

中華民國第 53 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國中組 生活與應用科學科

030817

「煞」費苦心--渦電流在磁煞車上的應用之探討

學校名稱：新竹縣立成功國民中學

作者： 國二 阮羿寧 國二 陳彥洋 國二 黃品函	指導老師： 張君豪 黃伶莉
---	-----------------------------

關鍵詞：磁煞車、渦電流、冷次定律

摘要

磁鐵與非磁性金屬轉盤因冷次定律產生阻尼效應而產生煞車效果，常常在物理實驗提到。但如何設計一個渦電流煞車器，又好像不是一件簡單的事。因為牽涉到許多變因，如轉盤材質、厚度、磁鐵與轉盤中心距、磁鐵數量、磁鐵與金屬轉盤距離、磁鐵移動速率等。本研究以”實驗驗證法”的方式，企圖為這些變因找到可依循的準則，進而充分掌握設計要點。為了有效率地分析這些變因，我們自行製作了一套「渦電流煞車分析系統」，可減少許多實驗時間並可記錄即時數據。另外，我們也量測渦電流在煞車系統的熱能分佈情形。在分析這些變因後，提出一份實用的設計指南。在最後，藉由控制磁盤的移動速度及與轉盤的距離，來分析渦電流煞車的各種即時「煞車曲線」。

壹、研究動機

看到前屆學長以渦電流的阻尼效應製作一套緩降機減速裝置的實驗，激起了我們對渦電流剎車的好奇心。經過一番的收集資料及研究相關資訊，了解到渦電流煞車系統雖很早就存在，但通常都只是扮演一個輔助性的煞車裝置，大部分的交通工具還是以傳統的接觸式煞車裝置為主。究其原因，不外乎是渦電流煞車系統構造較複雜、煞車效率較低等。但是它卻有傳統煞車器沒有的優點—沒有接觸磨耗的問題。所以為了深入了解渦電流煞車系統的複雜性，我們開始著手研究其各種設計變因，並實際設計各種實驗，驗證各種變因的影響效果，企圖得到各種實驗數據的合理解釋，進而能夠充分掌握各項設計準則，以利於渦電流煞車系統的設計。

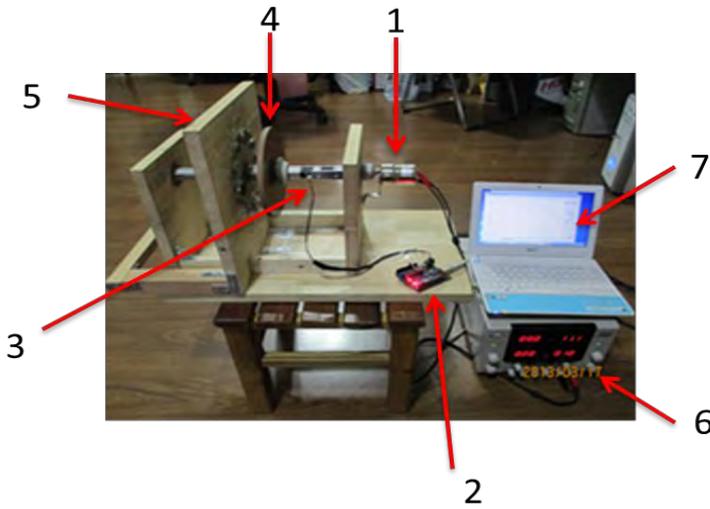
貳、研究目的

主要是研究渦電流煞車系統中各項設計變因所產生的影響，並藉由各項實驗數據，建立相關之設計準則。且藉由實際操作渦電流煞車裝置所得到的各種「煞車曲線」，分析其運作特性。包含：

- 一、研究渦電流煞車系統之基本原理及運作方式
- 二、探討整個煞車系統所包含的各項設計變因
- 三、自製一套實驗設備來進行各項變因之定性/定量分析
- 四、探討渦電流煞車作動時，其熱能之分佈情形
- 五、應用即時轉速回授觀念，控制磁盤的移動速度及與轉盤的距離，來分析渦電流剎車系統的各種「煞車曲線」性能。

參、研究設備及器材

(一)渦電流煞車分析系統



系統組成元件：

- 1) 驅動馬達
- 2) 單晶片控制板
- 3) 光遮斷器感測板
- 4) 金屬轉盤
- 5) 移動式磁盤
- 6) 電源供應器
- 7) 電腦

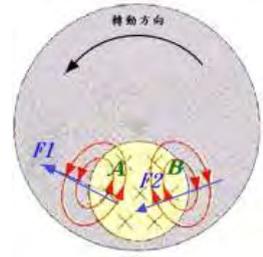
(二)系統各組成元件及輔助器材

		
馬達	單晶片控制板	各式轉盤
		
磁鐵	接觸式溫度計	高斯計
		
Ht*牌手機	轉速計	電源供應器

肆、研究過程與方法

一、渦電流原理

當一個移動的磁場與金屬導體相交，或是移動的金屬導體與磁場垂直交會時(即單位面積磁通量隨時間變化)，導體中會形成一循環感應電流”渦電流”。當轉盤單位面積要通過磁力線分布範圍時，如圖，渦電流瞬間產生於 A 處、B 處，進而產生兩相對於轉盤轉動方向的阻力 F_1 、 F_2 ，消耗轉盤動能，使之轉速下降。



二、實驗裝置之設計與製作－渦電流煞車分析系統

由於影響渦電流效應的變因很多，所以我們決定設計一個可以很容易量測各種變因所造成的煞車效果之實驗設備，因此有了這套「渦電流煞車分析系統」的產生。這套系統須具備以下特性：

- (一)可容易拆卸各種材質、尺寸之金屬轉盤。
- (二)可變動磁鐵排列位置與數目之磁盤。
- (三)可移動式之磁盤架。
- (四)可調整金屬轉盤轉速之控制裝置。
- (五)可量測及記錄金屬轉盤即時轉速之功能。

整個系統包含機構、電控及軟體三部分，在經費有限之下，我們親自設計、製作，並盡量採用便宜的材料，整個系統簡述如下：

(A)機構：

- (一)整個基座不用金屬而採用木頭材質，取其便宜且容易加工。
- (二)轉動軸採用兩段式金屬水管及螺帽式接頭，橫跨於基座兩側之軸承，可達到快速拆裝各種規格之金屬轉盤。
- (三)移動式磁盤架也採用木頭製作，底部配合基座之軌道滑動，兩側並加裝把手，便於移動。如下圖所示：

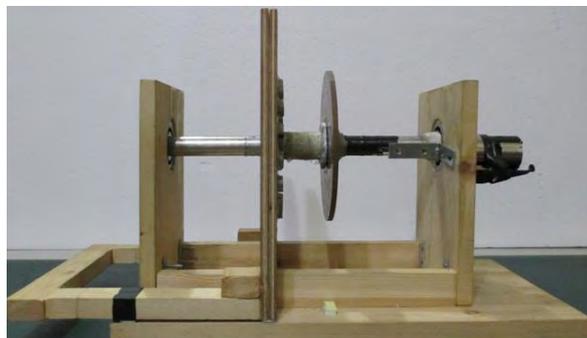


圖 4-2-1 渦電流煞車分析系統-機構部分

(B)電控:

- (一)驅動馬達:負責驅動轉盤，採用直流 DC 馬達+減速齒輪 (電壓範圍 0-12V)。
- (二)電源供應器:可調整電壓大小。
- (三)單晶片控制板:負責讀取光遮斷器感測板及傳送給電腦(內部需撰寫程式)。
- (四)光遮斷器感測板:負責感測黏貼於轉軸上之反光貼紙。
- (五)電腦:讀取單晶片控制板回送之訊號，並即時顯示於電腦螢幕上。

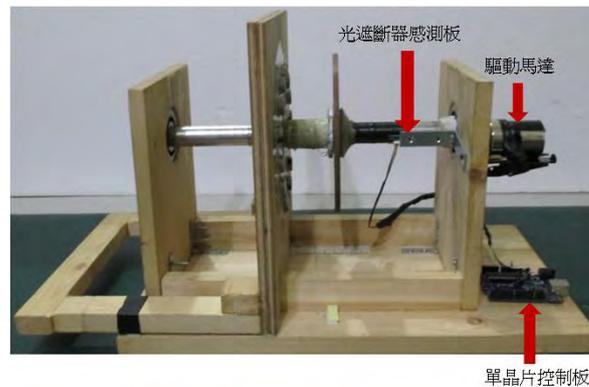


圖 4-2-2 渦電流煞車分析系統-電控部分

(C)軟體:

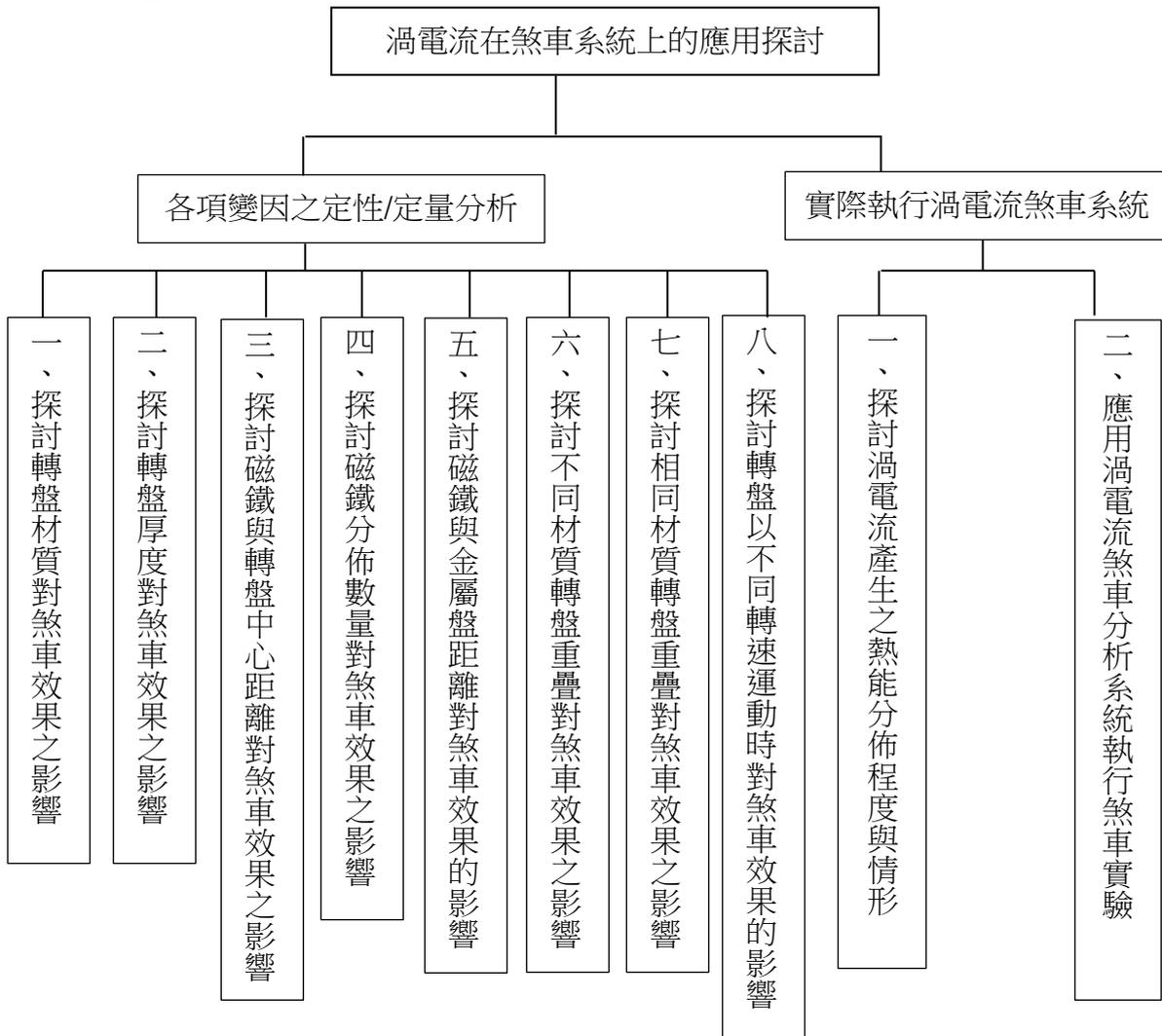
- (一)單晶片控制板(Arduino)上的軟體:類似 C 語言，提供很多現成硬體控制程式。
- (二)PC 上之 VB(Visual Basic)程式:即時讀取控制板回送之轉速及數據顯示/繪圖。

整個系統如下圖所示:



圖 4-2-3 渦電流煞車分析系統

三、研究項目：



名詞解釋

初始轉速：是指運轉中的馬達在僅負載用於實驗之單個亦或以上轉盤時，於無磁鐵及外力影響下，所測量到的實際轉速。我們使用的單位為 rpm，意即轉盤平均每分鐘所轉的總圈數。

轉速率：當磁鐵與轉動中轉盤距離維持固定，且可使轉盤初始轉速改變時，所測量到的轉速值(rpm)/初始轉速，即為轉速率。譬如當轉盤初始轉速為 400rpm，而磁鐵靠近轉盤使轉盤產生阻尼效應，進而使轉速下降至 100rpm，則此情況下所得之轉速率便為 100rpm/400rpm，即 25%。

減速率：即磁鐵靠近轉動中轉盤達到減速時，(初始轉速-減速後轉速值) rpm/初始轉速。譬如當轉盤初始轉速為 400rpm，而減速後轉速下降至 100rpm，則此情況下所得之減速率便為(400-100)rpm/400rpm，即 75%。

下降幅度：是指在同一項實驗中兩組實驗組之間減速率的比較，比如實驗組一的減速率為 80%，實驗組二的減速率為 60%，則其下降幅度即為 20%，也就是實驗一之 rpm-實驗二 rpm/初始轉速。

環狀質量：即磁鐵以圓形排列在磁盤上對應於轉動中轉盤表面上的面積乘上轉盤的厚度，並乘上其材質密度。比如當直徑 15mm 磁鐵擺放在距厚度 5mm 的紅銅轉盤

中心 55mm 的位置，則環狀質量即為 $[(1.5+5.5)^2-(5.5)^2] \times \pi \times 8.9$ ，約為 264g 此質量可用於計算進行渦電流煞車時熱能的分佈與溫度上升情形

四、研究過程:

器材規格說明：

- 1)金屬轉盤規格：有紅銅,黃銅及鋁三種材質，每個轉盤之直徑皆為 15cm, 但各有 3mm、5mm、8mm、10mm、13mm、16mm 不同厚度之轉盤，如下圖所示



圖 4-4-1 各式 鋁轉盤 圖 4-4-2 各式 紅銅轉盤

- 2)磁鐵規格：3300 高斯，直徑 15mm、厚度 5mm 的釹鐵硼磁鐵

- 3)移動式磁盤規格:把若干顆磁鐵以環狀排列方式吸附在磁盤面上(每個磁鐵距離轉盤中心點皆為固定距離，每顆磁鐵之間隔距離都相同，如下圖所示:



圖 4-4-3 磁盤

以下實驗將不再詳敘以上之規格

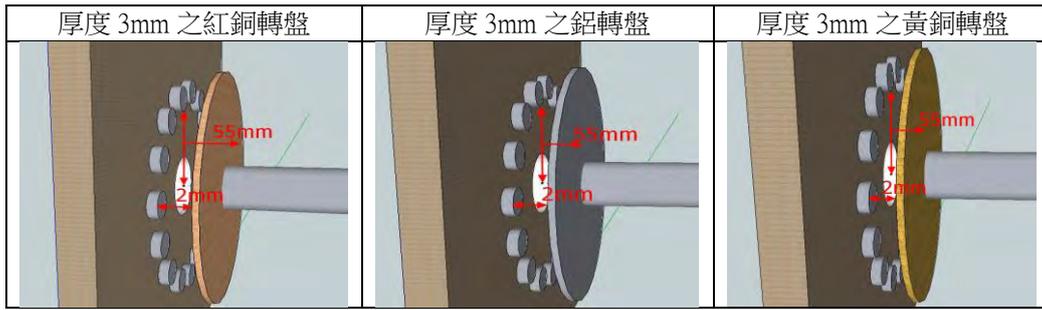
實驗一、轉盤材質對煞車效果的影響

依次將厚度均為 5mm 之紅銅、鋁、黃銅轉盤安裝於轉軸上，打開電源供應器使轉盤轉動(電壓均為 12V)，待其達到穩定轉速後，將磁盤移動至距離轉盤 2mm 處(渦電流煞車效應產生)，觀察不同轉盤材質對煞車效果的影響。

實驗二、轉盤厚度對煞車效果的影響

- (1)每次選用不同厚度之紅銅轉盤(共有 3/5/8/10/13/16mm 六種)安裝於轉軸上，打開電源供應器使轉盤轉動(電壓均為 12V)，待其達到穩定轉速後，將磁盤移動至距離轉盤 2mm 處，觀察不同厚度之紅銅轉盤對煞車效果的影響。
- (2)重複(1)之步驟，但改成鋁盤
- (3)重複(1)之步驟，但改成黃銅盤

圖 4-2-1 厚度皆為 3mm 之各材質轉盤示意圖



實驗三之一、磁鐵與轉盤中心距離對煞車效果之影響

(1)把 6 顆磁鐵以環狀排列方式吸附在磁盤面，每次改變每個磁鐵離轉盤中心點之距離，從 100mm，95mm，依次遞減至 25mm。

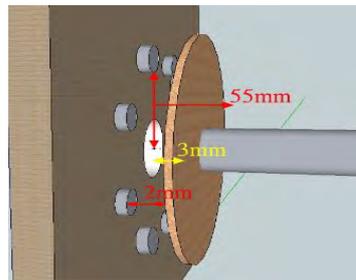


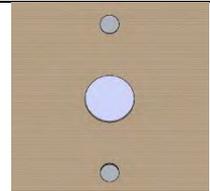
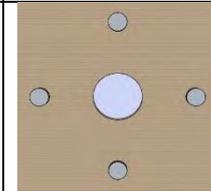
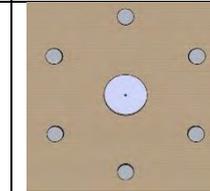
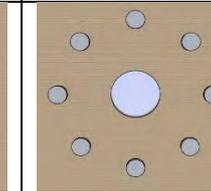
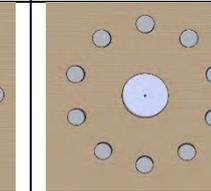
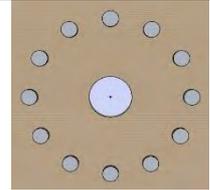
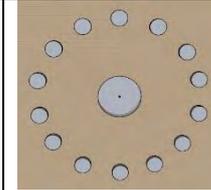
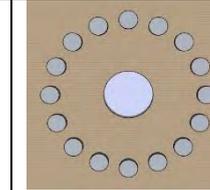
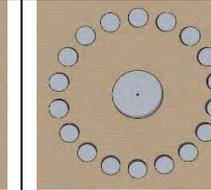
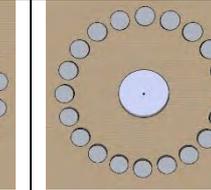
圖 4-3-1-1 磁鐵距離轉盤中心 55mm 示意圖

(2)將 3mm 紅銅轉盤安裝於轉軸上，打開電源供應器使轉盤轉動(電壓均為 12V)，待其達到穩定轉速後，將(1)所述之磁盤移動至距離轉盤 2mm 處，依次觀察不同磁鐵擺放位置對紅銅轉盤煞車效果之影響。

實驗三之二、磁鐵分布數量對煞車效果之影響

分別將 2、4、6、8、10、12、14、16、18、20 顆磁鐵以環狀排列在磁盤上，保持距離轉盤中心點 55mm 處。採用跟前面實驗相同的紅銅轉盤進行渦電流煞車試驗。觀察不同組數之磁鐵對紅銅轉盤煞車效果之影響。

表 4-3-2-1 磁鐵分布數量示意圖

2 顆	4 顆	6 顆	8 顆	10 顆
				
12 顆	14 顆	16 顆	18 顆	20 顆
				

實驗三之三、磁鐵與金屬轉盤之距離對煞車效果之影響

(方法一)使用高斯計測量本實驗用的磁鐵之有效磁力範圍。

(方法二)把 12 顆磁鐵以環狀排列方式吸附在磁盤面，採用跟前面實驗相同的紅銅轉盤進行渦電流煞車試驗，並控制磁鐵與轉盤距離，從最近的 1mm、2mm、3mm…逐步移至磁鐵距離轉盤 20mm 處，觀察轉盤轉速下降情形。

實驗四之一、不同材質的金屬重疊對減速效果的影響

把 16 顆磁鐵以環狀排列方式吸附在磁盤面，分別針對(紅銅盤+鋁盤)及(紅銅+紅銅)之組合式轉盤進行煞車試驗，磁鐵與轉盤距離一律是 2mm。

表 4-4-1-1 實驗組及對照組列表

	實驗組	對照組
直徑	15cm	15cm
材質	紅銅+鋁	紅銅+紅銅
疊加	5+3mm	5+3mm
厚度	8mm	8mm

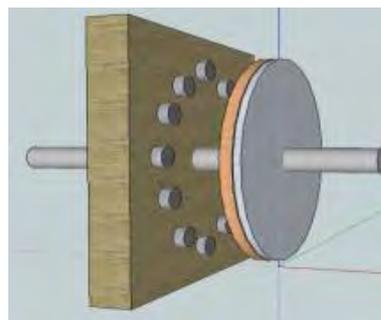
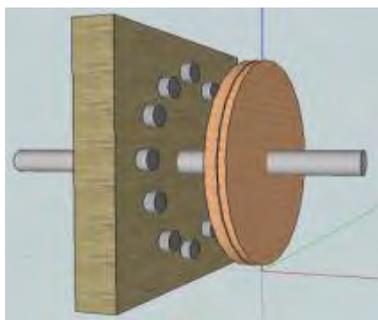


圖 4-4-1-1 疊加紅銅示意圖 圖 4-4-1-2 疊加紅銅和鋁示意圖

實驗四之二、疊加鋁轉盤對煞車效果的影響

把 16 顆磁鐵以環狀排列方式吸附在磁盤面，分別針對多組均是鋁盤，但不同厚度組合之轉盤(3+5mm，5+3mm，8mm，組合後之總厚度均相同)之組合式轉盤進行煞車試驗，磁鐵與轉盤距離一律是 2mm。(註: 3+5mm 是 3mm 厚的在磁盤側，5+3mm 是 5mm 厚的在磁盤側)

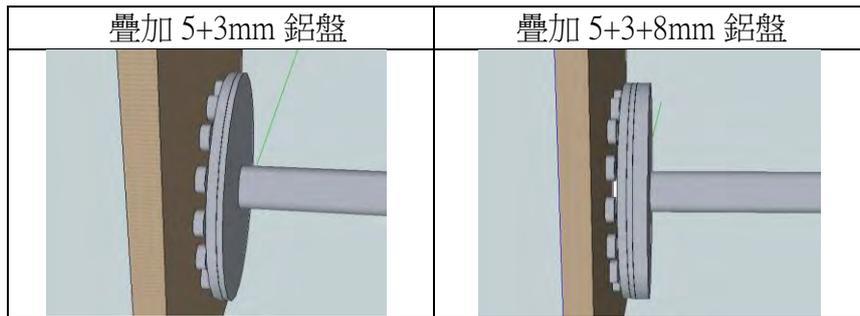
表 4-4-2-1 疊加雙鋁轉盤之實驗組及對照組列表

鋁盤組合	A 組	B 組	對照
直徑	15cm	15cm	15cm
材質	鋁+鋁	鋁+鋁	鋁
疊加(mm)	3+5	5+3	8
厚度(mm)	8	8	8

表 4-4-2-2 疊加三個鋁轉盤之實驗組及對照組列表

鋁盤組合	C 組	D 組	E 組	F 組	G 組	H 組	對照
直徑	15cm	15cm	15cm	15cm	15cm	15cm	15cm
材質	鋁+鋁+鋁	鋁+鋁+鋁	鋁+鋁+鋁	鋁+鋁+鋁	鋁+鋁+鋁	鋁+鋁+鋁	鋁
疊加(mm)	5+3+8	5+8+3	3+5+8	3+8+5	8+5+3	8+3+5	16
厚度(mm)	16	16	16	16	16	16	16

表 4-4-2-3 疊加鋁轉盤示意圖



實驗四之三、轉盤以不同轉速運動下之煞車情形

把 12 顆磁鐵以環狀排列方式吸附在磁盤面，採用 3mm 厚的紅銅轉盤進行渦電流煞車試驗。分別輸入馬達電壓 12V、10V、8V、6V。並同時移動磁鐵至距離轉盤 1mm、2mm、3mm…直至轉盤轉速與初始轉速相同處。(註:輸入馬達不同電壓，可控制轉盤初始轉速)

實驗五、探討渦電流產生之熱能分佈程度與情形

(一)測量不同厚度的紅銅轉盤之溫度上升情形: 把 16 顆磁鐵以環狀排列方式吸附在磁盤面，分別採用 3mm/5mm/8mm 厚的紅銅轉盤進行渦電流煞車試驗。每隔 1 分鐘以接觸式溫度計測量一次表面之定點溫度。

表 4-5-1 實驗組列表

紅銅規格	a 盤	b 盤	c 盤
直徑	15cm	15cm	15cm
材質	紅銅	紅銅	紅銅
厚度(mm)	3	5	8

(二)測量在轉盤上產生的渦電流之溫度分佈情形: 把 16 顆磁鐵以環狀排列方式吸附在磁盤面，採用 5mm 厚的紅銅轉盤進行渦電流煞車試驗，每隔 1 分鐘以接觸式溫度計分別測量甲到戊處的溫度。

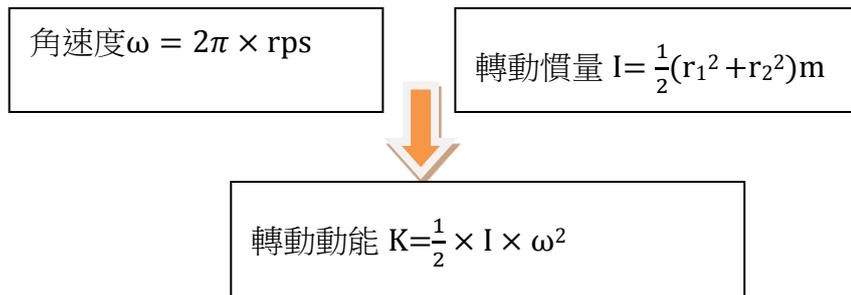
表 4-5-2 接觸式溫度計測量位置列表

	甲	乙	丙	丁	戊
與轉盤中心的距離 (mm)	75~62.5	62.5 ~50	50~37.5	37.5~25	25~0

(三)渦電流產生的熱能之理論值計算法:

第一步:測量馬達在負載轉盤並未受磁力影響的情況下運轉時的動能(在此稱作初始動能)。(質量單位為 kg，長度為 m)

※本實驗進行公式計算時皆取到小數點後九位數，然因篇幅不夠，在此至多僅能四捨五入到小數點後五位數，不影響實驗準確性。



第二步: 測量馬達在負載轉盤並受磁力影響的情況下運轉時的動能(在此稱作減速動能)。(公式如上)

第三步:計算轉盤上升的溫度(因渦電流影響)。

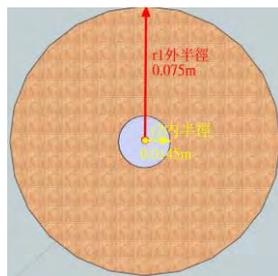
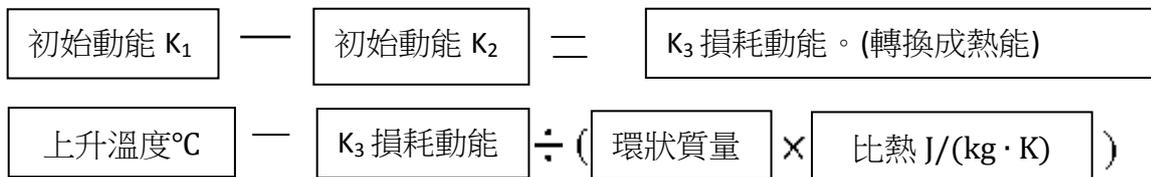


圖 4-5-1 內外半徑示意圖

實驗六、應用「渦電流煞車分析系統」實際執行渦電流煞車實驗

觀察各種轉速下，改變磁盤移動速率及距離對煞車的性能曲線

分別將轉盤之轉數設定在 500,400,300,200,100RPM 下,以 1,2,3,4,5,6 秒不同時間讓磁盤由距離轉盤 20mm 移至 1mm，觀察其轉速之變化

伍、研究結果

實驗一、轉盤材質對煞車效果的影響

由下列數據(表 5-1-1 及圖 5-5-1)可得知，厚度為 5mm 的三種相異材質轉盤，紅銅轉盤的煞車效果是最好的，其減速率為 70.56%，鋁轉盤 57.91%次之，黃銅轉盤最差，減速率僅為 44.07%。故可從此實驗得知，轉盤材質影響的減速效果程度為：紅銅>鋁>黃銅。

表 5-1-1 厚度 5mm 之不同材質轉盤的轉速及減速率

材質(5mm)	初始轉速	第一次	第二次	第三次	平均	標準差	減速率
紅銅	378.1	115.2	111.1	107.6	111.3	6.2	70.56%
鋁	384.6	164.1	160.8	160.8	161.9	3.2	57.91%
黃銅	376.9	210.1	211.6	210.7	210.8	1.2	44.07%

單位:rpm

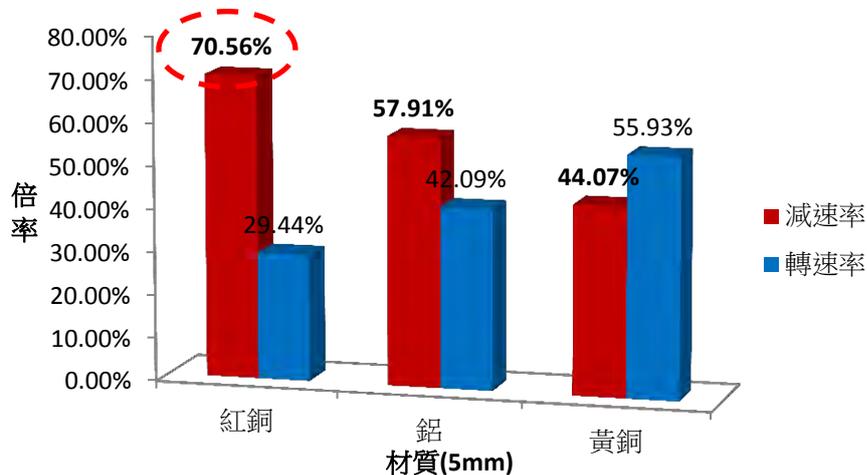


圖 5-1-1 厚度 5mm 之不同材質轉盤的倍率

實驗二、轉盤厚度對煞車效果的影響

本實驗依三種不同材質的轉盤分別探討厚度對煞車效果的影響—

紅銅:由表 5-2-1 及圖 5-2-1 可發現，紅銅轉盤自厚度 3mm 逐漸增至 5mm，減速率由 69.23%持續上升，直至厚度 5mm 的紅銅轉盤達本實驗組中最低轉速 111.3rpm，減速率高達 70.56%，為本實驗組中煞車效果最顯著的厚度。

鋁：由表 5-2-2 及圖 5-2-2 可發現，厚度 5mm 的鋁轉盤經渦電流效應影響後的穩定轉速可降至 161.9rpm，減速率為 57.91%，為本實驗組中煞車效果最顯著的厚度；其次為厚度 3mm 的鋁轉盤，減速率較厚度 5mm 的鋁轉盤低 1.27%，煞車效果僅次於厚度 5mm 的鋁轉盤；再者為厚度 8mm 的鋁轉盤，減速率為 49.67%。至厚度 5mm 及 3mm 之後的其餘厚度轉盤大致呈現「轉盤愈厚煞車效果愈差」的趨勢。

黃銅: 由表 5-2-3 及圖 5-2-3 可發現，厚度 3mm 的黃銅轉盤經渦電流效應影響後的

穩定轉速可降至 207.1rpm，減速率為 45.2%，為本實驗組中煞車效果最顯著的厚度，大致呈現「轉盤愈厚煞車效果愈差」的趨勢。

表 5-2-1 不同厚度的紅銅轉盤之轉速及倍率 (單位: rpm)

厚度(mm)	初始轉速	第一次	第二次	第三次	平均	標準差	減速率
3	389.7	122.42	118.7	118.6	119.9	3.6	69.23%
4	378.9	117.34	116.06	115.72	116.4	1.4	69.29%
5	378.1	115.2	111.1	107.6	111.3	6.2	70.56%
8	395.7	153.6	152.6	154.9	153.7	1.8	61.16%

表 5-2-2 不同厚度的鋁轉盤之轉速及倍率 (單位: rpm)

厚度(mm)	初始轉速	第一次	第二次	第三次	平均	標準差	減速率
3	383.5	169.9	166.3	162.7	166.3	5.8	56.64%
5	384.6	164.1	160.8	160.8	161.9	3.2	57.91%
8	382.8	195.6	192.8	189.5	192.7	5.0	49.67%
10	379.5	202.8	201.7	201.1	201.9	1.4	46.80%
13	391.3	221.3	220.0	219.7	220.3	1.4	43.69%
16	378.2	219.6	219.0	217.9	218.8	1.4	42.14%

表 5-2-3 不同厚度的黃銅轉盤之轉速及倍率 (單位: rpm)

厚度(mm)	初始轉速	第一次	第二次	第三次	平均	標準差	減速率
3	377.9	206.2	207.8	207.2	207.1	1.4	45.20%
5	376.9	210.1	211.6	210.7	210.8	1.2	44.07%
8	375.2	214.9	213.8	211.6	213.4	2.8	43.12%
10	371.4	217.5	214.4	215.4	215.8	2.6	41.89%
13	373.7	227.8	227.1	226.0	227.0	1.4	39.26%
16	372.9	239.0	237.2	236.8	237.7	2.0	36.26%

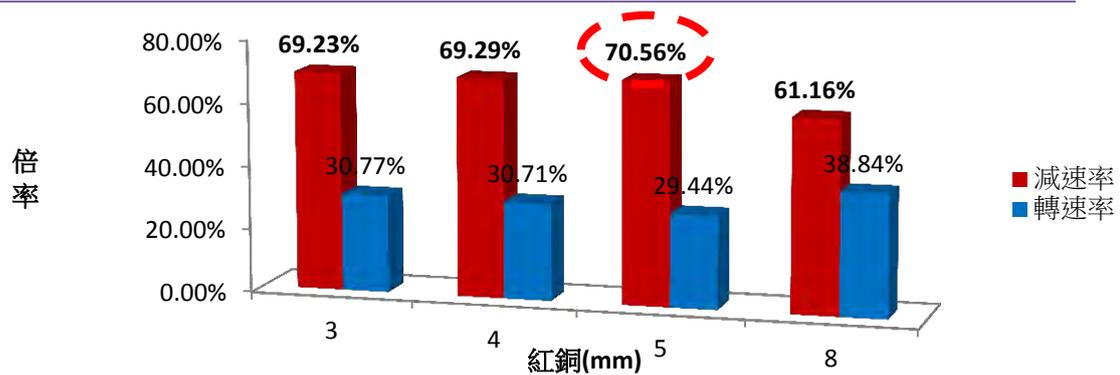


圖 5-2-1 不同厚度的紅銅轉盤之轉速率及減速率

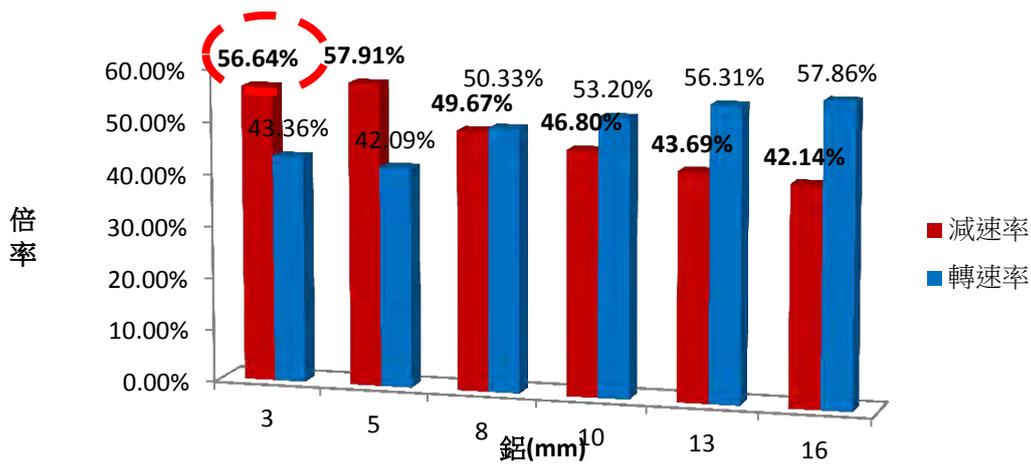


圖 5-2-2 不同厚度的鋁轉盤之轉速率及減速率

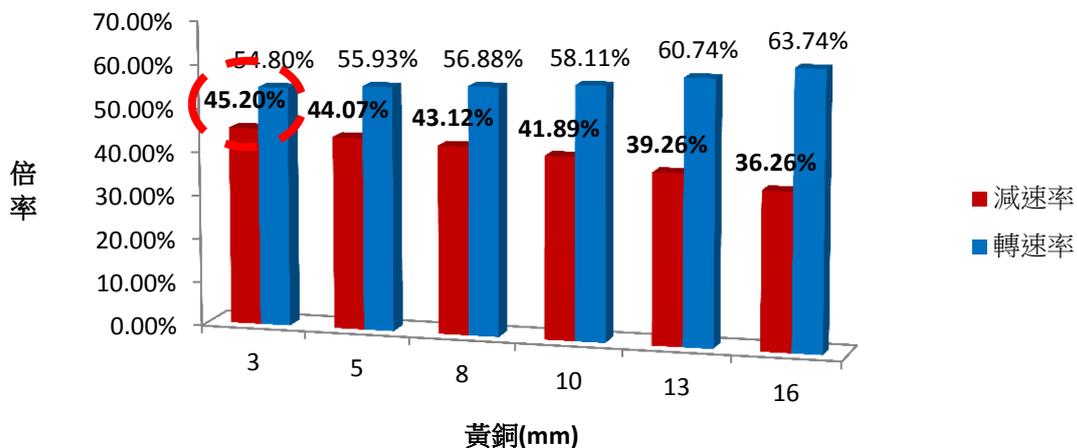


圖 5-2-3 不同厚度的黃銅轉盤之轉速率及減速率

實驗三之一、磁鐵與轉盤中心距離對煞車效果之影響

可將下列(表 5-3 之 1-1 及圖 5-3 之 1-1)分為三部分探討:

第一部分：磁鐵距離轉盤中心 100mm 到 75mm，轉速維持平衡。平均轉速為 352.2rpm，標準差為 1.6rpm。

第二部分：磁鐵距離轉盤中心 75mm 到 55mm，轉速從 352rpm 急遽下降到 173.5rpm；磁鐵距離轉盤中心 55mm 時達到最低轉速 173.5rpm，減速率為 52%，約為原轉速的一半。

第三部分：磁鐵距離轉盤中心 55mm 到 25mm，轉速從 173.5 rpm 逐漸上升到 284rpm；磁鐵距離轉盤 25mm 時減速率已降至 22%。

表 5-3 之 1-1 磁鐵與轉盤中心距離對應之轉速及減速率

磁鐵距離轉盤中心(mm)	100	95	90	85	80	75	70	65
轉速(rpm)	353.5	352.2	351.5	351	353	352	310.8	246
減速率	3%	3%	4%	4%	3%	3%	15%	32%
磁鐵距離轉盤中心(mm)	60	55	50	45	40	35	30	25
轉速(rpm)	194.6	173.5	196.2	217.9	228.1	247.8	252	284
減速率	47%	52%	46%	40%	37%	32%	31%	22%

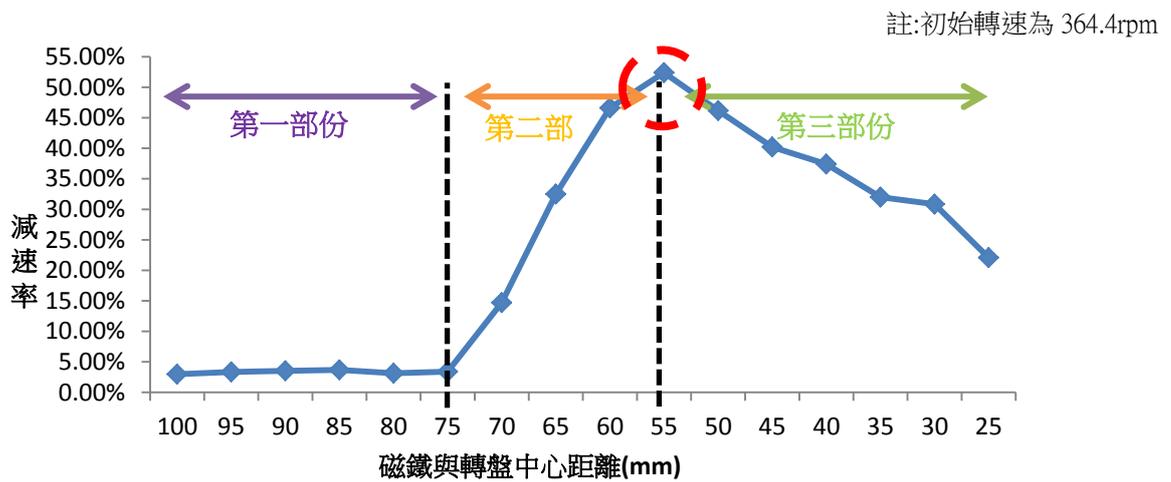


圖 5-3 之 1-1 磁鐵與轉盤中心距離對應之減速率

實驗三之二、磁鐵分布數量煞車效果之影響

可將下列數據(表 5-3 之 2-1 及圖 5-3 之 2-1)分為三部份探討：

第一部份：轉盤轉速隨著磁鐵顆數逐漸增加至 16 顆，轉盤轉速會隨著磁鐵顆數增加而下降。轉盤的原轉速為 370rpm，當兩顆磁鐵時，轉速急遽下降 28%，直至 14 顆磁鐵時，轉速是 83.6rpm，減速率為 77%，轉速已下降至低於初始轉速的一半。

從表 5-3 之 2-1 可發現，轉速下降的幅度會隨磁鐵顆數增加而減少，磁鐵顆數為兩顆時轉速較原轉速下降了 28%，四顆磁鐵較兩顆下降 19%，六顆較四顆下降 11%.....轉速下降的幅度反而越來越小，16 顆磁鐵較 14 顆磁鐵，轉速僅差 1rpm，下降幅度為 0%

第二部份：當磁鐵顆數增至 16 顆時，轉速降至 82.6rpm，減速率高達 78%，為**本實驗最低轉速，煞車效果最好。**

第三部份：16 顆磁鐵後之轉速隨磁鐵顆數增加上升，下降幅度為負值，例如磁鐵顆數增加到 18、20 顆，轉速卻升至 99.5rpm、142.9rpm，減速率較 16 顆磁鐵低了 5%及 17%

表 5-3 之 2-1 磁鐵分布數量對應之轉速及減速率

磁鐵顆數	第一次	第二次	第三次	平均	標準差	減速率	下降幅度
0	370.4	370.2	369.4	370.0	0.8	0%	0%
2	268.6	268.2	267.9	268.2	0.6	28%	28%
4	198.6	197.5	198.6	198.2	1.0	46%	19%
6	157.1	157.4	156.9	157.1	0.4	58%	11%
8	111.8	111.6	111.1	111.5	0.6	70%	12%
10	96.8	96.8	94.4	96.0	2.2	74%	4%
12	92.3	91.3	89.9	91.2	2.0	75%	1%
14	85.7	82.5	82.5	83.6	3.0	77%	2%
16	82.2	82.3	83.3	82.6	1.0	78%	0%
18	100.2	99.5	98.7	99.5	1.2	73%	-5%
20	142.5	142.7	143.5	142.9	0.8	61%	-8%

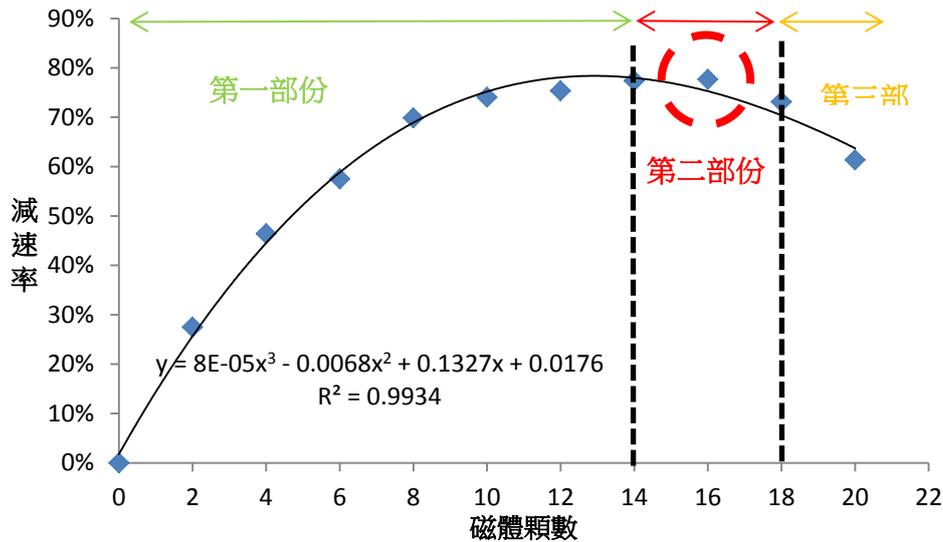


圖 5-3 之 2-1 不同顆數的磁鐵排列對應之減速率

實驗三之三、磁鐵與金屬盤距離對煞車效果的影响

可將下列(表 5-3 之 3-1 及圖 5-3 之 3-1)分為兩部份探討:

有效磁力範圍：磁鐵距離轉盤 16mm 時，轉速是 360.2rpm，較之初始轉速 364rpm 下降 1%，而將磁鐵距離轉盤 16mm 的距離逐漸縮至為 1mm 的過程中，可發現減速率從 1%逐漸升至 74%，表示在此範圍為磁鐵有效磁力所涵蓋之；且磁鐵距離轉盤 1mm 時，轉速降至 95rpm，減速效果為本實驗最好之。

無效磁力範圍：磁鐵與轉盤距離超過 16mm 後，減速率維持在 0%，幾乎沒有減速效果。進行磁鐵煞車時，磁鐵與轉盤距離須保持在 16mm 之內才能達到效果，且磁鐵與轉盤之間的距離愈短則減速效果愈彰。

表 5-3 之 3-1 磁鐵磁力與不同材質的轉盤之有效作用範圍

材質	紅銅	鋁	黃銅
作用範圍(mm)	19	18	18

表 5-3 之 3-2 磁鐵與轉盤距離對應之轉速及倍率

磁盤距轉盤 (mm)	rpm	減速率	磁盤距轉盤 (mm)	rpm	減速率
1	95	73.93%	11	345.5	5.19%
2	105	71.19%	12	348.5	4.36%
3	152	58.29%	13	355.5	2.52%
4	203	44.29%	14	358.7	1.56%
5	244	33.04%	15	361.8	0.71%
6	286	21.51%	16	360.2	1.15%
7	313.5	13.94%	17	363.6	0.22%
8	332	8.89%	18	363	0.38%
9	342	6.15%	19	364	0.11%
10	343.5	5.74%	20	363.5	0.22%

註:本實驗之初始轉速為 364.4rpm

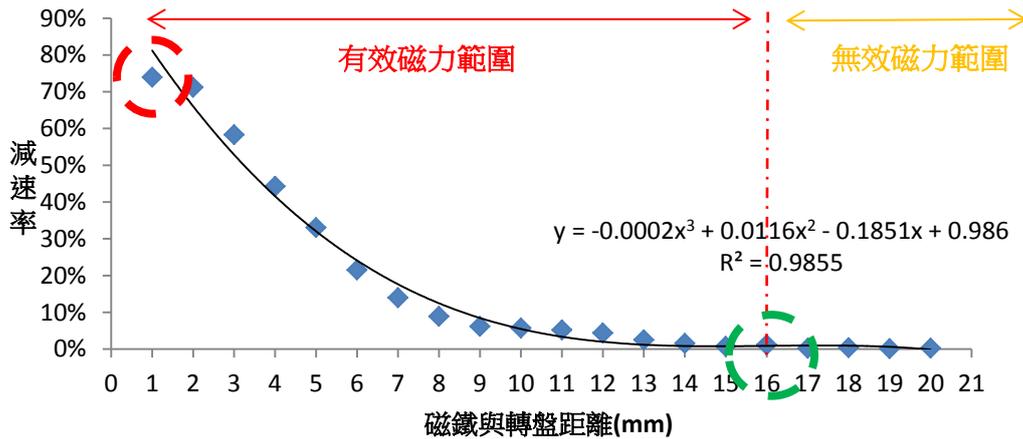


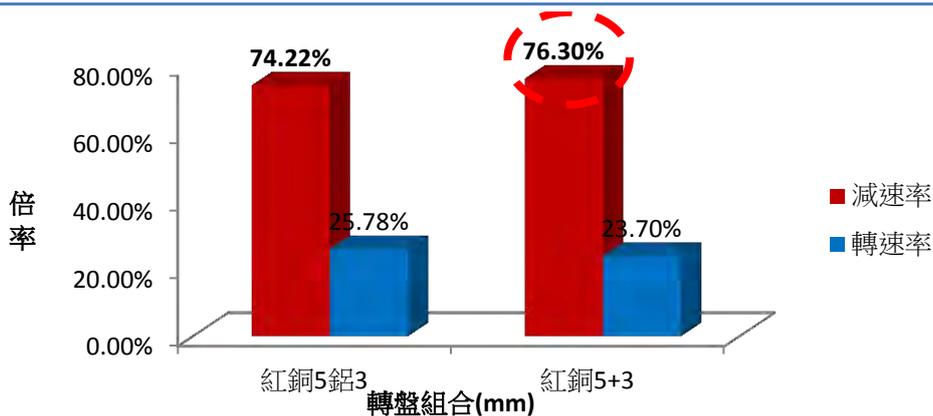
圖 5-3 之 3-1 磁鐵與轉盤距離對應之減速率

實驗四之一、不同材質的金屬重疊對減速效果的影響

由下列(表 5-4-1 及圖 5-4-1)可以發現，紅銅 5mm 加 3mm 的減速率為 76.30%，較紅銅 5mm 加鋁 3mm 的減速率高 2.08%，故可從實驗得到一個結論—由於渦電流具穿透深度，所以即便朝向磁鐵的轉盤材質、厚度一樣，其後連接的轉盤厚度也一樣，卻會因後方轉盤的材質不同，有不一樣的減速效果，且**減速效果最顯著的是整體皆為紅銅之組合**。我們將在實驗七中深入探討渦電流穿透所產生的影響。

表 5-4-21 疊加不同材質轉盤之轉速及倍率

組合厚度(mm)	初始轉速	第一次	第二次	第三次	平均	標準差	減速率
紅銅 5+鋁 3	384.5	101.0	98.0	98.4	99.1	99.1±1.3	74.22%
紅銅 5+3	383.4	95.2	90.3	87.1	90.9	90.9±3.3	76.30%



▲圖 5-4-1 總厚度為 8mm 的紅銅與鋁組合之減速率比較圖 (紅銅 5mm 朝向磁盤)

實驗四之二、疊加鋁轉盤對煞車效果的影响

可將下列數據分為三部分探討:

第一部分:可從圖 5-4-2-1 發現, A 組的減速率為 58.05%, B 組的減速率為 62.71%, 皆較對照組(厚度 8mm 的鋁轉盤)之減速率高。

第二部分:可從圖 5-4-2-2 發現, C 組的減速率為 71.34%, 一直到 H 組的減速率 51.98%, 皆較對照組(厚度 16mm 的鋁轉盤)之減速率高。

第三部分:可從圖 5-4-2-3 發現, 疊加鋁盤 3+5mm 的減速率為 58.05%, 速率則為 67.34%, 不僅高過僅一個厚度 3mm 的鋁轉盤之減速率, 也高於厚度 3mm 的鋁轉盤之減速率; 而疊加鋁盤 3+5+8mm 的減過疊加兩個鋁轉盤(3+5mm)的減速率。可參考圖 5-4 之 2 之 1-4 得一結論:單個轉盤<雙個轉盤<三個轉盤(減速率)。

表 5-4-2-1 疊加雙鋁轉盤與對照組之轉速及倍率(總厚度為 8mm)

鋁盤組合	初始轉速	第一次	第二次	第三次	平均	標準差	減速率
A	382.4	161.3	159.1	160.7	160.4	160.4±0.9	58.05%
B	381.3	143.7	141.9	141.0	142.2	142.2±1.1	62.71%
對照	382.8	195.6	192.8	189.5	192.7	192.7±2.5	49.67%

表 5-4-2-2 疊加三鋁轉盤與對照組之轉速及倍率(總厚度為 16mm)

鋁盤組合	初始轉速	第一次	第二次	第三次	平均	標準差	減速率
C	376.7	108.8	104.8	110.3	108.0	108.0±2.3	71.34%
D	379.8	124.1	120.7	118.1	120.9	120.9±2.5	68.16%
E	378.5	125.3	123.6	121.9	123.6	123.6±1.4	67.34%
F	383.4	136.3	134.1	135.0	135.1	135.1±0.9	64.76%
G	380.3	164.8	161.7	160.0	162.1	162.1±2.0	57.37%
H	383.9	184.9	184.6	183.5	184.4	184.4±0.6	51.98%
對照	378.2	219.6	219.0	217.9	218.8	218.8±0.7	42.14%

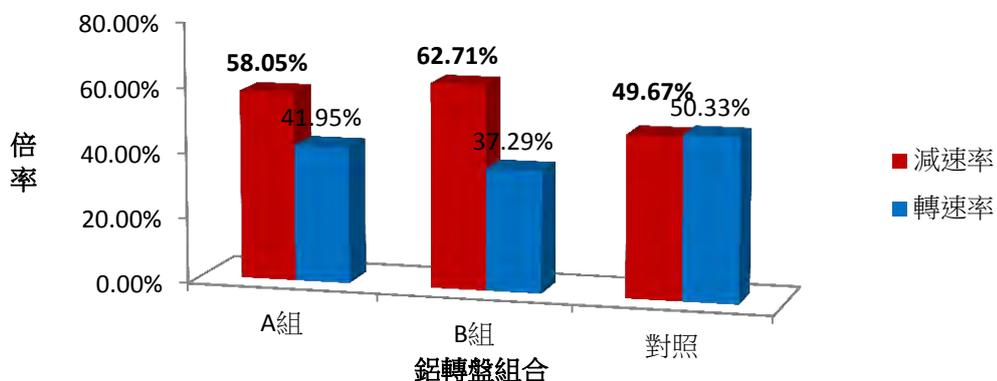


圖 5-4-2-1 疊加雙鋁轉盤與對照組之減速率(總厚度為 8mm)

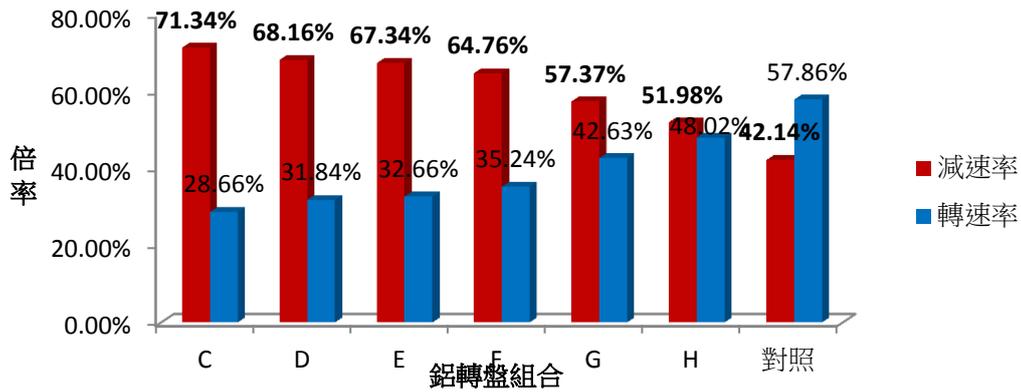
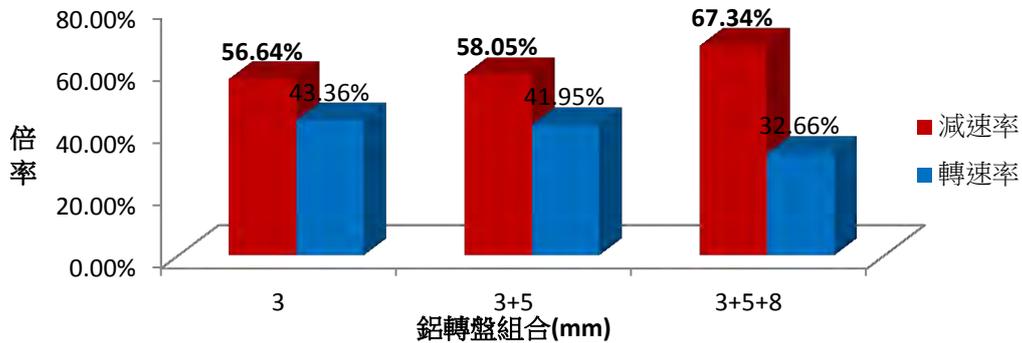


圖 5-4-2-2 疊加三個鋁轉盤與對照組之減速率(總厚度為 16mm)



實驗四之三、轉盤以不同轉速運動下之煞車情形

可將表 5-4-3-1 及圖 5-4-3-1 分兩部分探討一

第一部分:無論磁鐵與轉盤的距離為何，當馬達電壓為 12V(初始轉速 363.3rpm)時，紅銅轉盤的減速率皆較其他輸入電壓時高，例如:磁鐵距離轉盤 1mm 時，轉盤轉速在馬達輸入電壓 12V(初始轉速 363.3rpm)的情況下，減速率可達 74%；然當馬達輸入電壓為 6V(初始轉速為 171rpm)、8V(初始轉速為 236.4rpm)，減速率皆為 68%，而馬達輸入電壓為 10V(初始轉速為 309rpm)時，減速率則為 72%，煞車效果皆不如輸入電壓為 12V(初始轉速為 363.4rpm)之。

第二部分:馬達輸入電壓為 6V(初始轉速 171rpm)時，磁鐵需移至距轉盤 10mm 處才沒有任何煞車效果，減速率為 0%，直至馬達輸入電壓為 12V(初始轉速 363.3rpm)時，磁鐵需移至距轉盤 17mm 處才沒有任何煞車效果，可得一結論—初始轉速愈高渦電流阻尼效應作用範圍愈大。

表 5-4-3-1 減速率與初始轉速(電壓)及磁盤與轉盤距離的關係

距離 (mm)	6V rpm	減速率	8V rpm	減速率	10V rpm	減速率	12V rpm	減速率
初始	171	0%	236.4	0%	309	0%	363.3	0%

1	54	68%	76.2	68%	85.2	72%	95	74%
2	73.2	57%	97.9	59%	108.2	65%	105	71%
3	96	44%	126.2	47%	146.8	52%	152	58%
4	114.3	33%	158	33%	189	39%	203	44%
5	132	23%	188	20%	220	29%	244	33%
6	145.5	15%	204	14%	246	20%	286	22%
7	156	9%	215.4	9%	276	11%	313.5	14%
8	162.4	5%	225.5	5%	285.7	8%	332	9%
9	165.5	3%	230	3%	293.4	5%	342	6%
10	170.7	0%	234.6	1%	300	3%	343.5	6%
11	--	--	236.4	0%	304	2%	345.5	5%
12	--	--	--	--	306.8	1%	348.5	4%
13	--	--	--	--	309	0%	355.2	3%
14	--	--	--	--	--	--	358.7	2%
15	--	--	--	--	--	--	361.8	1%
16	--	--	--	--	--	--	360.2	1%
17	--	--	--	--	--	--	363.6	0%
18	--	--	--	--	--	--	--	--

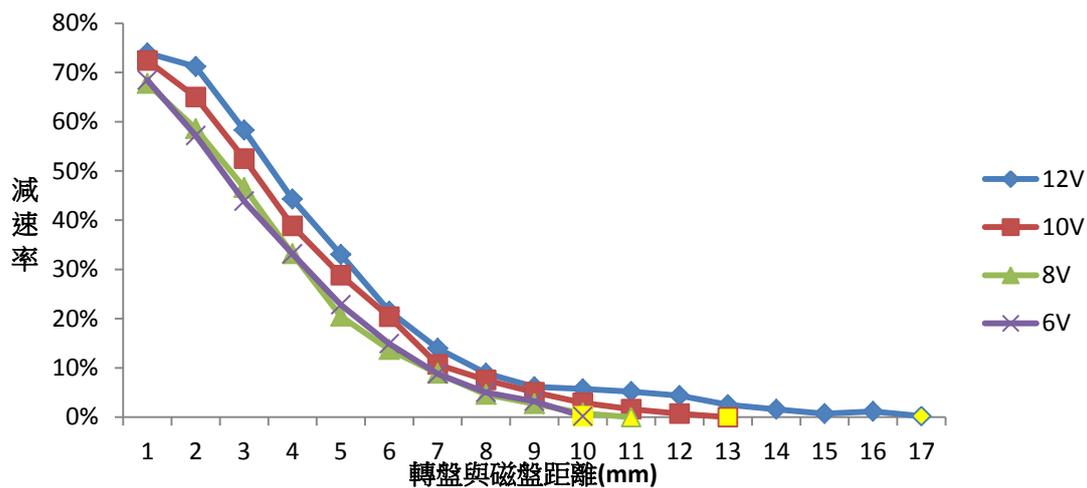


圖 5-4-3-1 減速率與初始轉速(電壓)及磁盤和轉盤距離的關係

實驗五、探討渦電流產生之熱能分佈程度與情形

由表 5-5-1~3 的計算結果可知，若不考慮熱能的消耗，3mm、5mm、8mm 的鋁轉盤，持續煞車時每分鐘上升的溫度僅 0.098°C、0.112°C、0.089°C，遠低於黃銅轉盤每分鐘 0.638°C、0.561°C、0.578°C。可知上升溫度的高低不一定只取決於相異材質轉盤煞車效果的好壞(材質煞車效果:紅銅>鋁>黃銅)。而 3mm、5mm、8mm 的紅銅轉盤，每分鐘會上升 1.011°C、0.831°C、0.846°C。比對表 5-5-4，煞車時實際測量紅銅轉盤溫度變化，a、b、c 三盤在 15 分鐘內溫度僅上升了 2.2°C、2.1°C、1.8°C，推測渦電流產生的熱能大部分已其他形式消耗掉了。

另外從表 5-5-5 可發現，轉盤表面上溫度一開始在甲乙二區上升情形較丙丁戊三區明顯，但隨著煞車時間整個轉盤溫度逐漸達致平衡。

表 5-5-1 紅銅轉盤之上升溫度計算

紅銅 3mm	外半 徑(m)	內半徑 (m)	質量 (kg)	環狀質 量(kg)	rps	角速度 W	轉動質量 I	轉動 動能 K	耗損 動能 J	熱能 °C /min
初始	0.075	0.0145	0.475	0.158	6.5	40.809	0.00136	1.134	1.027	1.011
減速	0.075	0.0145	0.475	0.158	2.0	12.556	0.00136	0.107		

紅銅 5mm	外半 徑(m)	內半徑 (m)	質量 (kg)	環狀質 量(kg)	rps	角速度 W	轉動質量 I	轉動 動能 K	耗損 動能 J	熱能 °C /min
初始	0.075	0.0145	0.673	0.264	6.3	39.595	0.00196	1.540	1.406	0.831
減速	0.075	0.0145	0.673	0.264	1.9	11.655	0.00196	0.133		

紅銅 8mm	外半 徑(m)	內半徑 (m)	質量 (kg)	環狀質 量(kg)	rps	角速度 W	轉動質量 I	轉動 動能 K	耗損 動能 J	熱能 °C /min
初始	0.075	0.0145	1.077	0.422	6.6	41.438	0.00314	2.699	2.291	0.846
減速	0.075	0.0145	1.077	0.422	2.6	16.095	0.00314	0.407		

紅銅比熱為 385J/(kg·K)

表 5-5-2 鋁轉盤之上升溫度計算

鋁 3mm	外半 徑(m)	內半徑 (m)	質量 (kg)	環狀質 量(kg)	rps	角速度 W	轉動質量 I	轉動 動能 K	耗損 動能 J	熱能 °C /min
初始	0.075	0.0145	0.121	0.048	6.4	40.317	0.00035	0.287	0.233	0.324
減速	0.075	0.0145	0.121	0.048	2.8	17.415	0.00035	0.053		

鋁 5mm	外半 徑(m)	內半徑 (m)	質量 (kg)	環狀質 量(kg)	rps	角速度 W	轉動質量 I	轉動 動能 K	耗損 動能 J	熱能 °C /min
初始	0.075	0.0145	0.202	0.080	6.6	41.500	0.00059	0.506	0.443	0.369
減速	0.075	0.0145	0.202	0.080	2.3	14.713	0.00059	0.064		

鋁 8mm	外半 徑(m)	內半徑 (m)	質量 (kg)	環狀質 量(kg)	rps	角速度 W	轉動質量 I	轉動 動能 K	耗損 動能 J	熱能 °C /min
初始	0.075	0.0145	0.322	0.127	6.4	40.087	0.00094	0.756	0.564	0.296
減速	0.075	0.0145	0.322	0.127	3.2	20.179	0.00094	0.191		

鋁比熱為 900J/(kg·K)

表 5-5-3 黃銅轉盤之上升溫度計算

黃銅 3mm	外半 徑(m)	內半徑 (m)	質量 (kg)	環狀質 量(kg)	rps	角速度 W	轉動質量 I	轉動 動能 K	耗損 動能 J	熱能 °C /min
-----------	------------	------------	------------	--------------	-----	----------	-----------	---------------	---------------	------------------

初始	0.075	0.0145	0.400	0.149	6.3	39.574	0.00117	0.914	0.639	0.678
減速	0.075	0.0145	0.400	0.149	3.5	21.687	0.00117	0.274		

黃銅 5mm	外半 徑(m)	內半徑 (m)	質量 (kg)	環狀質 量(kg)	rps	角速度 W	轉動質量 I	轉動 動能 K	耗損 動能 J	熱能 °C /min
初始	0.075	0.0145	0.600	0.249	6.3	39.469	0.00175	1.364	0.937	0.594
減速	0.075	0.0145	0.600	0.249	3.5	22.075	0.00175	0.427		

黃銅 8mm	外半 徑(m)	內半徑 (m)	質量 (kg)	環狀質 量(kg)	rps	角速度 W	轉動質量 I	轉動 動能 K	耗損 動能 J	熱能 °C /min
初始	0.075	0.0145	1.015	0.398	6.3	39.291	0.00296	2.286	1.546	0.613
減速	0.075	0.0145	1.015	0.398	3.6	22.347	0.00296	0.739		

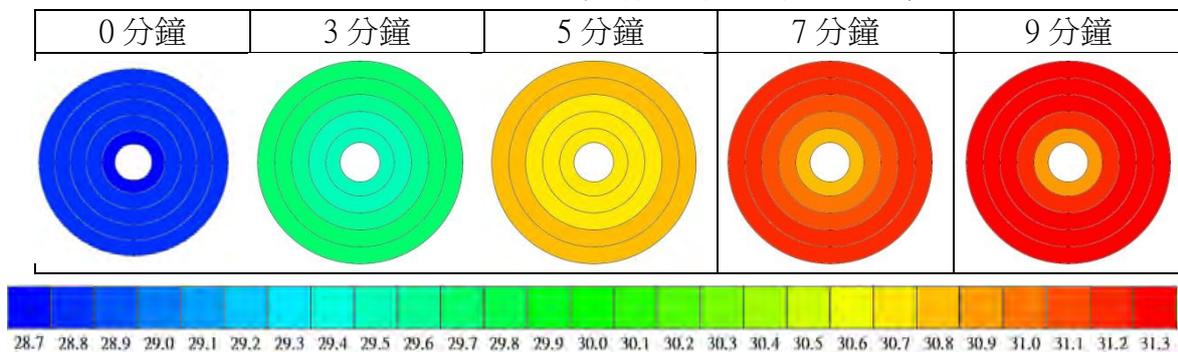
黃銅比熱為 380J/(kg· K)

表 5-5-4 紅銅轉盤每分鐘溫度

min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
a 盤	30.9	31.4	31.9	32.3	32.7	32.8	32.9	32.7	33	33.1	33.2	33.1	33.1	33.2	33.1	33.1
b 盤	30.6	30.9	31.2	31.4	31.6	31.8	32	32.2	32.2	32.3	32.4	32.6	32.6	32.5	32.6	32.7
c 盤	30.8	31	31.2	31.4	31.6	31.8	31.9	32	32.1	32.2	32.4	32.5	32.6	32.6	32.5	32.6

(室溫為 30.4°C)

表 5-5-5 b 盤五區隨煞車時間溫度上升色塊分布圖



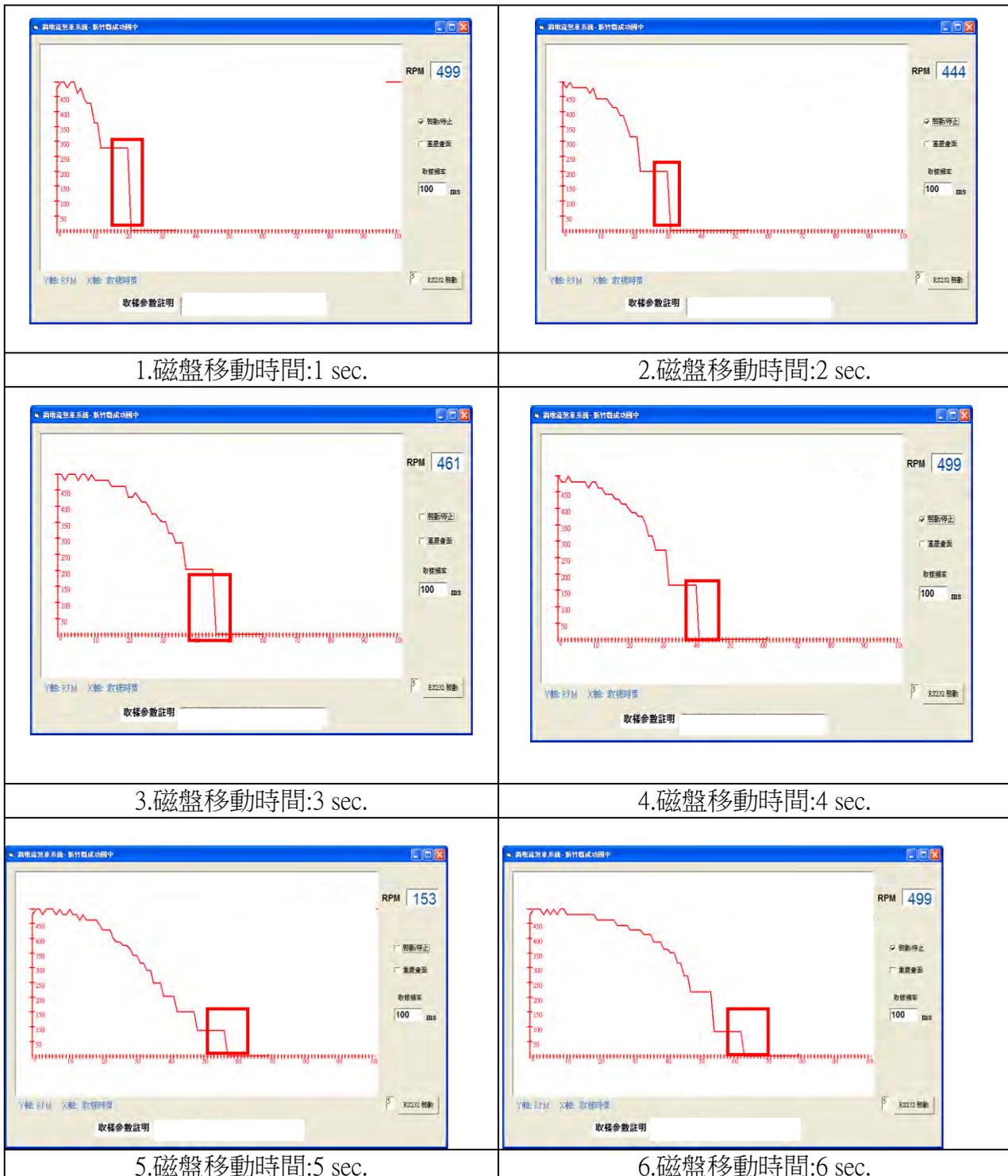
實驗六、應用自製之「渦電流煞車系統」實際執行渦電流煞車實驗

減速越快時，雖然越容易將轉盤停止，但是轉速在末段之變率越陡，容易造成緊急煞車的現象。以下，取 500RPM 之例子說明：

- (1)減速時間-1 秒：轉盤約 2 秒時停止，末段速率由 280rpm 陡降至 0
- (2)減速時間-2 秒：轉盤約 3 秒時停止，末段速率由 310rpm 降至 200rpm 再降至 0
- (3)減速時間-3 秒：轉盤約 4 秒時停止，末段速率由 300rpm 降至 270rpm 至 160rpm 再降至 0
- (4)減速時間-4 秒：轉盤約 4.5 秒時停止，末段速率由 300rpm 降至 270rpm 至 160rpm 再降至 0

圖 5-11-1 中紅框所框選起來的區域為磁煞車在 0.1 秒內，從 280rpm 急遽下降為 0rpm 的曲線，與圖 5-11-2~5-11-3 紅框選起來的區域一般為急煞的曲線。圖 5-11-5 中藍框所框選起來的區域為磁煞車在 0.1 秒內，從 85rpm 下降為 0rpm 的曲線，與圖 5-11-6 一般為緩煞的曲線。當磁盤以 5、6 秒靠近轉盤時，由於煞車時間拉長，故轉速是從初始的 400rpm 緩緩下降，對於人體是比較舒緩的煞車方式。

磁盤分別在 1~6 秒靠近轉盤之煞車曲線(圖 5-11-1~圖 5-11-6)



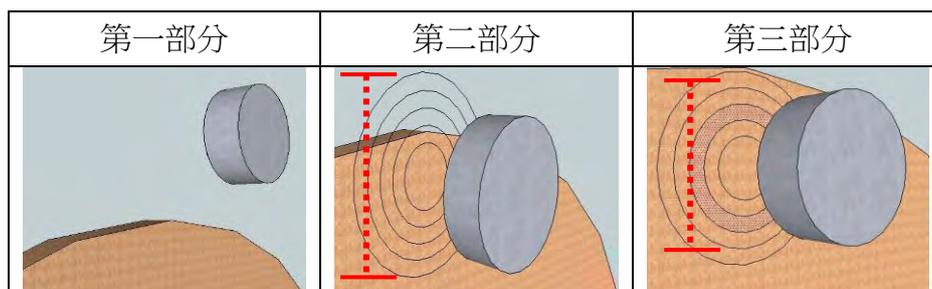
陸、討論

自從一年前決定深入研究渦電流在煞車系統的應用，本研究小組從開始一無所知，漸漸收集資料，並請教校內外老師及學長，到開始製作渦電流煞車之簡易實驗裝置，並嘗試了解系統中所包含的各種變因，進而設計各種分析變因的實驗，也為了增加實驗效率而設計製作了「渦電流煞車分析系統」。過程雖辛苦，卻讓我們三人學到如何解決各種困難問題的種種經驗及培養可貴的團隊精神。相信這也是科展活動要我們學到的重要課題。

在本研究中，我們建立了一個簡易的渦電流煞車系統，但其中卻隱含許多設計變因，有些變因極易了解與掌握，但有些變因卻具有非線性的物理特性，在我們有限的知識上，仍然無法充分了解，我們只好盡量經由實驗數據來提出一些經驗法則，希望隨著知識的增長，可以漸漸解開其中的奧秘。以下為本研究之討論內容：

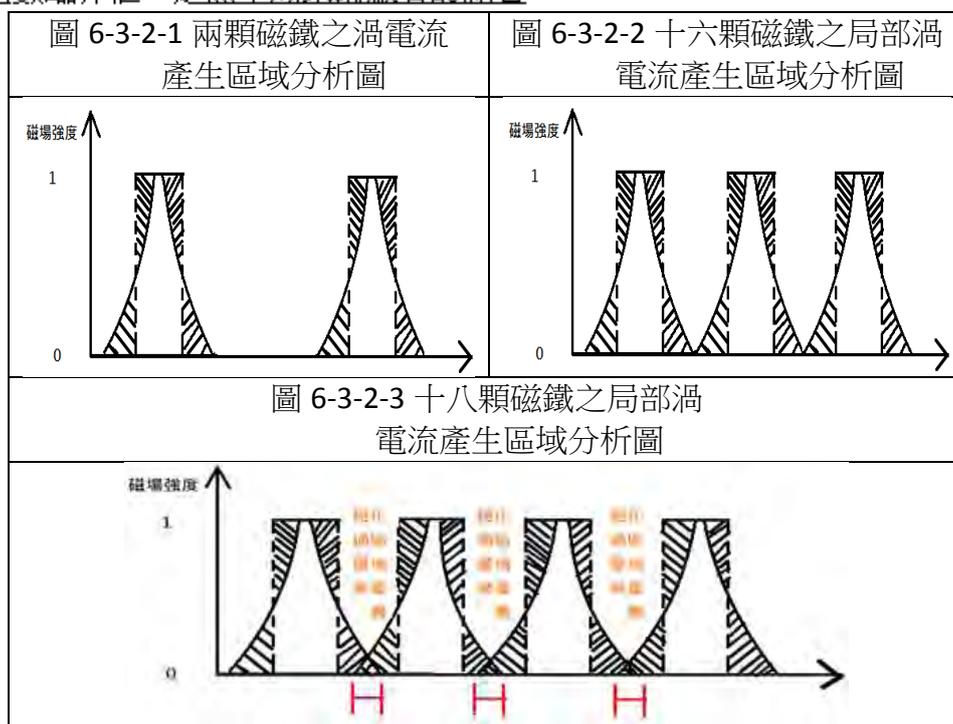
- (1) 實驗一轉盤材質對煞車效果的影響: 紅銅轉盤的煞車效果為三種材質中最佳，研判因為金屬導電率會影響渦電流的產生。紅銅轉盤純度為 99.9%，鋁轉盤則含 2% 鎂，而銅的導電率為 $5.96 \times 10^7 \Omega \cdot m$ ，較鋁 $3.78 \times 10^8 \Omega \cdot m$ 高，因此紅銅轉盤效果比鋁好。黃銅轉盤含有約 20%-30% 鋅與 2% 鉛，鋅的導電率僅為 $1.66 \times 10^7 \Omega \cdot m$ ，所以黃銅轉盤效果最差。故在挑選轉盤材質時可挑選煞車效果最佳的紅銅轉盤。
- (2) 實驗二轉盤厚度對煞車效果的影響: 在厚度實驗中，觀察到不同材質之厚度減速效果呈現不同的趨勢，沒有共同的規則可循。紅銅與鋁以 5mm 減速效果最佳，但黃銅卻以厚度 3mm 減速效果最佳，由此可推測，減速效果不會與轉盤厚度成正比關係，故在選擇轉盤時不必挑選太厚的厚度，以減少成本。
- (3) 實驗三之一磁鐵與轉盤中心距離對煞車效果之影響: 推測因轉盤半徑為 75mm，因此在
 - 第一部分：磁鐵距離轉盤中心 100mm 至 75mm，磁場作用範圍無法涵蓋轉盤，造成轉盤轉速受磁鐵磁力及渦電流的影響微乎其微為，減速率僅為 3%。
 - 第二部分：磁鐵與轉盤中心距離在 55mm~75mm 以內時，煞車力矩較大，不過其產生之渦電流的作用範圍會超出轉盤邊緣，使煞車效果不理想。
 - 第三部分：隨著磁鐵與轉盤中心距離從 55mm 移至 25mm，渦電流作用範圍雖完整，但力矩逐漸較小，故而減速效果越來越差。而磁鐵距離轉盤中心 55mm 處，渦電流作用範圍可完整涵蓋轉盤邊緣，並較磁鐵距離轉盤中心 25mm~55mm 之力矩大，故而煞車效果為本實驗最明顯之。

表 6-3-1-1 渦電流作用範圍示意圖



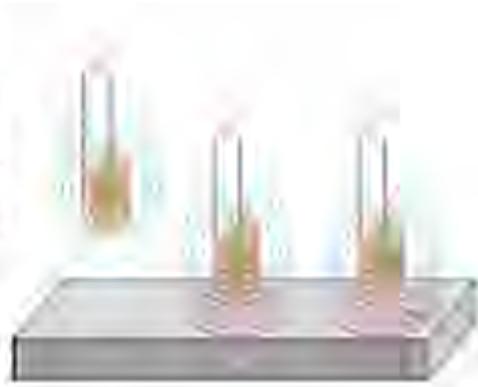
(4)實驗三之二磁鐵分布數量煞車效果之影響:(一)當磁鐵顆數越多時，轉速下降的幅度卻越小，這是因為磁鐵顆數增加會使轉盤的初始轉速緩慢造成磁通量的變化減少，導致轉速下降的幅度趨緩。(二)圖 6-3-2-1 至圖 6-3-2-3 中，若磁鐵區內磁場存在，設強度訊號為 1，非磁鐵區磁場不存在，設強度訊號為 0，斜線部分則是渦電流產生區域。

- 1.由圖 6-3-2-1 可得知，當磁鐵顆數很少時，例：兩顆磁鐵，1->0 或 0->1 只有四組，也就是說只有 4 個位置有渦電流產生。
- 2.由圖 6-3-2-2 可得知，當 1->0 或 0->1 的變化區增加時，渦電流存在的時間較久，然當磁鐵顆數過多導致 1->0 或 0->1 的變化區太多乃至重疊(參考圖 6-3-2-3)，則 1->0 或 0->1 的變化量反而會減少，此時渦電流存在的時間減少。故而可從本實驗得十六組磁鐵為本實驗之磁鐵組數臨界值，是煞車效果最顯著的組合。



(5) 實驗三之三 磁鐵與金屬盤距離對煞車效

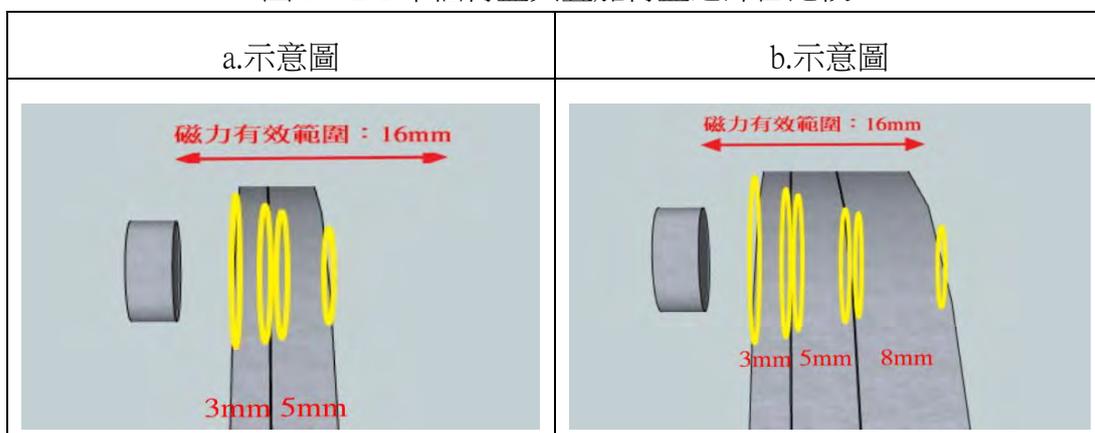
果的影響: 磁鐵距離轉盤越近時, 渦電流的阻抗效應越顯著, 轉盤煞車效果越好。這是因為磁力線是定義由磁鐵 N 極所發射, 經外部回到 S 極, 再由 S 極經磁棒內部回到 N 極的封閉曲線。如圖所示, 因此, 越接近磁鐵 N 極和 S 極的區域, 磁鐵磁力線經過越多, 磁力也就越強, 渦電流的阻尼效應也就越顯著。



(6) 實驗四之一 不同材質的金屬重疊對減速效果的影响: 由於磁力有疊加效應, 磁鐵的磁力線同時對重疊的兩個轉盤產生感應磁場, 故雖朝向磁鐵的轉盤條件相同, 卻會因其後連接不同材質的轉盤(可參考實驗一), 有不一樣的煞車效果。例如紅銅 5+3mm 之轉速為初始轉速的 25%, 而紅銅 5mm+鋁 3mm 為初始轉速的 33%。因此當磁煞車應用在生活上時, 選擇整體皆為導電率較高材質疊加之組合效果會較佳。

(7) 實驗四之二 疊加鋁轉盤對煞車效果的影响: 本實驗組中無論單個或多個轉盤的總厚度皆在磁鐵與鋁轉盤的有效磁力範圍內(約為 18mm, 參考實驗三之三), 因此每個轉盤面皆可產生渦電流, 例如: 疊加厚度各為 3+5+8mm 的鋁轉盤, 因較疊加厚度各為 3+5mm 的鋁轉盤多疊一個厚度 8mm 的鋁轉盤(多兩個渦電流產生面), 故煞車效果較佳。

圖 6-4-2-1 單個轉盤與疊加轉盤之綜合比較



可得一結論: 在磁鐵與轉盤的有效磁力範圍內疊加愈多轉盤, 其煞車效果愈明顯。

(8) 實驗四之三 轉盤以不同轉速運動下之煞車情形: 轉盤的初始轉速會影響渦電流阻尼效應的作用範圍, 當電壓越高, 也就是轉速越快時, 由於磁通量變化量更大, 會使渦電流阻尼效應強, 煞車作用範圍也較轉速慢時更大。

(9)實驗五)探討渦電流產生之熱能分佈程度與情形: 轉盤的煞車情形、質量、比熱, 皆會影響進行煞車時轉盤表面上升溫度。鋁轉盤相較黃銅轉盤煞車效果佳, 但由於鋁轉盤比熱 $900\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 比黃銅 $380\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 大, 需消耗掉較多能量使轉盤溫度上升, 故上升溫度低於黃銅轉盤。而轉盤表面五區上升溫度的差異是受到了磁鐵擺放時對應的位置影響, 磁鐵距離轉盤中心是 55mm , 對應轉盤位置甲乙二區, 溫度上升較快, 而隨時間甲乙二區溫度也逐漸和丙丁戊三區達到熱平衡, 也驗證了在本實驗之轉盤上升溫度計算中, 取環狀質量作渦電流產生區域正確無誤。

從本實驗我們學習到了能量轉換為不同形式的過程: 一開始以電能使馬達啟動, 而馬達經由轉軸帶動轉盤轉動是動能, 磁鐵靠近轉盤產生渦電流為磁能, 最後轉盤電阻使表面產生熱能。過程為: 電能 \rightarrow 動能 \rightarrow 磁能 \rightarrow 熱能。而能量在轉換為熱能的過程中也會被消耗掉, 我們推測熱能消耗掉的管道可能的有二, 一是轉盤表面熱能效耗在空氣中了, 二是轉盤表面與內部達到熱平衡, 兩者皆會造成實際測量到的熱能低於計算所產生之。

雖然本實驗轉盤上升的溫度並不足以造成嚴重影響, 但未來若能應用渦電流煞車系統使在高速行駛之下的交通工具在最短時間之內達到減速效果, 則必須考慮到溫度上升的問題。鋁的密度小, 相對同體積的鋁質量也較小, 因此轉動慣量及轉動動能較低, 能量損耗較低, 比熱較銅大也使鋁溫度較不易上升, 因此我們認為從安全角度出發鋁是三種材質當中最為合適的。

(10)實驗六)「渦電流煞車分析系統」執行渦電流煞車實驗: 當磁盤的移動時間在 3 秒以內時, 轉速可在 0.1 秒內從 $310\text{rpm}\sim 280\text{rpm}$ 急遽下降到 0rpm , 此為急煞, 雖可在極短的時間內煞車, 人體卻會因在短時間內改變運動狀態而向前俯衝造成撞擊, 具一定危險性; 當磁鐵移動的時間超過 4 秒時, 轉盤約可在 4.5 秒內停止轉動, 且因有足夠的時間減速, 故煞車曲線趨於理想煞車曲線。

柒、結論

※渦電流煞車系統之設計指南

	變 因	性能說明	磁煞車之設計建議
一	轉盤材質對煞車效果之影響	導電率： 紅銅>鋁>黃銅 渦電流效應： 紅銅>鋁>黃銅	選用材質時，以紅銅為優先選項，鋁次之，黃銅最後
二	轉盤厚度對煞車效果之影響	紅銅、鋁之轉盤以厚度 5mm 時渦電流效應最佳；黃銅則是以厚度 3mm 時渦電流效應最佳	轉盤之厚度與渦電流效應並非成正比，所以厚度大於 3mm 或 5mm 時，增加厚度並無益處
三	磁鐵與轉盤中心距離對煞車效果之影響	煞車力矩與渦電流完整性影響煞車效果距離 55mm 為最佳平衡點	磁鐵擺放位置須先配合所形成渦電流是否完整，再來是最靠近邊緣
四	磁鐵分布數量對煞車效果之影響	渦電流煞車效果最佳的磁鐵顆數為 16 顆	進行磁煞車時，可增加磁鐵的分布數量直至渦電流產生區域不會重疊的極限
五	磁鐵與金屬盤距離對煞車效果的影響	渦電流強度隨磁鐵與磁盤距離縮短而增強 相距 1mm 煞車效果最佳	磁鐵越接近轉盤，煞車效果可越迅速下降
六	不同材質的金屬重疊對減速效果的影響	將導電率較高之材質疊加煞車效果較好	建議使用導電率高的紅銅或銀疊加
七	相同材質的金屬重疊對減速效果的影響	疊加金屬盤效果比不疊加好，且朝向磁鐵那面轉盤接近 5mm 尤佳	靠近磁鐵那面的疊加轉盤需接近 5mm
八	轉盤以不同轉速運動下之煞車情形	磁通量變化越大，渦電流效應越好，轉速越快時，煞車效果越顯著	車子以高速行駛時較適合進行磁煞車

九	探討渦電流產生之熱能分佈程度與情形	從磁鐵靠近轉盤的表面及轉盤曲面可觀察到溫度升高約 2℃	可將磁煞車時所產生的熱能進行利用
---	-------------------	-----------------------------	------------------

- 一、在渦電流煞車系統中，金屬轉盤材質之選用，與煞車效率有極大關係，但厚度卻不會與煞車效率成正比關係。
- 二、磁鐵距離轉盤中心 55mm 時所形成的渦電流完整，且最接近轉盤邊緣煞車力矩大，因此煞車效果最佳。
- 三、磁盤上的磁鐵數量越多則煞車效率越高，但到達臨界數量後，效果便不明顯。
- 四、磁鐵距離轉盤越近時，渦電流的阻尼效應越顯著，所以煞車效果越好
- 五、由於磁力有疊加效應，所以各種不同材質之金屬轉盤或不同厚度之金屬轉盤組合而成的”複合式”轉盤，會產生不同之煞車性能。在轉盤重量或成本考量上，這也是個選項。
- 六、從渦電流產生的熱能計算及實際測量中提供一個渦電流產生熱能的參考數據，未來應用時也必須多方考慮到裝置可能上升之溫度。
- 七、磁通量的變化越大，渦電流阻尼效應越好。所以當磁鐵組數少時增加磁鐵，其效果會比磁鐵組數多時增加磁鐵來的好。而當輸予馬達較高電壓使初始轉速較快時，渦電流阻尼效應作用範圍較轉速慢時大也是因為這個原因。
- 八、透過調整磁盤移動的距離可控制轉速下降的幅度，控制磁盤移動速率可製造急煞與緩煞兩種煞車效果。如果導入自動控制原理的回授控制觀念，可以藉由轉速的回授來控制這兩個變因，達到理想的煞車曲線，甚至是 ABS 防鎖死煞車等設計。

捌、未來展望

渦電流煞車系統目前還無法取代傳統接觸式煞車器而大量應用於一般交通工具上，可能是交通工具與人身安全有關。但是如果用在其它的領域，如自動化機器、電器、玩具等之煞車裝置，應該也有其發展空間，可避免煞車皮磨耗之問題。如果有機會，希望朝小型化，精緻化之設計著手，期望有一天能夠製造出可以實際被應用之小型渦電流煞車器。

另外，希望針對在煞車系統中渦電流所產生的熱能進行更進一步的探討，藉由計算轉盤初始轉速之轉動慣量及磁鐵接近後轉速之轉動慣量，比較其能量差及轉盤所產生的熱能，探討其動能轉換為熱能是否符合能量守恆定律。

最後，我們在網路上查詢到關於渦電流的穿透深度有二種說法：一說會受導電率，另一說會受導磁率影響，希望未來可以設計出實驗方式來深入分析。

玖、參考資料

1. 休伊特(民 97)。觀念物理II轉動力學·萬有引力。臺北市:天下文化。
2. 黃文聰等(民 100)。堅磁到底-探討渦電流在緩降機上應用。新竹縣第 51 屆科展作品，未出版，新竹縣。
3. 王欽忠、吳盛嘉、王飛(民 98)。Halliday物理(第八版)學生版解答手冊。新北市:全華圖書。

【評語】 030817

製作渦電流剎車分析系統詳盡探討各種變因的影響，企圖提出實用的設計指南。若能先以傳統接觸式剎車系統所能達到的剎車效率為標竿，可望青出於藍而勝於藍。