法拉第定律

變化使其產生感應電動勢。根據法拉第定律

感應電動勢的大小為：

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt}, \quad \Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{A}$$

Φ_B 為鋁管截面的磁通量。鋁管產生的感應電流會讓磁鐵受到一向上的磁力，當向下的重力和向上的磁力相等時，磁鐵就會達到終端速度。

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = F_g - F_B, \quad \text{當 } F_g = F_B \text{ 時, } \frac{d^2x}{dt^2} = 0 \text{ (如圖五所示)}$$

(二) 楞次定律

金屬表面藉由磁通量改變而產生的感應電流，其所產生的磁場是阻止磁鐵與金屬表面發生相對運動。在金屬表面上此感應電流稱為「渦電流」。(如圖六、七所示)

(三) 磁矩

一個載流線圈可視為一磁偶極(一磁體也可近似於一磁偶極)，而它的磁矩 $\vec{\mu}$ 的大小為：

$$\mu = NiA$$

<p>N：線圈匝數 I：線圈所通過的電流 A：線圈所包圍的面積</p>

其中 $\vec{\mu}$ 的方向由 S 極指向 N 極。當一磁矩為 $\vec{\mu}$ 之磁偶極處在外加磁場 \vec{B} 中時，他所受到的力矩 $\vec{\tau}$ 為：

$$\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}$$

這將會是以後我們研判磁鐵旋轉方向的一個重要方法。

三、 實驗前置作業

(一)使磁鐵容易觀察

為了方便利用 Tracker 分析磁鐵的運動，我們將磁鐵外側貼了一層黑色電氣膠帶，並在磁鐵的一端用白色油漆筆塗上白色，如圖八。

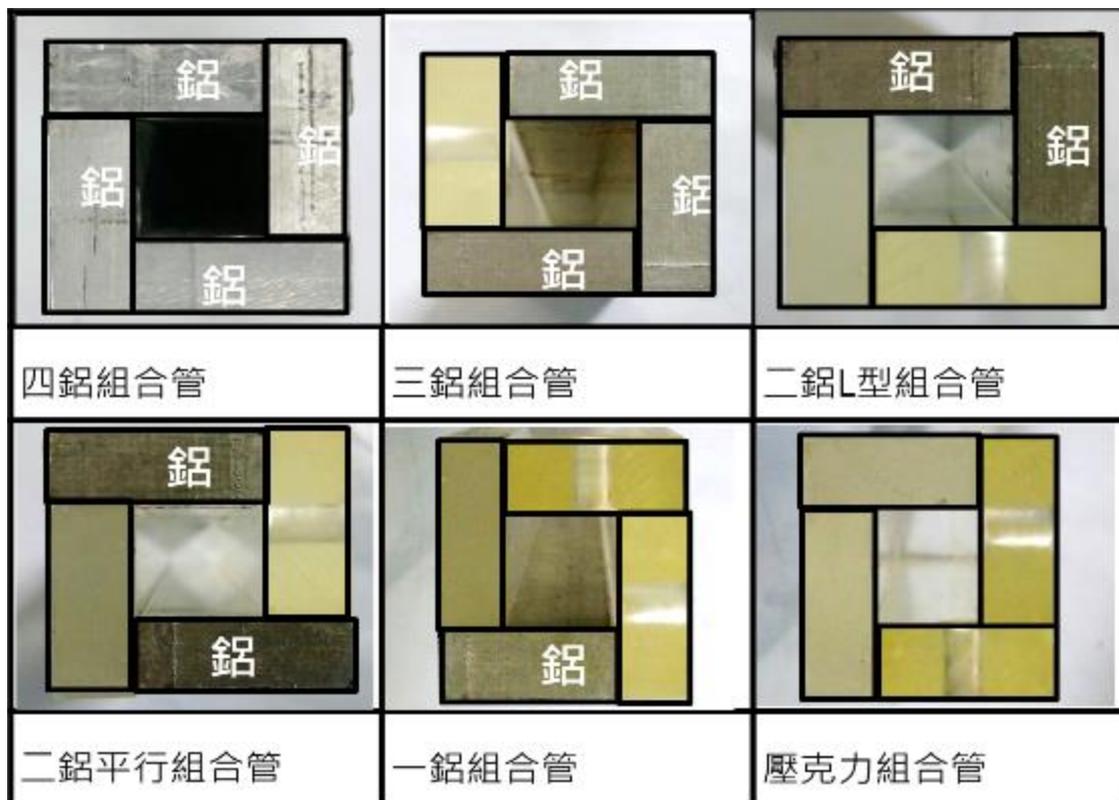


(圖八)

(二)製作鋁塊、壓克力塊排列組成的方型組合管使用的材料規格如圖九

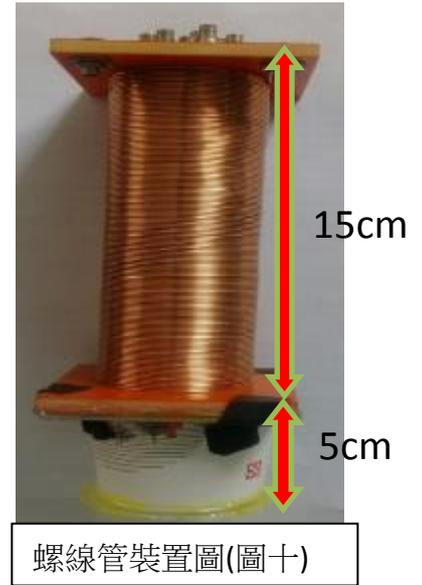


以 C 型夾固定，再用膠帶黏貼成各種不同的鋁塊組合(名稱以排列模式和使用鋁塊數作為簡稱，分別為四鋁、三鋁、二鋁平行、二鋁 L 型、一鋁、零鋁)，替代不完整鋁管，來進行實驗。



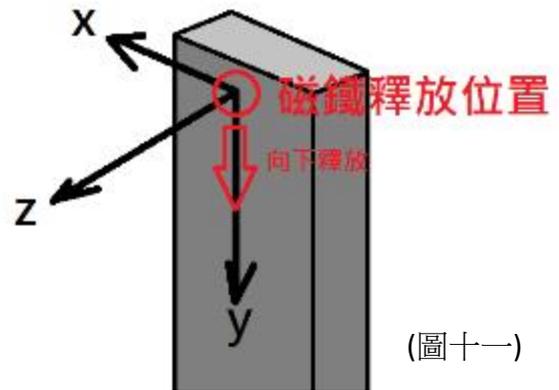
(三)架設穩定釋放磁鐵的實驗器材

為了減少手放磁鐵的不定，我們利用螺線管、直流發電機和鐵桿架設一 S 極朝下的電磁鐵(也可交換線路更改成 N 極朝下)。此外，為了減少磁鐵與螺線管的交互感應影響，我們在螺線管下方加裝一 5 公分的高台，並於其下黏一壓克力板，在板上標示磁鐵釋放位置座標。

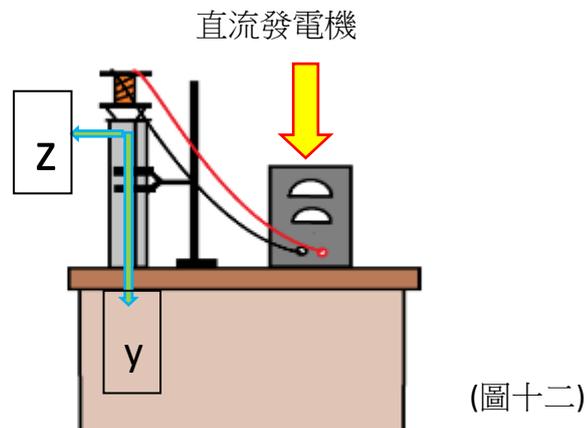
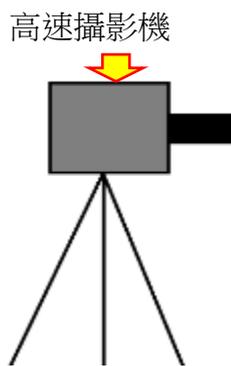


(四)定義坐標軸

因為實驗中需要觀察和變動位置，所以我們在鋁塊上訂定了座標軸,如圖十一所呈現



四、實驗裝置架設



1、架設高速攝影機於裝置前方 1m 左右

2、拍攝兩方向：(1)正面：攝影機沿 z 軸拍攝

(2)側面：攝影機沿 x 軸拍攝

3、用夾子固定鋁塊組合或單片鋁塊

4、在裝置旁綁一重錘，以此作為鋁塊組合或單片鋁塊是否鉛直的依據

五、實驗方法

1. 確認鋁塊組合或單片鋁塊、螺線管及直尺皆為鉛直
2. 開啟電源供應器，將磁鐵吸附於螺線管下方的特定初始位置
3. 關閉直流電源，使磁鐵下落
4. 用高速攝影機或 Pasco 電流感測器紀錄下磁鐵於鋁塊組合中或單片鋁塊旁下落之情形
5. 每種組合重覆錄影若干次，並更換各種不同組合
6. 以 Tracker 軟體分析其運動情形

實驗 1:

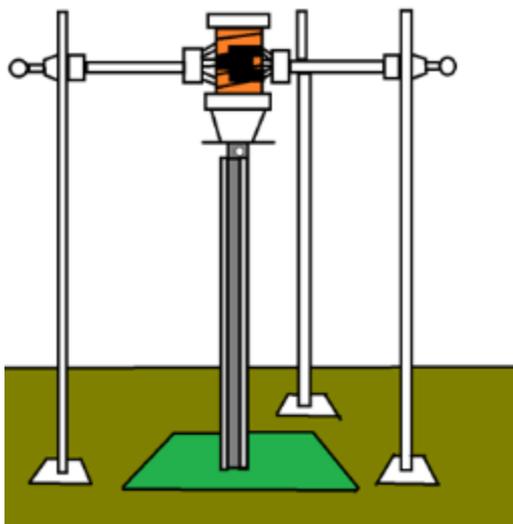
實驗 1-1：磁鐵於不同鋁塊組合（不包含四鋁組合）中運動之分析（鋁塊組合）（正面拍攝）
（圖十九）

實驗 1-2：磁鐵於四鋁組合管中運動之分析

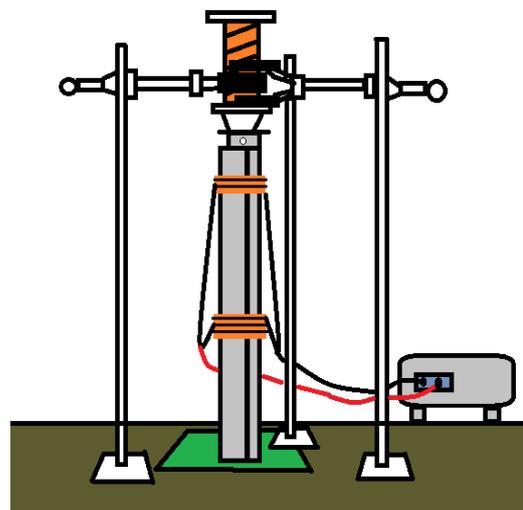
由於四鋁組合管無法以攝影方式記錄，故我們在管上纏繞 2 組線圈，由 pasco 紀錄波形圖，利用圖中兩波的時間差和調整線圈距，即可計算磁鐵的運動分析(圖十四)

實驗 1-3：使 L 型組合管鋁塊不互相接觸

製作 L 型鋁管組合時，在鋁塊的側邊黏貼透明膠帶，讓鋁塊間的電流不能有互通的情形發生，並與正常 L 型鋁管組合比較。



(圖十三)



(圖十四)

實驗 2:

實驗 2-1：磁鐵於單一鋁塊 A(50cm)、加長後的單一鋁塊 B(100cm)(2 倍)旁運動分析（距 z 為 2.5mm）（側面拍攝）（圖十五）

實驗 2-2：改變磁鐵與單片鋁塊的正向距離(z):

將磁鐵置於鋁塊中央， z 分別調整為 6.5mm、7mm、7.5mm、8mm、8.5mm、9.5mm、10mm(以質心為主體)（單片鋁塊）（側面拍攝）（圖十六）

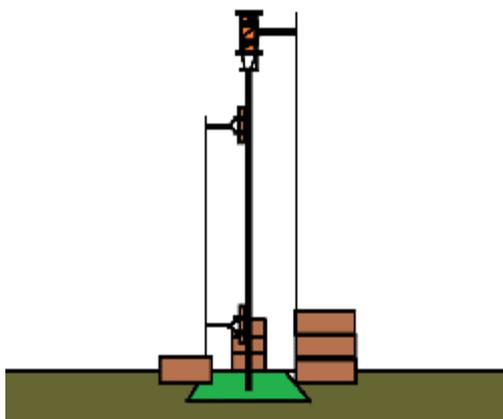
實驗 2-3：改變磁鐵與鋁塊的側向距離(x):

將 z 調整為 2.5mm， x 分別調整為 0mm、6.25mm、12.5mm、18.75mm、25mm (以質心為主體)（單片鋁塊）（正面拍攝）（圖十七）

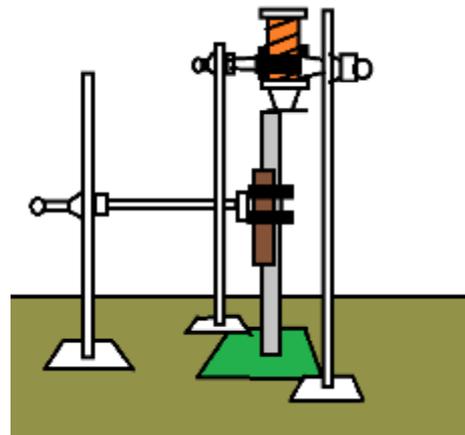
實驗 2-4：改變磁鐵 \vec{B} :

以直徑為 10mm，高為 1mm 的墊片和磁鐵組合成高 12mm，不同 \vec{B} 的磁鐵（圖十八），按其磁鐵數目分別簡稱為十二磁，十磁，八磁，六磁，四磁。

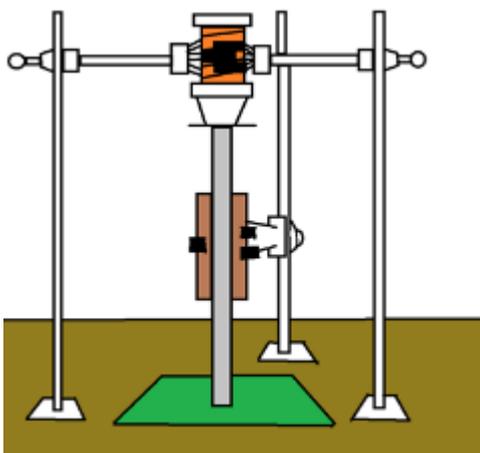
其於單片鋁塊旁運動之分析（ z 為 2.5mm）（單片鋁塊）（側面拍攝）



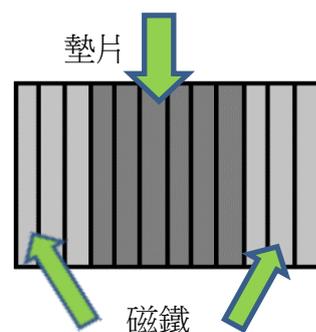
(圖十五)



(圖十六)



(圖十七)



(圖十八)

實驗 3:

實驗 3-1：驗證面電流的存在

在單片鋁塊(圖十九)的正面上纏繞五個螺旋狀的線圈，連接上 Pasco 電流感測器紀錄電流，重複實驗三和實驗四，觀測其波圖形(單片鋁塊)(圖二十)

實驗 3-2：驗證側面電流的存在

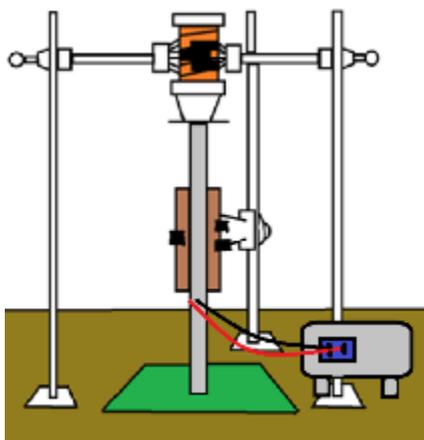
在單片鋁塊(圖十九)的側面上纏繞五個螺旋狀的線圈，連接上 Pasco 電流感測器紀錄電流，重複實驗三和實驗四，觀測其波圖形(單片鋁塊)(圖二十一)

實驗 3-3：驗證邊界電流的存在

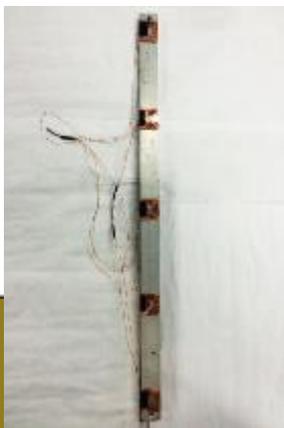
在單片鋁塊(圖十九)上纏繞五個環狀的線圈，連接上 Pasco 電流感測器紀錄電流，重複實驗三和實驗四，觀測其波圖形(單片鋁塊)(圖二十二)

實驗 3-4：驗證各種電流對磁鐵的影響

將圖二十、二十一、二十二之裝置接上直流發電機，模擬感應電流，分析磁鐵的轉動方向。(裝置如圖二十三、圖二十四)



(圖十九)



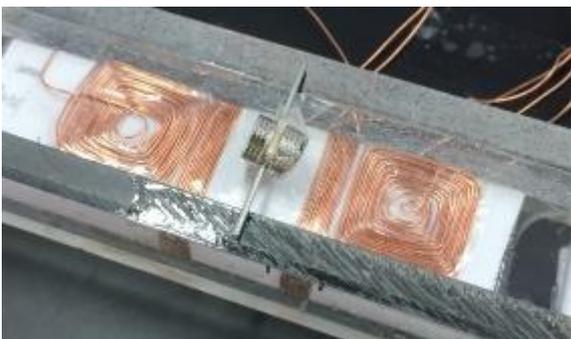
(圖二十)



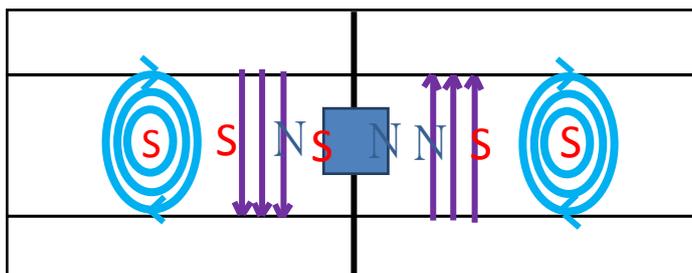
(圖二十一)



(圖二十二)



(圖二十三)



(圖二十四)

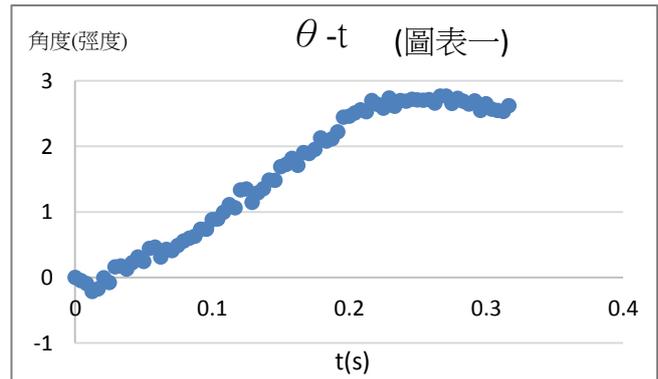
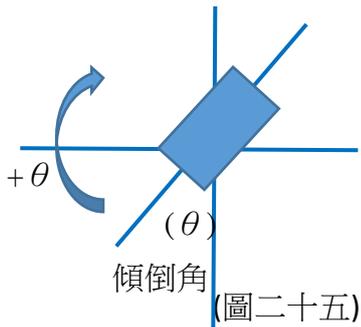
伍、研究結果

一、實驗 1-1：磁鐵於不同鉛塊組合（不包含四鉛組合）運動之分析

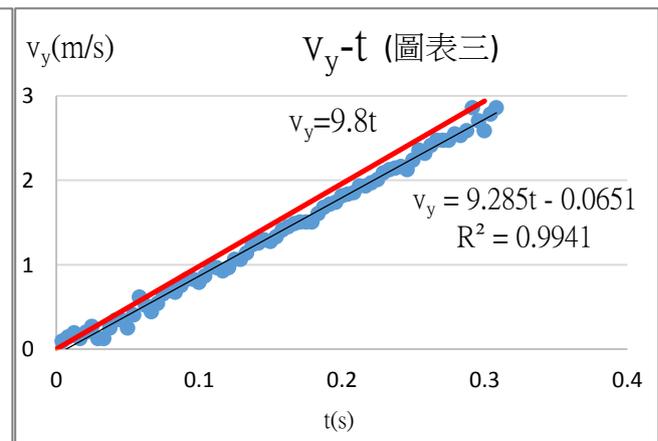
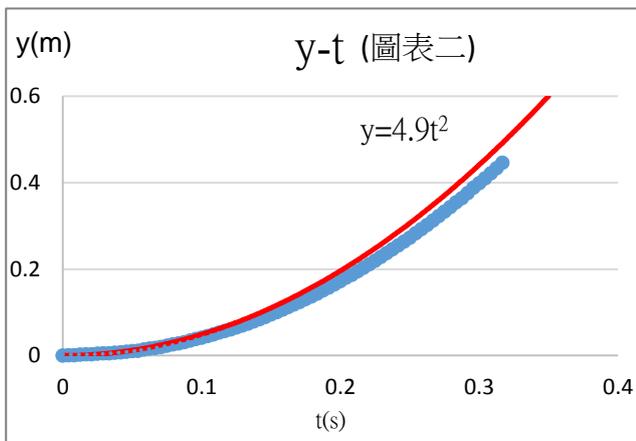
(一)壓克力組合管

1.運動行為描述：

磁鐵於壓克力組合管下落時，會因受到地磁影響而產生傾倒角(θ)，但轉速不大，總過程約只轉了半圈。



2.運動量與時間之關係

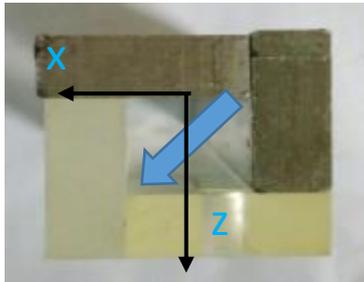


3.從圖表二中，看出前段與自由落體一致，可證明磁鐵下落時，已無受到螺線管的影響。至於從圖表三中，可看出加速度與自由落體相近，可知管內管外環境相差不大。

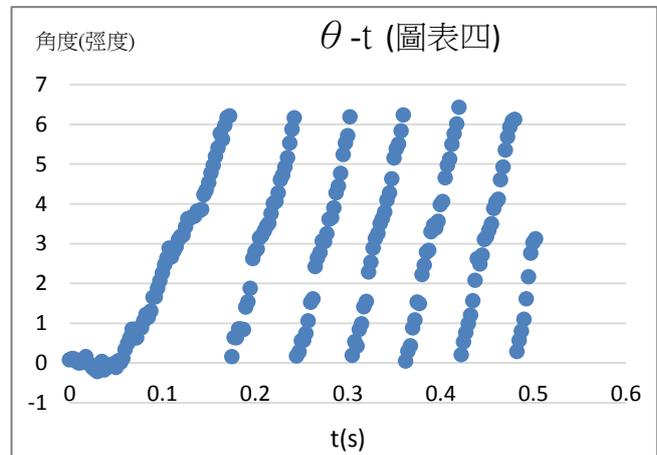
(二)二鋁 L 型組合管

1. 運動行為描述：

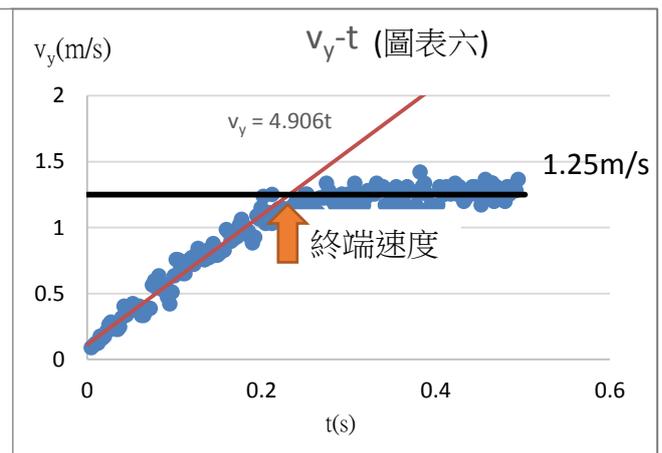
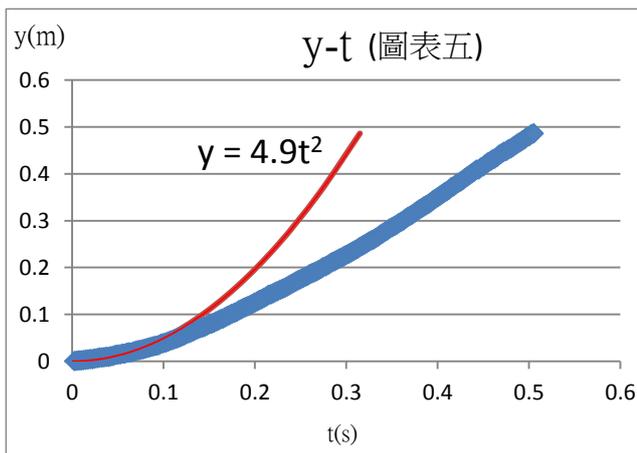
磁鐵於二鋁 L 型組合管中下落時，磁鐵會沿著對角線且遠離鋁塊的方向轉動，轉速也有越來越大的趨勢。



(圖二十六)

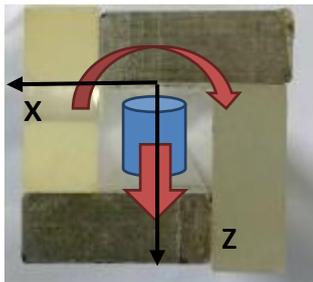


2. 運動量與時間之關係

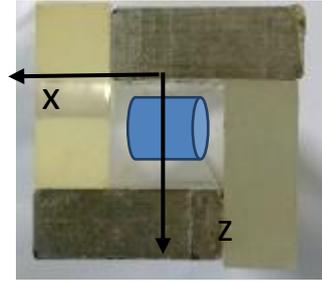
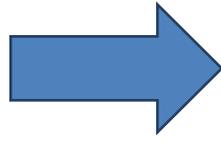


3.從圖表六中，看出加速度明顯小於自由落體，並於箭頭處達終端速為 1.25m/s。

(三)二鋁平行組合管



(圖二十七之一)

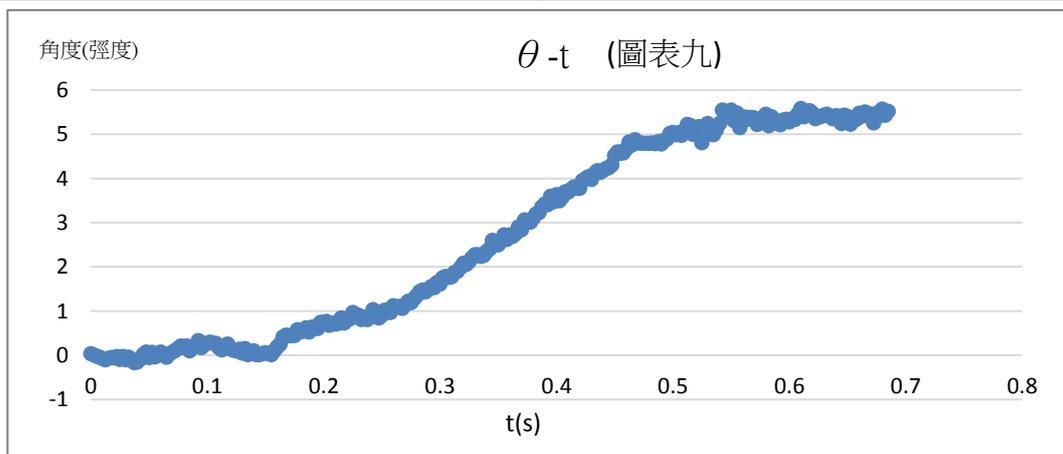
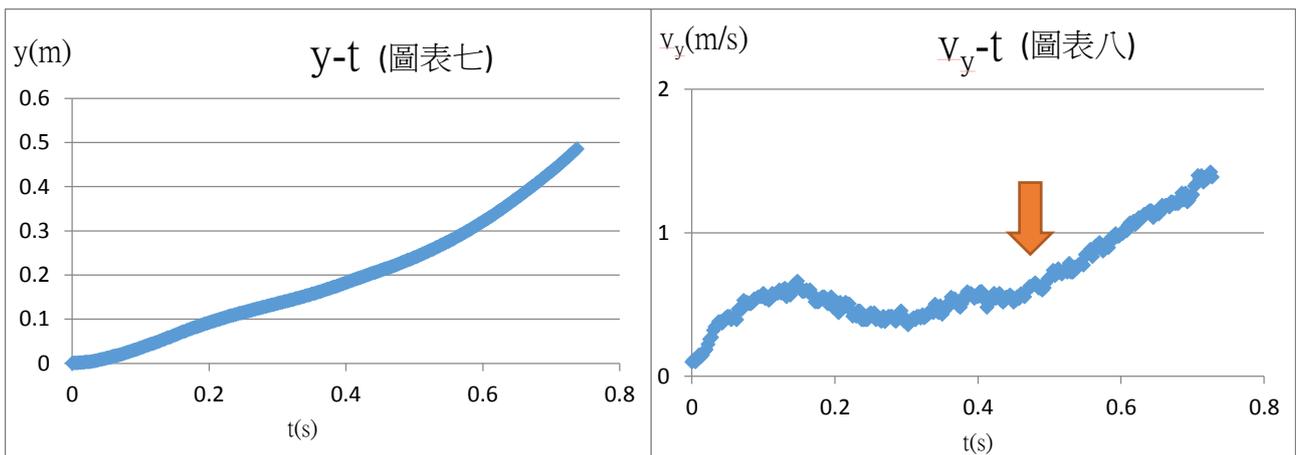


(圖二十七之二)

1. 運動行為描述：

磁鐵於二鋁平行組合管下落時，端面會先面對鋁塊緩慢地轉一圈左右(z 軸方向)如圖二十七之一，同時會因組合管的不對稱，磁鐵頂部平面會逐漸轉向平行壓克力塊(x 軸方向)，使得速度又再度增加。

2. 運動量與時間之關係

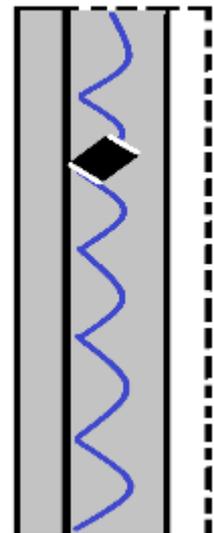


3.從圖表八中，可看出由於翻轉的關係，前半部分速度上上下下的，後半部分(箭頭處後)由於磁鐵對鋁塊磁通量變少，因此速度又再度增加。

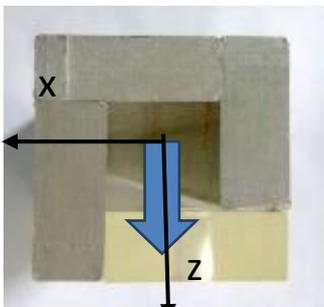
(四)三鋁組合管

1. 運動行為描述：

磁鐵於三鋁組合管下落時，磁鐵受到不對稱鋁塊組合影響，會有週期性的碰撞後方鋁塊。轉動方向為藍色箭頭，橘色箭頭處為週期性的碰撞時刻。

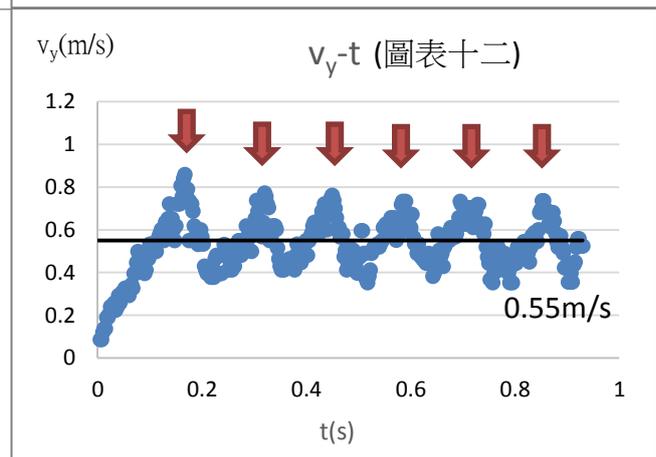
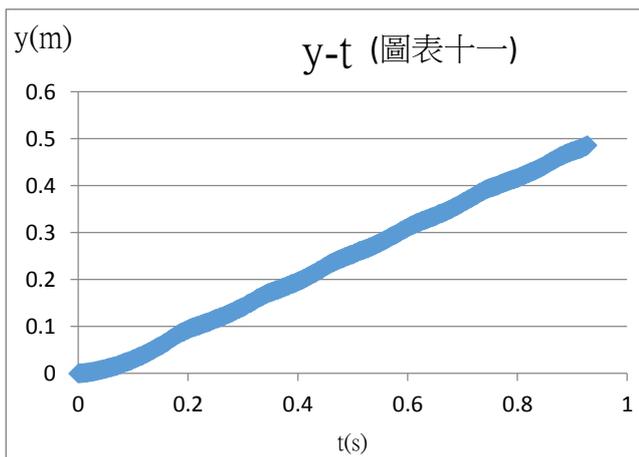
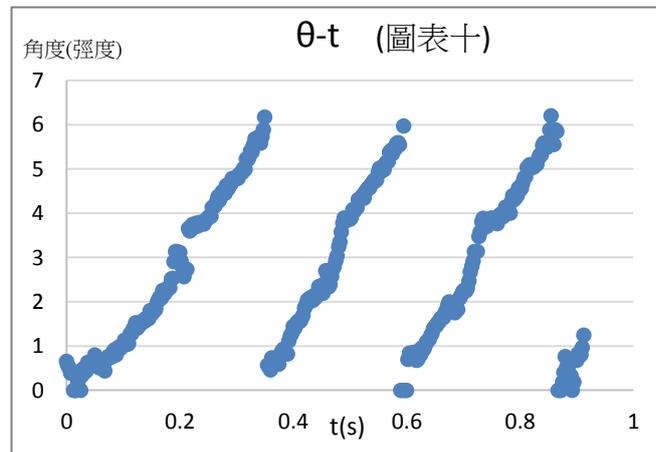


(圖二十八)



(圖二十九)

2. 運動量與時間之關係



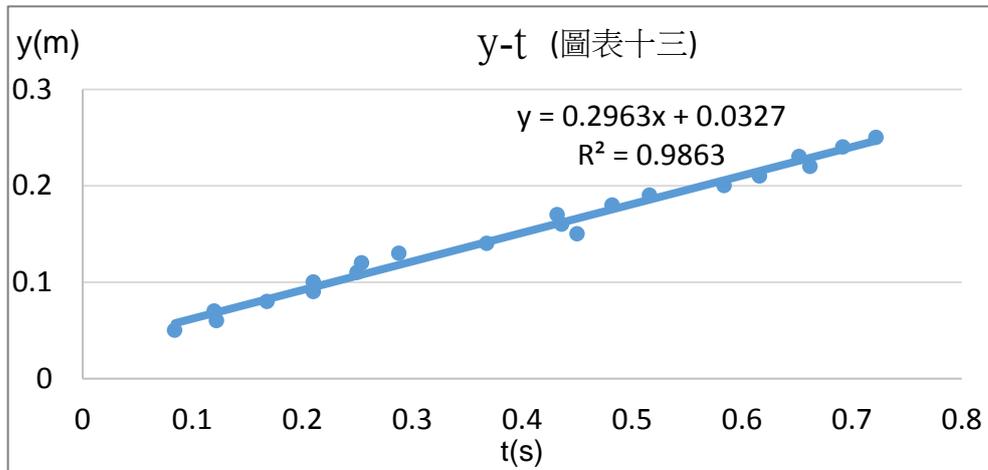
3. 從圖表十二可明顯看出速度上下震盪，都沿著 0.55m/s 這條軸上下起伏。

二、實驗 1-2：磁鐵於四鉛組管中運動之分析

1. 運動行為描述：

磁鐵於四鉛組管中下墜時，幾乎立刻到達終端速度，以靜動方式下墜。

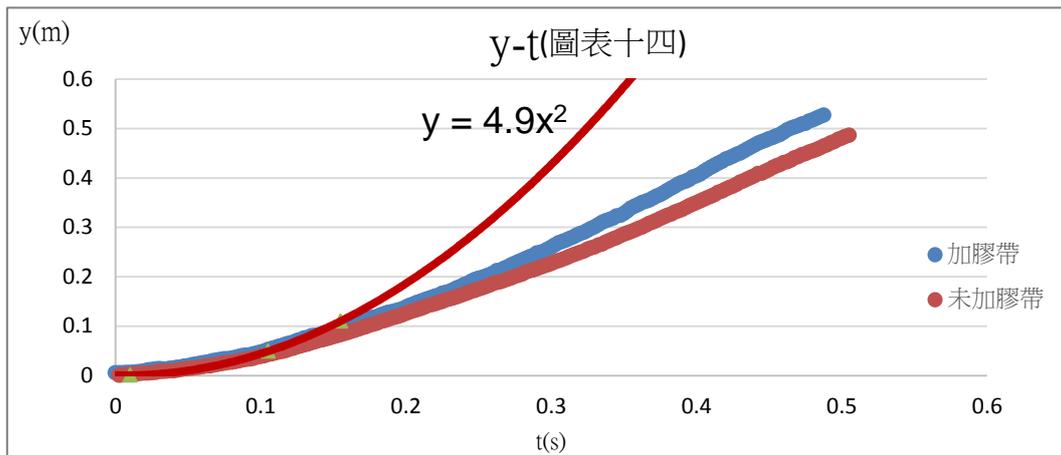
2. y-t 圖



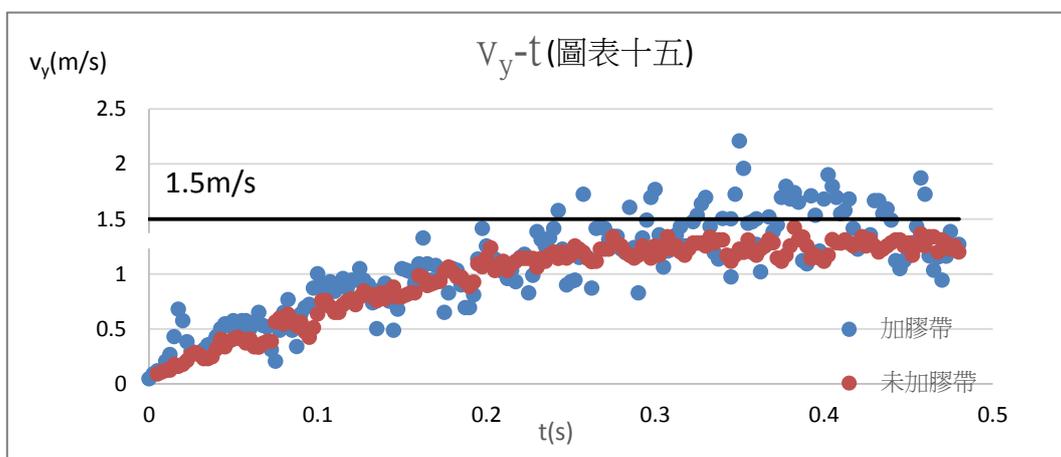
3. 由圖表十三看出速率約為 0.29m/s，比所有其他情形都還明顯來的小。

三、實驗 1-3：使 L 型組合管中鉛塊不互相接觸

y-t 圖



v_y -t 圖



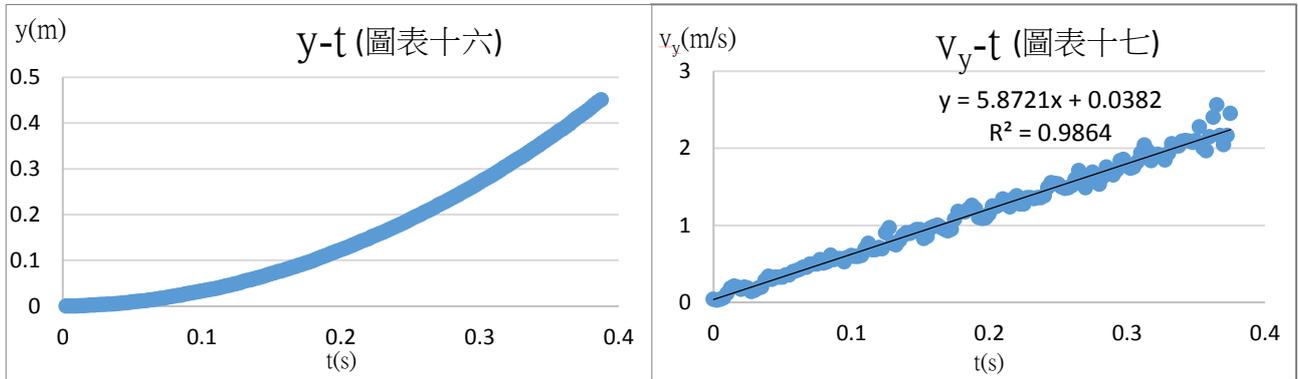
由圖表十五看出加膠帶 L 型組合管終端速大於未加膠帶 L 型組合管，為 1.5m/s。

四、實驗 2-1：磁鐵於單一鋁塊 A、單一鋁塊 B 旁運動分析

(一)單一鋁塊 A

y-t 圖

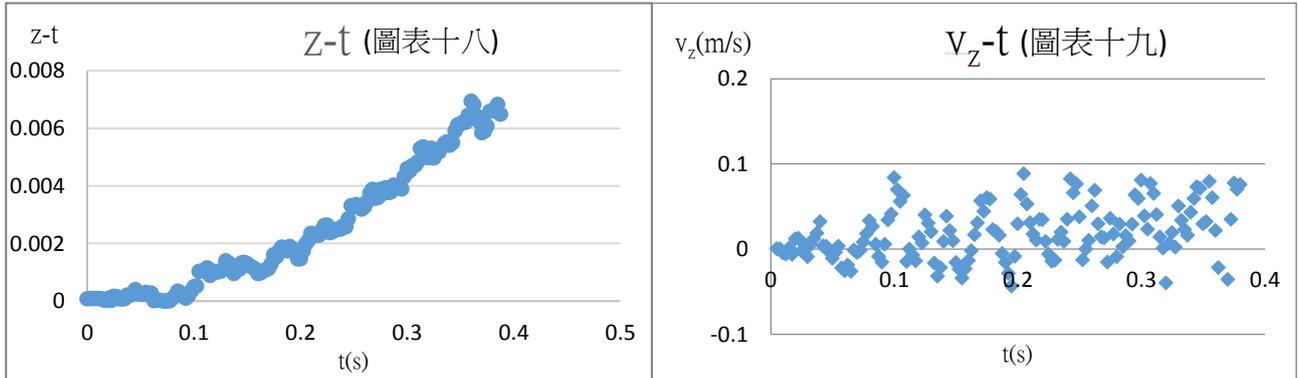
v_y -t 圖



由圖表十七看出磁鐵於單一鋁塊旁下墜時無法達到終端速度

z-t 圖

v_z -t 圖

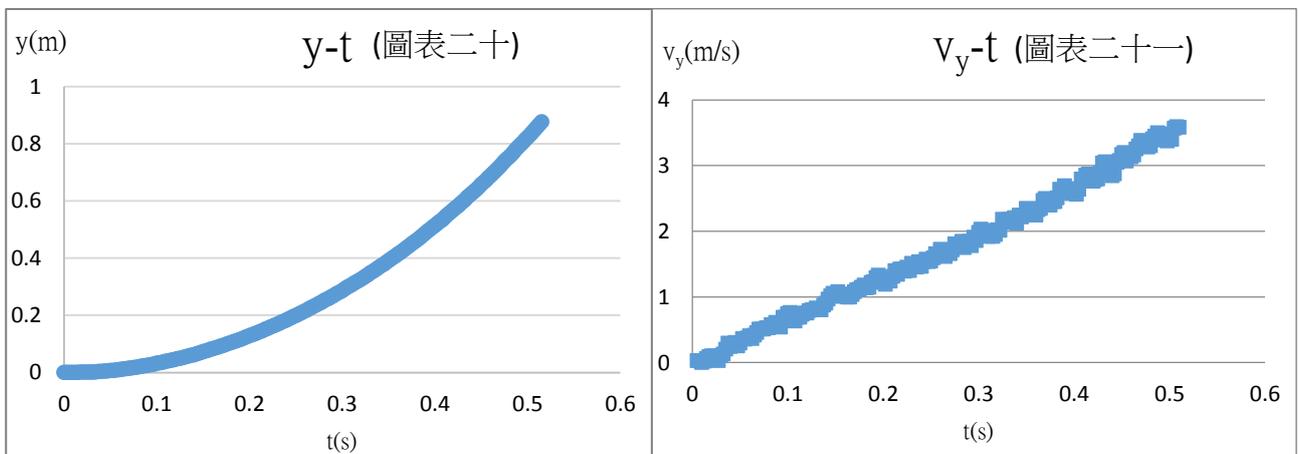


圖表十八發現磁鐵於單一鋁塊旁下墜時會有 z 軸的位移量

(二)單一鋁塊 B

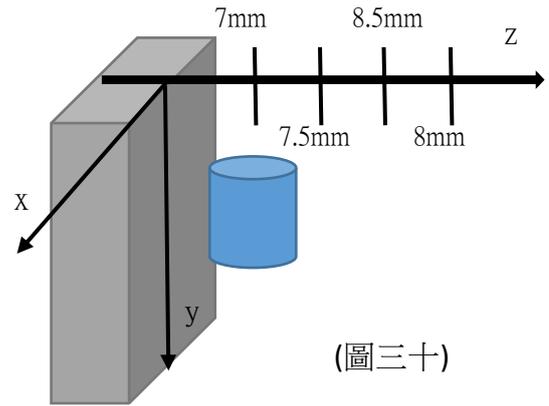
y-t 圖

v_y -t 圖

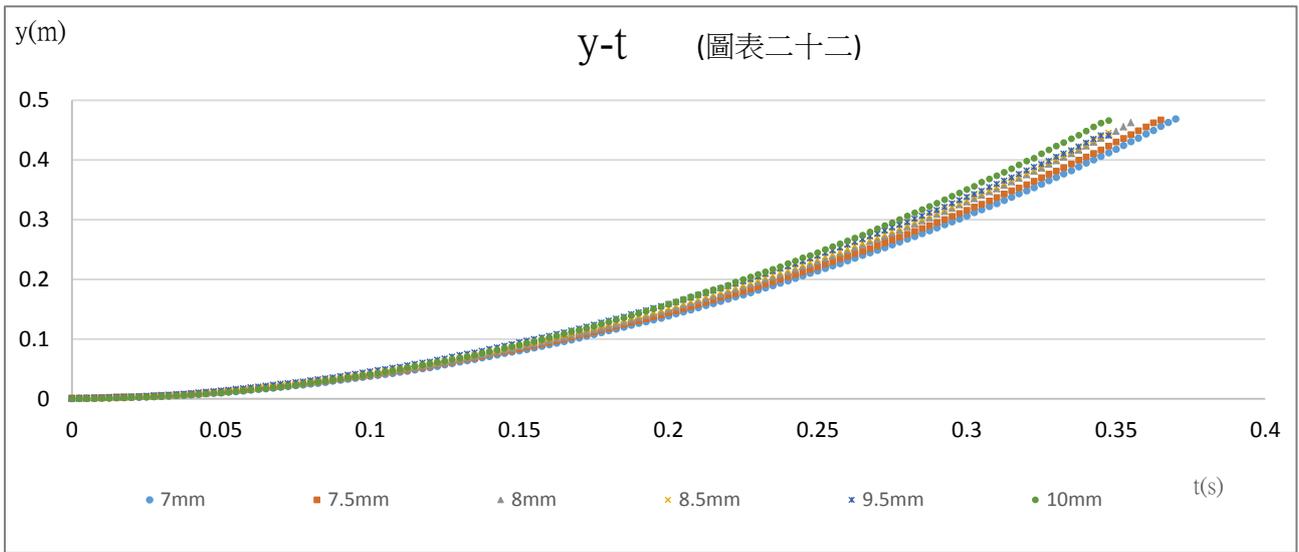


由圖表二十一看出鋁塊加長後仍未達到終端速

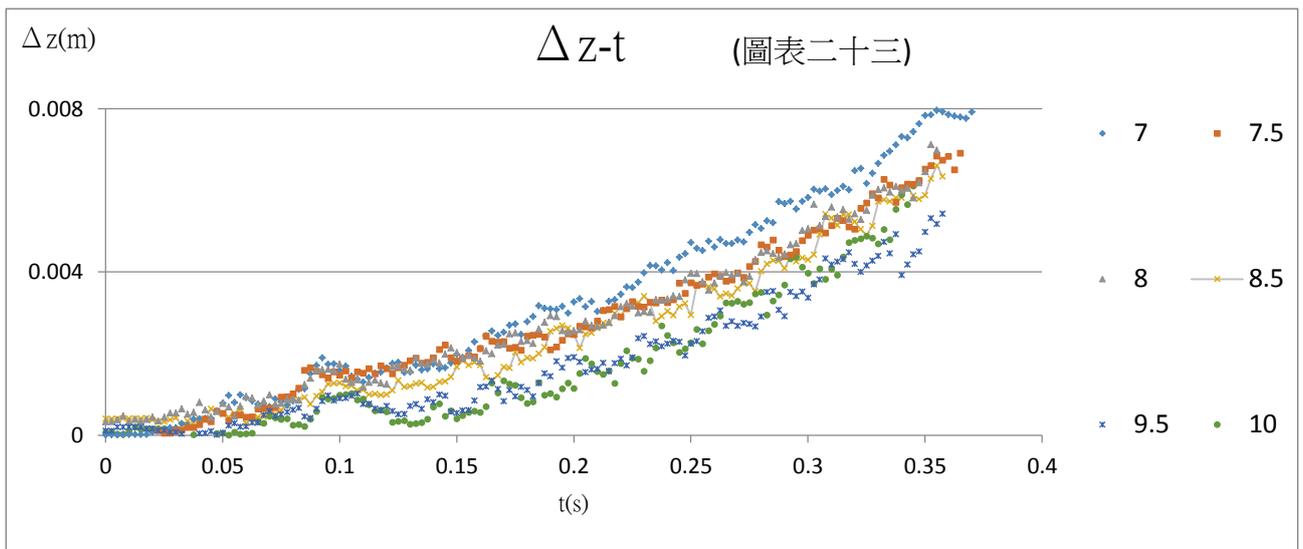
五、實驗 2-2：改變磁鐵與單片鋁塊的正向距離(z)



y-t 圖

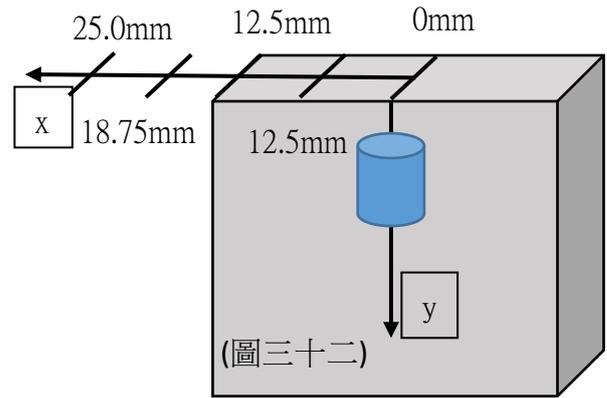
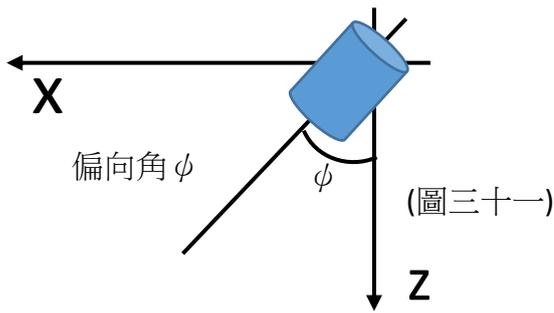


Δz -t 圖

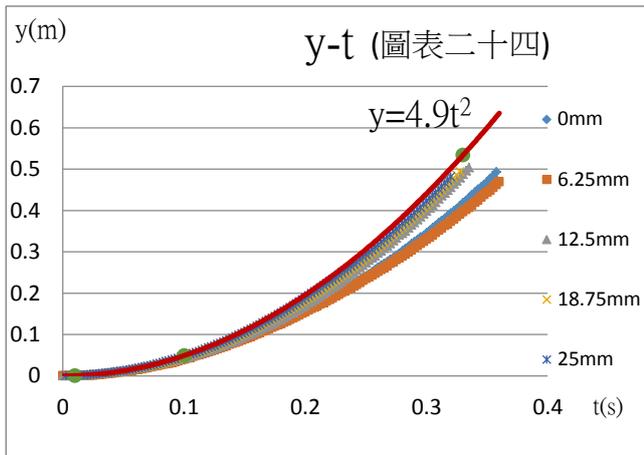


由圖表二十二看出磁鐵越靠近鋁塊釋放，y 軸加速度愈小，由圖表二十三看出磁鐵越靠近鋁塊釋放， Δz 越大。

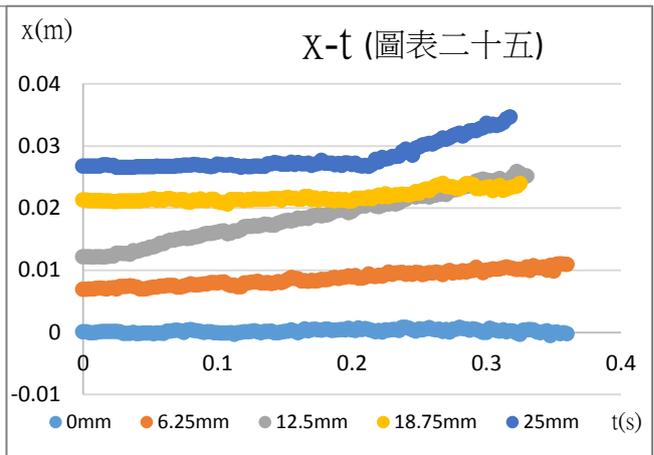
六、實驗 2-3：改變磁鐵與鋁塊的側向距離(x)



y-t 圖

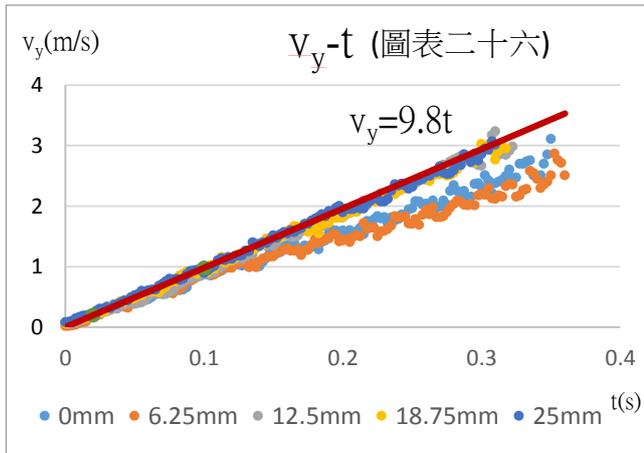


x-t 圖

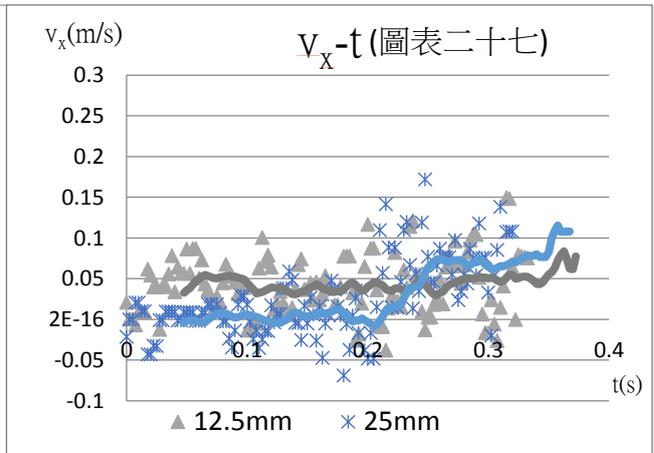


圖表二十四看出在鋁塊內釋放(0mm、6.25mm)的加速度明顯比在鋁塊外釋放(12.5mm、18.75mm、25mm)的小，至於由圖表二十五看出 $x=12.5\text{mm}$ 釋放的 Δx 最大。比較特別的是距中央 25mm 釋放，發現在到一半之後才有明顯的變化。另外由影片發現從 0mm 到 12.5mm 其磁鐵的偏向角(ϕ)有越來越大的趨勢。

v_y -t 圖



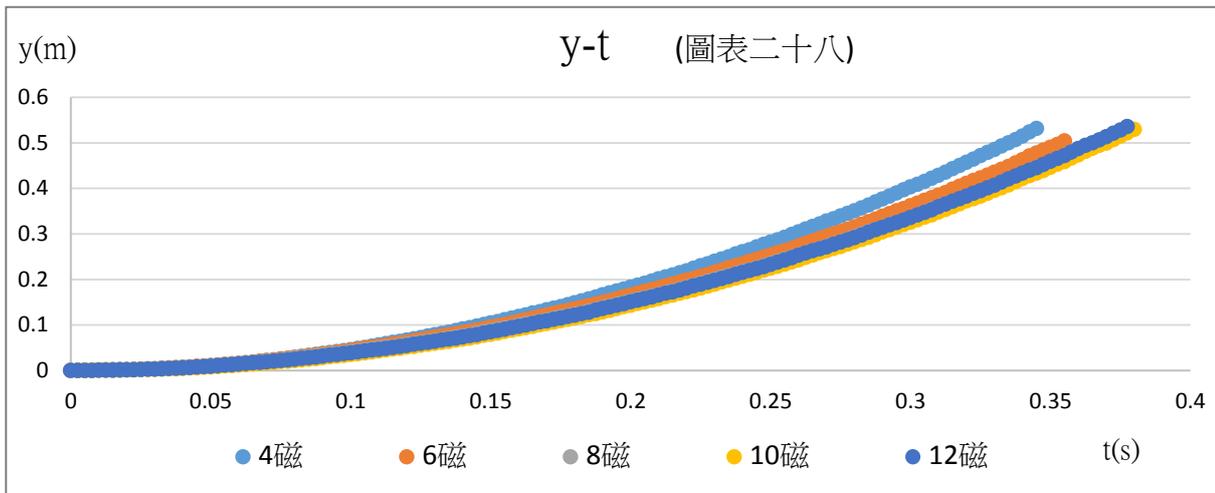
v_x -t 圖



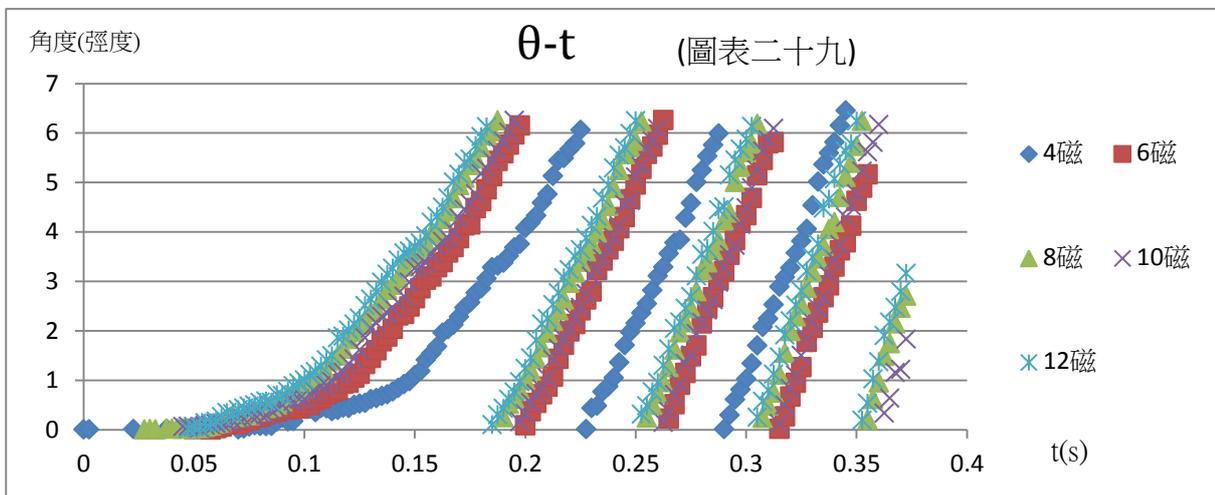
由圖表二十六看出在鋁塊外釋放(12.5mm、18.75mm、25mm)加速度已和自由落體差不多了。

七、實驗 2-4：改變磁鐵 \vec{B}

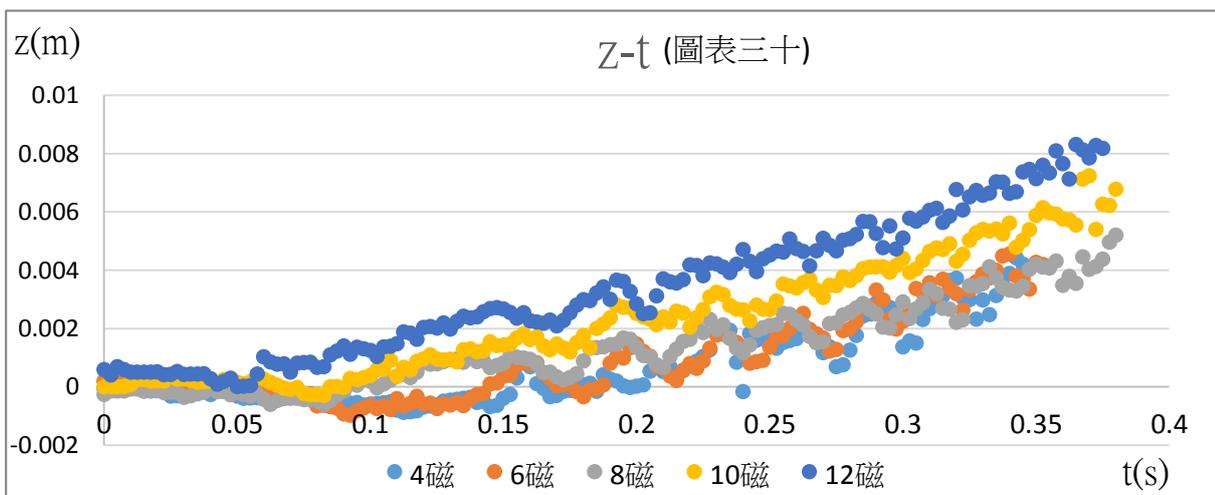
y-t 圖



θ -t 圖

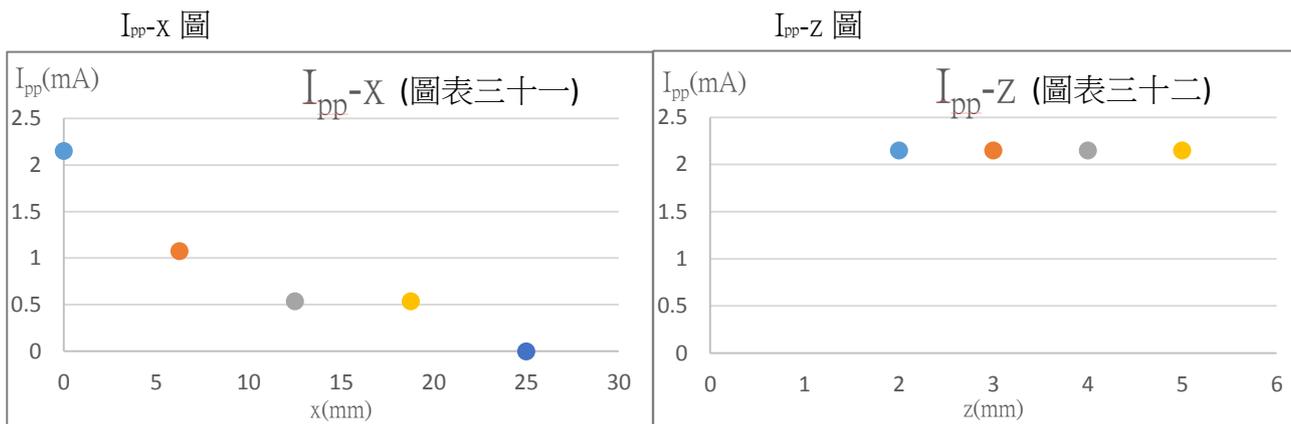


z-t 圖



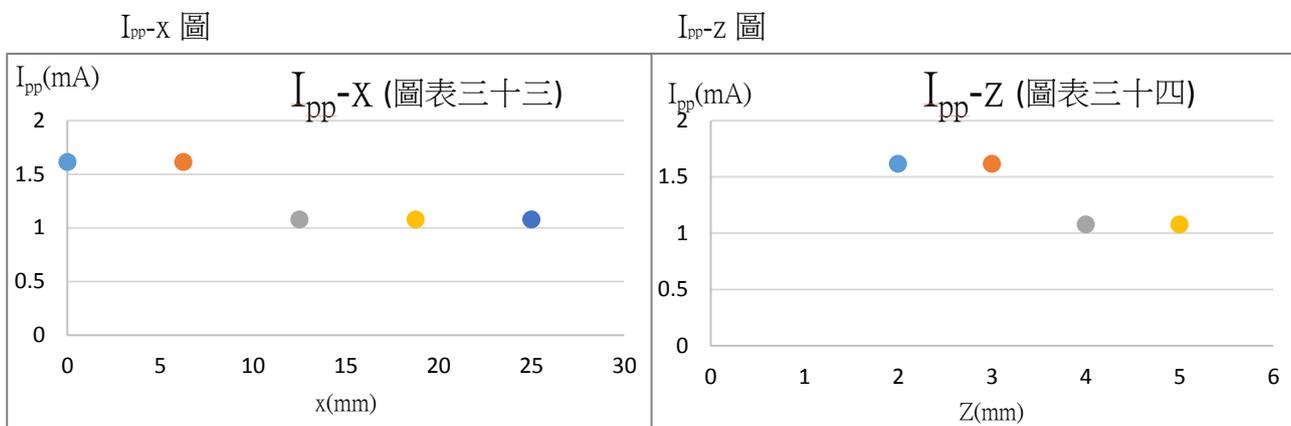
由圖表二十八看出磁力愈弱，y 軸加速度越大，並且由圖表二十九發現磁力越弱，產生轉動的情形也越不明顯。由圖表三十看出磁力越弱，z 軸偏移量越小。

八、實驗 3-1：驗證正面電流的存在(第一個線圈)



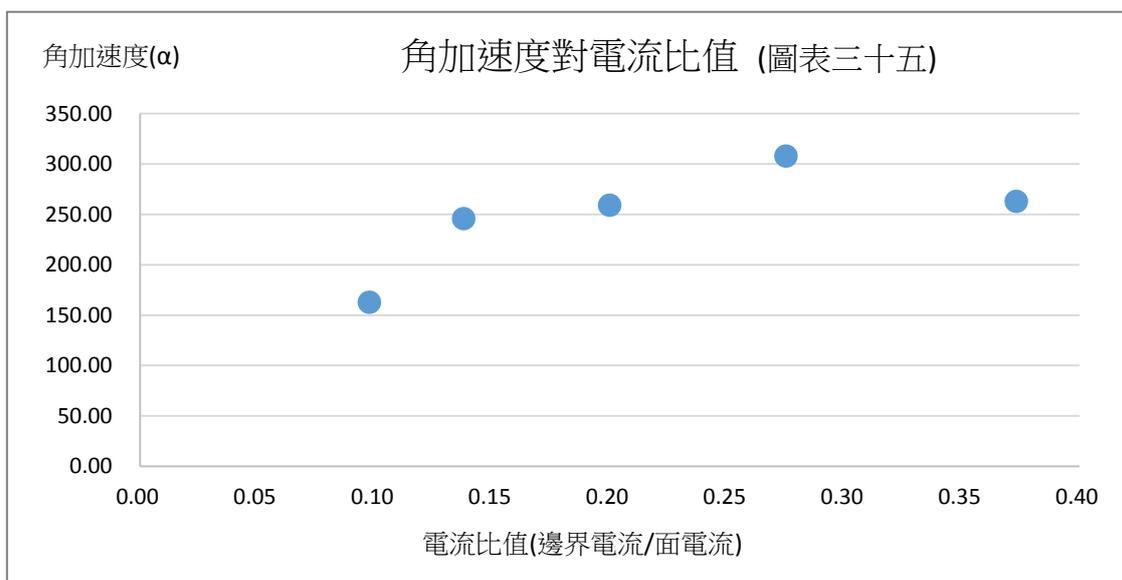
圖表三十一發現磁鐵離 X=0mm 越遠釋放，第一個線圈所感應出的電流越小，至於圖三十二數值都一樣可能是儀器可測得位數不夠導致。

九、實驗 3-3：驗證邊界電流的存在(第一個線圈)



圖表三十三看出磁鐵離 X=0mm 越遠釋放，第一個線圈感應出的電流有下降趨勢，至於圖表三十四也是磁鐵離 Z=2mm 越遠釋放，感應出的電流越小。

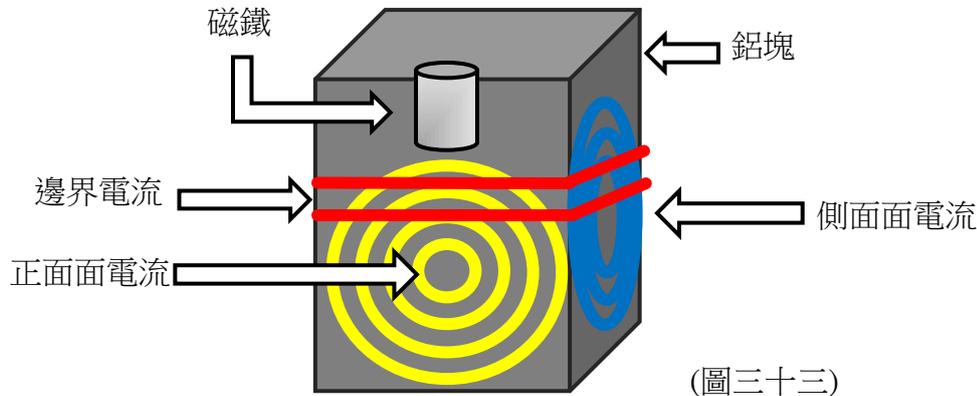
十、實驗 3-4：驗證各種電流對磁鐵的影響



陸、討論

一、渦電流型態

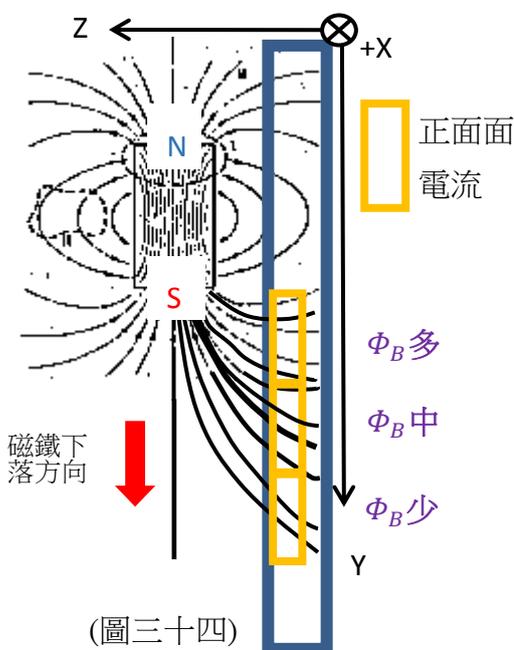
根據之前的實驗，我們統整並簡化出三種渦電流型態：



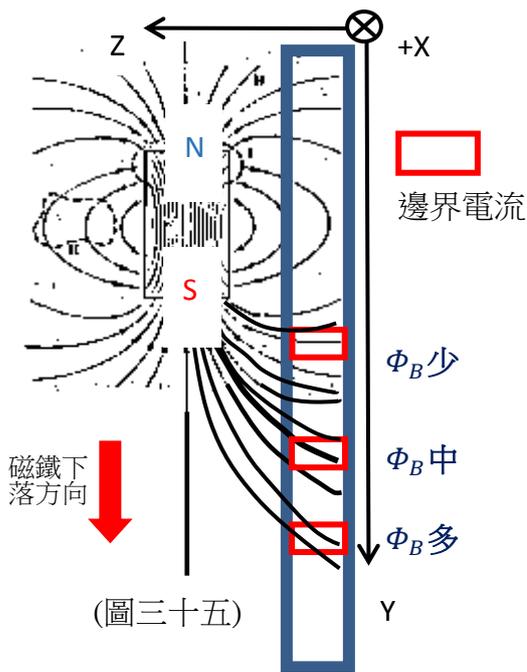
二、磁鐵於單一鋁塊中落下的運動情形

當磁鐵下落時，會同時產生旋轉及減速，我們推測在它的上方和下方各會出現邊界電流和正面面電流，我們將它們等效為上下各一個邊界電流及面電流來進行討論。

(一) 渦電流的方向及排列方式



如圖三十四所示，正面面電流方面，上方截面因為磁鐵遠離，往-z方向的磁通量減少，故會有渦電流產生磁場補充-z方向的磁通量；下方截面則是接近磁鐵，往+z方向之磁通量增加，故渦電流產生磁場抵抗+z方向的磁通量增加。於是在磁鐵的上下皆產生了一個磁矩往-z方向的渦電流。

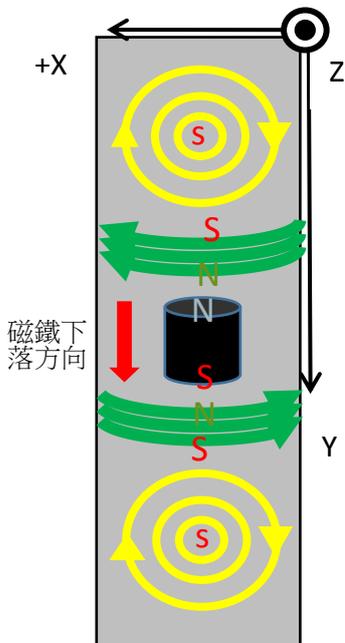


(圖三十五)

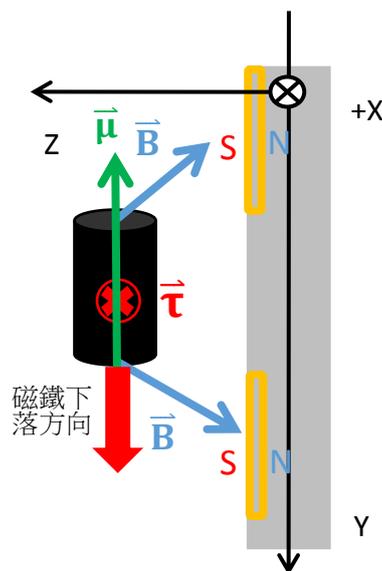
如圖三十五所示，邊界電流方面，因為磁鐵對於鋁塊位置改變，使上方截面往-y 方向之磁通量增加，而會有渦電流產生磁場抵抗-y 方向的磁通量變化；下方截面則是往-y 方向的磁通量漸漸減少，產生補充-y 方向磁通量的渦電流。於是磁鐵上方產生了磁矩向+y 方向的渦電流，下方出現磁矩向-y 方向的渦電流。

由上二張圖可看出，正面面電流的磁通量大於邊界電流，故如果邊界電流也能夠影響磁鐵的運動，勢必要有較大的磁通量變化，所以我們猜測邊界電流的位置較靠近磁鐵，在磁鐵周圍的渦電流分布如圖三十六。

(二)磁鐵受到渦電流所造成的力矩

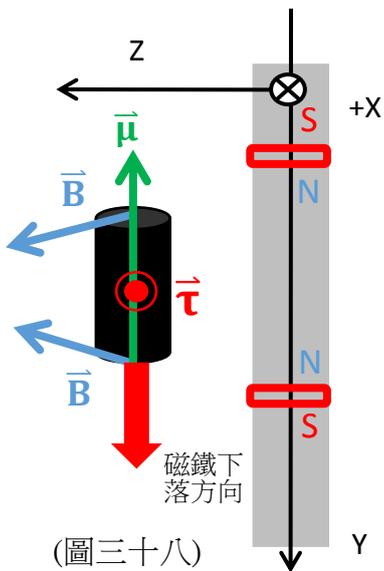


(圖三十六)



(圖三十七)

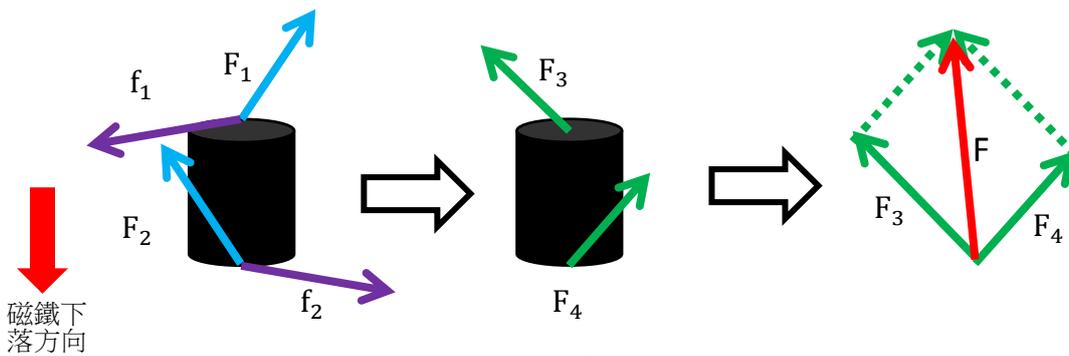
由圖三十六中渦電流的方向，畫出正面面電流在磁鐵位置所產生的磁場後，由公式 $\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}$ ，可知磁鐵會受到一向鉛管+X 方向的力矩，使其順時針旋轉，如圖三十七所示。



(圖三十八)

由圖三十六中渦電流的方向，畫出邊界電流在磁鐵位置所產生的磁場後，由公式 $\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}$ ，可知磁鐵會受到一向鋁管-X方向的力矩，使其逆時針旋轉，如圖三十八所示。

因排列上邊界電流較接近磁鐵，其所產生磁場 \vec{B} 在磁鐵磁矩 $\vec{\mu}$ 上之垂直分量較大，所以產生的力矩大於正面面電流所產生的力矩，合力矩會使磁鐵往逆時針方向旋轉，與實驗結果相符合。



(圖三十九)

(三)磁鐵所受到的合力

由圖三十九中所示磁鐵上下方的受力，可看出上方和下方的正面面電流分別會給磁鐵 F_1 及 F_2 ；而上方和下方的邊界電流會給磁鐵 f_1 及 f_2 。將各力相加後，可得到其合力，上下方的合力分別為 F_3 、 F_4 ，會使磁鐵逆時針旋轉，而最後的合力 F ，方向向上，會使磁鐵減速，若方向稍微偏移，則會使磁鐵向兩側偏移。

三、實驗一結果討論

(一)不同鋁管中磁鐵下落情形

1.二鋁 L 型組合管

(1)轉動

與一鋁組合管的情況相同，轉速會愈來愈大，因為比一鋁組合管多了一側鋁塊，多了連接的 L 型邊界電流和面電流，給磁鐵一個合力矩，使磁鐵在 L 型組合管中是朝對角線轉動。

(2)夾紙與未夾紙的差別

由圖表(十五)，我們發現磁鐵在有夾紙的 L 型組合管中，其終端速度 1.5m/s，大於在未夾紙的 L 型組合管的終端速度 1.25m/s，是因為夾紙後，L 型中環繞二鋁塊的正面面電流被阻斷了，使磁鐵所受到磁力減少，所以磁鐵的終端速度增加。

(3)磁鐵於 L 型與四鋁中終端速度的比較

	L 型組合管(未夾紙)	L 型組合管(夾紙)	四鋁組合管
終端速(m/s)	1.25	1.5	0.25

四鋁組合管是由兩個 L 型組合而成，但其終端速度卻小於 L 型的終端速的一半，這是因為四鋁組合管所產生的電流數目除了原本的 L 型的兩個面電流和一 L 型邊界電流外，還有多了兩面所產生的面電流和一個環繞四個鋁塊的邊界電流，使磁鐵在四鋁中所受到的磁力大於在 L 型組合管受到的磁力的兩倍。

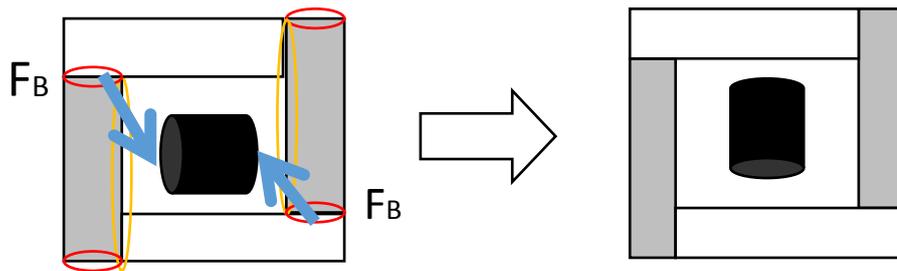
2.二鋁平行組合管

(1)轉動

二鋁平行組合的轉動情形是因為一開始磁鐵在的位置非鋁塊的中央，造成二鋁不對稱而產生力矩，使磁鐵一直受到磁力而轉動直到磁鐵端面指向壓克力塊才不再繼續轉動。

(2)速度

在二鋁平行組合中，磁鐵在前期有達到終端速度，後期則否，是因為磁鐵在二鋁平行組合中運動時，前期的轉動對鋁塊產生磁通量變化，而達到一穩定速度，故磁鐵前期有達到終端速度，但磁鐵受到側邊電流產生的磁力的影響，使磁鐵轉向，導致磁鐵後期的轉動使磁鐵受到的感應磁力減少，因此加速度上升，所以磁鐵後期未達到終端速。



(圖四十)

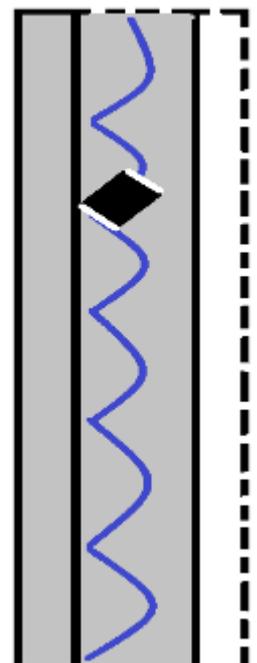
3.三鋁組合管

(1)轉動

三鋁組合的轉動情形是類似一鋁的轉動情形，但撞擊到的是-Z 方向管壁，是因為磁鐵轉到某個角度時，鋁管的平行鋁塊會產生側面電流將磁鐵推到管內，由於其磁力大於一鋁塊的排斥力，使磁鐵撞擊鋁管壁。

(2)速度

在三鋁組合中，磁鐵未達到終端速度，是因為雖然其速度呈現一週期性的震盪，但其現象是由磁鐵碰撞管壁所造成的，涉入了碰撞的因素，因此不列入終端速度討論。



(圖四十一)

(三)整體比較

從 y-t 圖可以看到磁鐵在不同組合管中的下落時間為：三鋁組合>二鋁平行組合>二鋁 L 型組合>一鋁組合。由此可知影響磁鐵下落時間的因素除了鋁塊數之外，還有鋁塊的幾何排列方式。

四、實驗二結果討論

(一)實驗 2-1

由於之前做的實驗發現在單一鋁塊 A 時，磁鐵沒有到達終端速度，於是我們將鋁塊加長至四塊鋁塊(單一鋁塊 B)，但發現還是沒有達到終端速度的現象。

我們推論是因為在一鋁情況中磁鐵會逐漸被面電流產生的磁力而向外推，而愈推愈遠的同時，感應磁力的影響就愈來愈小，導致我們觀察不到終端速度的現象。

(二)實驗 2-2

由圖表(二十三)可看出磁鐵離鋁塊愈遠，鋁塊對磁鐵的影響愈小，即 ΔZ 愈小，且產生的面電流也愈來愈小，因而導致磁鐵下落的時間逐漸減少。

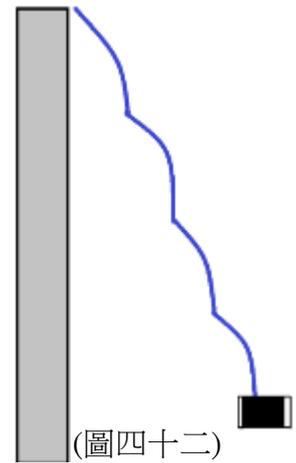
我們發現在 $Z=1\text{mm}$ 時磁鐵會撞到鋁塊，是因為當磁鐵下落時，磁鐵的下端會立刻受到邊界電流的吸引，而直接撞擊鋁塊，因此我們不採取 $Z=1\text{mm}$ 的數據。

(三)實驗 2-3

由圖表(二十五)可看出磁鐵於鋁塊內(0、6.25mm)時，其 X 變化並不明顯，但當 $X=12.5\text{mm}$ 時，就出現極大的變化，但之後卻又逐漸變小，這是因為在鋁塊內，正面電流無法產生 X 軸的改變，而側面面電流又不夠大到足以影響磁鐵有 X 軸的位移，直到 $X=12.5\text{mm}$ 時，正面面電流幾乎不對磁鐵產生影響，而側面的磁通量變化可以達到極大，產生極大的側面面電流，使磁鐵產生極大的 X 軸位移，之後因為距離增加，磁通量變化減少，使側面電流減弱，而讓磁鐵的 X 軸位移變小。

(四)實驗 2-4

由圖表(二十八、二十九、三十)，我們發現固定質量，磁鐵數目越少，磁鐵轉速會愈慢、磁鐵下落的時間會減少、Z 軸的位移變化量會減少，是因為磁場減弱時，對鉛塊產生的磁通量變化會減少，而使面電流和邊界電流減少，感應磁力對磁鐵的影響減小，而產生這些現象。



此外，在圖表(三十)也可發現磁鐵在 Z 軸的軌跡有震盪的情形，這是因為磁鐵不只下落時會影響磁通量，磁鐵的轉動也會影響磁通量，造成了鉛塊上面電流隨著磁鐵轉動而改變，而使磁鐵所受到的磁力也隨著磁鐵轉動而改變，故其軌跡有震盪的情形。

五、實驗三結果討論

由圖表三十五發現邊界與正面面電流比值越大，角加速度也會有越大的趨勢。目前實驗比值由 $1/3 \sim 1/10$ ，磁鐵的合力矩皆朝向 -x 方向，可見邊界電流對磁鐵轉動有極大的影響。

柒、結論

一、實驗一結論

- (一)在不同的鋁管中，磁鐵的運動形式都是滾動。
- (二)影響磁鐵下落時間的主要因素為鋁塊數目，其次是鋁塊的幾何排列方式。

二、實驗二結論

- (一)磁鐵愈靠近鋁塊，所產生的渦電流愈大，對磁鐵影響愈大。
- (二)磁鐵對應鋁塊的左右面積不同，會讓磁鐵向鋁塊面積較少的部分偏移。
- (三)若磁鐵磁場越小(磁鐵數目越少)，轉速會愈慢且磁鐵震盪愈明顯。

三、實驗三結論

- (一)側面面電流和正面面電流主要影響磁鐵的移動。
- (二)邊界電流主要影響磁鐵的轉動。
- (三)即使正面面電流的大小為邊界電流的 10 倍，磁鐵的轉動依然受邊界電流所支配。

捌、未來展望

本實驗已分析了磁鐵在五種鋁塊組合和一鋁改變 x 、 z 、 \vec{B} 的運動情形以及電流模擬，未來欲完成以下事項：

- 一、由速度及角速度分析出磁鐵在運動過程中之加速度及角加速度，並算出其受力情形，得到磁鐵的運動方程式。
- 二、測得不完整鋁管在磁鐵通過時所產生的渦電流大小。
- 三、目前關於四鋁組合管速度的測量方法，存在許多誤差，希望以後可以繼續改進，取得更精準的數據。
- 四、改變磁鐵質量固定磁場以觀察不同質量時的終端速度。
- 五、以後可繼續實驗其他各種不同的組合(六角形)，做出更多不完整的鋁管，觀察運動情形，做出可預測的運動方程式。
- 六、進行更多夾紙的實驗，觀察其他現象。
- 七、將電流定量化，以比較三種電流的大小。
- 八、希望可以將實驗 3-4 中邊界/正面電流之比值繼續降低，以使磁鐵得到 $+x$ 方向的合力矩，使其往反方向旋轉。

玖、參考資料

1. 普物(下) David Halliday
2. https://www.youtube.com/watch?v=Jb6r_oUW_90
3. <https://www.youtube.com/watch?v=-bZhVWyy8Vk>
4. 絕妙好「磁」！「它」抓得住我！
<http://www.tyc.edu.tw/files/CD/science/45/j2/b2/%E7%B5%95%E5%A6%99%E5%A5%BD%E7%A3%81%E5%AE%83%E6%8A%93%E5%BE%97%E4%BD%8F%E6%88%91.pdf>
5. 「渦」藏玄機－磁鐵在金屬管中掉落時間的因素探討與應用
<http://activity.ntsec.gov.tw/activity/race-1/53/pdf/030109.pdf>
6. 「煞」費苦心--渦電流在磁煞車上的應用之探討
<http://activity.ntsec.gov.tw/activity/race-1/53/pdf/030817.pdf>
7. 飛舞的磁蛇-磁鐵在非磁性金屬斜面滾落之特殊軌跡與週期
8. 高中選修物理課本教師版

【評語】 051801

作品以簡單元件能建立適合探究物件在非完全均勻磁場中的運動，誠屬可貴，建議可進一步建構成磁學的教學教具，或許可以考慮增加簡易改變設定磁場參數的功能，提升教材廣度。