

中華民國第 52 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國中組 物理科

030108

尼「煞」得住我

—利用阻尼擺及渦電流來探討電磁煞車的效能

學校名稱：桃園縣私立六和高級中學(附設國中)

作者： 國二 丁相安	指導老師： 郭泰祿
-------------------	------------------

關鍵詞：冷次定律、渦電流、電磁阻尼擺

尼「煞」得住我 -----利用阻尼擺及渦電流來探討電磁煞車的效能

摘要

本研究是利用簡易的電磁阻尼擺裝置，探討各式線圈通過磁場時，因磁通量變化產生感應電流及磁場並阻止線圈運動。實驗第一階段結果顯示出線圈匝數越多或是電流越大，則感應的磁場就越強，越能將擺盪中的線圈速度減低。實驗第二階段是直徑粗的漆包線因為電阻小，所以雖然纏繞圈數只有 20 圈，但是對於速度減緩的效果卻比 80 圈的細線圈要好 158 秒。實驗第三階段我們也製作了一個簡易的渦電流煞車裝置，利用不同的金屬圓盤來比較感應磁場的差異，意外發現到磁性金屬和非磁性金屬間對於渦電流產生的變化不同，而利用渦電流所產生的阻尼作用只適用於非磁性金屬。目前 0.3 公分厚的鋁盤效果最好的是從 12.7 圈/秒到停止只花了 1.06 秒，在未來我們希望先應用在腳踏車上來使腳踏車煞車成為有效又經濟實用的煞車方法。

壹、研究動機

國一讀到法拉第的故事時，就對電磁方面產生了強烈的興趣，在做磁浮車實驗時，就一直思考是否有讓它煞車的方法，與老師討論後學到了一個很有趣的定律，那就是楞次定律。上網查一查資料又發現了渦電流及電磁阻尼擺，雖然不懂的越來越多，但卻激起我研究及實驗的鬥志，最後決定了我這次科展的方向，也就是當不同的導通線圈通過電磁鐵時所產生的磁場反應，以及不同金屬間渦電流煞車的效能差異，冀望能找出最有效又經濟實用的煞車方法。

貳、研究目的

- 一、探討電磁阻尼擺中不同的纏繞線圈數對於線圈速度減緩的關係
- 二、探討電磁阻尼擺中不同的線圈大小對於線圈速度減緩的關係
- 三、探討電磁阻尼擺中不同的線圈形狀對於線圈速度減緩的關係
- 四、探討電磁阻尼擺中不同粗細的線圈對於線圈速度減緩的關係
- 五、探討電磁阻尼擺中不同的金屬對於速度減緩的關係
- 六、探討電磁阻尼擺中不同的鋁片厚度對於速度減緩的關係
- 七、探討渦電流煞車裝置中，不同金屬與非金屬對於速度減緩的關係
- 八、探討渦電流煞車裝置中，不同厚度的鋁盤對於速度減緩的關係
- 九、探討渦電流煞車裝置中，不同形狀的鋁盤對於速度減緩的關係
- 十、探討渦電流煞車裝置中，不同轉速的鋁盤對於速度減緩的關係
- 十一、探討渦電流煞車裝置中，不同電磁鐵的距離對於速度減緩的關係

參、研究設備及器材

- 一、設備：電源供應器兩台、三用電表、高斯計、自製簡易電磁阻尼擺裝置、自製簡易渦電流煞車裝置。

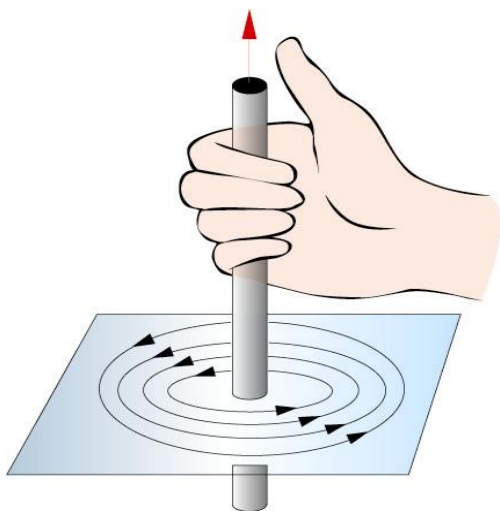
二、工具：12V 的馬達數個、直徑 2.5 公分的圓形鐵棒、15 公分寬的鐵板一塊、直徑 8 公分及直徑 15 公分不同的金屬圓盤數片、直徑 1 公分及 0.6 公分的金屬環數個、強力磁鐵數個、大型寶特瓶一個、竹片數片、細木棍一支、漆包線數捆(直徑 0.5mm 及 0.9mm)、砂紙、膠帶、釣魚線、銼刀、厚紙板、熱熔槍、量角器、焊槍、轉速器。

肆、研究過程或方法

一、自製簡易電磁阻尼擺裝置：

(一) 電磁鐵裝置：

1. 為了讓磁場增加，我們選擇了讓兩支鐵棒靠近約 3 公分的距離並焊接在鐵板上。
2. 在鐵棒上左右各纏上 600 圈的漆包線，位在左邊的鐵棒要依據右手安培定律來纏繞（圖一），而右邊的纏繞方式則相反。纏繞時要將線頭與線尾留好以利測試，纏的過程當中也要盡量讓線圈緊密不能過於鬆散，這樣才會讓電磁鐵產生的磁場最大（圖二）。
3. 為了讓磁場集中在線圈通過的地方，將最初的電磁鐵改良成在電磁鐵的頂端各焊接了一小段鐵芯。因為磁力線密集度的不同，所以不同的電磁鐵裝置也會有不同的磁場大小，由高斯計測得結果也顯示出磁場大小會因位置的不同而不同（圖三、四）
4. 線圈完成後，為了確認線頭與線尾是否導通，我們可以利用三用電表的蜂鳴器測量是否有斷路情形，結果蜂鳴器發出聲響，證明為通路。



圖一：右手安培定律



圖二：電磁鐵



圖三：磁場分佈及磁場大小



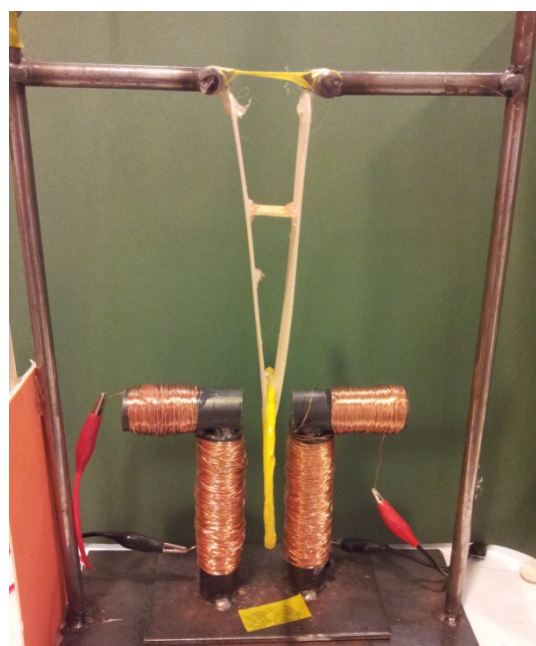
圖四：磁場分佈及磁場大小

(二) 擺盪裝置：

為了解決摩擦力過大及擺盪不穩定的問題，在擺盪裝置上我們改良了數次，最後發現到將棉線換成冰棒棍可以解決擺盪不穩的問題，而原本的保特瓶及細木棍也因為晃動而產生慣性，讓線圈也跟著一起擺動而造成實驗誤差，所以改採用鐵件做成支架增加穩定性。(圖五、六)。



圖五：最初製作的電磁阻尼擺裝置



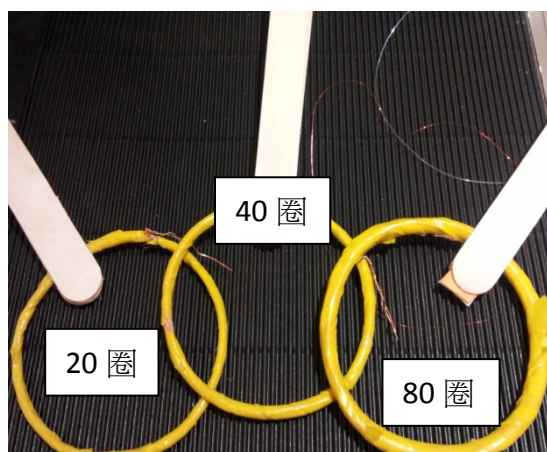
圖六：自製簡易電磁阻尼擺裝置

(五) 線圈及金屬圓片裝置：

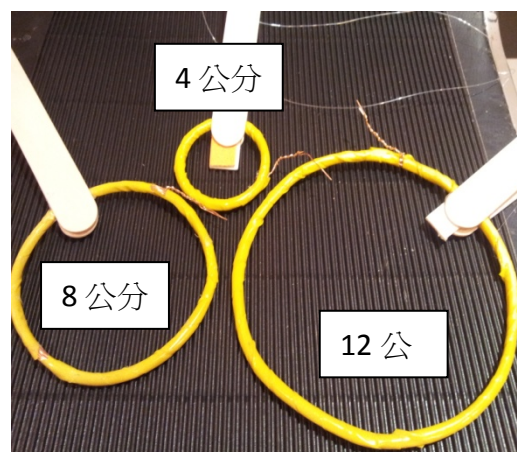
本實驗的目的就是要比較出各線圈及金屬圓片在通過電磁鐵時磁場的變化，所以我們製作了各式不同的線圈，並加入了不同的金屬片進行討論，線圈在纏繞的過程中除了要注意線圈的緊密度之外，也要注意最後線圈的頭尾要用砂紙磨一下再相接，以利於線圈產生磁場。

1. 直徑 8 公分，圈數不同的圓：分別為 20 圈、40 圈、80 圈(圖七)。
2. 圈數 40 圈，但直徑不同的圓：分別為直徑 4 公分、8 公分、12 公分(圖八)。

3. 周長相同都是 24 公分左右，纏繞 40 圈，但是形狀不同：分別為邊長 6 公分的正方形、邊長 8 公分的三角形及周長 25.12 的圓形(圖九)
4. 直徑 8 公分，圈數 20 圈，漆包線的直徑為 0.9mm 的線圈一個（圖九）。
5. 為了比較我們也準備了數個金屬片：直徑 8 公分厚度為 0.1 及 0.3 公分的鐵片不鏽鋼片及鋁片（圖十）。



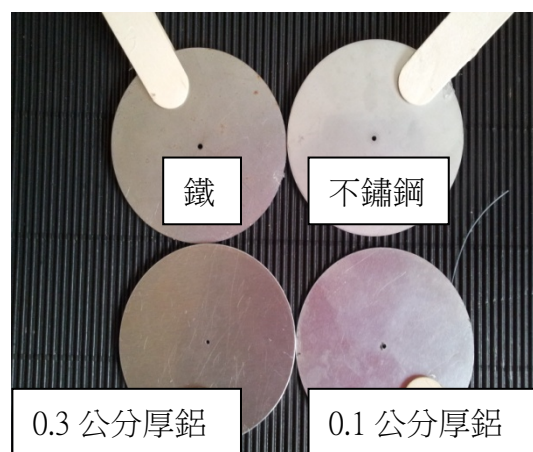
圖七：圈數不同的線圈



圖八：直徑不同的線圈



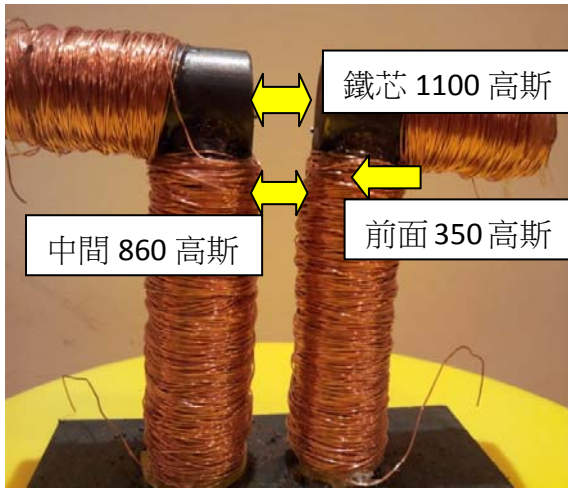
圖九：形狀粗細不同的線圈



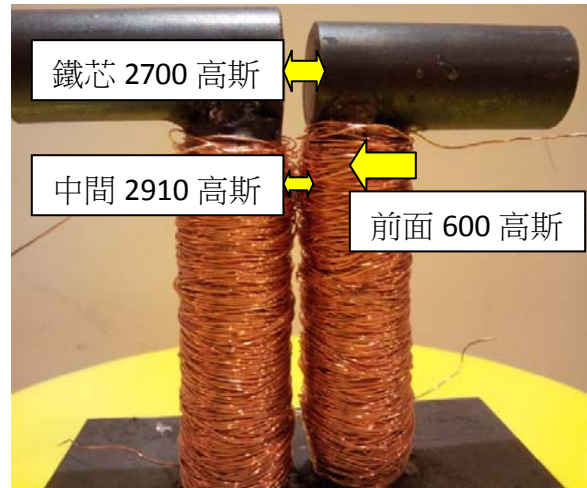
圖十：各式金屬圓片

二、自製渦電流煞車裝置：

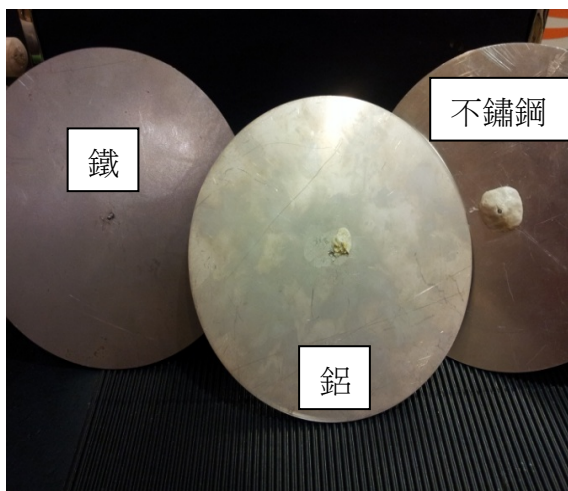
- (一) 電磁鐵裝置：為了比較磁場大小對於煞車速度的不同，我們製作了距離為 1 公分及 2 公分的電磁鐵各 1 個。由高斯計測得的結果顯示間距越近磁場越大(圖十一、十二)
- (二) 金屬轉盤裝置：為了比較不同金屬及不同厚度間的差異，我們製作了：
 1. 直徑 15 公分，厚度相同（0.3 公分）材質不同的圓：材質分別為鐵片、不銹鋼片、鋁片(圖十三)。
 2. 直徑 15 公分，厚度相同（0.3 公分）、材質相同但是形狀不同的鋁片：分別為完整 1 片、邊緣挖洞、車輪形狀(圖十四)。
 3. 直徑 15 公分，材質相同但是厚度不同的鋁片：厚度分別為 0.1 公分、0.3 公分、0.6 公分的鋁片(圖十四)。



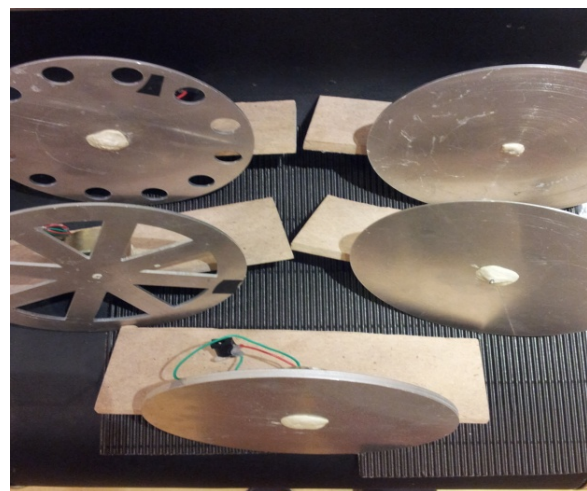
圖十一：間距 2 公分電磁鐵



圖十二：間距 1 公分電磁鐵



圖十三：不同材質的金屬圓盤



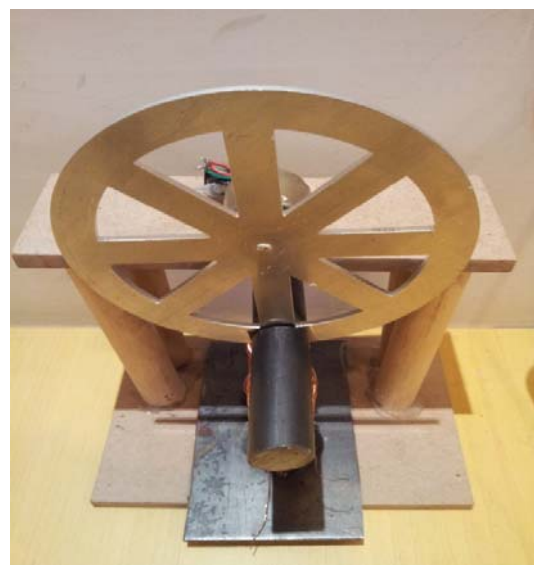
圖十四：不同形狀及厚度的鋁片

(三) 測速裝置：

為了將變因排除，我們將轉速控制成一樣，所以在鋁盤上加裝了一個測速器。將測速感應器裝在鋁盤旁邊，並在鋁盤上黏上一個強力磁鐵以利測速(圖十五)。



圖十五：測速裝置



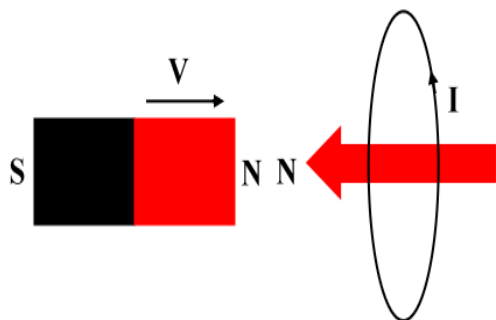
圖十六：自製簡易渦電流煞車裝置

四、原理說明：

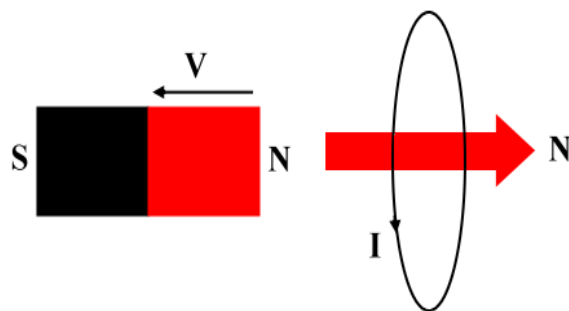
當我們要研究電磁阻尼擺及渦電流煞車時，首先就要認識冷次定律以及渦電流，以下就先就這兩種基本定律加以簡單說明。

(一) 冷次定律：

1. 線圈內的磁場發生變化時，線圈會感應而產生電流，感應電流的方向，恆使此電流產生新磁場，以抗拒原來磁場的變化，稱為冷次定律。
2. 當磁棒和線圈做相對運動時，將會在線圈中產生不同的感應電流。當一磁鐵靠近一封閉線圈，則線圈產生一磁場阻止它靠近（圖十七）。當一磁鐵遠離一封閉線圈，則線圈產生一磁場阻止它遠離（圖十八）。（註一）



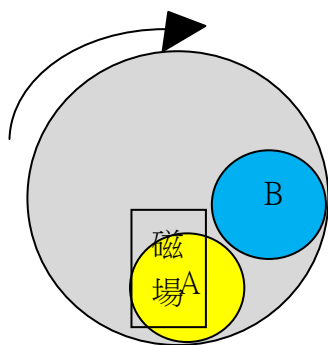
圖十七：冷次定律



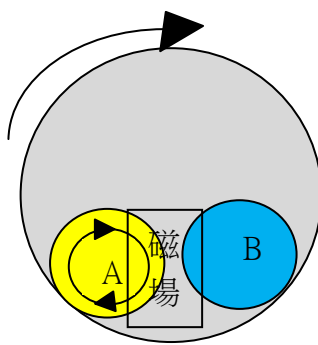
圖十八：冷次定律

(二) 渦電流：

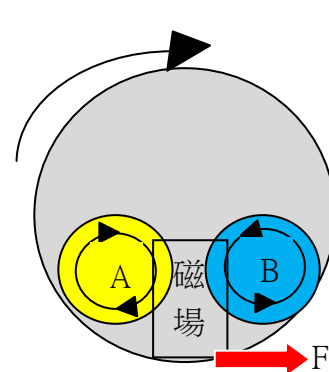
渦電流(Eddy Current)（又稱為傅科電流）現象，在 1851 年被法國物理學家萊昂·傅科所發現。是由於一個移動的磁場與金屬導體相交，或是由移動的金屬導體與磁場垂直交會所產生。簡而言之，就是電磁感應效應所造成。這個動作產生了一個在導體內循環的電流。磁場變化越快，感應電動勢就越大，渦流就越強；渦流能使導體發熱（註二）。渦電流還可以起到阻尼作用，利用磁場對金屬板的這種阻尼作用可制成各種電動阻尼器（註三）。當磁鐵靠近轉動的鋁盤時會產生磁場（圖十九），圓盤轉動時，原本有較大磁通量的 A 磁通量變小了，因此產生了感應電流來補償（圖二十），原本沒有磁通量的 B 進入了磁場區所以有了感應電流，而這兩股電流與磁場的交互作用可知，電流 $(i) \times$ 磁場 $(B) =$ 磁力 (F) 的方向使轉盤減速（圖二十一）。（註四）



圖十九



圖二十



圖二十一

五、研究方法：

（一）電磁阻尼擺：

1. 對照組：為了使實驗結果更精準，我們設計了將每一個步驟做十次，並取其平均值作為我們的研究數據。當電磁鐵不通電時，記錄下線圈及金屬片單藉著空氣阻力所產生的摩擦力而停止擺盪的時間，並以此數據當成對照組。
2. 實驗組：探討電磁阻尼擺中，不同的纏繞線圈數對於線圈速度減緩的關係。我們做了以下實驗，並通以不同大小的電流來觀察：
 - （第一組）不同的纏繞線圈數對於速度減緩的關係
操縱變因：不同的圈數（20 圈、40 圈、80 圈）
控制變因：相同的大小（直徑 8 公分）
 - （第二組）不同的線圈大小對於速度減緩的關係
操縱變因：不同的線圈大小（4 公分、8 公分、12 公分）
控制變因：相同的圈數（40 圈）
 - （第三組）不同的線圈形狀對於速度減緩的關係
操縱變因：不同的線圈形狀（邊長 6 公分的正方形、邊長 8 公分的三角形、周長 25.12 公分的圓形）
控制變因：相同的線圈長度（24~25 公分）
 - （第四組）不同粗細的線圈對於速度減緩的關係
操縱變因：不同直徑的漆包線（0.5mm 及 0.9mm 的線圈）
控制變因：相同的圈數（20 圈）
 - （第五組）不同的金屬對於速度減緩的關係
操縱變因：不同材質的金屬圓片（鐵、不鏽鋼、鋁）
控制變因：相同的大小（直徑 8 公分）
 - （第六組）不同的鋁片厚度對於速度減緩的關係
操縱變因：不同厚度的鋁圓片（0.1 公分、0.3 公分）
控制變因：相同的大小（直徑 8 公分）

（二）渦電流煞車：

實驗組：探討渦電流煞車中不同的金屬圓盤與線圈速度減緩的關係。我們做了以下實驗，而且除了通以不同大小的電流之外，我們也將電磁鐵的距離縮短來比較差異性：

- （第一組）不同金屬及非金屬對於速度減緩的關係
操縱變因：不同的金屬（鐵、不鏽鋼、鋁）非金屬為厚紙板
控制變因：相同的大小（直徑 15 公分）
- （第二組）不同厚度的鋁盤對於速度減緩的關係
操縱變因：不同的厚度（0.1 公分、0.3 公分、0.6 公分）
控制變因：相同的大小材質（直徑 15 公分的鋁盤）
- （第三組）不同形狀的鋁盤對於速度減緩的關係
操縱變因：不同的形狀（完整一片、邊緣挖洞、車輪形狀）
控制變因：轉速、大小、厚度相同（直徑 15 公分的鋁盤）

（第四組）不同轉速的鋁盤對於速度減緩的關係

操縱變因：不同的轉速（12.7 圈/秒及 15.8 圈/秒）

控制變因：重量、大小、厚度相同（直徑 15 公分的鋁盤）

（第五組）不同電磁鐵的距離對於速度減緩的關係

操縱變因：不同電磁鐵的間距（間距 2 公分及 1 公分）

控制變因：相同的大小、厚度及材質（直徑 15 公分的鋁盤）

伍、研究結果

一、對照組間的不同：將每一個線圈擺盪十次記錄的結果：

	20 圈	40 圈	80 圈	4 公分	8 公分	12 公分	正方形	三角形	粗線圈
1	358.6	408.8	425.6	326.6	408.8	453.9	253.3	280.8	493.3
2	359.2	409.7	424.8	325.6	409.7	454.2	253.5	281.9	494.5
3	359.5	409.2	425.1	326.4	409.2	454.1	253.6	281.8	494.1
4	359.1	409.5	424.8	325.8	409.5	453.8	253.4	281.6	493.6
5	359.6	409.3	424.5	325.6	409.3	453.9	253.5	281.8	494.3
6	358.6	408.5	425.2	326.3	408.5	454.2	253.8	281.9	494.5
7	359.0	409.1	425.4	326.1	409.1	454.3	253.6	282.0	493.8
8	358.9	408.6	424.9	325.8	408.6	454.1	253.5	282.1	494.0
9	359.3	408.5	425.1	325.5	408.5	453.8	253.6	281.8	493.6
10	359.1	409.1	425.5	325.8	409.1	453.9	253.5	281.9	494.3
平均值 (s)	359.09	409.03	425.06	325.95	409.03	454.02	253.53	281.76	494.02

表 1

	鐵片	不鏽鋼片	厚度 0.1 公分鋁片	厚度 0.3 公分鋁片
1	250.2	283.7	335.2	392.3
2	249.8	284.1	334.0	392.1
3	249.6	283.9	334.8	391.8
4	249.8	284.0	335.1	392.1
5	250.1	284.2	334.6	392.3
6	250.3	283.9	335.2	391.9
7	249.8	283.8	335.0	391.8
8	249.9	284.1	334.9	392.1
9	250.1	284.3	334.6	392.3
10	249.8	284.2	334.8	392.2
平均值 (s)	249.90	284.02	334.82	392.09

表 2

二、實驗組間的不同：

(一) 電磁阻尼擺裝置：

1. 第一組：不同的纏繞線圈數對於線圈速度減緩的關係

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值(s)
20 圈	121.8	122.4	122.6	121.8	122.2	122.6	121.8	122.1	122.0	122.4	122.17
40 圈	102.7	103.5	102.1	103.8	103.5	102.7	103.1	102.6	102.7	103.2	102.99
80 圈	54.3	54.2	55.1	54.6	55.0	54.5	54.7	54.7	54.5	54.3	54.59

表 3：通電 1 安培的停止時間

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值(s)
20 圈	67.5	68.2	67.7	68.1	67.6	67.8	68.0	68.3	67.9	68.1	67.92
40 圈	53.5	53.2	53.1	53.4	53.4	53.2	53.5	53.1	53.3	53.5	53.32
80 圈	38.6	39.4	39.5	39.1	39.3	38.9	38.8	39.0	39.2	38.6	39.04

表 4：通電 2 安培的停止時間

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值(s)
20 圈	50.4	49.8	49.6	50.6	49.4	50.2	50.1	49.8	49.5	49.4	49.88
40 圈	34.7	32.7	33.5	32.5	33.4	32.8	32.5	33.3	33.5	32.7	33.16
80 圈	23.1	24.1	23.8	24.3	24.1	24.3	23.8	24.0	24.3	23.9	23.97

表 5：通電 3 安培的停止時間

	20 圈	40 圈	80 圈
1 安培	237s	306s	370s
2 安培	291s	356s	386s
3 安培	309s	376s	401s

表 6：與對照組的時間差比較，數字越大表示停止效率越好（數字取四捨五入後的整數）

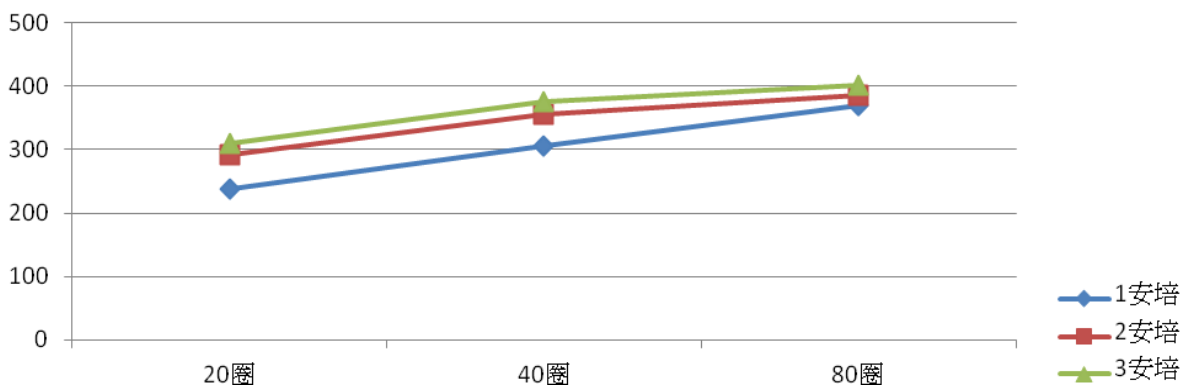


表 7：與對照組的時間差折線圖

2. 第二組：不同直徑的線圈對於線圈速度減緩的關係

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值(s)
4 公分	140.6	140.3	140.7	140.5	140.4	140.5	140.8	140.6	140.4	140.5	140.56
8 公分	102.7	103.5	102.1	103.8	103.5	102.7	103.1	102.6	102.7	103.2	102.99
12 公分	201.2	200.8	200.7	201.0	201.2	201.1	201.3	201.2	200.9	200.8	201.02

表 8：通電 1 安培的停止時間

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值(s)
4 公分	83.6	85.1	83.9	84.31	84.7	85.1	83.9	84.3	84.8	84.5	84.42
8 公分	53.5	53.2	53.1	53.4	53.4	53.2	53.5	53.1	53.3	53.5	53.32
12 公分	135.8	136.3	136.1	135.8	106.2	135.9	135.7	136.1	136.3	136.1	136.03

表 9：通電 2 安培的停止時間

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值(s)
4 公分	56.1	55.8	55.6	56.6	56.2	55.9	56.0	56.2	55.7	56.3	56.04
8 公分	34.7	32.7	33.5	32.5	33.4	32.8	32.5	33.3	33.5	32.7	33.16
12 公分	121.3	121.2	121.3	120.9	121.1	121.3	121.2	120.9	121.1	121.3	121.1

表 10：通電 3 安培的停止時間

	4 公分	8 公分	12 公分
1 安培	185s	306s	253s
2 安培	242s	356s	318s
3 安培	270s	376s	333s

表 11：與對照組的時間差比較，數字越大表示停止效率越好（數字取四捨五入後的整數）

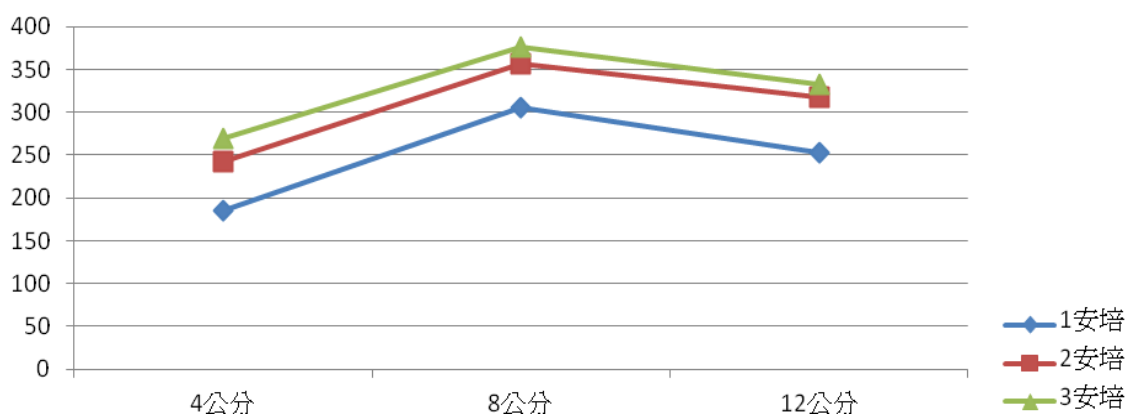


表 12：與對照組的時間差折線圖

3. 第三組：不同形狀的線圈對於線圈速度減緩的關係

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值(s)
三角形	238.1	237.8	237.7	237.9	237.6	237.8	237.6	237.8	237.9	238.1	237.83
正方形	108.3	107.9	108.2	107.8	107.9	108.1	108.3	108.2	107.9	108.3	108.09
圓形	102.7	103.5	102.1	103.8	103.5	102.7	103.1	102.6	102.7	103.2	102.99

表 13：通電 1 安培的停止時間

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值(s)
三角形	145.6	145.5	145.8	145.7	145.6	145.3	145.5	145.6	145.4	145.5	145.55
正方形	62.3	62.8	62.5	62.6	62.4	62.5	62.3	62.6	62.3	62.6	62.49
圓形	53.5	53.2	53.1	53.4	53.4	53.2	53.5	53.1	53.3	53.5	53.32

表 14：通電 2 安培的停止時間

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值(s)
三角形	85.3	85.5	85.6	85.4	85.3	85.6	85.5	85.6	85.4	85.7	85.49
正方形	51.3	51.5	51.6	51.4	51.3	51.5	51.6	51.3	51.4	51.3	51.42
圓形	34.7	32.7	33.5	32.5	33.4	32.8	32.5	33.3	33.5	32.7	33.16

表 15：通電 3 安培的停止時間

	三角形	正方形	圓形
1 安培	43s	146s	306s
2 安培	136s	192s	356s
3 安培	197s	203s	376s

表 16：與對照組的時間差比較，數字越大表示停止效率越好（數字取四捨五入後的整數）

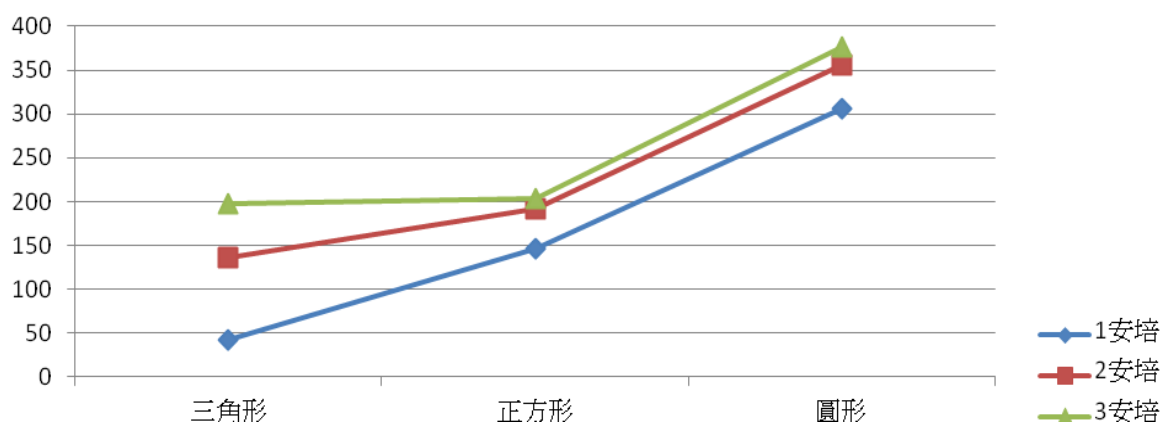


表 17：與對照組的時間差比較，數字越大表示停止效率越好

4. 第四組：不同粗細的線圈對於線圈速度減緩的關係

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值(s)
粗線圈	92.7	93.0	93.2	93.1	92.9	92.7	93.3	93.1	93.0	93.2	93.02
細線圈	121.8	122.4	122.6	121.8	122.2	122.6	121.8	122.1	122.0	122.4	122.17

表 18：通電 1 安培的停止時間

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值(s)
粗線圈	44.8	44.0	43.4	43.7	44.2	44.1	43.9	44.6	44.2	44.5	44.14
細線圈	67.5	68.2	67.7	68.1	67.6	67.8	68.0	68.3	67.9	68.1	67.92

表 19：通電 2 安培的停止時間

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值(s)
粗線圈	27.5	27.6	26.3	26.2	26.6	26.5	27.1	27.0	26.8	26.5	26.81
細線圈	50.4	49.8	49.6	50.6	49.4	50.2	50.1	49.8	49.5	49.4	49.88

表 20：通電 3 安培的停止時間

	粗線圈	細線圈
1 安培	401s	237s
2 安培	450s	291s
3 安培	467s	309s

表 21：與對照組的時間差比較，數字越大表示停止效率越好（數字取四捨五入後的整數）

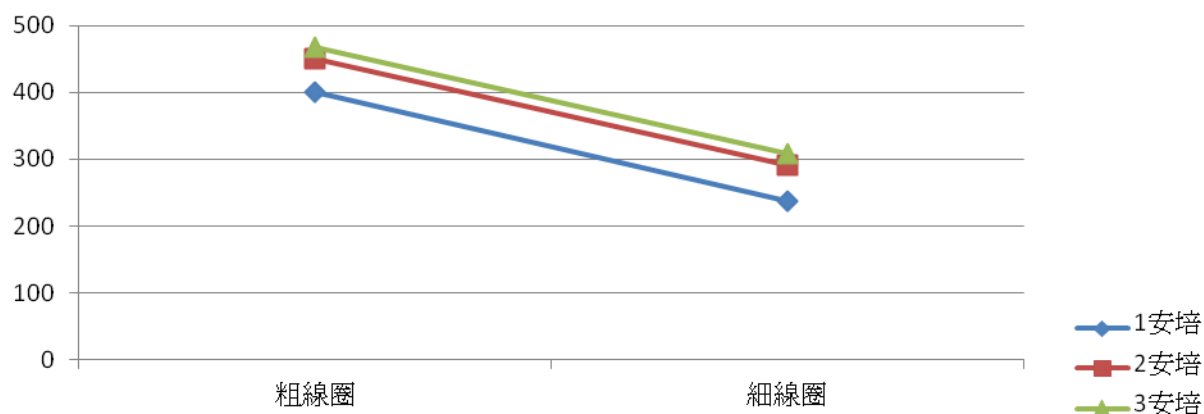


表 22：與對照組的時間差折線圖

5. 第五組：不同的金屬對於速度減緩的關係

實驗中的金屬圓片為鐵片、不鏽鋼片和鋁片，其中鐵片因為是鐵磁性物質，所以通過電磁鐵時就瞬間被電磁鐵吸住而無法測量。不銹鋼片則完全沒有停止的現象所以也無法測量，而有實驗效果的是鋁片，隨著電流的增大，停止的時間也越快，所以之後都以鋁片做實驗。

6. 第六組：不同的鋁片厚度對於速度減緩的關係

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值(s)
0.1 公分	95.1	94.6	96.0	94.4	95.4	95.2	95.6	95.2	95.1	95.0	95.16
0.3 公分	71.3	71.5	71.2	71.6	71.3	71.1	71.4	71.1	71.2	71.1	71.28

表 23：通電 1 安培的停止時間

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值(s)
0.1 公分	51.8	52.4	52.2	52.0	52.1	51.8	52.1	52.4	51.9	52.1	52.08
0.3 公分	34.1	33.8	34.2	33.9	33.8	34.1	33.9	34.2	34.1	33.8	33.99

表 24：通電 2 安培的停止時間

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值(s)
0.1 公分	33.8	34.4	33.9	34.1	33.9	33.6	34.0	34.2	33.9	33.8	33.96
0.3 公分	17.8	17.7	17.6	17.8	17.7	17.9	17.8	17.6	17.7	17.9	17.75

表 25：通電 3 安培的停止時間

	0.1 公分	0.3 公分
1 安培	240s	321s
2 安培	283s	358s
3 安培	301s	374s

表 26：與對照組的時間差比較，數字越大表示停止效率越好（數字取四捨五入後的整數）

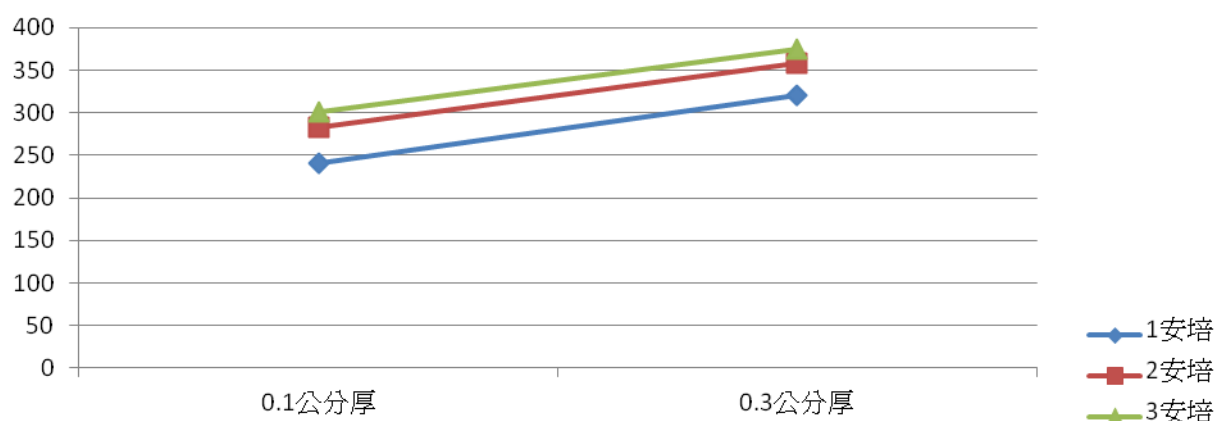


表 27：與對照組的時間差折線圖

(二) 渦電流煞車裝置：(電磁鐵間距 1 公分)

1. 第一組：不同金屬及非金屬對於速度減緩的關係

為了驗證速度的減緩並非超距力的關係，我們特地增加了非金屬（厚紙板）的實驗，而金屬圓盤的材質為鐵、不鏽鋼和鋁，其中鐵因為是鐵磁性物質，所以通過電磁鐵時就瞬間被電磁鐵吸住而無法測量。不鏽鋼則完全沒有停止的現象所以也無法測量，而有實驗效果的是鋁，隨著電流的增大，停止的時間也越快。所以之後都以鋁做實驗。

2. 第二組：不同厚度的鋁盤對於速度減緩的關係(電磁鐵距離 2 公分，轉速 12.7 圈/秒)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值(s)
0.1 公分	16.0	16.3	16.1	16.2	15.9	16.1	16.1	16.0	15.9	16.1	16.07
0.3 公分	21.8	21.7	21.9	21.8	21.7	21.8	21.9	21.7	21.8	21.8	21.79
0.6 公分	28.6	28.5	28.6	28.6	28.7	28.5	28.6	28.5	28.5	28.6	28.57

表 28：通電 1 安培的停止

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值(s)
0.1 公分	10.2	10.3	10.2	10.1	10.2	10.2	10.3	10.2	10.3	10.1	10.21
0.3 公分	14.3	14.2	14.3	14.3	14.2	14.3	14.2	14.1	14.3	14.2	14.24
0.6 公分	17.3	17.2	17.2	17.3	17.4	17.2	17.3	17.3	17.2	17.3	17.27

表 29：通電 2 安培的停止時間

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值(s)
0.1 公分	5.6	5.5	5.5	5.6	5.4	5.5	5.6	5.5	5.6	5.4	5.52
0.3 公分	9.4	9.3	9.4	9.5	9.3	9.4	9.4	9.3	9.4	9.3	9.37
0.6 公分	13.2	13.3	13.1	13.2	13.3	13.3	13.2	13.3	13.1	13.2	13.22

表 30：通電 3 安培的停止時間

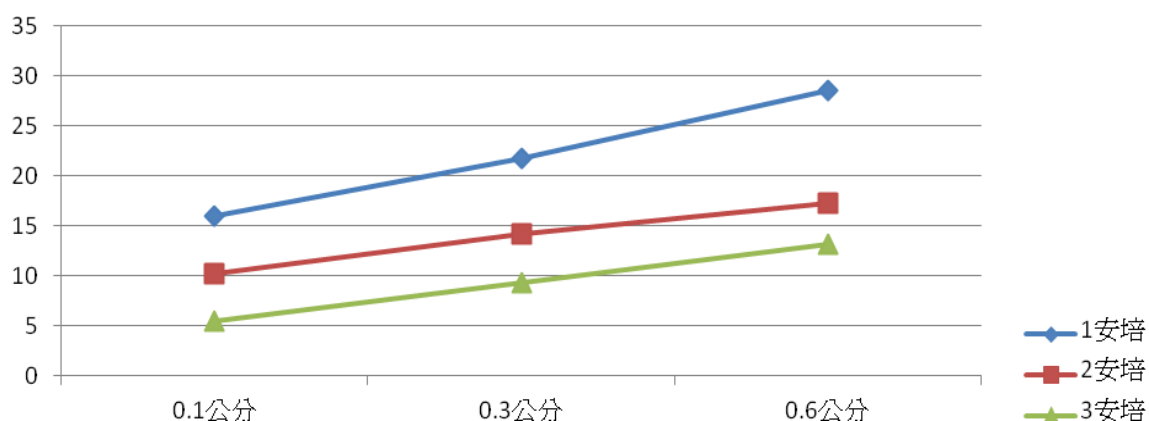


表 31：通電後停止時間的折線圖（數字取四捨五入後的小數第一位）

3. 第三組：不同形狀的鋁盤對於速度減緩的關係(，轉速 15.8 圈/秒)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值(s)
完整一片	5.1	5.3	5.2	4.9	5.1	5.1	5.0	5.2	5.1	4.9	5.09
邊緣挖洞	6.1	6.2	6.1	6.3	6.2	6.3	6.1	6.2	6.2	6.1	6.18
車輪	7.7	7.6	7.8	7.7	7.9	7.7	7.8	7.6	7.7	7.8	7.73

表 32：通電 1 安培的停止時間

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值(s)
完整一片	2.4	2.3	2.5	2.4	2.3	2.5	2.4	2.3	2.2	2.4	2.37
邊緣挖洞	3.4	3.5	3.3	3.4	3.3	3.5	3.4	3.4	3.3	3.5	3.40
車輪	3.8	3.7	3.5	3.8	3.8	3.6	3.7	3.8	3.7	3.6	3.7

表 33：通電 2 安培的停止時間

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值(s)
完整一片	1.8	1.9*	1.7	1.8	1.7	1.8	1.9	1.7	1.7	1.8	1.78
邊緣挖洞	2.2	2.3	2.2	2.4	2.2	2.1	2.3	2.3	2.1	2.3	2.24
車輪	2.5	2.6	2.5	2.7	2.5	2.6	2.5	2.7	2.5	2.6	2.57

表 34：通電 3 安培的停止時間

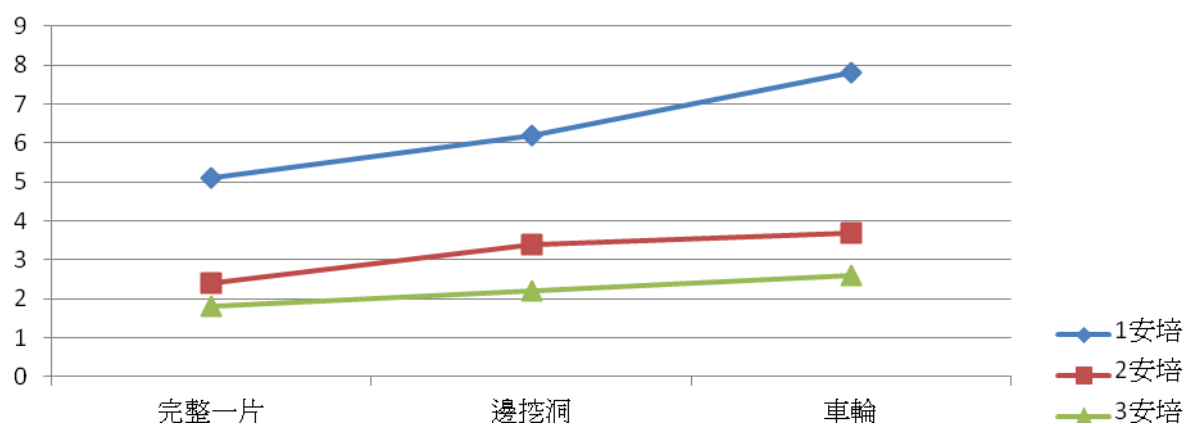


表 35：通電後停止時間的折線圖（數字取四捨五入後的小數第一位）

4. 第四組：不同轉速的鋁盤對於速度減緩的關係（電磁鐵距離 1 公分，鋁盤厚度 0.3 公分）

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值(s)
12.7 圈/秒	4.1	3.9	4.0	4.1	4.2	4.1	3.9	4.1	4.2	4.1	4.07
15.8 圈/秒	5.1	5.2	4.9	5.1	4.8	4.9	4.8	5.1	4.9	5.1	5.09

表 36：通電 1 安培的停止時間

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值(s)
12.7 圈/秒	1.9	1.8	1.7	1.8	1.9	1.9	1.7	1.8	1.9	1.7	1.81
15.8 圈/秒	2.4	2.3	2.5	2.4	2.6	2.5	2.5	2.4	2.3	2.4	2.37

表 37：通電 2 安培的停止時間

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值(s)
12.7 圈/秒	1.0	1.1	0.9	1.1	1.2	1.0	1.1	1.2	1.1	0.9	1.06
15.8 圈/秒	1.8	1.9	1.8	1.9	1.8	1.9	1.7	1.9	1.8	1.7	1.78

表 38：通電 3 安培的停止時間

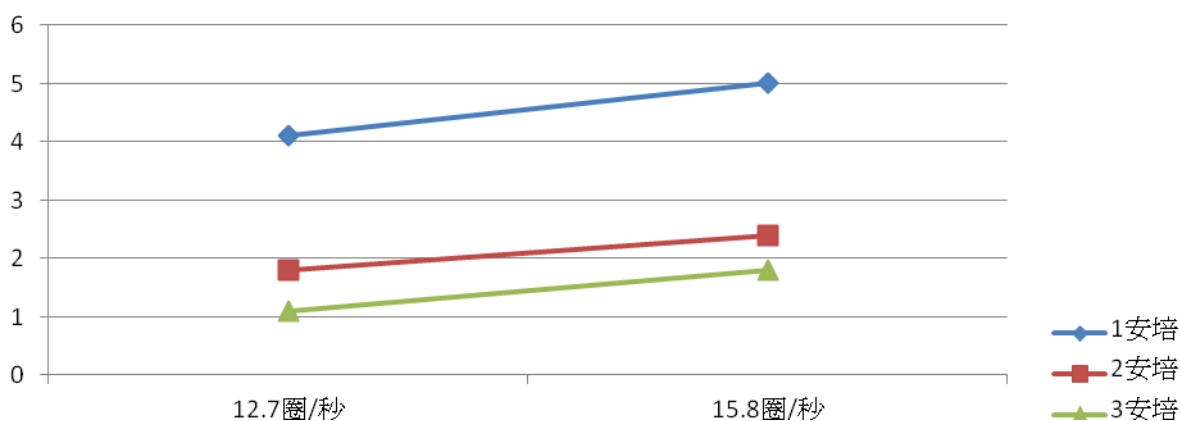


表 39：通電後停止時間的折線圖（數字取四捨五入後的小數第一位）

5. 第五組：不同電磁鐵的距離對於速度減緩的關係（鋁盤厚度 0.3 公分，轉速 15.8 圈/秒）

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值(s)
1 公分	5.1	5.3	5.2	4.9	5.1	5.1	5.0	5.2	5.1	4.9	5.09
2 公分	28.3	28.5	28.4	28.5	28.6	28.4	28.5	28.6	28.5	28.4	28.47

表 40：通電 1 安培的停止時間

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值(s)
1 公分	2.4	2.3	2.5	2.4	2.3	2.5	2.4	2.3	2.2	2.4	2.37
2 公分	17.8	17.9	17.7	17.6	17.9	17.7	17.5	17.6	17.7	17.6	17.7

表 41：通電 2 安培的停止時間

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值(s)
1 公分	1.8	1.9*	1.7	1.8	1.7	1.8	1.9	1.7	1.7	1.8	1.78
2 公分	12.7	12.8	12.6	12.5	12.7	12.5	12.6	12.8	12.7	12.7	12.66

表 42：通電 3 安培的停止時間

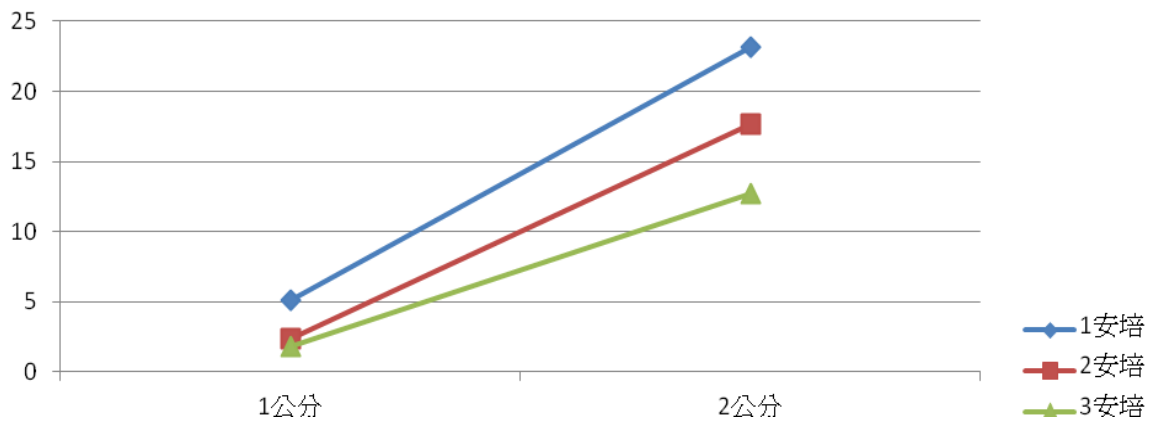


表 43：通電後停止時間的折線圖（數字取四捨五入後的小數第一位）

陸、討論

一、 電磁阻尼擺裝置部分

（一）不同的纏繞線圈數對於速度減緩的關係（直徑為 8 公分）

1. 20 圈：電磁鐵的電流為 3 安培和不通電所擺盪的時間差了 309 秒。
2. 40 圈：電磁鐵的電流為 3 安培和不通電所擺盪的時間差了 376 秒。
3. 80 圈：電磁鐵的電流為 3 安培和不通電所擺盪的時間差了 401 秒。

由實驗結果可知線圈數越多，當線圈通過電磁鐵後所停止的速度越快，這是跟線圈的匝數及緊密度有關，線圈纏繞越多即漆包線匝數多，它的緊密度越高，所以當它通過電磁鐵後所產生感應電流的磁場也越大。另外我們也發現雖然圈數是等比例增加，而且 80 圈也是停止效率最好的，但是停止速度卻不是以等比例增加，所以雖然 80 圈比 20 圈多 4 倍，但是也因為圈數越多電阻也越大的原因，因此停止時間並不會呈現等比例的現象。

（二）不同的線圈大小對於速度減緩的關係（圈數為 40 圈）：

1. 4 公分：電磁鐵的電流為 3 安培和不通電所擺盪的時間差了 270 秒。
2. 8 公分：電磁鐵的電流為 3 安培和不通電所擺盪的時間差了 376 秒。
3. 12 公分：電磁鐵的電流為 3 安培和不通電所擺盪的時間差了 333 秒。

由實驗結果得知，當纏繞的圈數相同時，直徑 8 公分的線圈相差時間最多，所以是擺盪中停止的效率最好的一個，直徑 4 公分的線圈所相差的時間最少，所以效率是最低的。而直徑 4 公分的線圈停止變化最少是因為通過電磁鐵的面積小，且漆包線的長度較短，導致所產生的安培數及感應電流較少，所以擺盪的停止變化最低。直徑 12 公分的線圈則是因為當擺幅變小時由於面積太大，並不能與電磁鐵發生進出的關係，也就無法產生感應作用，所以產生的感應電流也是沒有非常大。

(三) 不同的線圈形狀對於速度減緩的關係(周長相似)：

1. 三角形：電磁鐵的電流為 3 安培和不通電所擺盪的時間差了 197 秒。
2. 正方形：電磁鐵的電流為 3 安培和不通電所擺盪的時間差了 203 秒。
3. 圓形：電磁鐵的電流為 3 安培和不通電所擺盪的時間差了 376 秒。

照理來說，相同的線圈長度，所產生的感應電流是一樣的。但是由實驗結果得知，雖然線圈長度相差不多，但是線圈的形狀卻影響很大。以三角型為例，當擺幅變小時，我們觀察到三角形的線圈幾乎只有一小點接觸到電磁鐵，而且還不是通過磁力線最集中的地方，所以電流量越小時，三角形的線圈幾乎沒有甚麼感應電流的變化，而正方形也是相同的原因。

(四) 不同粗細的線圈與速度減緩的關係(圈數為 20 圈)：

1. 粗線圈（漆包線的直徑為 0.9mm）：電磁鐵的電流為 3 安培和不通電所擺盪的時間差了 467 秒。
2. 細線圈（漆包線的直徑為 0.5mm）：電磁鐵的電流為 3 安培和不通電所擺盪的時間差了 309 秒。

由實驗結果得知，同樣是纏繞 20 圈，粗線圈在擺盪中停止的效果是最好的，因為較粗的漆包線它的電阻較小，所以能讓電流通過的流量最大，但較細的漆包線因為電阻較大，通過的電流量就較小，所以效能沒有粗的線圈來的好。

(五) 不同的鋁片厚度對於速度減緩的關係(直徑相同)：

1. 0.1 公分厚的鋁片：電磁鐵的電流為 3 安培和不通電所擺盪的時間差了 301 秒。
2. 0.3 公分厚的鋁片：電磁鐵的電流為 3 安培和不通電所擺盪的時間差了 374 秒。

原本認為 0.3 公分厚的鋁片因為較重所以會產生較大的慣性運動，會較慢停止，但是因為厚的鋁片電阻低，所以能產生較多的感應電流，所以停止效率比薄的鋁片好。

(六) 通過線圈的電流量(直徑及圈數相同)：

比較之後我們發現，電流越大的電磁鐵能使相同線圈的停止效率越高，同樣地，電流越小其效果則不明顯。這也是因為兩端的電磁鐵所產生的磁場越大的話，線圈也會產生較大的感應電流，而感應電流建立的新磁場，用以反抗原有磁通量變化，停止的效率相對而言就高了。但是值得思考的是，所有的數據皆顯示出通電前後是有明顯的時間差異，也就是說明了雖然我們的電磁鐵是距離三公分，根據磁場等於距離的平方成反比，距離三公分的電磁鐵的磁場比距離二公分的小很多，但就通電後的時間差，說明出本實驗的目的成功了，且實驗數據是有效度的。只是通電二安培到三安培間

的時間減緩，所以隨著電流量的增加，它所呈現的趨勢是漸緩的曲線，而不是大概成等比的直線。

(七) 不同線圈的磁通量比較：

當一個均勻磁場垂直通過一個平面，磁通量是磁場與該平面面積的乘積。由實驗結果得知，4 公分的線圈因為面積小所以他通過電磁鐵時所產生的磁通量也很小，而感應電流建立的新磁場，其磁通量變化也不明顯。所以最好的效能是 8 公分的線圈，就是因為它的面積完整地通過電磁鐵的磁場，所以能產生最大的磁通量。

(八) 不同線圈的電阻比較：

	20 圈	40 圈	80 圈	4 公分	8 公分	12 公分	正方形	三角形	粗線圈
電阻 (歐姆)	0.9	1.7	2.3	0.9	1.7	2.0	1.6	1.7	0.5

表 44

1. 不同圈數：

由實驗結果得知，80 圈的線圈停止速率最大，其次是 40 圈，最小是 20 圈。所以纏繞 80 圈的導通線圈所產生的感應電流為最大，由表 44 得知，雖然 80 圈的線圈所產生的電阻最大，但是因為漆包線匝數多，緊密度高，所以通過電磁鐵所產生的感應電流就較大。但是值得注意的是，有時候，同樣的漆包線線徑，增加繞線匝數，感應電流量反而會稍減小，那是因為電阻已經增大到對於感應電流的消弱超過了增加匝數對感應電流的增強所導致。

2. 不同直徑的圓(圈數相同)：

由表 44 結果得知，雖然 4 公分的線圈電阻比 8 公分的線圈電阻小，但由於磁通量的影響，所以就算電阻小但是讓擺盪減緩的效率並不好。

3. 不同形狀的線圈(周長相同)：

正方形的線圈和三角形的線圈電阻一樣，是因為它們的漆包線長度相同，漆包線的直徑也一樣，但是擺盪停止的效率是正方形的線圈稍微好一點，是因為正方形的磁通量要比三角形來的大一些的原因。

4. 直徑 0.9mm 的線圈(圈數 20 圈)：

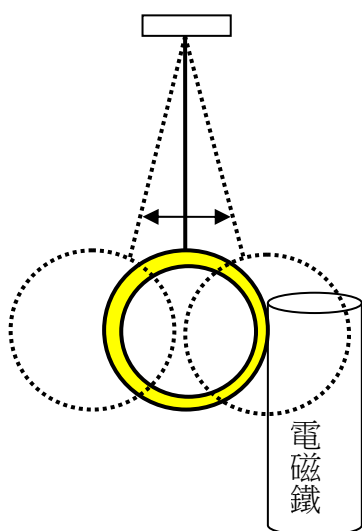
由表 44 得知，漆包線愈細則電阻值愈高，漆包線愈粗則電阻值就低，加入同樣的電壓時，線圈會產生比較大的電流。所以在實驗中，直徑 0.9mm 的粗線圈電阻最小，也是擺盪停止效率最好的。

(九) 單擺與電磁鐵的位置比較：

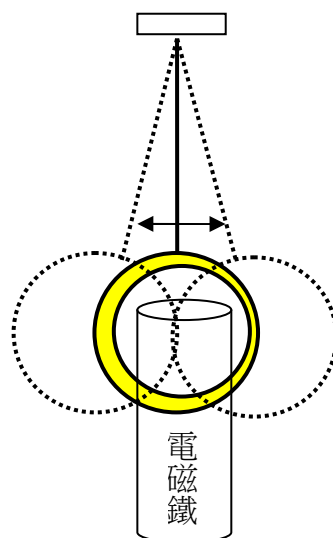
1. 線圈部分：

線圈的位置必須與電磁鐵有適當的距離（圖二十二），因為要使線圈有

進出電磁鐵的現象，線圈才能產生和電磁鐵磁力運動方向相反的磁場，當磁場發生變化時，線圈會感應而產生電流。感應電流的方向，恆使此電流產生新磁場，以抗拒原來磁場的變化來達到擺盪速度減緩的效果。如果將線圈擺在與電磁鐵成一直線的位置上時，當擺幅變小時，因為線圈已經在電磁鐵的磁場裡擺動沒有進出的動作，而且線圈中間是空的，所以也不會產生相對的感應電流來對抗原有的磁場（圖二十三）。



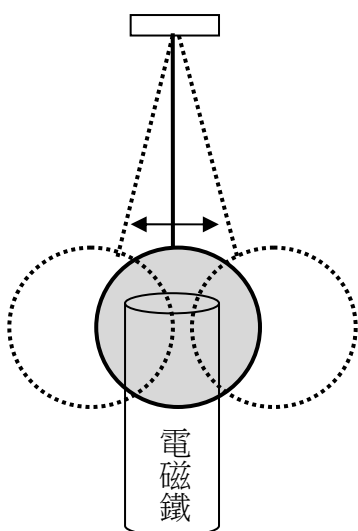
圖二十二：線圈正確的位置



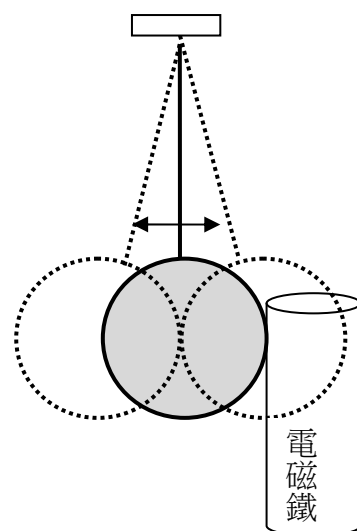
圖二十三：線圈錯誤的位置

2. 金屬圓片部分：

與金屬圓片不同的是，線圈中間是空的，所以必須靠著周圍的線圈與電磁鐵發生進出的動作來產生感應電流。而金屬圓片是完整一片金屬導體，因此表面上的每一個點都能產生感應電流，所以它與線圈的擺放位置正好相反，將電磁鐵放在與金屬圓片同一線上（圖二十四）當金屬圓片擺動時反而有更大的面積來與電磁鐵作對應。錯誤的位置則是當擺幅變小時，金屬圓盤與電磁鐵接觸的面積變小，所以產生的感應電流也少（圖二十五），而實驗數據（表 50）也顯示正確的對應位置能有更好的效率。



圖二十四：金屬圓片正確的位置



圖二十五：金屬圓片錯誤的位置

	粗線圈	0.3 公分厚鋁片
正確位置	27 秒	18 秒
錯誤位置	90 秒	78 秒

表 45：對應位置的時間關係

二、渦電流煞車裝置部分

(一) 不同金屬及非金屬對於速度減緩的關係：

1. 厚紙板：

厚紙板不會受電磁鐵影響而減緩速度，是因為它不是金屬，無法切割磁力線，所以無法與磁鐵產生感應電流來對抗原有的磁通量變化，自然也就不會有減緩速度的效果。

2. 鐵圓盤：

鐵會與電磁鐵相吸，是屬於鐵磁性物質，停止也是以接觸力來停止的，並不是實驗要求的，以渦電流所產生的阻尼作用，來達到速度減緩的效果，所以不具實驗效度。

3. 不鏽鋼圓盤：

我們知道的是，任何金屬導體都會產生渦電流，然後實驗結果發現，當開啟電磁鐵時，不鏽鋼完全沒有減緩速度，它並不會與電磁鐵產生相吸，但是似乎也不會與電磁鐵產生磁通量的變化，來達到速度減緩的目的。討論之後發現，不鏽鋼雖然不被磁鐵吸引，但比鋁合金還具有些微的鐵磁性，外磁場撤去後仍保留部分磁化強度。所以當 A 區遠離磁鐵時，A 區還是會保留部分磁化強度，根據楞次定律能量守恆的結果，所以不用另外產生渦電流來產生感應磁場以補充損失的磁場，既然磁場沒有變化，磁力也就沒有變化。

(二) 不同厚度的鋁盤對於速度減緩的關係(電磁鐵的間距為 2 公分)：

1. 0.1 公分厚的鋁盤（重量 49g 面積 $56\pi \text{ cm}^2$ ）：

電磁鐵的電流為 3 安培，停止時間為 5.5 秒

2. 0.3 公分厚的鋁盤（重量 145g 面積 $56\pi \text{ cm}^2$ ）：

電磁鐵的電流為 3 安培，停止時間為 9.4 秒。

3. 0.6 公分厚的鋁盤（重量 285g 面積 $56\pi \text{ cm}^2$ ）：

電磁鐵的電流為 3 安培，停止時間為 13.2 秒。

由實驗得知，當轉速相同時重量越重所需要的停止時間也較長，雖然較厚的鋁片有較小的電阻，但是因為 $I = m\omega^2 r^2$ 的關係，當半徑一樣時，質量越大，而轉動慣量也越大。0.3 公分厚的鋁盤因為比較重所以轉動慣量就較大，所以相較而言厚的鋁盤就需要較長的時間停止，這也說明了為何大型車輛需要較長的時間來煞車的原因了。值得討論的是，0.6 公分厚的鋁盤比 0.1 公分厚的鋁盤就轉動慣量而言相差快 6 倍，但是停止的時間差只有大約 2.5 倍，這也說明了雖然轉動慣量是影響原因之一，但是物體本身的感應電流大小所產生的阻尼作用還是大於轉動慣量的。

(三) 不同形狀的鋁盤對於速度減緩的關係(轉速 15.8 圈/秒)：

1. 完整一片：0.3 公分厚，電磁鐵的電流為 3 安培，停止時間為 1.78 秒。
(重量 145g 面積 56.7 cm^2)
2. 邊圓挖洞：0.3 公分厚，電磁鐵的電流為 3 安培，停止時間為 2.24 秒。
(重量 133 g 面積 49.7 cm^2)
3. 車輪形狀：0.3 公分厚，電磁鐵的電流為 3 安培，停止時間為 2.57 秒。
(重量 108g 面積 40.7 cm^2)

從實驗中我們發現整片的停止效率最好，原本認為邊緣有洞的鋁盤，因為正好通過電磁鐵的地方是空的，所以磁場會斷掉而效果不好，結果顯示，雖然車輪形狀通過電磁鐵的地方是完整的(圖十六)，但是就整體的鋁片面積而言，它的面積比邊緣有洞的鋁片要小，所以停止速度也就比慢一點。另外值得討論的是，前文提到轉動慣量越大所需停止的時間也越久，所以越重的圓盤，轉動慣量越大，但在本實驗中卻是越重的圓盤越快停止，這是因為雖然完整一片的轉動慣量較大，但由於金屬導體面積大所以產生的感應電流也多而這感應電流所產生的力已經大過於轉動慣量所抑制的力。

(四) 不同轉速的鋁盤對於速度減緩的關係(鋁盤厚度 0.3 公分)：

1. 12.7 圈/秒：電磁鐵的電流為 3 安培，停止時間為 1.06 秒。
2. 15.8 圈/秒：電磁鐵的電流為 3 安培，停止時間為 1.81 秒。

以同樣重量的鋁盤但是轉速不同來做實驗，發現到轉速越快它所需停止的時間要越久，雖然磁通量變化快轉速高產生的磁場比較大，但是轉速快的力矩也大，所以需要較長時間來停止。

(五) 不同電磁鐵距離對於速度減緩的關係(鋁盤厚度 0.3 公分，轉速 15.8 圈/秒)：

1. 1 公分：電磁鐵的電流為 3 安培，停止時間為 1.78 秒。
2. 2 公分：電磁鐵的電流為 3 安培，停止時間為 12.66 秒。

磁場等於距離的平方成反比，實驗中用相距 1 公分及 2 公分的電磁鐵作比較，發現到停止的效率差很大。所以往後要做進階研究時，都以相距 1 公分的電磁鐵來做實驗，以求最好而有效的實驗數據。

(六) 超距力的影響

當初實驗中最讓大家懷疑的就是超距力的影響，為此我們特地做了一個實驗，實驗中我們用相同的馬達，並將鋁盤改成非金屬的厚紙板，增加厚紙板的重量以求準確度。當馬達與電磁鐵距離 4 公分時，停止的時間為 24.54 秒；當馬達與電磁鐵距離 1 公分時，停止時間為 24.78 秒；當馬達完全貼在電磁鐵上時，停止時間為 24.63 秒。由此證明馬達並不會受到磁力即超距力的影響，為求精準我們也用了鋁片做實驗，並用永久磁鐵貼近馬達也是毫無影響，反倒是貼近鋁片時，不到十秒就停了。

柒、結論

- 一、在自製電磁阻尼擺中，導通線圈可代表加速中的物體，藉由通過電磁鐵來產生相斥的感應電流，而這感應電流所建立的新磁場是可以對抗原有的磁通量變化而達到速度減緩的目的，而線圈的纏繞次數越多，使用的漆包線越粗然後電磁鐵的電流越高，而線圈所產生的感應電流也會越高，而磁場也越大，使得導通線圈更快減緩速度。
- 二、在自製渦電流煞車裝置的實驗中，因為金屬本身的重量差距，所以當高速轉動時，會因轉動慣量而影響實驗準確度，為此，我們在本次實驗中，利用轉速器來計算控制每個圓盤的轉速。
- 三、為了達到每組的變因相同，開始時是用 6V 及 12V 的馬達，因為不能控制每個鋁盤的轉速，所以之後為了控制變因，就用了電源供應器來供給馬達電流，進而達到控制轉速的目的，為了力求精準雖然實驗變因很多，還是盡可能的將變因控制到最小。
- 四、了解到了電磁煞車的原理，如何利用渦電流產生的阻尼作用，並經由實驗找出最好的效率組合，對於往後研究電磁煞車有很大的幫助。
- 五、根據電流 (i) $\times$ 磁場 (B) = 磁力 (F)， F 的方向是與轉盤方向相反，如果能以這股力的大小來討論，就更能證明本實驗的研究成果，這一步也是我們的下一個目標。
- 六、本實驗所產生的所有阻尼作用都是利用磁通量變化所產生的感應電流，我們未來目標希望不但本裝置可以改善好的煞車系統而且又能收集電流，為節能省碳貢獻最大的心力。

捌、參考資料及其它

- 一、<http://ezphysics.nchu.edu.tw/physiweb/device/exp11.htm> (註一)
- 二、<http://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E6%B8%A6%E9%9B%BB%E6%B5%81> (註二)
- 三、<http://zyk.thss.tsinghua.edu.cn/14/p04/ch15/sec07/index.htm> (註三)
- 四、<http://www.phys.ncue.edu.tw/> (註四)
- 五、國立台灣師範大學物理系 物理教學示範實驗教室
<http://www.phy.ntnu.edu.tw/demolab/phpBB/viewtopic.php?topic=19194>
- 六、Paul G. Hewitt，觀念物理 V-電磁學！核物理，天下文化，p99~150
- 七、翰林教科書團隊，國中自然與生活科技 6，翰林出版社，p73~128
- 八、陳忠城、黃裕修、李物，高中基礎物理 1，南一書局，p110~150
- 九、黃詩淵、黃詩翔，高中選修物理下冊，南一書局，p6~90
- 十、陳瑞和、謝奇文，全華圖書

【評語】 030108

1. 本作品應用電磁學理論來研究電磁煞車的可能性，有很好的想法，也做了很多的測試，唯在新穎創新上略待加強。