

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

磁性液滴電能轉換應用於流場量測之實驗研究

Research of Applications of Electricity Conversion
Devices for Ferrofluid Droplet Measurements

研究生：黃國安

指導教授：陳慶耀 博士

中華民國一百年七月

磁性流滴電能轉換應用於流場量測之實驗研究

Developments and Applications of Electricity Conversion Devices for
Ferrofluid Droplet Measurements

研究生：黃國安

Student : Kuo -An Huang

指導教授：陳慶耀

Advisor : Ching-Yao Chen



A Thesis

Submitted to Department of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of The Requirements

for the Degree of

Master of Science

in

Mechanical Engineering

July 2010

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十九年七月

磁性液滴電能轉換應用於流場量測之實驗研究

學生：黃國安

指導教授：陳慶耀

國立交通大學機械工程學系碩士班

摘要

本文研究磁性流體在管流內的運動，並且研究電能轉換之實驗及理論方法於磁性流體在流場中通過線圈組之研究，利用磁性流體感磁特性，改變磁性流體體積及磁場讓磁通量密度改變，以及觀察感應電動勢(EMF)的變化，找出速度、感應電動勢(EMF)與體積之間的關聯。在實驗中可以發現，磁通量密度只受體積影響，並不會受到速度干涉，而感應電動勢大小及方向則受磁通量密度及速度影響，當速度越大或磁通量密度越大時，感應電動勢會增大。資料處理方面利用快速傅立葉轉換方法將原始訊號處理，以有利於後續分析。

關鍵字：磁性流體，磁通量密度，感應電動勢。

誌謝

就讀這兩年的碩士班過程中，首先是感謝老師陳慶耀教授的指導，在做研究及學習的過程中適時的指引方向，以及當學生遇到挫折及瓶頸時給予意見，並且在課業上以及人生方向上給予教導與鼓勵，讓學生在研究期間得以依進度循序漸進，使學生能夠克服困難且不放棄的持續進步，而完成整篇論文。在生活上，分享自身的經歷，使學生更懂得與人相處之道以及學習更多的時間管理方法。

此外，還要感謝學長姐的立杰、程雄、鴻筠、琦雯、奇軒、宏元、詒翔、裕盛、柏瑋、佳芬、啟鳴在我碩士過程中對實驗儀器教導以及理論分析上的教學和對環境上的熟悉，以及同窗好友的杰民、世聰、文良在操作實驗以及撰寫論文過程中所給予的幫忙，並且在這兩年的相處中愉快的度過，以及學弟彥志、定弘、隆福、育辰在實驗的幫忙以及辛勞的舉辦活動使複雜性流體實驗室大家之間感情更加融洽，還有大學朋友及其它實驗室的大家能夠一起討論功課以及一起放鬆心情。

最後，莫過於父母親對我的養育之恩和栽培，以及家人和女朋友的支持與關心，而得以完成碩士學業；此外，尚有許多曾幫助過我的人，雖無法盡舉，在此獻上最誠摯的敬意和謝意，所有感激無法言喻，僅以此論文獻給我所有感謝的人。

目錄

摘要.....	iii
誌謝.....	iv
目錄.....	I
圖目錄.....	IV
符號說明.....	IX
第一章 緒論.....	1
1-1 前言.....	1
1-2 文獻回顧.....	3
1-3 研究目的.....	8
第二章 實驗原理、方法及設備.....	22
2-1 實驗儀器.....	22
2-2 實驗裝置及說明.....	22
2-2-1 水平管流.....	22
2-2-2 垂直管流.....	23
2-2-3 垂直管流(兩側為線圈).....	23
2-2-4 垂直管流(兩側為磁鐵).....	23
2-2-5 垂直管流(下方為磁鐵).....	24
2-3 實驗步驟.....	24

2-3-1 水平管流.....	24
2-3-2 垂直管流.....	25
2-4 理論背景.....	26
2-5 訊號分析.....	28
第三章 結果與討論.....	42
3-1 各種不同裝置的結果比較.....	42
3-1-1 水平管流.....	42
3-1-2 垂直管流.....	42
3-1-3 垂直管流(兩側為線圈).....	43
3-1-4 垂直管流(兩側為磁鐵).....	43
3-1-5 垂直管流(下方為磁鐵).....	44
3-2 磁場與感應電壓之相對比較.....	44
3-2-1 位置與磁場之相對比較.....	44
3-2-2 位置與電壓之相對比較.....	45
3-3 感應電壓比較.....	46
3-3-1 以體積為變數之相對比較.....	46
第四章 結論.....	61
參考文獻.....	62

表目錄

表 1-1 磁性流體的製造方法.....	21
----------------------	----



圖目錄

圖 1-1 磁性流體構成圖.....	10
圖 1-2 直流電與交流電之差別	10
圖 1-3 磁流體受磁場之感磁情形	11
圖 1-4 Kwon et.al利用交流電電磁線圈量測於一靜態溶液中磁粒子之 體積分率 [2004]。	11
圖 1-5 Nicklin 等人發現感應電壓及速度之感應電壓關係[1986]..	12
圖 1-6 Singh 利用振盪系統系統來感應電壓[2002].....	12
圖 1-7 注入磁性流體至玻璃管內並藉由外部磁場引導之運動狀態， Ganguly, [2005]。	13
圖 1-8 Chen等人發現可互溶磁性液滴於毛細管中之運動數值模擬 [2003]	13
圖 1-9 磁性流體吸移管作用原理Greivell and Hannaford, [1997]。 .	14
圖 1-10 磁性流體閥門和幫浦在微流道內原理Hartshorne et al.[2004]	14
圖 1-11 不同空包率所產生之磁場[2002]	15
圖 1-12 Yamaguchi et al比較靜止與流動兩相不同之感應電壓變化 [2005]	15
圖 1-13 氣泡於垂直管中分布情況[2008]	16
圖 1-14 不同流動情況所產生之感應電壓[2008]	16

圖 1-15 利用兩組相同感應線圈(pick-up coils)來取得訊號[2009]..	17
圖 1-16 兩組相同線圈之感應電壓所產生時間差[2009]	17
圖 1-17 為磁性流體(4 ml)受外力以移動(0.05 m/s)產生感應磁場(B)之 時間磁場圖[2010].....	18
圖 1-18 為磁性流體(4 ml)受外力以移動(0.05 m/s)產生感應電壓(V)之 時間電壓圖[2010].....	19
圖 1-19 磁鐵與磁液體之磁通量密度比較.....	20
圖 2-1 各種線圈圖示	30
圖 2-2 磁性流體示意圖.....	30
圖 2-3 磁性液體 EMG905 之磁化率曲線圖.....	31
圖 2-4 丙三醇(甘油).....	31
圖 2-5 蒸餾水	32
圖 2-6 水平管流之裝置示意圖	32
圖 2-7 垂直管流之裝置示意圖	33
圖 2-8 垂直管流之裝置示意圖(加裝兩側激磁線圈).....	33
圖 2-9 垂直管流之裝置示意圖(感應線圈較小).....	34
圖 2-10 垂直管流之裝置示意圖(激磁線圈換成磁鐵).....	34
圖 2-11 垂直管流之裝置示意圖(下方線圈換成磁鐵+拿掉旁邊兩側磁 鐵).....	35

圖 2-12 垂直管流之裝置示意圖(感應線圈橫放).....	35
圖 2-13 電子天秤	36
圖 2-14 管內混和溶液	36
圖 2-15 水平管流裝置圖	37
圖 2-16 1cc之針管	37
圖 2-17 線圈組架構.....	38
圖 2-18 桌上型高斯計.....	38
圖 2-19 可程式電源供應器示意圖	39
圖 2-20 資料擷取器.....	39
圖 2-21 磁流體為 0.17CC時之原始訊號與利用FFT過濾後之訊號 .	40
圖 2-22 磁流體為 0.17CC時之時間域轉為頻率域圖形表示.....	40
圖 2-23 磁流體為 0.17CC時之時間域轉為頻率域圖形表示.....	41
圖 3-1 水平管流之影片截圖.....	48
圖 3-2 時間-位置圖及時間-速度圖	48
圖 3-3 兩側加裝激磁線圈之垂直管流影片截圖.....	49
圖 3-4 當磁液滴 0.15cc時所測量得到的位置-時間及速度-時間圖 .	49
圖 3-5 當磁液滴 0.15cc時所測量得到的感應電動勢	50
圖 3-6 將感應線圈換成較小線圈之垂直管流影片截圖	50
圖 3-7 當磁液滴為 0.23cc時所量測得到的位置-時間及速度-時間圖	51

圖 3-8 當磁液滴為 0.23cc 時使用較小之感應線圈測量得到的感應電動勢.....	51
圖 3-9 兩側為永久磁鐵之垂直管流影片截圖.....	52
圖 3-10 當磁液滴為 0.07cc 時使用永久磁鐵所量測得到的位置-時間及速度-時間圖	52
圖 3-11 當磁液滴為 0.07cc 時使用永久磁鐵測量得到的感應電動勢	53
圖 3-12 下方為永久磁鐵時偏移中心 15mm 之垂直管流影片截圖..	53
圖 3-13 當磁液滴為 0.15cc 時偏移中心 15mm 所量測得到的位置-時間及速度-時間圖	54
圖 3-14 當磁液滴為 0.15cc 時偏移中心 15mm 測量得到的感應電動勢.....	54
圖 3-15 當磁液滴偏移中心 15mm、10mm、5mm 測量得到的感應電動勢.....	55
圖 3-16 將感應線圈橫放之影片截圖	56
圖 3-17 當磁液滴為 0.15cc 時將感應線圈橫放測量得到的感應電動勢.....	57
圖 3-18 當磁液滴(0.21cc)通過一顆感應線圈時，由探棒所量測出感應磁場.....	57
圖 3-19 當磁液滴(0.16cc)通過一顆感應線圈時，所量測到的感應電動	

勢.....	58
圖 3-20 為在使用旁邊為永久磁鐵及下方線圈為 120V、3A 時，分別用 0.1cc、0.14cc 及 0.16cc 之磁液滴來量取感應電壓	58
圖 3-21 為下方為永久磁鐵及橫放感應線圈時，分別用 0.07cc、0.13cc 及 0.19cc 之磁液滴來量取的感應電壓	59
圖 3-22 為下方為永久磁鐵及橫放感應線圈時，分別用不同體積之磁液滴來量取的感應電壓.....	59
圖 3-23 為下方為永久磁鐵及橫放感應線圈時，分別用不同體積之磁液滴來量取的感應電壓誤差圖.....	60
圖 3-24 為下方為永久磁鐵及橫放感應線圈時，分別使用數目不同之磁鐵來產生 0.5KG、1.5KG、3KG 的磁場來量取感應電壓	60



符號說明

α	空包率
Δt	時間差
μ	流體黏滯度
ρ	流體密度
M_s	磁性流體飽和磁化率
V	感應電動勢
v	磁性流體移動速度
N	線圈開數
Φ	磁通量
B	磁通量密度
A	感應有效面積
ρ	磁場感應面積
B_z	磁力線方向之磁場
H	線圈磁通量密度
M	磁性流體感磁率



第一章 緒論

1-1 前言

近年來，流場量測大都使用攝影法來取得流場資訊，這種方法屬於非接觸式量測，但多數儀器普遍偏貴，以及量測條件往往受到限制，例如當量測流場為不可視化時，或量測目標進入了非透明的物體中，導致於影像部分受阻礙，不過亦有學者，利用非接觸式的都卜勒流速計 (Acoustic Doppler Velocimeter，簡稱 ADV)，利用聲波反射得到流速，但缺點也為儀器部分偏貴。而較早期量測流場所使用的接觸式測量，因為會影響到流場變化，故不考慮。本文將利用電磁感應原理應用於流場量測，此方式也為非接觸式量測，可量測磁性液滴在一可溶或不可溶溶液中之運動速度情形。

綠色科技能源越來越受到重視，替代能源也開始被廣為研究，大家紛紛開始開發新的能源，而經由法拉第定理可知磁液體在磁通量密度為非穩態時，可由磁生電產生感應電壓，因此能否產生感應電壓並加以利用也格外重要。本文利用電磁感應原理應用於流場量測，觀察微小的磁液滴在流場內運動時，是否抓的到產生的感應電壓，以及可以探討當磁性液滴之濃度和磁場改變時，會對應量測出的情形。

本文之磁性液滴的移動參考了許多文獻之後，又經過了多種方法的測試，決定的裝置為垂直式，此裝置能使我們最有效的量取到微小的磁液滴所產生的感應電壓訊號。磁液滴利用重力的影響，當自然落下至底部磁場的吸引範圍後，被底部磁場吸引加速磁液滴墜落速度，以及在感應線圈外部加磁鐵，給予一垂直梯度磁場，則當磁液滴通過垂直梯度磁

場時，會有感磁的情況發生，再經由電磁感應所量取到之訊號來做分析討論。

磁性流體(Ferrofluid)的起源為 20 世紀，1965 年由美國航空太空總署(NASA) Papell 發明，當時美國積極征服太空，並於阿波羅計畫中首創人類登陸月球，磁性流體因而首度亮相。因為太空人在外太空時，處於真空狀態，為了讓太空衣內保持在一大氣壓，頭盔可以自由的旋轉活動，並解決外太空的失重情形，以及為了解決太空衣的問題，磁性流體的真空封件因應而生，同時也利用磁性流體來解決在外太空失重情況下，液體火箭燃料的控制。

磁性流體的組成是由懸浮於載流體中之奈米級的鐵磁微粒組合之，磁性流體組合如圖 1-1，由奈米級磁性粒子(氧化鐵粒子)、表面活化劑(surfactant)與載基流體(base fluid)組成，其奈米粒子大小約為 10 nm。磁性流體最主要的製造方法是經由化學合成的方法，將表面活性劑依附在奈米級磁性粒子上面，為了防止粒子間的吸引產生凝聚，或因重力、離心力和磁力而產生沉澱，並將其均勻溶解於水性或油性之載基流體中，使其同時具有磁性而且可流動之雙重特性。而利用此特性，有別於一般流體之較不可操控性，磁性流體則可利用外部磁場加以控制流體流動，故而磁性流體通常亦被稱為智慧型流體或功能性流體，且因其奈米級粒子尺寸，可充分使用於相關先進生物科技與微奈米流體機械系統。

Papell 將強磁性磁鐵礦(magnetite)在粉碎機中粉碎成超微粒子，再加上介面活性劑，安定分散於溶媒，形成磁性流體，其磁性顆粒不會受到磁場、凡得瓦力或重力場之作用，產生凝聚而與液體分離。將磁性流體置於磁場中，由於磁場之作用，懸浮液中之磁性顆粒即往強磁場方向移動，同時亦帶動溶媒分子一起移動。

磁性流體的製程則可分為兩個階段，第一階段是把強磁性物質變成超微粒子或加工成超微粒子形狀的製程；第二階段是為防止強磁性超微粒子凝集，以介面活性劑包住強磁性超微粒子而分散的製程。磁性流體的製造方法除了粉碎法外，還有火花侵蝕法、共沉法、熱分解法、真空蒸發法、紫外線分解法及電著法(如表 1-1)。

磁流體現階段一般應用主要在於三大部分:(a)太空科技、(b)阻尼機制及(c)軸封技術。於太空應用中，因受無重力因素影響，傳統利用自然對流所設計之熱傳導機構(如熱管)無法有效應用，因而可使用磁性流體，並以外加磁場替代重力場產生對流效應。再者，磁流體之黏滯度會隨著外加磁場之存在而顯著增加，在常見的阻尼器中可藉由局部的磁場強度，來增大黏性效應，因而被廣泛應用為阻尼機制。而於軸封應用方面，則著眼於磁流體可為外加磁場所支持而附著於軸壁，無須如一般流體需要容器支撐，即可有效分隔軸封。

在其他未來應用方面，磁流體粒子之奈米級尺度及其於溫度變化下所產生之磁化率變化，亦可運用在新一代之電子冷卻系統，配合新近發展之微流道機構，可將原本於微流道中用於散熱用之工作流體加置磁性粒子，而利用磁性粒子吸熱產生之磁化變化現象，推動流體循環以進行熱量傳輸，達到散熱效果。同時磁性粒子因其優異之生物相容性，及其奈米特質，亦已被應用於生物醫學技術上，如細胞分離、精準釋藥與腫瘤細胞之追蹤與治療技術等。

1-2 文獻回顧

有關磁液體與電磁鐵結合的研究方向，目前多注重於量測，其中包

括液滴大小量測、流體移動速度、磁場的變化以及感應電壓大小、等。

感應電壓產生之條件，其原理可由法拉第定理可知，當磁通量密度為非穩態時，方能產生感應電壓，而產生非穩態磁通量密度之因素為激磁磁場本身之非穩態性(例如輸入為交流電電流如圖 1-2，因交流電之電流大小和方向都以週期性變化，固磁場利用右手定則時，磁場方向會因輸入電流方向而受改變)，其二為磁化影響 (如磁鐵與線圈有相對運動以及磁性流體受磁場磁化之情形，圖 1-3 為磁性流體受磁場作用影響所產生感應磁場)，最後為磁化磁場之磁化強度變異(如改變磁流體之濃度以及體積或者改變輸入電流大小時，磁化強度皆會受到改變)等。

故電能轉換之訊號，可間接量測其相關流場之運動、體積與濃度等性質。目前較為具體者均著重於利用交流電磁線圈量測於一靜態溶液中磁粒子之體積分率 Kwon et al.[1] 圖 1-4，利用交流電來量取磁粒子之體積分率可由其相對應之感應磁場強度求得。

磁流體之電能轉換研究方向大多著眼於能源非常珍貴之太空科技應用，方式乃利用熱磁效應將廢熱排放，並利用於排熱過程中磁流體之運動，產生電能再利用。然而轉換效率過低，於一般應用上並無太多迴響，近年來因磁流體之合成技術之進步與微製程之發展，Zahn[2]利用熱磁效應排放廢熱，再旋轉磁流體之粒子，通過一線圈，產生電流，並加以利用。

電能轉換亦可做為一非接觸量測流場之技術，其原理來自於法拉第電磁感應定律，由 Nicklin [3]所做出之法拉第實驗，磁場產生不均勻磁場的原因是利用磁鐵通過線圈時，與線圈產生相對運動，並利用磁鐵以自

由落體方法通過線圈中央，以及利用不同匝數之線圈，來比較，速度、匝數及感應電壓之間關係(如圖 1-5 所示)，由 Nicklin 之實驗可以證實，匝數與感應電壓成一線性關係，速度與感應電壓亦為線性關係，此作者另外利用理論法，將速度項單獨推導出，此外可以利用理論法之速度項，來驗證速度與電壓之比例關係。

電能轉換也可以利用在測量速度，wood 等人[4]亦利用重力加速度關係式，並以計算方法求出磁鐵通過現圈時之速度與位置間關係，並在線圈上加入不同的負載，以討論不同負載對於感應電壓與速度之影響，在此文獻裡面發現，速度與訊號之頻寬成一線性關係，並以能量的方式來表示與時間關係。

上述[3,4]乃利用自由落體的方法來量測感應電壓，而 kingman 等人[5]是利用馬達機制讓磁鐵通過線圈時，以穩定速度來產生感應電壓，在此實驗中發現最大電壓發生在線圈入、出口處，且感應電壓極值與線圈半徑倒數平方成正比，這表示當線圈半徑越大時，相對的感應電壓亦會減少，反之同理。在法拉第定理中磁通量密度亦跟電壓相關，Singh 等人[6]利用振盪系統，將磁鐵固定於一圓弧狀之軌道上如圖 1-6，並運用不同角速度通過磁場時所產生之磁場，並利用磁場與角度間之關係，來找出與電壓之關係式。

生醫近年來蓬勃發展，關於微流道的研究也越來越多，而其實磁性流體也可應用在醫療工程上，利用制癌劑混入磁性流體製成乳液，注入血管，從外部以磁鐵把有制癌劑的液體導入患部，以制癌劑治療癌症，因制癌劑除了殺死癌細胞也會殺死正常的細胞，利用磁性流體的性質藉由外加磁場將制癌劑集中患部，可減少正常細胞受到傷害。因此在可互溶質傳的問題上，如何去改善人類血液循環裡藥物的輸送是很重要的課

題。其次在醫療的應用為 X 光的造影劑，如牙齒治療用或胃癌檢診用之 X 光攝影，通常胃癌檢診用之 X 光造影劑為含有 BaSO₄ 的糊狀飲料。因為鐵氧體膠體粒子會吸收 X 光，所以磁性流體可用作造影劑，但此時並未利用磁性流體的磁化性質。

另一種有關於生醫的未來之應用是將藥物溶解到磁性流體中，經由外界磁場之牽引，可將藥物固定在特定之位置上，致此藥物可以快速到達並且停留在受損的細胞上，這樣的治療效率更好，因此可以精準的控制磁流體的位置也是一個可以探討的研究方向。根據hen等人 [7,8](如圖 1-7)，將磁性流體注入內有流體流動的玻璃管，再利用磁鐵將磁性流體引導到目標地堆積，發現磁性流體堆積對流體形成阻礙，造成磁性流體與流體間產生剪切力，以致於流體能夠攜帶走磁性流體且分散於流體中，且不斷的剝離減少磁性流體堆積區域。圖 1-8. Chen 等人發現可互溶磁性液滴於毛細管中之運動數值模擬，利用磁場的影響下，發現可互溶磁性液滴於毛細管中之運動情形，此運用亦可模擬預知磁性液滴在血管中之流動情況。

由此可知，能精準的控制磁液滴也是很重要的研究方向，根據 Nancy E. Greivell and Blake Hannaford[9]所研究之磁性定量吸管，可取樣至 0.2 μ l 以下，它原理是利用數組串聯之電磁鐵，分別產生磁場，使得阻塞式的磁流體，受磁場梯度關係而吸引，因而可控制磁流體量，控制原理如圖 1-9。

在未來的運用可以利用磁力來驅動流場[10-11]，且可精準控制磁力來驅動流體，圖 1-10 為 Hartshorne 等人在 2004 年所作的研究，在微流道中利用磁鐵導引磁流體製成可開啟之磁塞，設計成微閥門及微幫浦的機制。近幾年來，微機電快速地發展，零組件尺寸縮小，傳統運用的驅動

力量，如壓力差，這樣的驅動力量在微小流場中的作用是很小的，因此利用磁力來控制的方法變得備受矚目。

也有許多人將氣泡注入到磁液體裡面來研究觀察其感應電壓訊號，Helmholtz excitation coils 輸入交流電來量取氣泡與磁液體中之變化，Yamaguchi et al [12-14]中指出不同空包率(α)之流場，會影響感應出之電壓，如圖 1-11 所示當 α 值不同時，上層線圈所接受到的磁通密度會比下層所接受到的磁通密度少，原因為磁液體受重力影響，會往管子下層沉，以致於磁液體受交流電磁場影響時，下層磁通量密度會比上層磁通量密度高；另外此作者亦有比較靜止與流動中氣泡的不同時所量測之感應電壓訊號(如圖 1-12)，當交流電頻率較低時，靜止中所感應電壓與 α 值呈正比關係，且當靜止與流動空包率相同時，當空包率越小時感應電壓亦會相近。

除了上述所做之空包率與感應電壓關係外，kuwahara et al[15-16]有比較當氣泡不同形狀(如圖 1-13)以及大小時會與感應電壓之關係，由圖 1-14 可知，感應電壓會與所感應面積有關，當通過之感應線圈之磁流體面積越勻稱，則波形也越平滑，如果通過的為間斷性，則波形也震盪越多。

kuwahara et al 除了利用交流電磁場來探討氣泡與感應電壓之間的關係外，另外還提出了量取氣泡速度之機制[17-18]，此作者利用兩組相同機制線圈(圖 1-15)，利用訊號差異性，來取得 Δt (圖 1-16)，再利用線圈之距離差來反推速度，並與其他文獻所求得氣泡速度做比較，發現此方法為可行的。

關於磁性流體電能轉換量測之實驗[19]，吳啟鳴學長利用磁性流體感

磁特性，改變磁性流體體積讓磁通量密度改變，以及利用感應電動勢(EMF)與速度呈線性關係，來改變速度與體積。在實驗中可以發現，磁通量密度只受體積影響，並不會受到速度干涉，而感應電動勢大小及方向則受磁通量密度及速度影響，當速度越大或磁通量密度越大時，感應電動勢會增大，圖 1-17 為磁性流體(4 ml)受外力以移動(0.05 m/s)產生感應磁場(B)之時間磁場圖，圖 1-18 為磁性流體(4 ml)受外力以移動(0.05 m/s)產生感應電壓(V)之時間電壓圖，則原因可由法拉第定律得知。在實驗中亦有觀察磁鐵及磁流體中兩者不同之處，磁鐵本身具有偶磁性，所以在磁通量密度表現上有兩個波峰，磁流體本身為順磁性，所以磁通量密度具有一波峰(圖 1-19)。

依據法拉第定律 (Faraday' s law) [2,3]，磁流體磁通量(magnetic flux) 的變化可以產生感應電動勢 (induced emf)。目前，已有許多學術研究以及工業應用被發表出來 [10,11]，且電磁轉換的觀念未來可以應用至微型裝置 (micro-devices) 設計以及藥物傳遞 (medicine transportation) 的發展上 [15,16]

1-3 研究目的

磁液體可由磁生電可由上述之文獻回顧中得知，而從磁性流體電能轉換量測之實驗[19]也可得知，當速度越大或磁通量密度越大時，感應電動勢會增大，因此用磁滴體來做電能轉換是可行的。在本文中，將把磁液滴實際應用在流場實驗中，來觀察其液滴在實際管流內的型態及使用微小磁液滴是否能抓到產生的感應電壓訊號，並設計出能得到最好訊號之機制，且對量測到之感應電壓訊號做進一步分析。方法為底部放置永久磁鐵，上方放置一組感應線圈，使產生一均勻磁場，故可直接量取流體狀態(如磁液體之體積、速度)，再利用不同大小的磁液滴在管內的快速

移動來量取不同的電壓值，以及量取不同的磁場密度，若都能抓到這些訊號，就使用這些數據來驗證是否可套入法拉第定律中驗證。

在未來應用時可利用至液滴分割，體積控制為一重要要素，當液滴分裂速度極快時，無法確認體積是否正確，以及當分割之液滴進入線圈內部時，無法利用攝影裝置攫取影像分析之，因此利用磁能轉換可得知液滴狀態。以及在生醫應用及微混合器涉及磁粒子於環境流體之運動輸送，磁粒子在輸送過程中無法精準了解其運送情況，磁流體或磁粒子之濃度變化為一非常重要須要掌控與瞭解之項目。



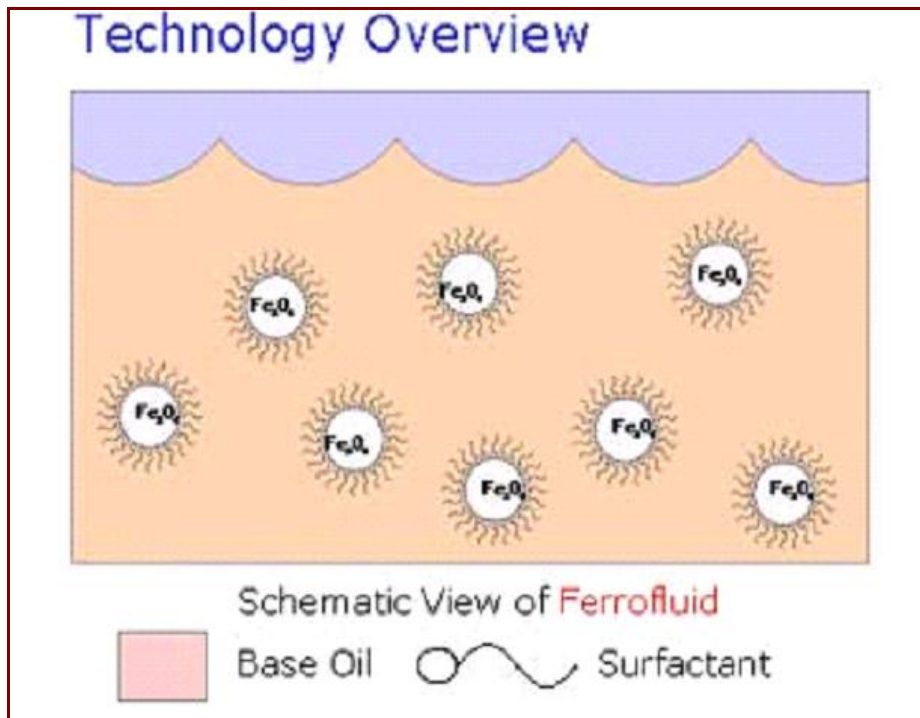


圖 1-1 磁性流體構成圖

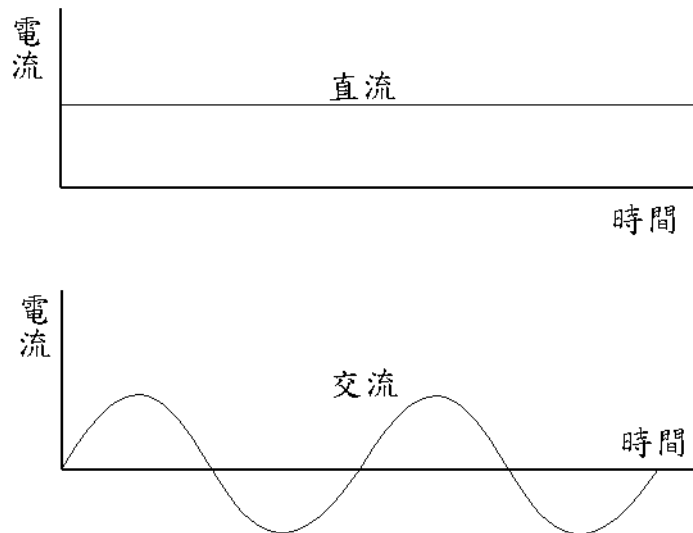


圖 1-2 直流電與交流電之差別

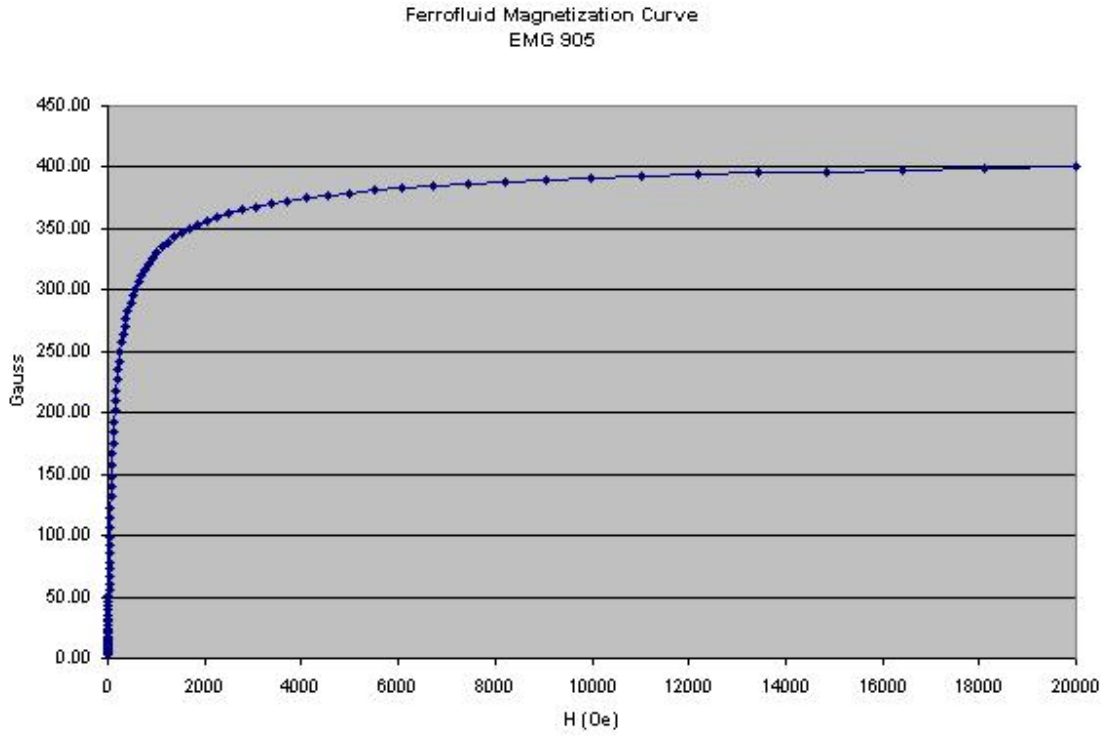


圖 1-3 磁流體受磁場之感磁情形

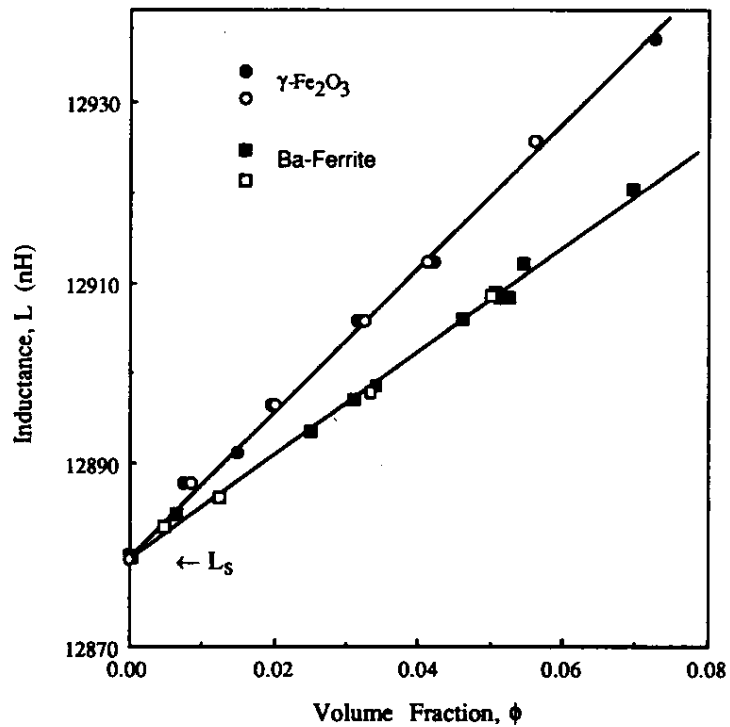


圖 1-4 Kwon et.al 利用交流電磁線圈量測於一靜態溶液中磁粒子之體積分率 [2004]。

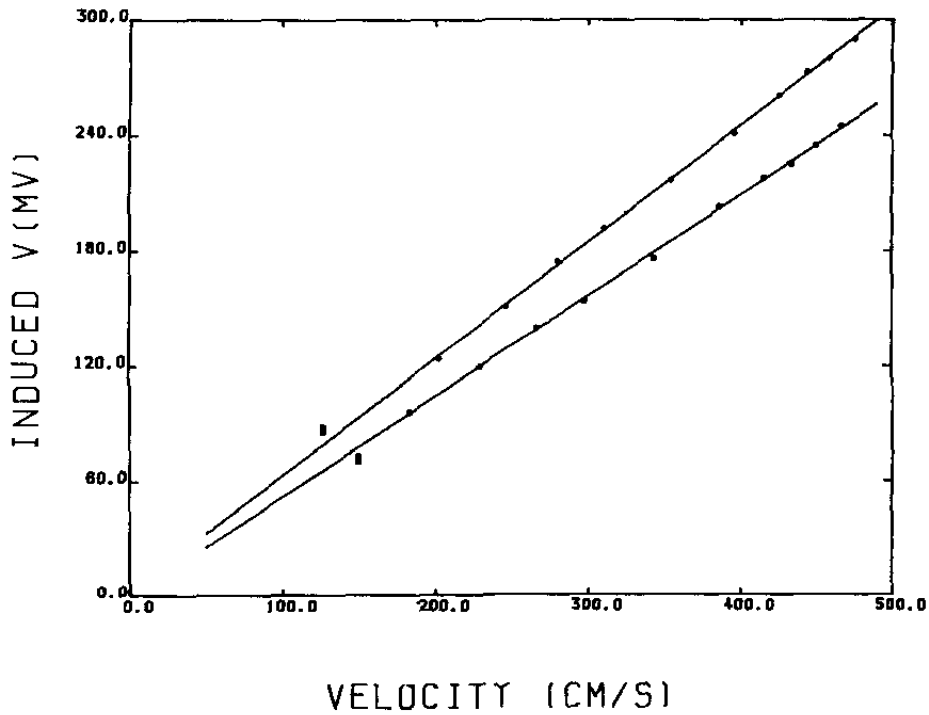


圖 1-5 Nicklin 等人發現感應電壓及速度之感應電壓關係[1986]

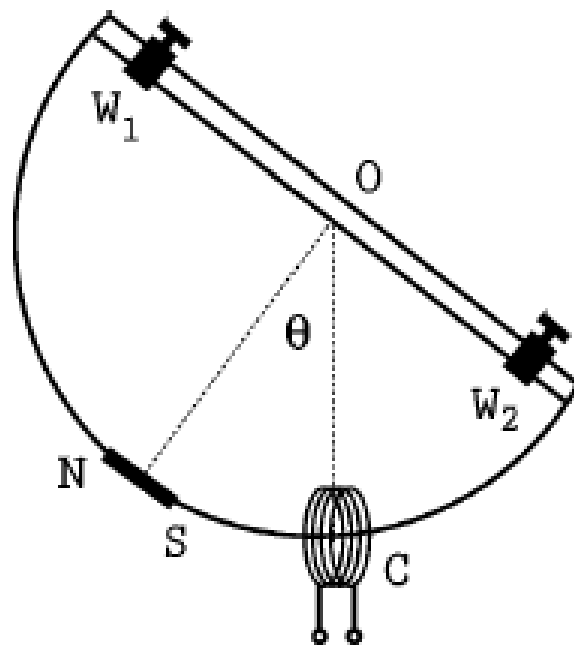


Fig. 1. A magnet (NS) attached to an oscillating system passes through a coil (C) periodically, generating a series of emf pulses.

圖 1-6 Singh 利用振盪系統系統來感應電壓[2002]

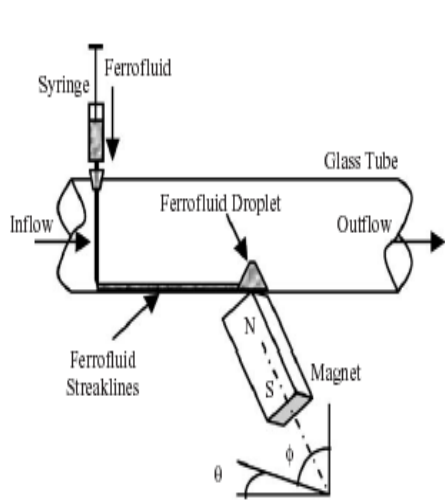


Fig. 1. The experimental setup.

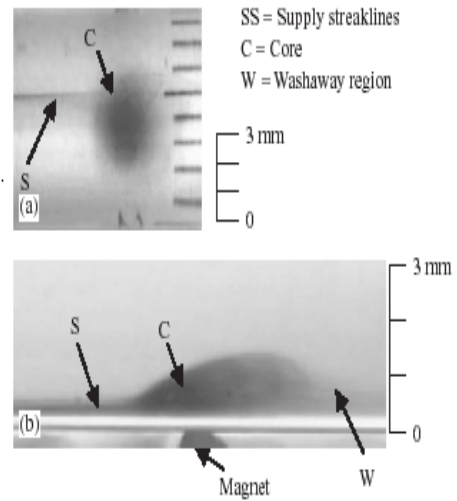


Fig. 2. Accumulation of ferrofluid near the dipole at $t = 20$ s: (a) top view, (b) front view. Volume of injected drop = $3 \mu\text{l}$, flow $Re = 250$. Accumulation phase continues till $t = 100$ s.

圖 1-7 注入磁性流體至玻璃管內並藉由外部磁場引導之運動狀態，Ganguly, [2005]。

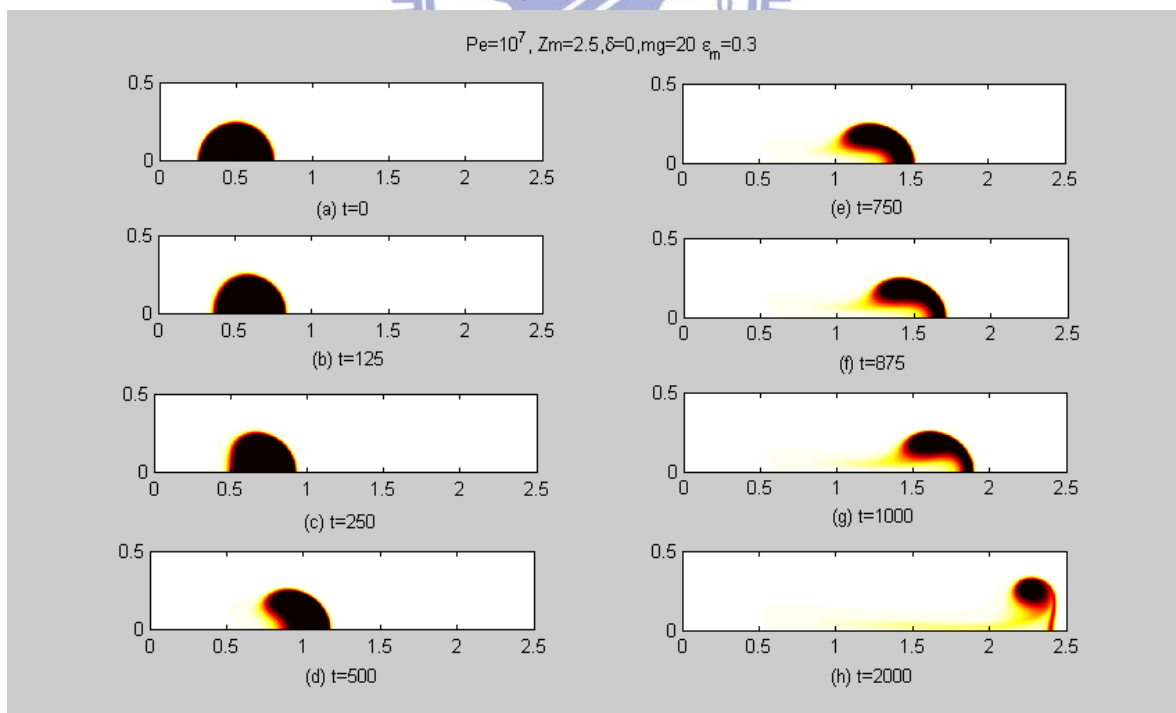


圖 1-8 Chen 等人發現可互溶磁性液滴於毛細管中之運動數值模擬[2003]

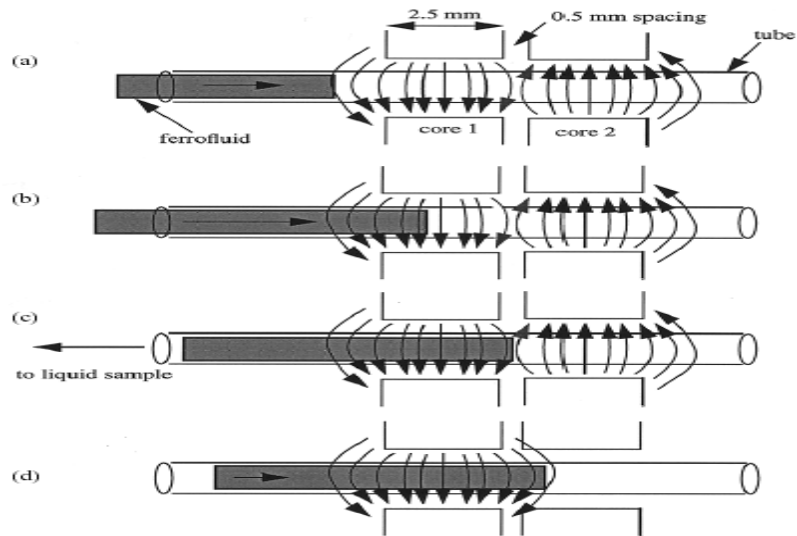


Fig. 7. The idea of the gradient-field modulation scheme for ferrofluid position control. In (a), core 1 and core 2 are energized simultaneously. The ferrofluid moves through the air-gap of core 1 in (b) and stops at a point in the space between the two air-gaps in (c). At this point, the end of the ferrofluid-magnetic pipette is placed in the biological liquid. Sampling occurs when the field in core 2 is "switched off" and the ferrofluid readjusts its position in (d). This position adjustment corresponds to a specific volume of liquid sampled.

圖 1-9 磁性流體吸移管作用原理 Greivell and Hannaford, [1997]。

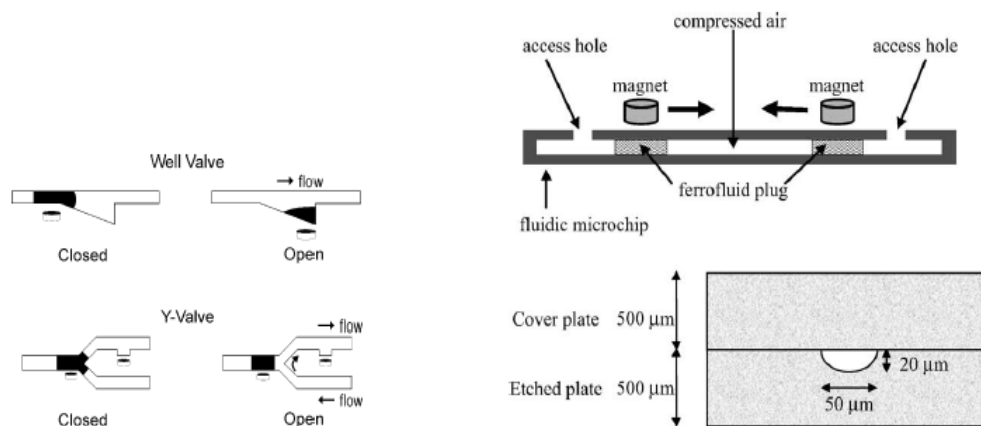


圖 1-10 磁性流體閥門和幫浦在微流道內原理 Hartshorne et al.[2004]

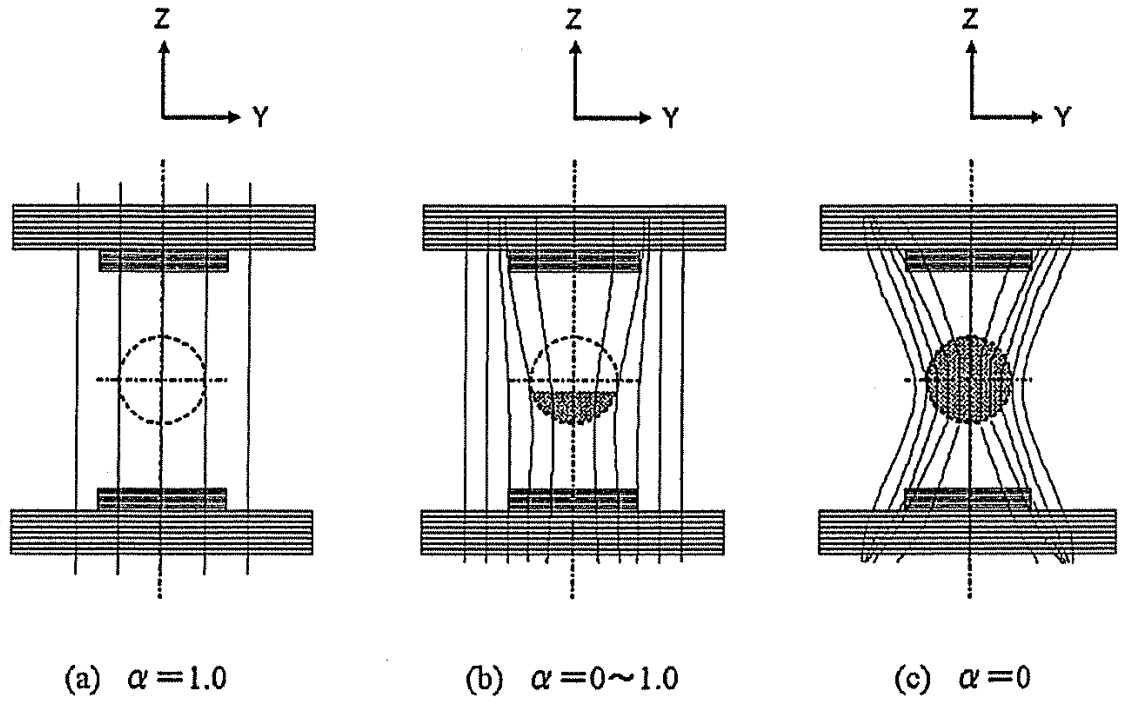


圖 1-11 不同空包率所產生之磁場[2002]

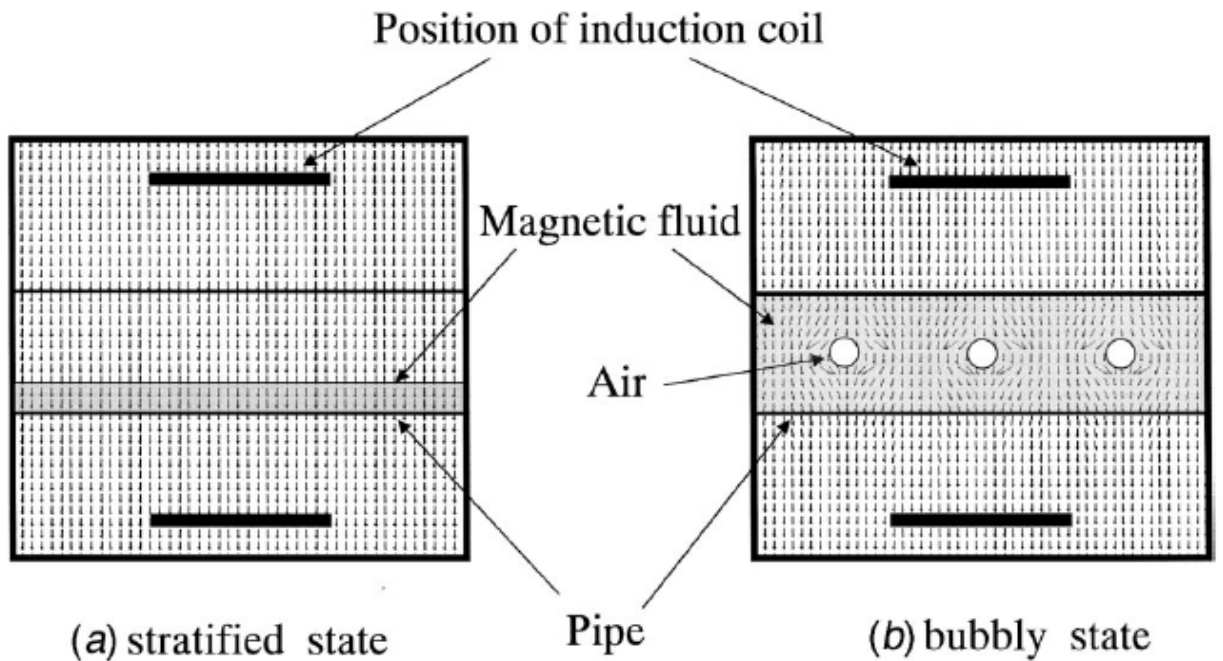


圖 1-12 Yamaguchi et al 比較靜止與流動兩相不同之感應電壓變化[2005]

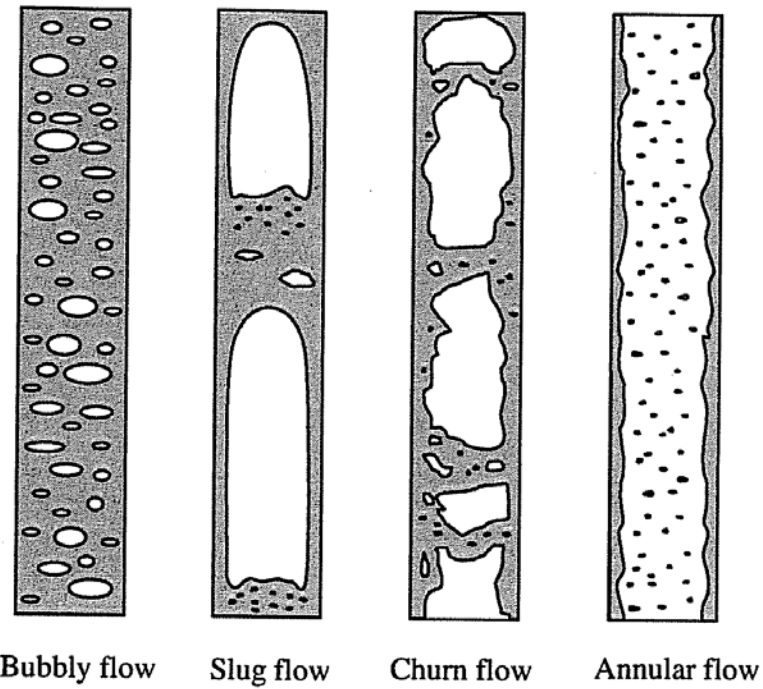


圖 1-13 氣泡於垂直管中分布情況[2008]

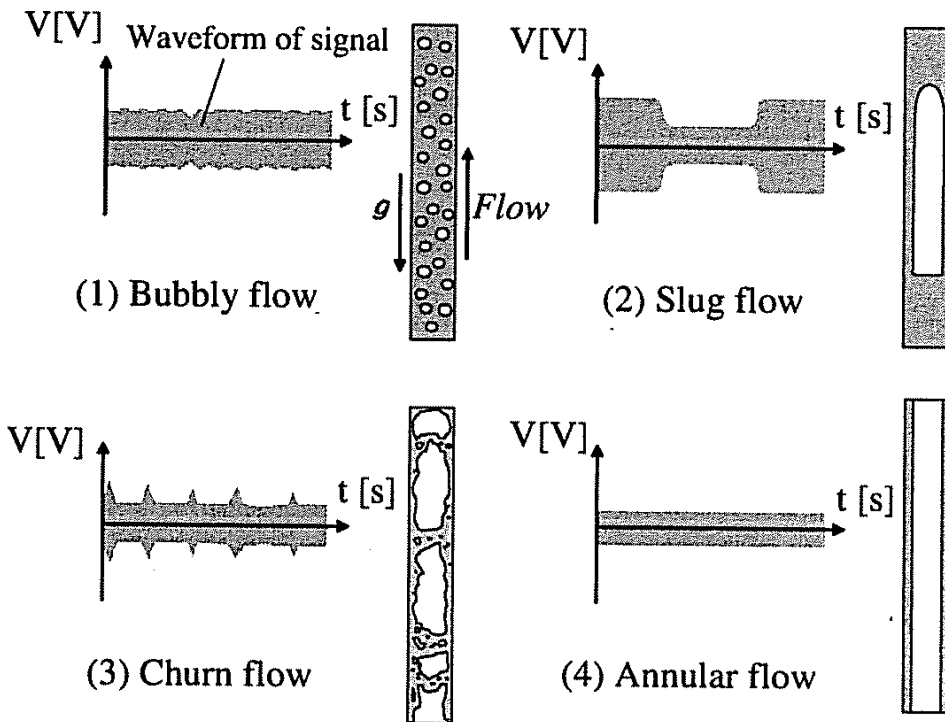


圖 1-14 不同流動情況所產生之感應電壓[2008]

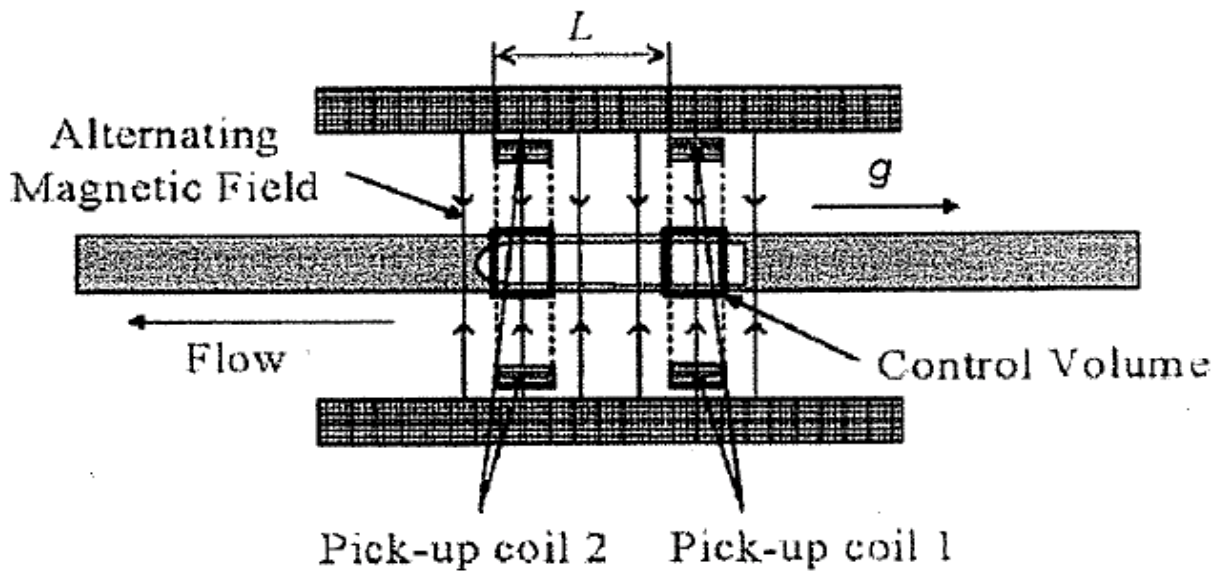


圖 1-15 利用兩組相同感應線圈(pick-up coils)來取得訊號[2009]

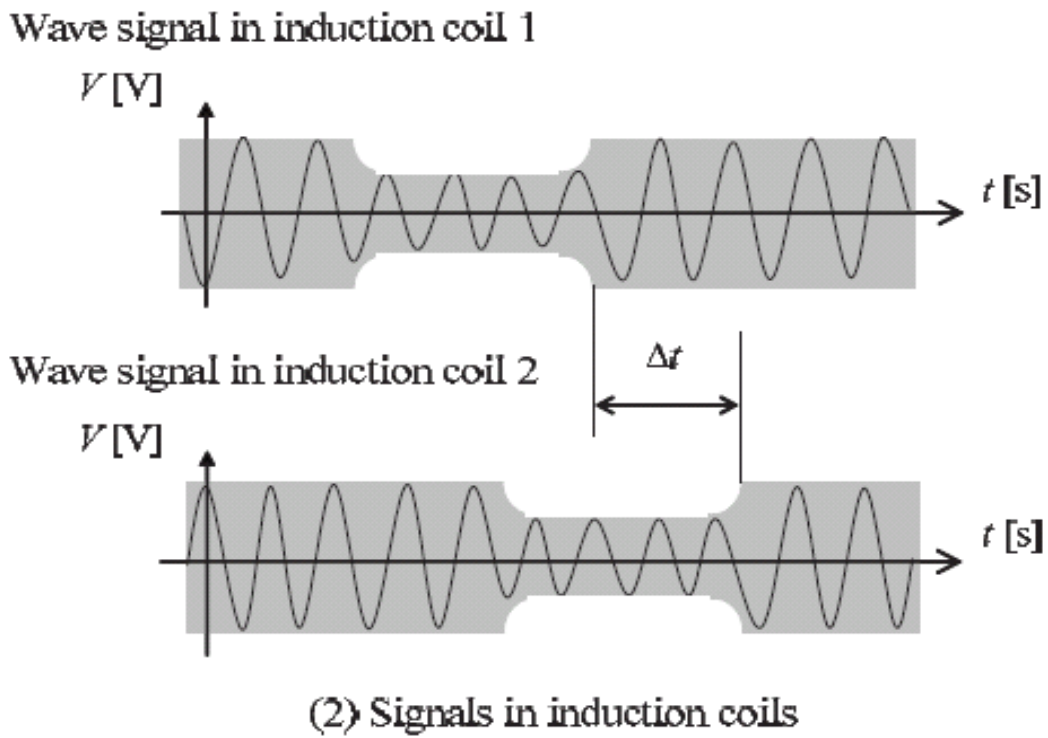


圖 1-16 兩組相同線圈之感應電壓所產生時間差[2009]

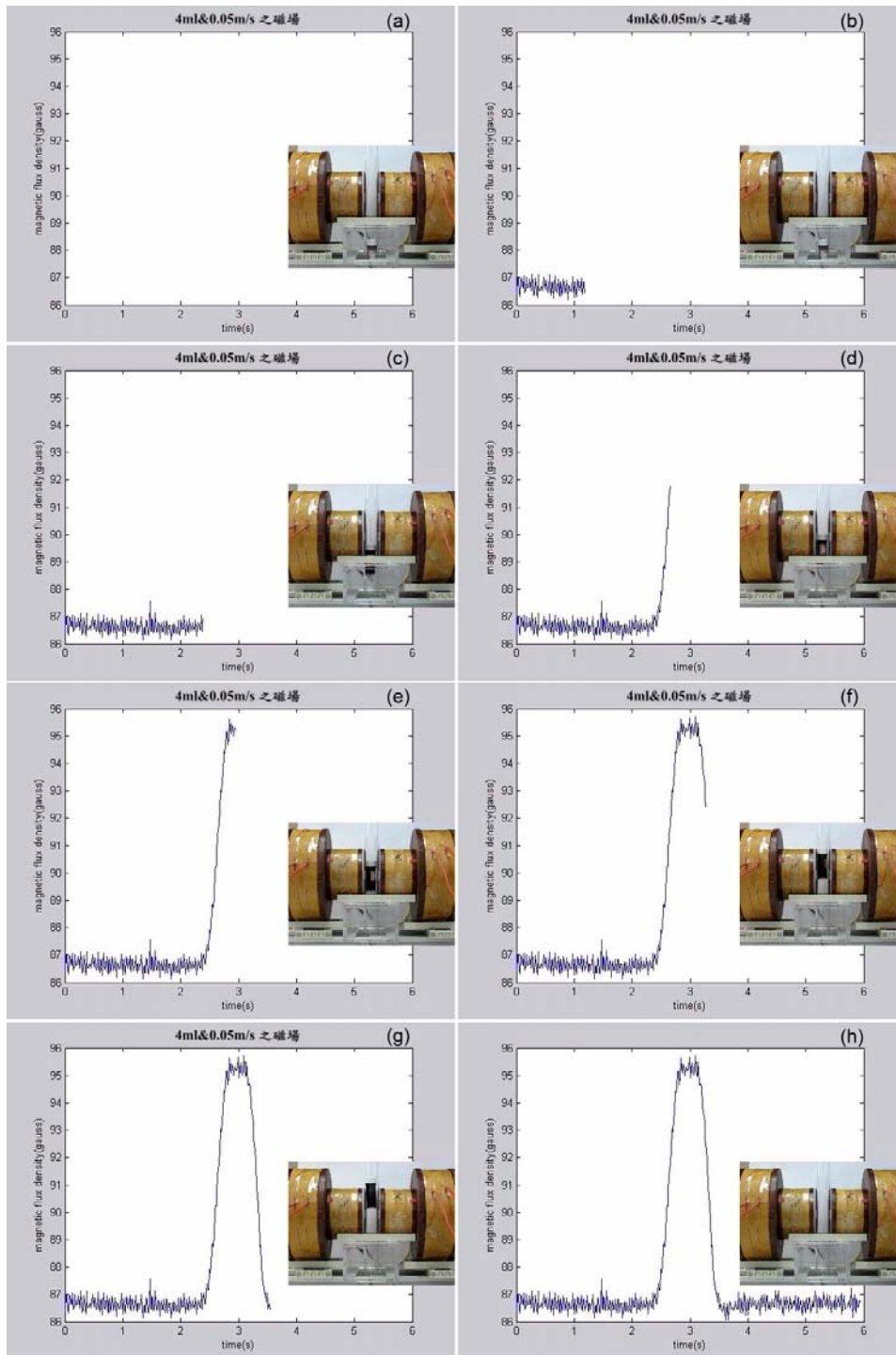


圖 1-17 為磁性流體(4 ml)受外力以移動(0.05 m/s)產生感應磁場(B)之時間
磁場圖[2010]

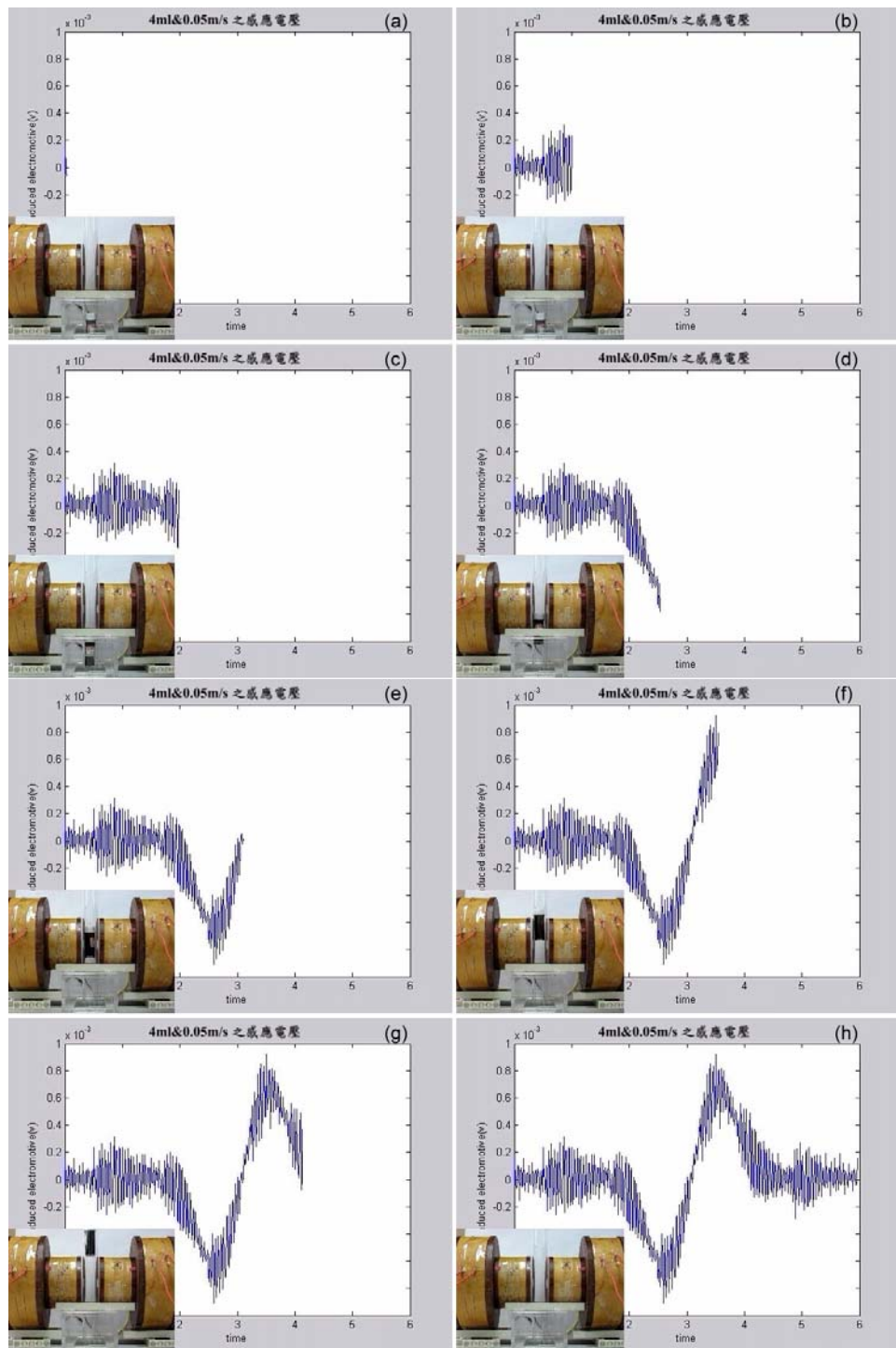


圖 1-18 為磁性流體(4 ml)受外力以移動(0.05 m/s)產生感應電壓(V)之時間電壓圖[2010]

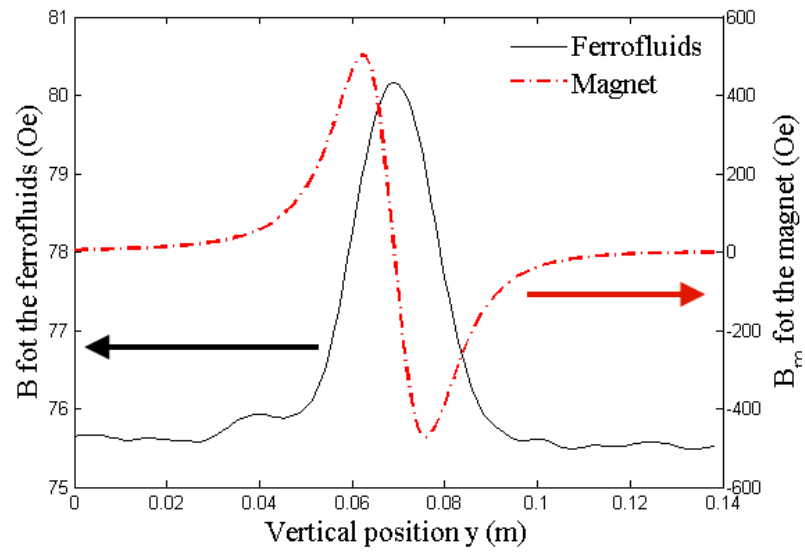


圖 1-19 磁鐵與磁液體之磁通量密度比較



表 1-1 磁性流體的製造方法

粉碎法	將強磁性磁鐵礦在粉碎機中粉碎成超微粒子，再加介面活性劑，安定分散於溶媒，形成磁性流體。
火花侵蝕法	把金屬電極插入液體中，在液體放電，使電極金屬以膠體粒子形溶入液體中，亦即火花放電使電極金屬蒸發，在液體中急冷，成為超微粒子。
共沉法	用第一鐵鹽與第二鐵鹽在水中反應時，會產生磁鐵礦微粒子，即可生成磁性流體。
熱分解法	把化學上不安定的有機金屬熱分解，析出金屬單體，此時析出的金屬成為超微粒子析出溶媒中，作為磁性流體。
真空蒸發法	在抽真空的鐘罩中，把金屬加熱蒸發，在真空中急冷，作成金屬的超微粒子，形成磁性流體。
紫外線分解法	以高能量光(紫外線)取代熱分解，分解有機金屬，作為金屬的超微粒子，形成磁性流體。
電著法	把水銀為陰極裝入 FeSO_4 水溶液，通電流而溶解，於是 Fe 離子析出，此時攪拌水銀析出超微粒子，分散於水銀中，預先使錫溶於水中，阻止鐵超微粒子成長，生成安定的水銀溶媒鐵膠體粒子磁性流體。

第二章 實驗原理、方法及設備

2-1 實驗儀器

本實驗有使用到的裝置有激磁線圈(長)、激磁線圈組(兩側)、感應線圈組(中)、感應線圈組(小)、電子天秤、玻璃管、塑膠軟管、量杯、鐵棒、永久磁鐵、高斯計、探棒、資料擷取器、高速攝影機、磁性流體(EMG905)及電腦。其中使用的玻璃管外徑為 14mm 、內徑為 11.7mm 、長 250mm ，激磁線圈(長)的外徑為 78mm 、內徑為 14.5mm 、長 89mm ，有 3600 匝，激磁線圈組(兩側)的外徑為 138mm 、內徑為 20mm 、長 58mm ，有 5280 匝，感應線圈組(中)的外徑為 78mm 、內徑為 15mm 、長 50mm ，有 2160 匝，感應線圈組(小)的外徑為 40mm 、內徑為 6mm 、長 58mm ，有 1200 匝，如圖 2-1 所示，所使用的永久磁鐵(大)直徑為 40mm 、厚度 3mm ，永久磁鐵(小)直徑為 20mm 、厚度 3mm 。

本實驗中所使用的磁性流體為型號 EMG905 的輕礦油基磁性流體，而玻璃管內的混合流體則是由甘油(丙三醇)和蒸餾水調配而成。其中 EMG905 磁性流體的黏滯度 $\mu=9\text{ cp}$ 、密度 $\rho_d=1.24\text{ gm/ml}$ 、飽和磁化率 $M_s=473.7\text{ Oe}$ 和原始磁化率 $X=1.9$ ，如圖 2-2、2-3，甘油的黏滯度 $\mu=1500\text{ cp}$ 、密度 $\rho=1.252\text{ gm/ml}$ ，如圖 2-4，蒸餾水的黏滯度 $\mu=0.001003\text{ kg/m}^*\text{s}$ 、密度 $\rho=998.2\text{ kg/m}^3$ ，如圖 2-5。

2-2 實驗裝置及說明

2-2-1 水平管流

圖 2-6 為水平管流的裝置示意圖，當輸入電流至激磁線圈後，磁液滴會由右邊往左邊吸入，管內的混合流體的數據為甘油 50g 和蒸餾水 3g，可以使液滴浮在中間而不接觸到壁面，進而減少因為壁面摩擦力而損失之速度，使用的裝置為激磁線圈(長)及感應線圈組(中)。

2-2-2 垂直管流

圖 2-7 為垂直管流的裝置示意圖，利用重力的關係，使磁液滴慢慢下落至磁場的吸引範圍，受到磁場吸引加速落下，可使液滴經過感應線圈時速度更快，更能抓到感應電動勢。管內混合流體的數據為甘油 33g 蒸餾水 8g，使用的裝置為激磁線圈(長)及感應線圈組(中)。

2-2-3 垂直管流(兩側為線圈)

圖 2-8 為垂直管流的裝置示意圖，參考吳啓鳴學長之裝置[19]，加裝旁邊兩側之激磁線圈來增強磁場，使得當磁液滴通過感應線圈組時能更容易量測出感應電動勢，管內混合流體的數據為甘油 33g 蒸餾水 8g，使用的裝置為激磁線圈(長)、激磁線圈組(兩側)及感應線圈組(中)。

圖 2-9 為將感應線圈換成較小之線圈的裝置示意圖，理由為嘗試把感應量測的範圍更集中在磁液滴通過速度最快的地方，可以得到更漂亮的感應電動勢，管內混合流體的數據為甘油 30g 蒸餾水 12g，使用的裝置為激磁線圈(長)、激磁線圈組(兩側)及感應線圈組(小)。

2-2-4 垂直管流(兩側為磁鐵)

由於發現使用兩側為激磁線圈會使雜訊較大，影響所量測之感應電

動勢，因此將兩側之激磁線圈換成永久磁鐵，裝置如圖 2-10，管內混合流體的數據為甘油 30g 蒸餾水 12g，使用的裝置為激磁線圈(長)、感應線圈組(小)及永久磁鐵(小)*6。

2-2-5 垂直管流(下方為磁鐵)

由於發現垂直管流實驗都會發生液滴偏移之情形，為了探討及解決這個問題，因此將兩側的磁場拿掉，並將下方的磁場用永久磁鐵代替，來研究液滴偏移與感應電壓之關係，裝置如圖 2-11，管內混合流體的數據為甘油 30g 蒸餾水 12g，使用的裝置為永久磁鐵(大)*5、感應線圈組(小)。

最後我們發現，將感應線圈改為橫放後，可以完美的量測到所需之訊號，以及液滴不會發生偏移之情形，裝置如圖 2-12，管內混合流體的數據為甘油 30g 蒸餾水 12g，使用的裝置為永久磁鐵(大)*5、感應線圈(中)一顆。

因此最後決定所使用的裝置為，用管子貫穿一顆感應線圈，下方放置永久磁鐵，方能得到最好的量測結果。利用此架構可以觀測出磁性流體通過感應線圈和探棒後，磁能轉換之電壓值與位置之間關係比較以及量測出磁場強度與位置之間關係比較。

2-3 實驗步驟

2-3-1 水平管流

實驗開始的前置作業為，先倒出 50g 甘油及 3g 蒸餾水到量杯內，重量則是用電子天秤調整(如圖 2-13)，重量秤量好後使用鐵棒攪拌，攪拌至

量杯內的混合溶液到達透明程度(如圖 2-14)，之後倒入插好軟管之玻璃管中，接著將玻璃管插入激磁線圈裡並且水平放置(如圖 2-15)，然後開啟高速攝影機，將攝影鏡頭調整到適當範圍，並檢查高速攝影機設定是否正確。

開啟資料擷取器及 Fluke DAQ 4.0，檢視電腦裡顯示的訊號是否穩定，如果發現雜訊過大，檢查磁鐵及感應線圈是否有平行放置，或是附近是否有人在走動導致震動到機台產生影響及附近是否有正在使用之電子產品，測試沒問題之後把資料擷取器關閉。

接著使用 1cc 之針管(如圖 2-16)吸取磁液滴，將針管倒至並輕彈針管使磁液體都下流後，慢慢擠出管內的空氣使針管內部完全都為磁液體，為了避免磁液滴接觸空氣太久而硬化，所以必須盡速注入磁液滴至管內，磁液滴的量可由針管外部刻度所知，注入方法為將針插入軟管內，由於軟管的材質有延展性，因此針頭拔出後並不會造成有液體流出，接著使用磁鐵慢慢的把磁液滴吸入到磁場的吸引範圍，開啟電源供應器並輸出電流後，造成磁液滴吸入完成實驗。

當單一實驗結束後，關閉電源供應器的電流輸出以免線圈過熱，如要繼續實驗，需記下新的針管刻度，則重附上述步驟即可，如果當線圈溫度溫熱時，必須停止實驗，並等待線圈溫度冷卻至常溫，方可繼續進行。

2-3-2 垂直管流

實驗開始的前置作業為，先倒出 30g 甘油及 12g 蒸餾水到量杯內，之後步驟與水平管流相同，將混合液倒入玻璃管後再把玻璃管插入至底

部線圈裡，並仔細調整兩邊的感應線圈和磁鐵到達平行(如圖 2-17)，然後開啟高速攝影機，將攝影鏡頭調整到適當範圍，並檢查高速攝影機設定是否正確。

為了確保實驗時所使用的磁場為正向磁場，實驗前先以高斯計探棒(如圖 2-18)進行磁場的量測，接著輸入激磁線圈所需之電壓及電流至電源供應器(如圖 2-19)中，但先不要輸出電流以免發生危險，連接資料擷取器(如圖 2-20)和高斯計(如圖 2-18)於電腦，接著開啟資料擷取器及 Fluke DAQ 4.0，檢視步驟與水平管流相同。

接著使用 1cc 之針管吸取磁液滴，方法與水平管流相同，注入時並保持液滴在正中心的位置，接著開啟資料擷取器及高速攝影機，並當液滴下落至離管口約 5 公分的距離時，將電源供應器電流輸出使下方線圈產生磁場，磁液滴被加速吸入後完成實驗。

當單一實驗結束後，跟水平管流一樣，關閉電源供應器的電流輸出以免線圈過熱，如要繼續實驗，記下新的針管刻度，則重附上述步驟即可，如果當線圈溫度溫熱時，必須停止實驗，並等待線圈溫度冷卻至常溫，方可繼續進行。

當實驗全部結束後，將量測數值以 Excel 形式匯出，並且以 MATLAB 進行繪圖，並將影像跟訊號做同步處理以及後續分析訊號與速度動作。

2-4 理論背景

法拉第電磁感應定律為電磁學中之基本定律，公式如下：

$$V = -N \left(\frac{d\phi}{dt} \right) \quad (1)$$

其中V為感應電壓;N為感應線圈匝數; Φ 為磁通量;t為時間,磁通量改變情況如下(磁場間本身會隨時間改變、磁場本身有相對運動、以及磁場間有一介質,其介質會隨磁場而改變磁化強度、、、等)。公式中“-”代表方向性,電動勢的方向(公式中的負號)由冷次定律提供。

其中,法拉第電磁感應定律中之磁通量可以寫成下式:

$$\phi = \int B \cdot dA \quad (2)$$

其中,B、A 分別代表磁通量密度及與磁場垂直之感應面積大小。由以上公式可看出,磁通量是由通過面積與垂直之磁場通量所得,並且可由磁場密度及面積所求得。將(2)式轉換圓柱座標,以利計算,如下式表示:

$$\phi = \int_0^R B_z (2\pi\rho) d\rho \quad (3)$$

其中 ρ 為受磁場感應面積,此公式可以說明當感測物形狀為圓柱形時,將可利用此方式計算。

磁通量密度是由線圈磁通量密度及磁液體之磁化強度所得,以下式表示:

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (4)$$

上述式子表示當磁液體通過磁場時,線圈磁通量密度為一定值(H=constant),但磁液體之磁化強度會隨線圈位置改變時,而有改變,當通過線圈中心點時,線圈磁通量密度為最大。

因實驗中會利用不同速度量取感應電動勢及磁通量密度,所以利用連鎖律將速度項顯示出:

$$\frac{dB_z}{dt} = \left(\frac{dB_z}{dz} \right) \left(\frac{dz}{dt} \right) \quad (5)$$

其中 dz/dt 為一速度項,我們可以利用此公式,將速度成為考慮變數之一。

將(3)、(5)兩式代入(1)中，如下式表示

$$V = -Nv \int_0^R \left(\frac{dB}{dz} \right) (2\pi\rho) d\rho \quad (6)$$

上述公式可以表示，法拉第定律可改變之變數包含，線圈匝數、相對移動速度、磁場變化與線圈大小皆會改變感應電動式大小。

因實驗中感應線圈在製作時重疊現象難免發生，固本文利用修正因子(α)來預估最大感應電動勢，故將(6)式改寫為

$$V = -(\alpha v_0) Nv \int_0^R \left(\frac{dB}{dz} \right) (2\pi\rho) d\rho \quad (7)$$

因此利用上式可以利用 B(磁通量密度)、A(感應面積)、 α (修正因子)、 v_0 (磁液體體積)來預測感應電動勢。其中在本文 B(磁通量密度)之求法，利用體積與磁通量密度之比例關係額外加入磁場即為磁通量密度。



2-5 訊號分析

因實驗裝置所造成誤差(來自於環境、儀器...等)，固使得感應電動勢之原始訊號有雜訊產生(圖 2-21)，由圖 2-21 原始訊號(藍色線部分)可以明顯看出雜訊為周期之跳動，如能將雜訊濾除，則能更有利於數據分析。

本研究採用 Matlab 內建之快速傅立葉轉換(Fast Fourier Transform, FFT)[20]來消除雜訊，其步驟如下：

(1) 將原始時間域(time domain)訊號利用(8)式轉換為頻率域(frequency domain)

$$G\left(\frac{n}{N \cdot \Delta T}\right) = \sum_{k=0}^{N-1} g(k \cdot \Delta T) e^{-j2\pi nk/N} \quad (8)$$

其中， N 和 ΔT 分別為數據個數和時間間隔，時間域和頻率域的函數分別為 $g(k \cdot \Delta T)$ 和 $G(\frac{n}{N \cdot \Delta T})$ ，如圖2-22所示，訊號主導頻率為中間域。

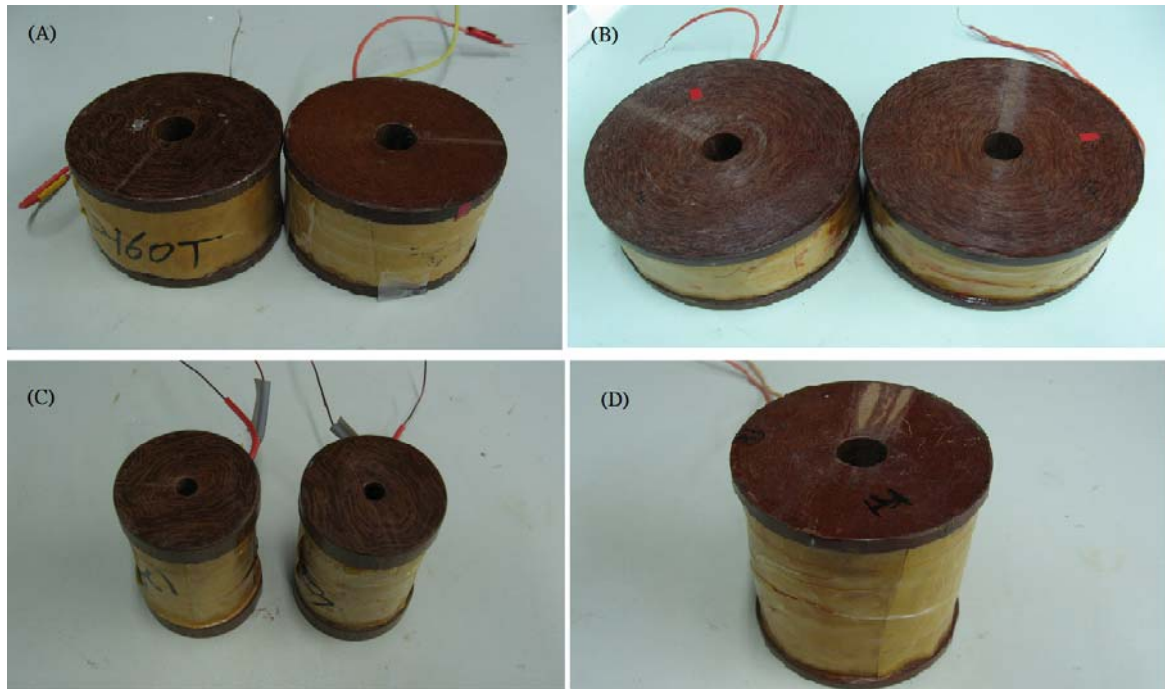
(2) 過濾高頻的雜訊；

(3) 將過濾完畢的頻率域利用逆傅立葉轉換 (inverse FFT) 轉變成時間域

$$g(k \cdot \Delta T) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} G\left(\frac{n}{N \cdot \Delta T}\right) e^{-j2\pi nk/N} \quad (9)$$

轉換後之圖形如圖2-23中表示，經由FFT過濾後留下主要頻域，雖然刪除雜訊波後，感應電動勢會稍微變小，但訊號表現的比原訊號更平滑。





(A) 感應線圈組(中)

(B) 激磁線圈組(兩側)

(C) 感應線圈組(小)

(D) 激磁線圈

圖 2-1 各種線圈圖示

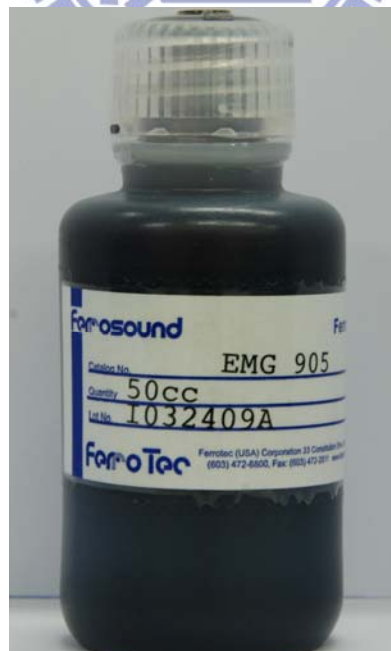


圖 2-2 磁性流體示意圖

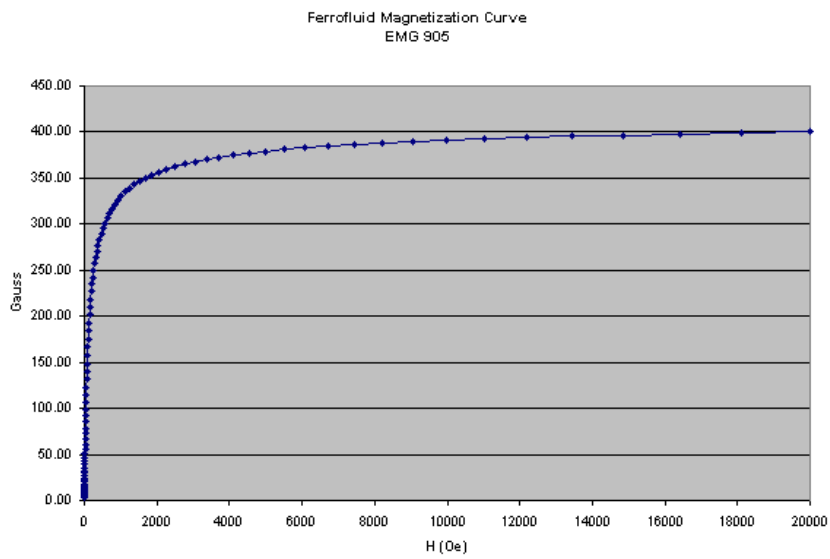


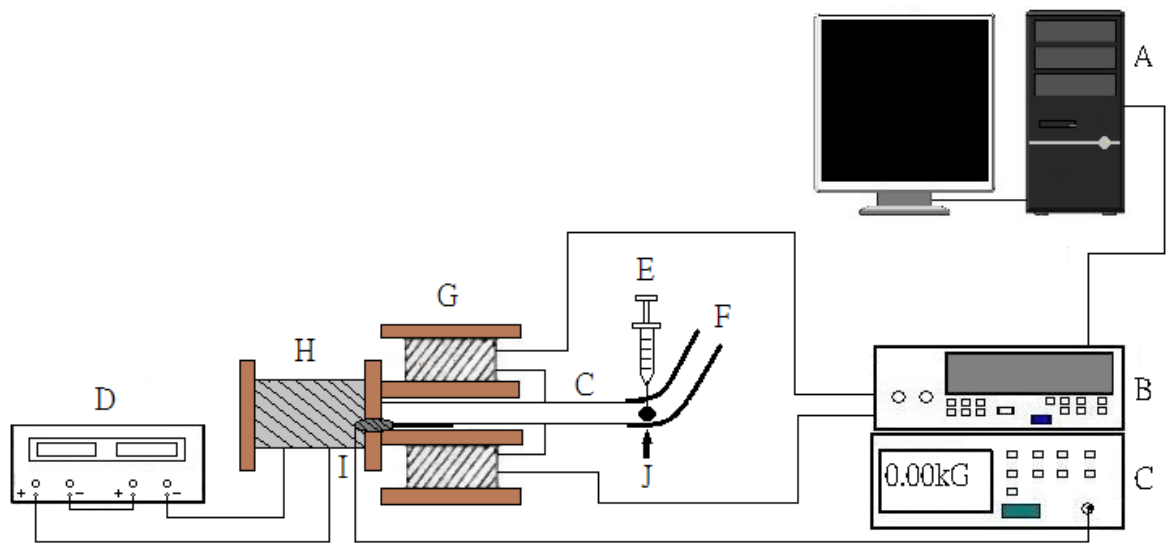
圖 2-3 磁性液體 EMG905 之磁化率曲線圖



圖 2-4 丙三醇(甘油)

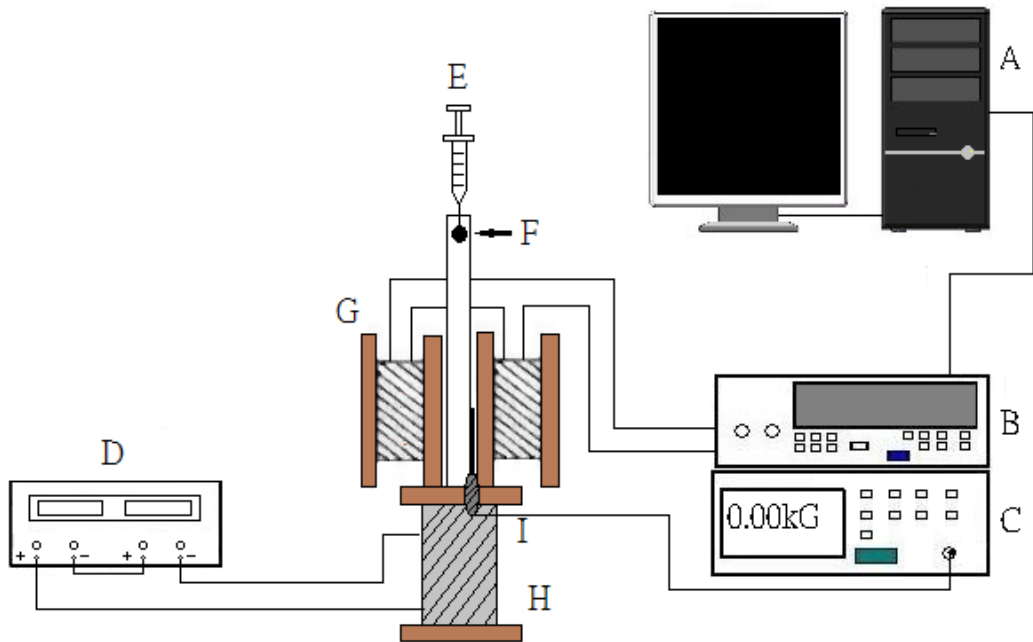


圖 2-5 蒸餾水



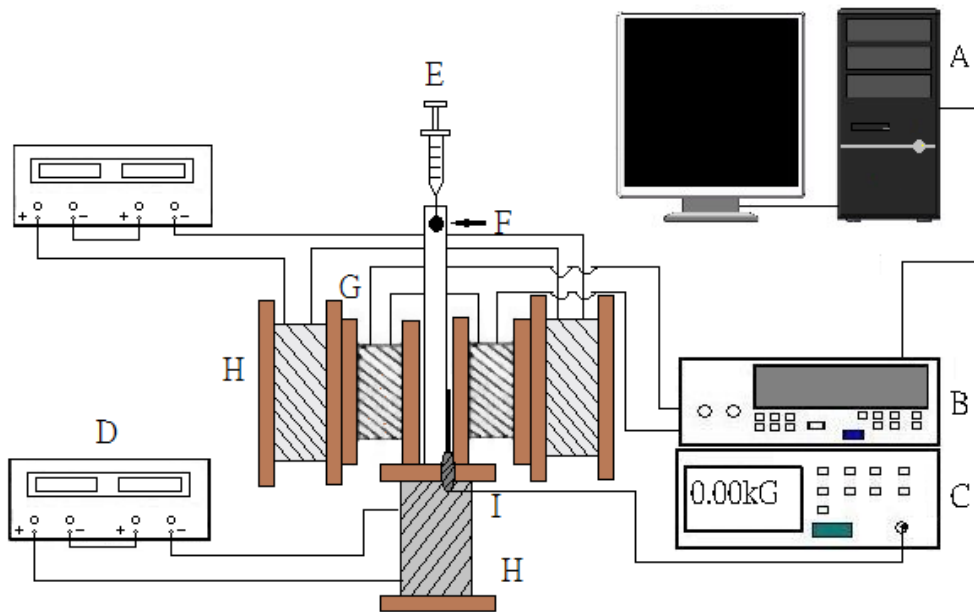
- | | |
|-----------------|---------------------|
| A: PC | F: Hose |
| B: Data Logger | G: Induction Coil |
| C: Gauss Meter | H: Excitation Coil |
| D: Power Source | I: Transverse Probe |
| E: Needle | J: Magnetic Droplet |

圖 2-6 水平管流之裝置示意圖



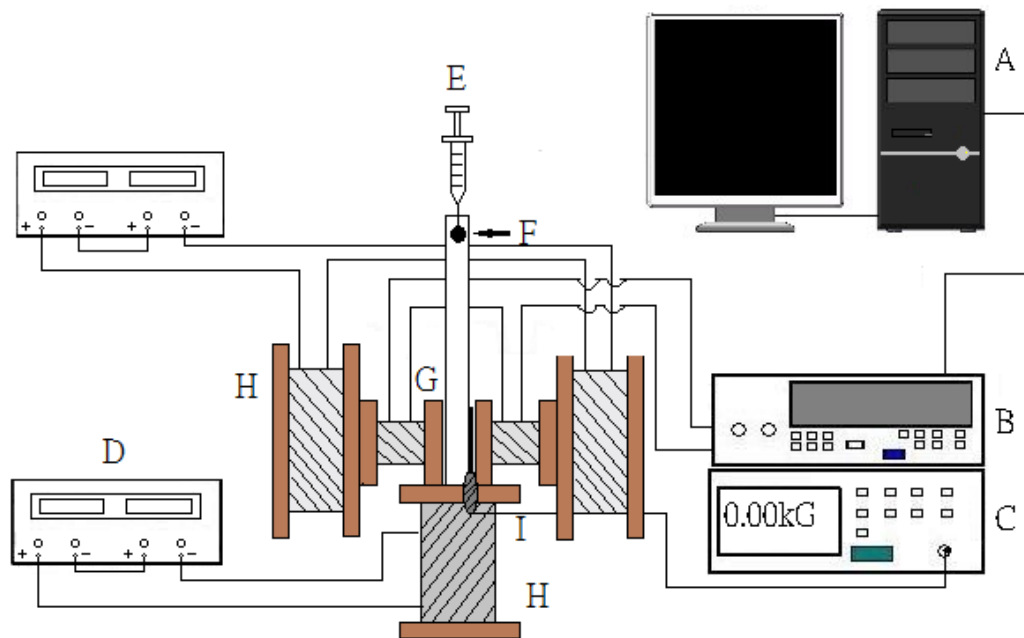
- | | |
|-----------------|---------------------|
| A: PC | F: Magnetic Droplet |
| B: Data Logger | G: Induction Coil |
| C: Gauss Meter | H: Excitation Coil |
| D: Power Source | I: Transverse Probe |
| E: Needle | |

圖 2-7 垂直管流之裝置示意圖



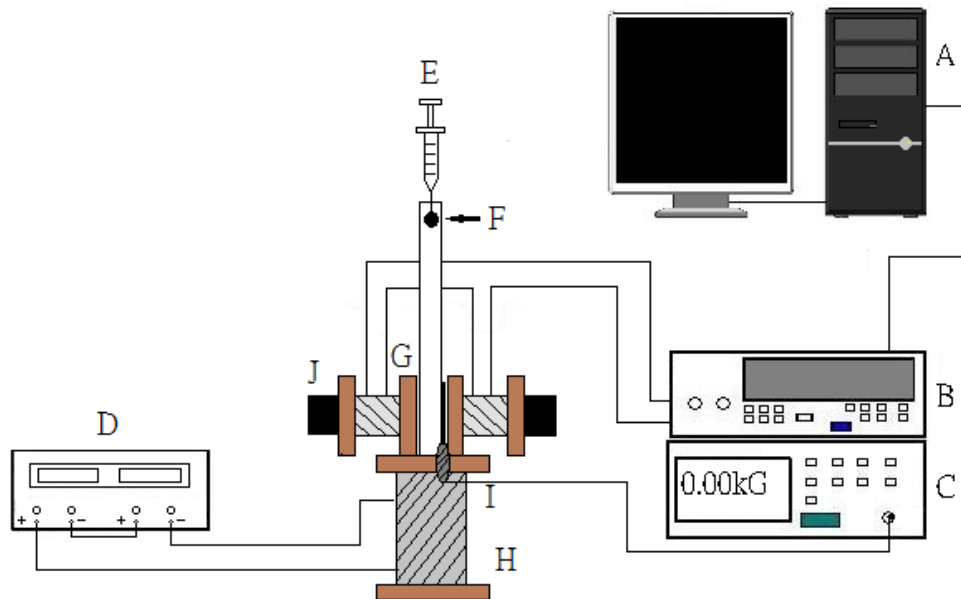
- | | |
|-----------------|---------------------|
| A: PC | F: Magnetic Droplet |
| B: Data Logger | G: Induction Coil |
| C: Gauss Meter | H: Excitation Coil |
| D: Power Source | I: Transverse Probe |
| E: Needle | |

圖 2-8 垂直管流之裝置示意圖(加裝兩側激磁線圈)



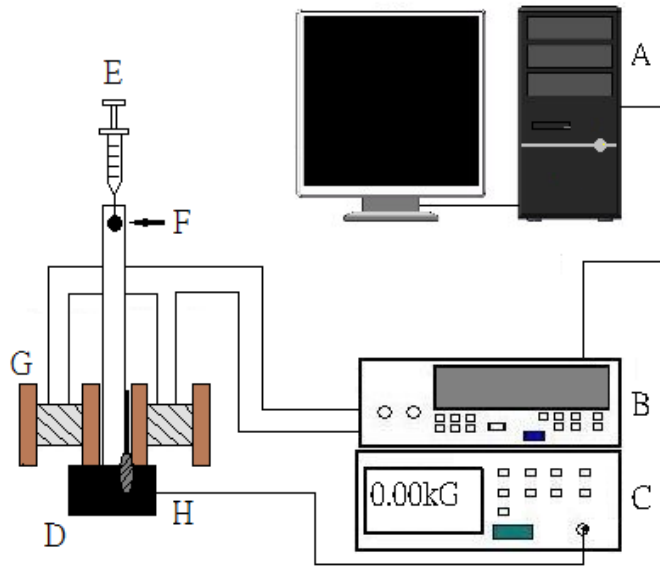
- | | |
|-----------------|---------------------|
| A: PC | F: Magnetic Droplet |
| B: Data Logger | G: Induction Coil |
| C: Gauss Meter | H: Excitation Coil |
| D: Power Source | I: Transverse Probe |
| E: Needle | |

圖 2-9 垂直管流之裝置示意圖(感應線圈較小)



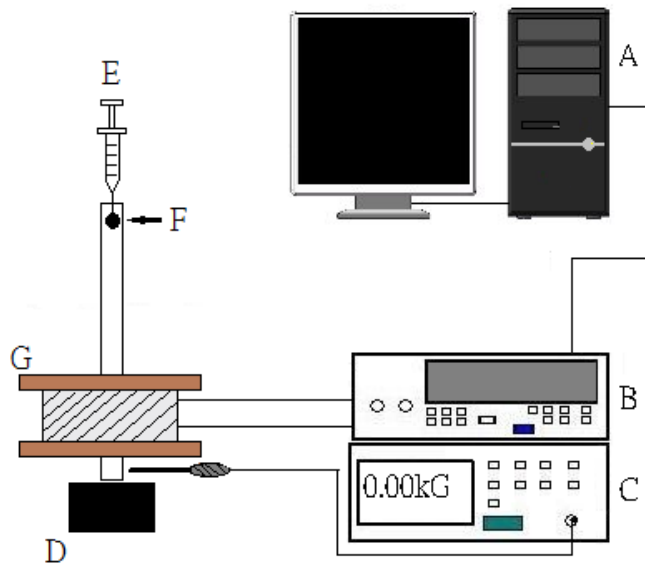
- | | |
|-----------------|---------------------|
| A: PC | F: Magnetic Droplet |
| B: Data Logger | G: Induction Coil |
| C: Gauss Meter | H: Excitation Coil |
| D: Power Source | I: Transverse Probe |
| E: Needle | J: Magnet |

圖 2-10 垂直管流之裝置示意圖(激磁線圈換成磁鐵)



- | | |
|----------------|---------------------|
| A: PC | F: Magnetic Droplet |
| B: Data Logger | G: Induction Coil |
| C: Gauss Meter | H: Transverse Probe |
| D: Magnet | |
| E: Needle | |

圖 2-11 垂直管流之裝置示意圖(下方線圈換成磁鐵+拿掉旁邊兩側磁鐵)



- | | |
|----------------|---------------------|
| A: PC | F: Magnetic Droplet |
| B: Data Logger | G: Induction Coil |
| C: Gauss Meter | |
| D: Magnet | |
| E: Needle | |

圖 2-12 垂直管流之裝置示意圖(感應線圈橫放)



圖 2-13 電子天秤

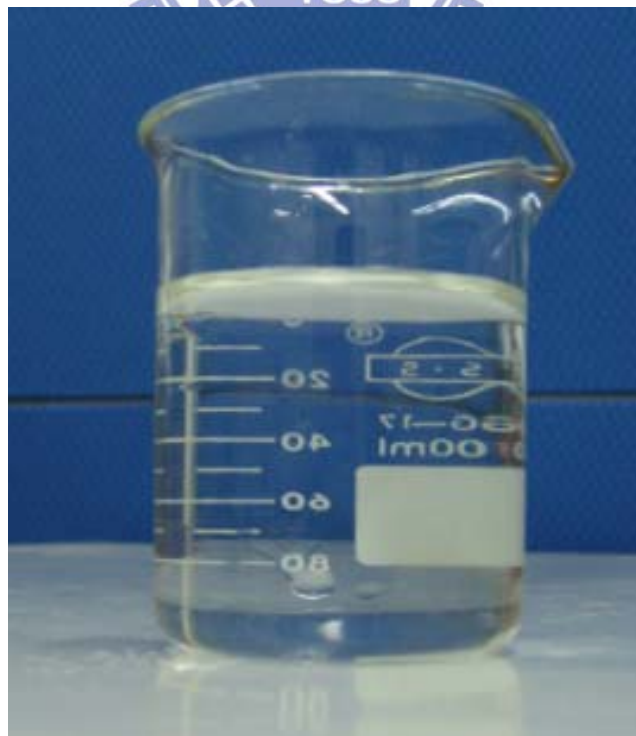


圖 2-14 管內混和溶液

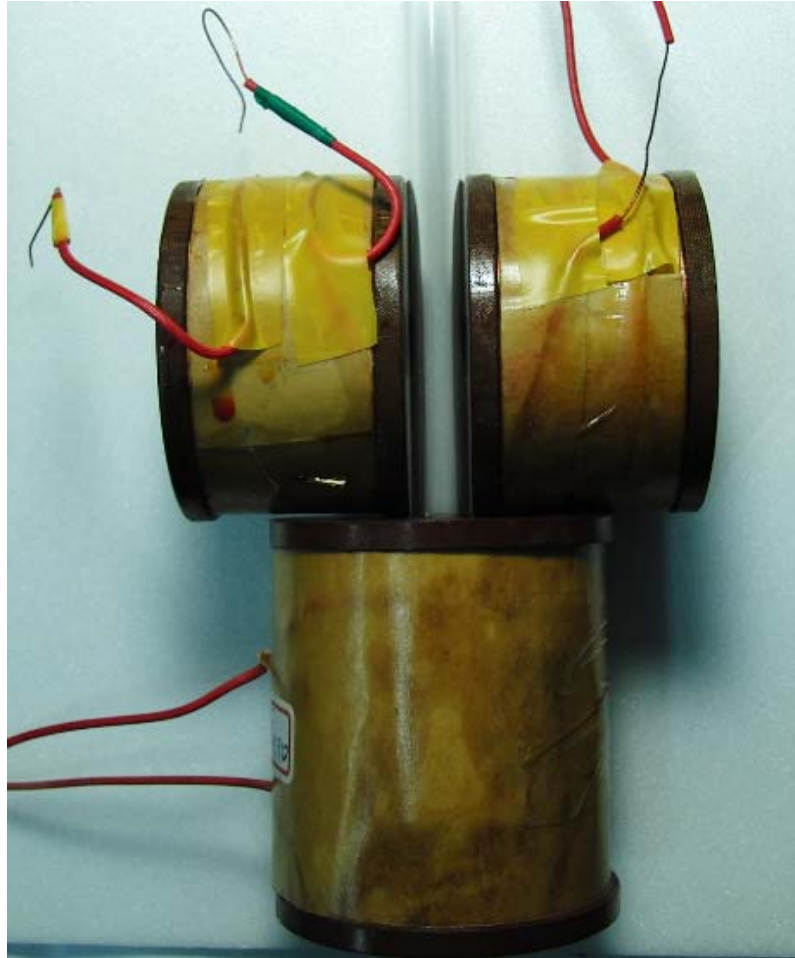


圖 2-15 水平管流裝置圖



圖 2-16 1cc 之針管



圖 2-17 線圈組架構

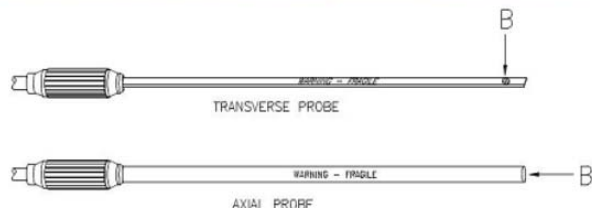


圖 2-18 桌上型高斯計



圖 2-19 可程式電源供應器示意圖



圖 2-20 資料擷取器

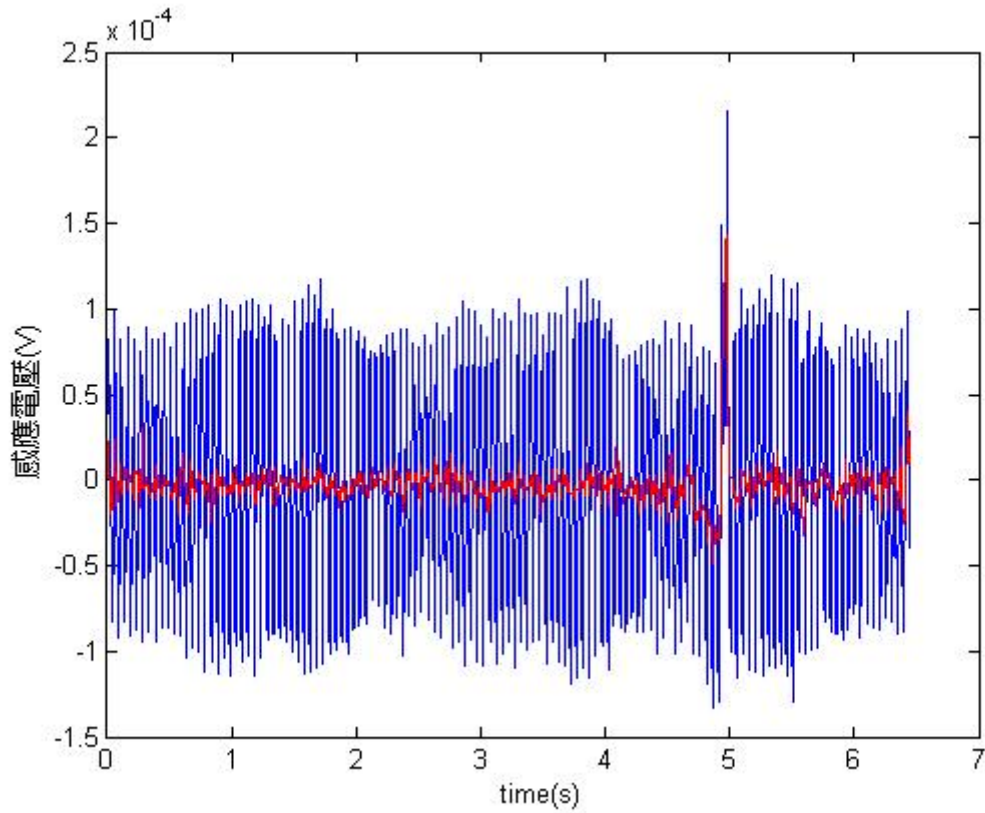


圖 2-21 磁流體為 0.17CC 時之原始訊號與利用 FFT 過濾後之訊號

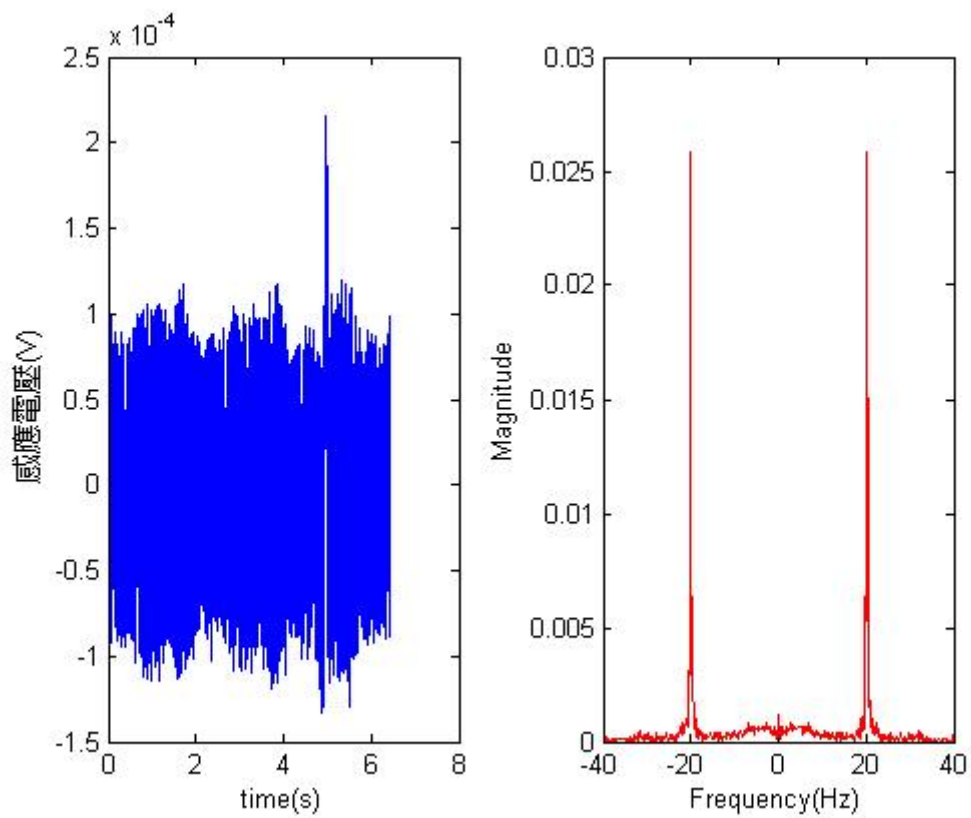


圖 2-22 磁流體為 0.17CC 時之時間域轉為頻率域圖形表示

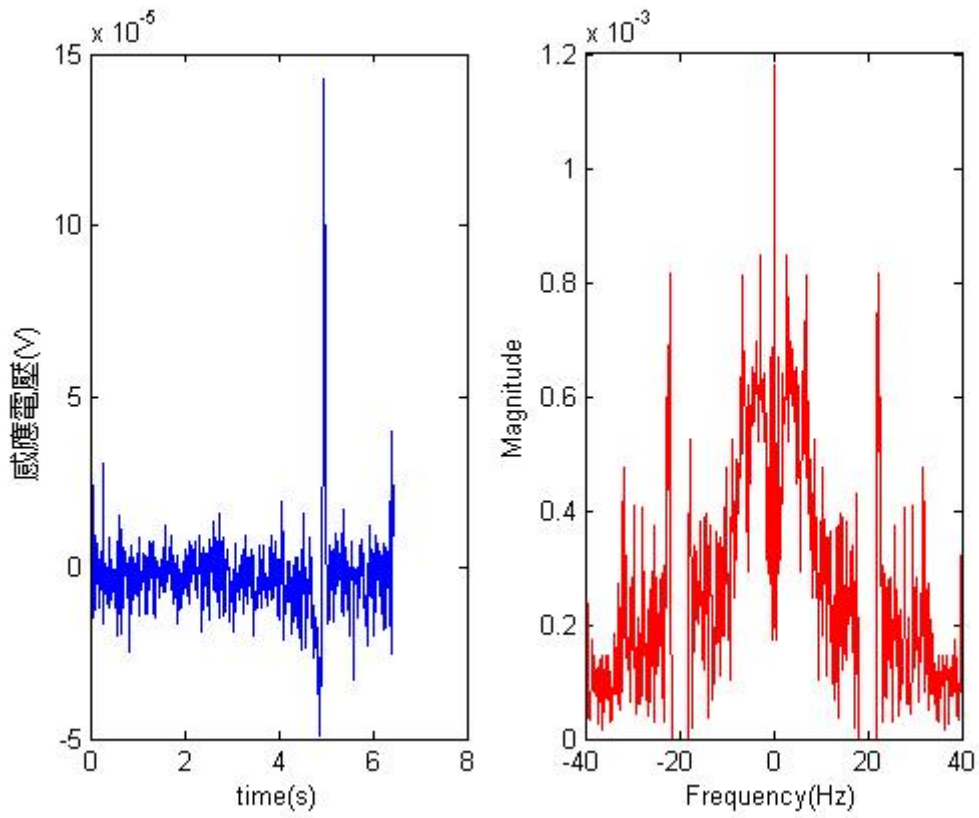


圖 2-23 磁流體為 0.17CC 時之時間域轉為頻率域圖形表示



第三章 結果與討論

本研究目的主要研究磁性液滴電能轉換量測之實驗研究，主要應用於流場量測(磁性流體之速度與體積關係)，在利用量測之數值與理論作驗證，探討產生感應電壓與磁場之相互關係。

採用了多種不同的實驗裝置，經由實際操作及比較之後，來決定能得到最漂亮的訊號及成果的裝置，並針對量測出之感應電壓訊號做進一步的比較。

3-1 各種不同裝置的結果比較

3-1-1 水平管流



圖 3-1 為水平管流的影片截圖，左邊為激磁線圈，當輸入電流至激磁線圈後，磁液滴會由右邊往左邊吸入，使磁液滴浮在中間是為了不讓磁液滴與壁面接觸，減少摩擦力的影響令液滴速度更快，圖 3-2 為利用影像法所測量得到的時間-位置關係圖及時間-速度圖，但是由於重力的影響導致速度不夠快，因此並沒有抓到感應電動勢的訊號。

3-1-2 垂直管流

垂直管流利用重力的關係，使磁液滴慢慢下落至磁場的吸引範圍，受到磁場吸引加速落下，可使液滴經過感應線圈時速度更快，更能抓到感應電動勢，不過由於線圈的磁力線是由裡向外射出的，因此將管子插入線圈裡使磁液滴在線圈的中心線上移動，垂直的量測感應電壓會因為

磁力線的方向相反而使訊號相互抵消。

3-1-3 垂直管流(兩側為線圈)

圖 3-3 為兩側加裝激磁線圈之垂直管流影片截圖，參考吳啓鳴學長之裝置[19]，加裝旁邊兩側之激磁線圈來增強磁場，當磁液滴通過感應線圈組時能更容易量測出感應電動勢，而且使得在感應區塊有個均勻的磁場，圖 3-4 為當磁液滴 0.15cc 時所測量得到的位置-時間及速度-時間圖，圖 3-5 為當磁液滴 0.15cc 時所測量得到的感應電動勢，藍色部分為原始的感應電動是訊號，紅色部分為做 FFT 訊號處理過濾雜訊後之感應電動勢訊號，可以發現雖然不是很明顯，但是在 4.3 秒左右時有個明顯的波動，因此代表這組機制是可行的。

圖 3-6 為將感應線圈換成較小之感應線圈的垂直管流影片截圖，理由為嘗試把感應量測的範圍更集中在磁液滴通過速度最快的地方，可以得到更漂亮的感應電動勢，圖 3-7 為當磁液滴為 0.23cc 時所量測得到的位置-時間及速度-時間圖，圖 3-8 為當磁液滴為 0.23cc 時使用較小之感應線圈測量得到的感應電動勢，可以發現在 2 秒位置時，感應電動勢的訊號有個很明顯的跳動，說明了使用較小的感應線圈，得到的感應電動勢會比較大的感應線圈來的更漂亮。

3-1-4 垂直管流(兩側為磁鐵)

由於發現使用兩側為激磁線圈會使雜訊較大，影響所量測之感應電動勢，因此將兩側之激磁線圈換成永久磁鐵，影片截圖如圖 3-9，圖 3-10 為當磁液滴為 0.07cc 時所量測得到的位置-時間及速度-時間圖，圖 3-11 為當磁液滴為 0.07cc 時使用較小之感應線圈測量得到的感應電動勢，可

以發現當換成磁鐵後，雜訊比使用線圈來的小，因此更能看出所量取到的感應電動勢。

3-1-5 垂直管流(下方為磁鐵)

由以上實驗均可以看出，當液滴通過感應線圈時，會發生偏移之問題，所以我們將兩側的磁鐵拿掉，並將下方的線圈換成永久磁鐵，來探討液滴偏移的角度與感應電壓之關係，影片截圖如圖 3-12，圖 3-13 為當磁液滴為 0.15cc 時偏移中心 15mm 所量測得到的位置-時間及速度-時間圖，圖 3-14 為當磁液滴為 0.15cc 時偏移中心 15mm 測量得到的感應電動勢，多組實驗比較後(如圖 3-15)可發現，當偏移永久磁鐵的中心越多，則量測到的感應電動勢越大。

之後我們發現，當把感應線圈橫放後，可量測得到更漂亮之感應電壓，影片截圖如圖 3-16，圖 3-17 為當磁液滴為 0.15cc 時測量得到的感應電動勢，可以發現訊號成一個 sin 波，而下峰值比上峰值還要來得大，其原因為磁液滴在管子內的移動速度是加速度，所以速度會越來越快之關係，因此下峰處所產生之感應電壓會更大。

因此最後決定使用的裝置為，下方使用永久磁鐵(大)，並將一顆感應線圈(中)橫放來進行量測，方能得到最佳的訊號量測結果，並與吳啓鳴學長之實驗結果[19]有互相呼應之結果。

3-2 磁場與感應電壓之相對比較

3-2-1 位置與磁場之相對比較

圖 3-18 顯示為當磁液滴通過一顆感應線圈時，由探棒所量測出感應磁場，圖中之範例說明磁場產生之關係，圖中右方部份為感應磁場與時間之關係圖，其餘部分為磁液滴與線圈之關係圖。感應磁場的生成是由線圈磁場以及磁流體導磁率所造成，在圖 3-18(A)及圖 3-18(B)所受的磁場大小單純只受永久磁鐵所影響，圖 3-18(C)為磁液滴通過探棒時，由圖中可以發現，當磁液滴未與磁棒接觸時，磁場亦不會受改變。而當磁液滴正進入感應線圈，此時磁場開始變化，其變化原因是磁通量(Φ)受到改變，且磁通量包含變數為面積(A)與磁通量密度(B)，因磁力線分布為一單方向性(垂直線圈方向)，所以當磁液滴通過探棒時，磁液滴會受線圈磁場影響，出現最大值，此時磁液滴位置恰好與磁棒平行，表示磁液滴對磁場之影響最大(磁流體感磁率(M)為最大)。當磁液滴離開探棒時，磁液滴之感磁率已經不受線圈磁場影響，所以磁場變成由永久磁鐵的磁場主導。

3-2-2 位置與電壓之相對比較

感應電壓是由磁場之不穩定所產生，造成磁場不穩定是因為感應線圈與磁性流體有相對運動所造成。圖 3-19 為當磁液滴(0.16cc)通過一組永久磁鐵時，所量測到的感應電動勢，圖中右邊部份為感應電壓與時間之關係圖，其餘部分為磁液滴與線圈之關係圖。如圖 3-19(A)所示，當磁性液滴未進入感應線圈時，感應線圈與磁流體並無相對運動，所以電壓持續維持在零左右，這可證明法拉第定律中($d\Phi/dt$)項，表示此段時間為穩態之狀態，永久磁鐵之磁力線為垂直線圈側面，且磁力線較均勻，所以當磁液滴未進入感應線圈時，磁場亦不會變化。圖 3-19(B)顯示當磁液滴剛進入感應線圈時，就開始微微的產生感應電壓，圖 3-19(C)等到液滴進入感應線圈中心時，先產生了向上突起的感應電動勢，接著圖 3-19(D)當液滴經過感應線圈後半段時，產生了向下突起之感應電動勢，而下峰值比

上峰值高，其原因為液滴移動速度為加速度，因此通過感應線圈下半部時速度較快，電壓訊號也較大。當磁性液滴離開感應線圈時，感應線圈與磁液滴並無相對運動，所以電壓持續維持在零左右。

3-3 感應電壓比較

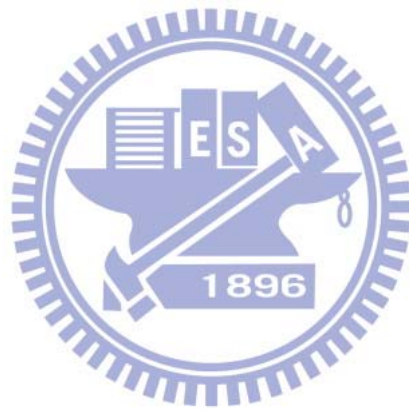
3-3-1 以體積為變數之相對比較

在 3-2-2 中有提及感應電壓產生方法，在這討論當不同容積磁液滴在相同實驗數據下所產生之感應電壓比較。圖 3-20 之實驗條件為在使用旁邊為永久磁鐵及下方線圈為 120V、3A 時，分別用 0.1cc、0.14cc 及 0.16cc 之磁液滴來量取感應電壓，圖 3-21 之實驗條件為在使用底部為永久磁鐵及將感應線圈橫放時，分別用 0.07cc、0.13cc 及 0.19cc 之磁液滴來量取感應電壓，由圖中可以看出在相同實驗數據下，以不同的量時，會產生不相同的感應電壓，磁液滴量越大，則磁通量密度越大而產生更大的感應電壓。圖 3-22 之實驗條件為在使用下方為永久磁鐵及橫放感應線圈時，分別使用不同體積之磁液滴量取的感應電壓，經由多組的實驗比較後可發現，當液滴量越大時，則感應電壓也越大。而圖 3-23 為使用底部為永久磁鐵及將感應線圈橫放之機制量測出多組的感應電壓誤差圖。

3-3-2 以磁場為變數之相對比較

在這討論當不同大小之磁場在相同實驗數據下所產生之感應電壓比較。圖 3-24 之實驗條件為在使用底部為永久磁鐵及將感應線圈橫放時，分別使用數目不同之磁鐵來產生 0.5KG、1.5KG、3KG 的磁場來量取感應電壓。由圖中可以看出在相同實驗數據下，以不同的磁場時，會產生不同的感應電壓，所給予的磁場越大，則磁通量密度越大而產生更大的感

應電動勢。



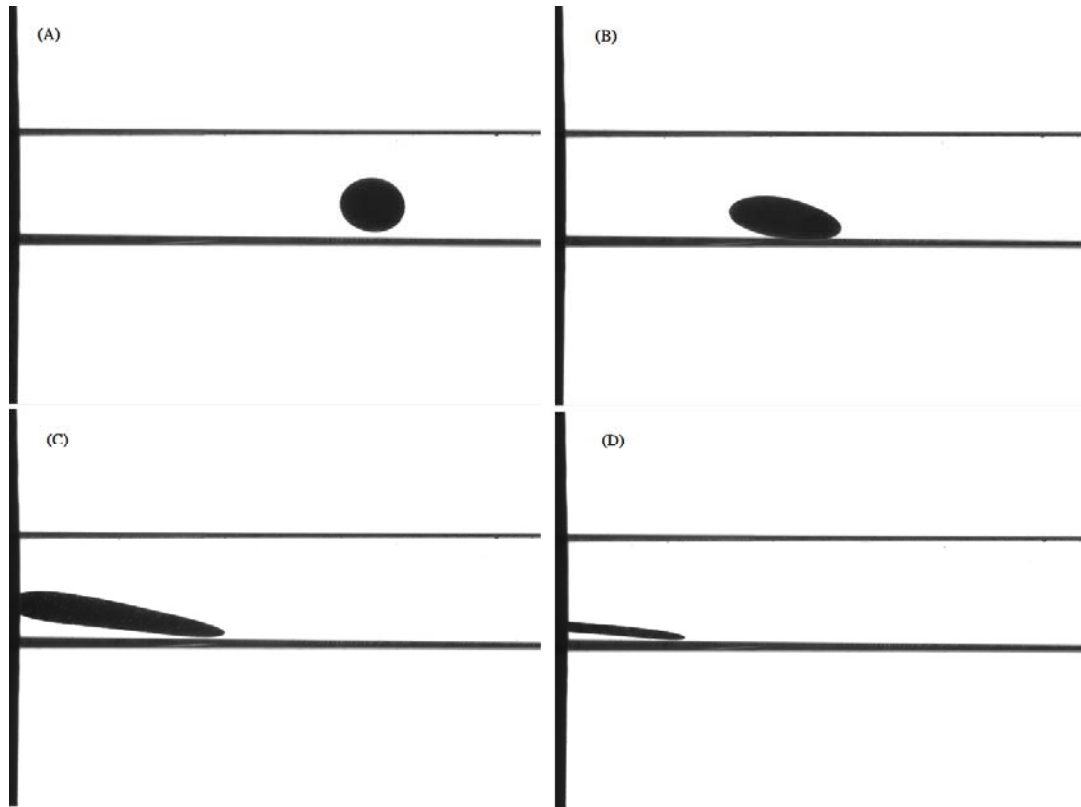


圖 3-1 水平管流之影片截圖

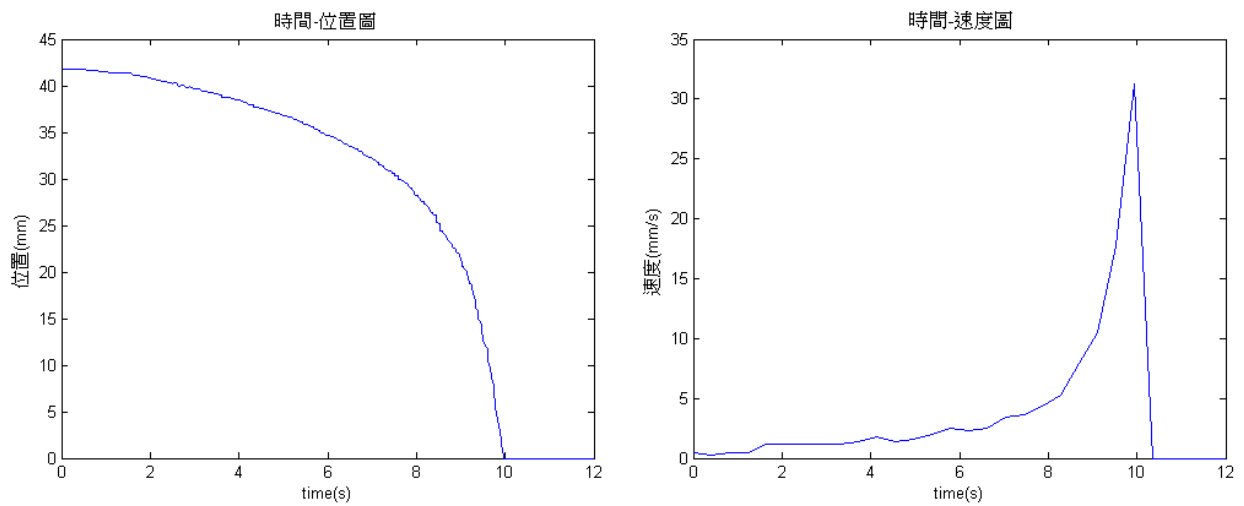


圖 3-2 時間-位置圖及時間-速度圖

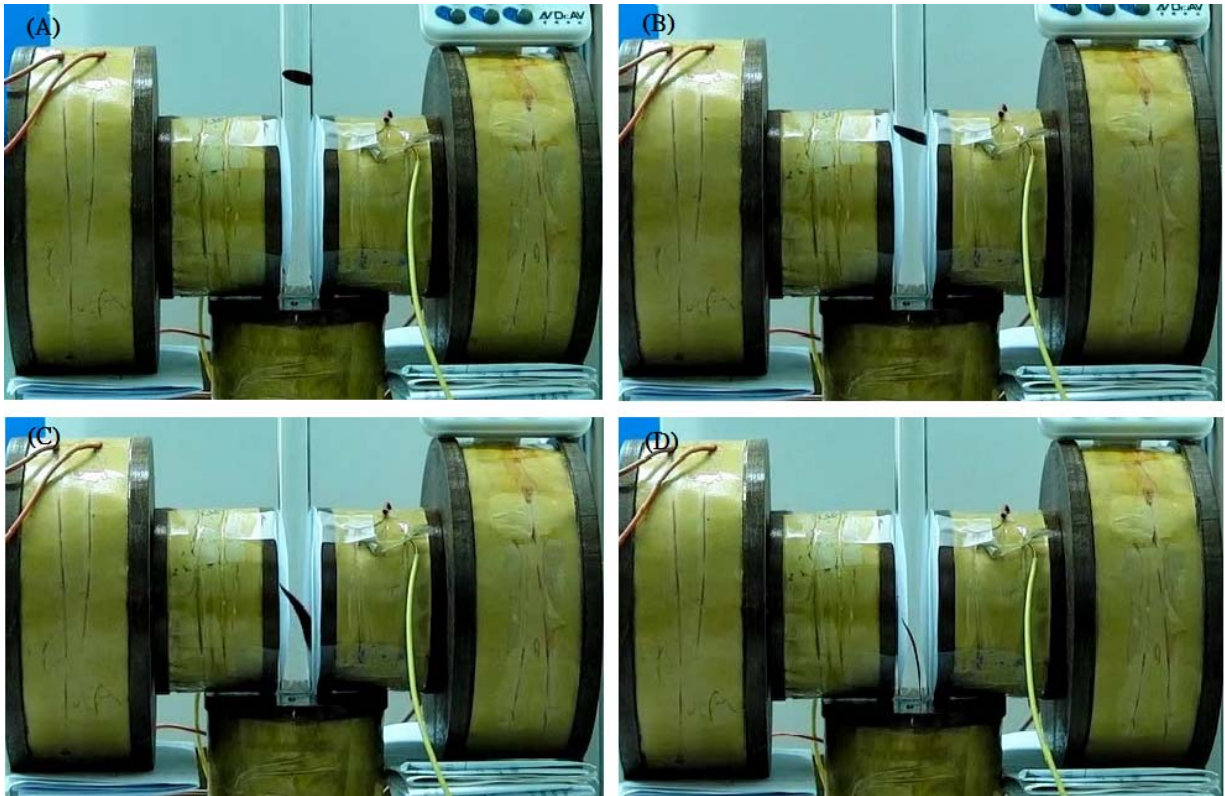


圖 3-3 兩側加裝激磁線圈之垂直管流影片截圖

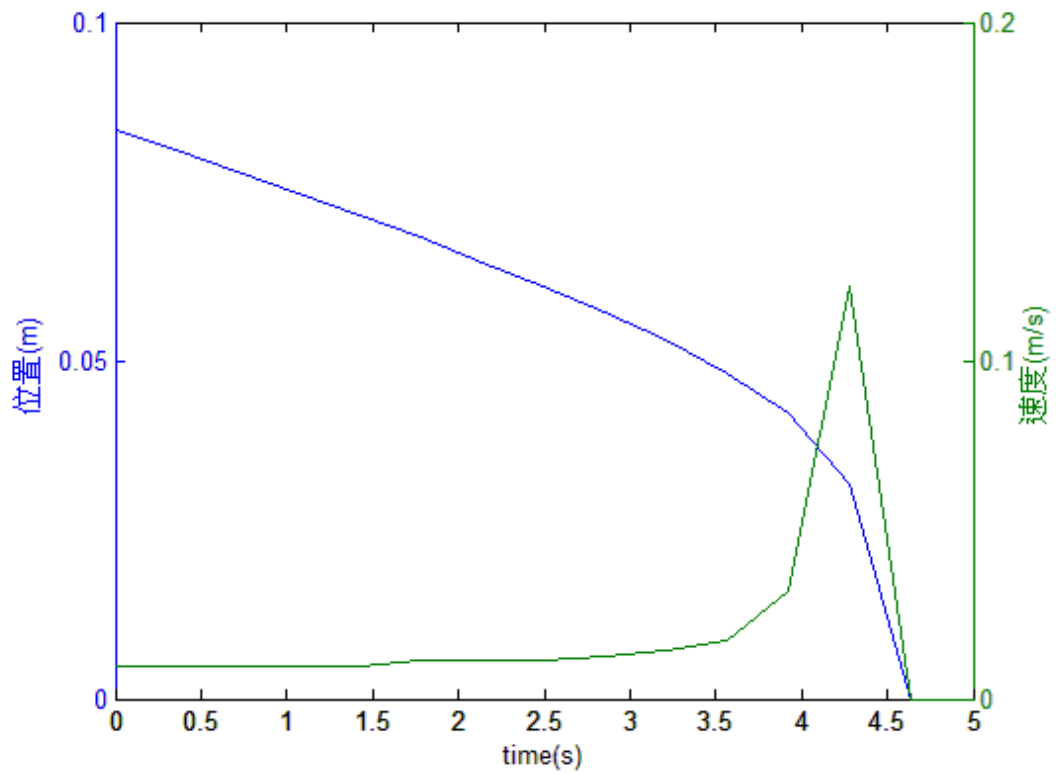


圖 3-4 當磁液滴 0.15cc 時所測量得到的位置-時間及速度-時間圖

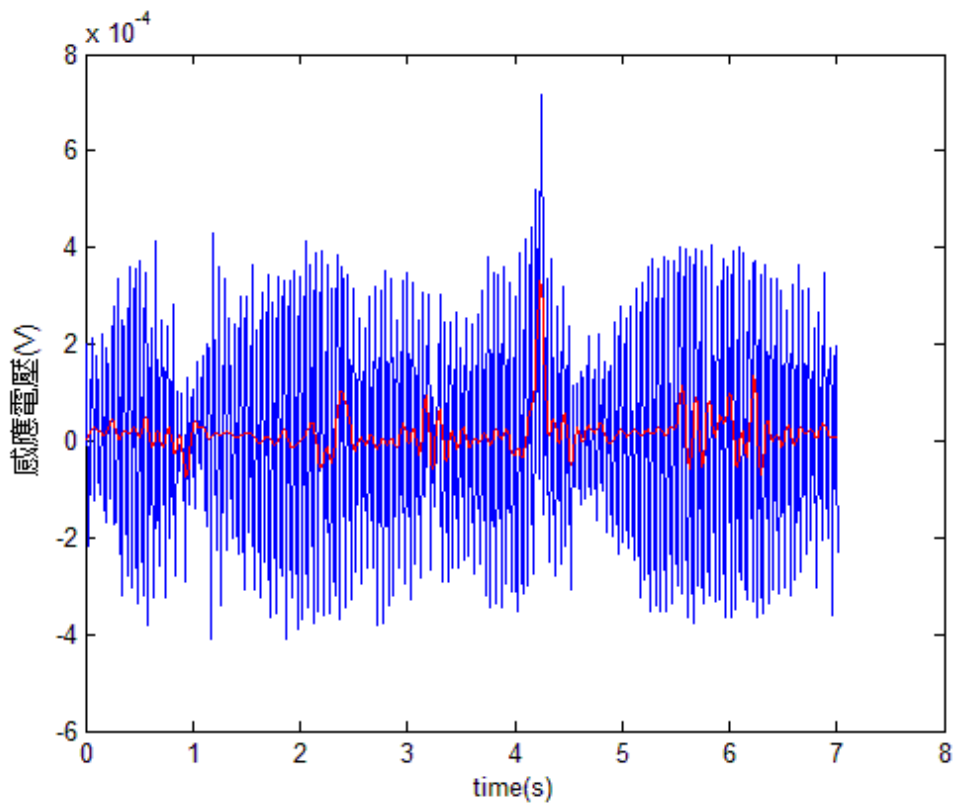


圖 3-5 當磁液滴 0.15cc 時所測量得到的感應電動勢

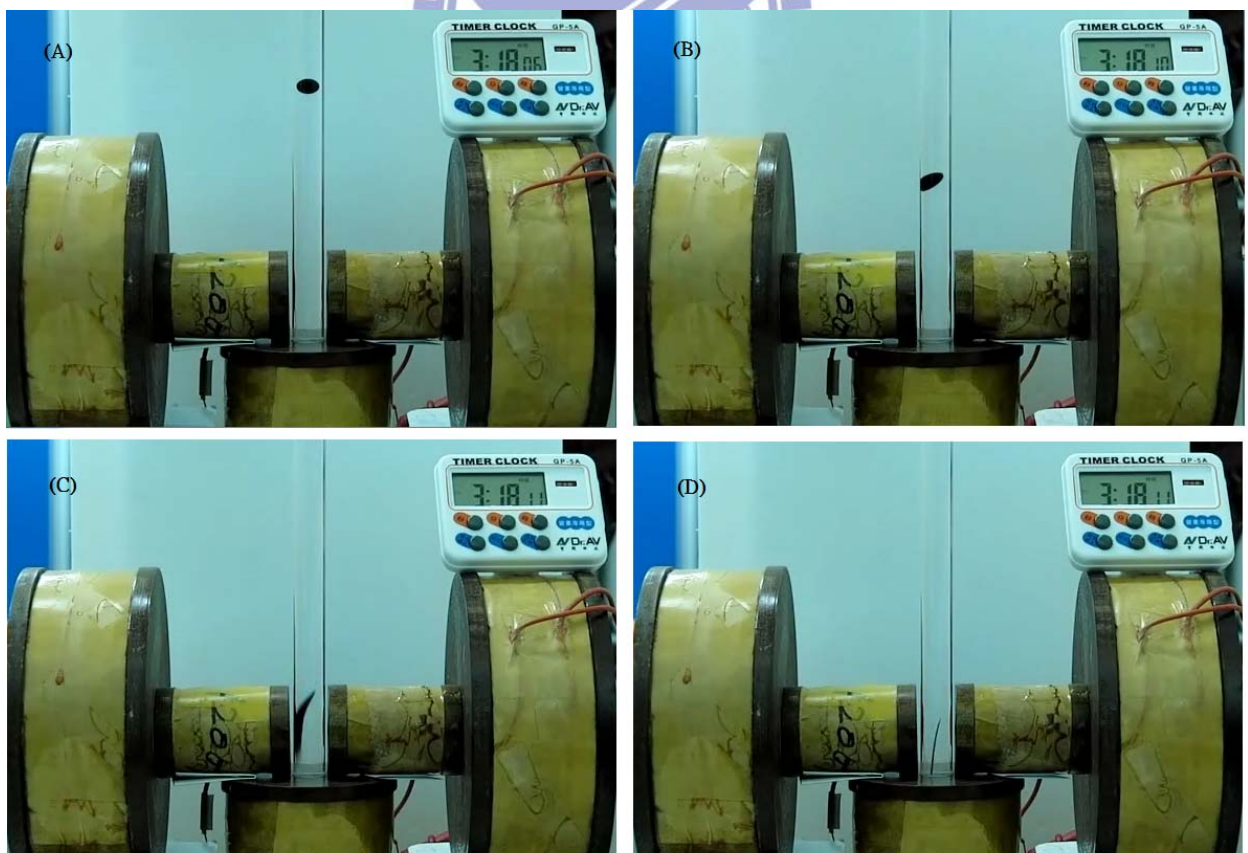


圖 3-6 將感應線圈換成較小線圈之垂直管流影片截圖

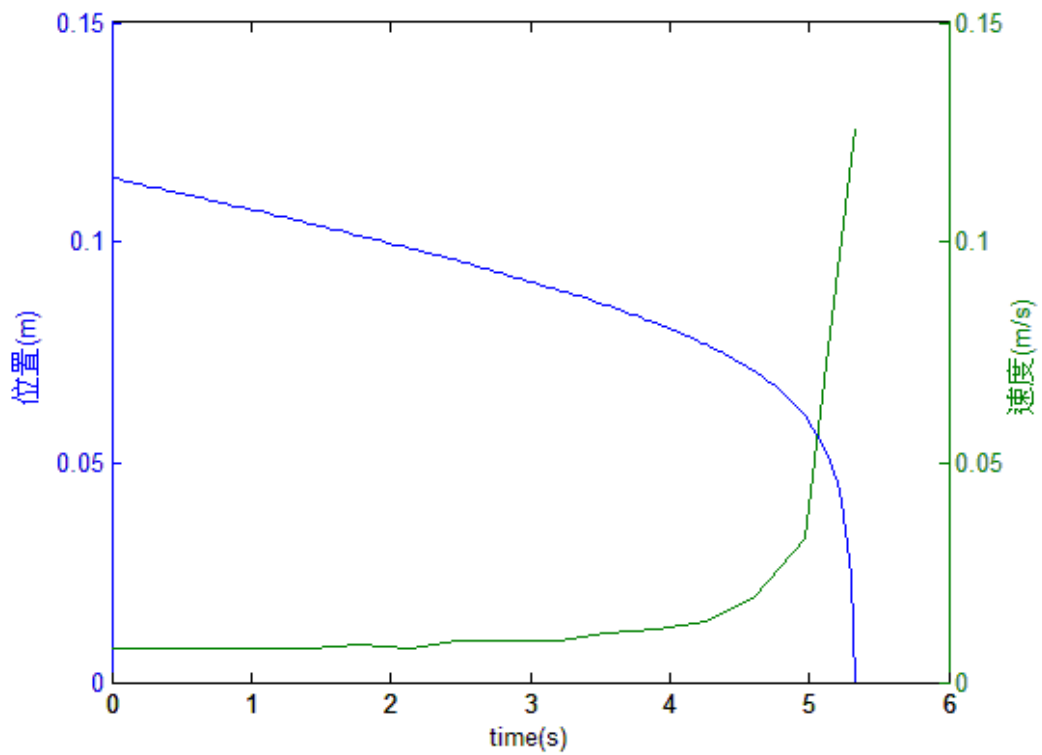


圖 3-7 當磁液滴為 0.23cc 時所量測得到的位置-時間及速度-時間圖

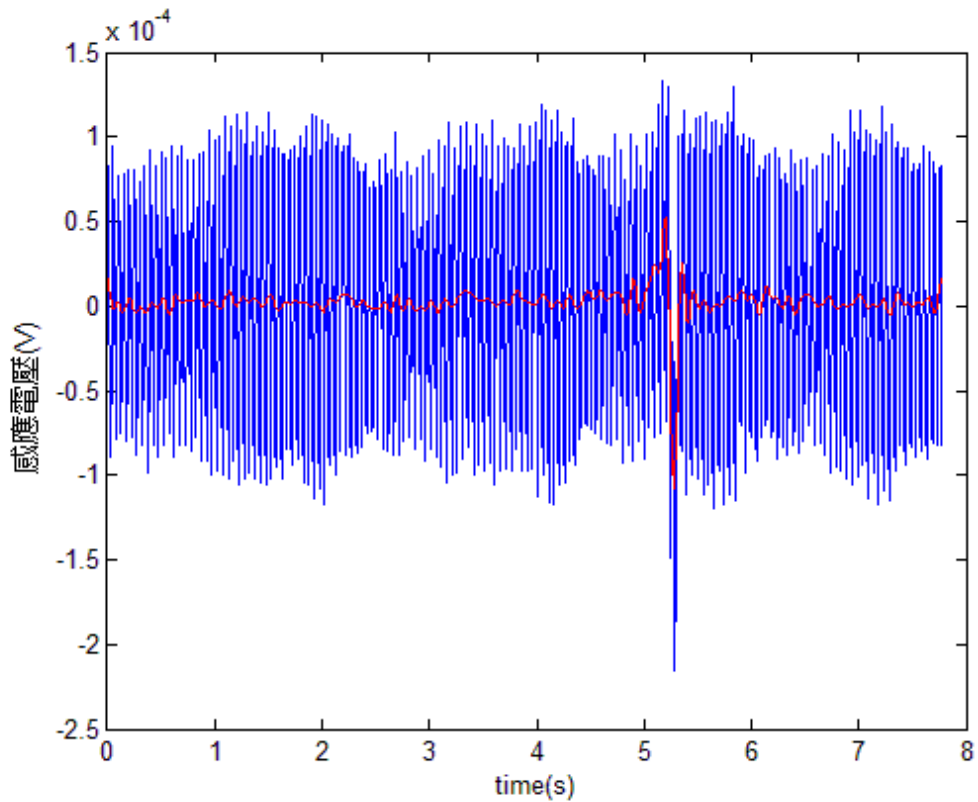


圖 3-8 當磁液滴為 0.23cc 時使用較小之感應線圈測量得到的感應電動勢

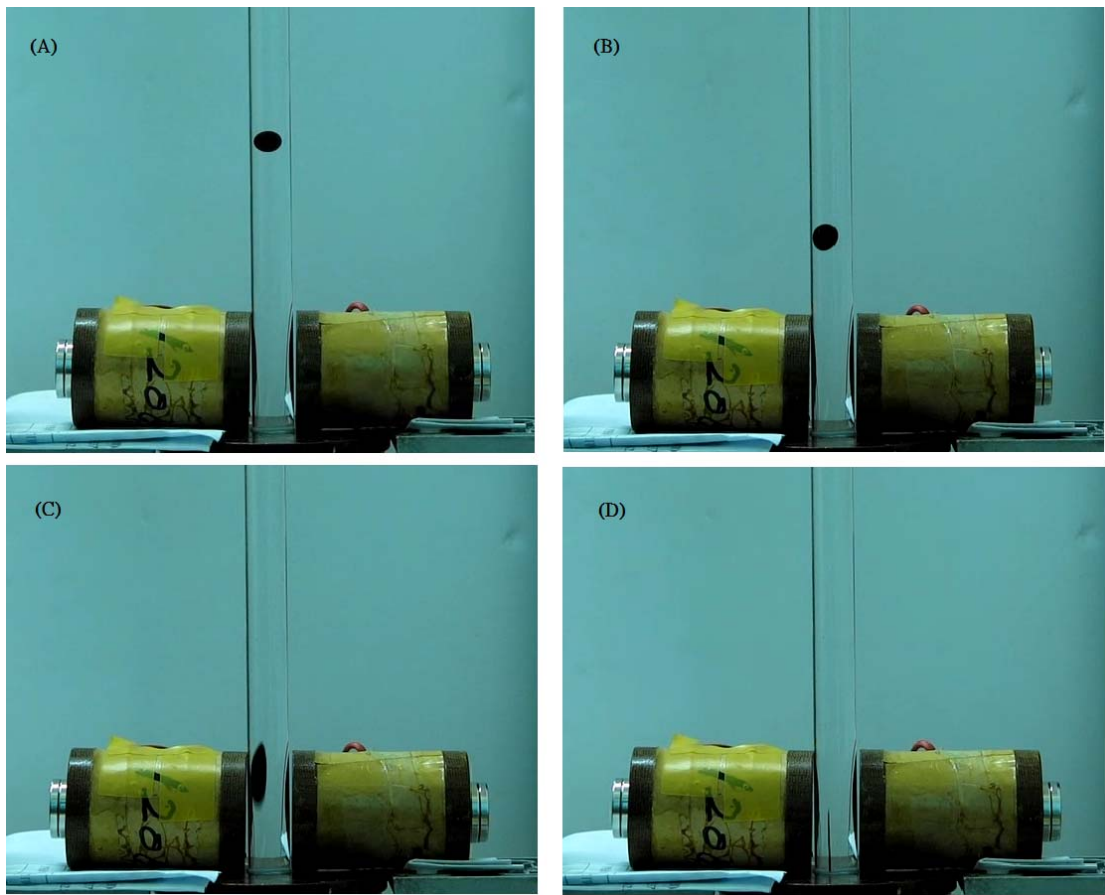


圖 3-9 兩側為永久磁鐵之垂直管流影片截圖

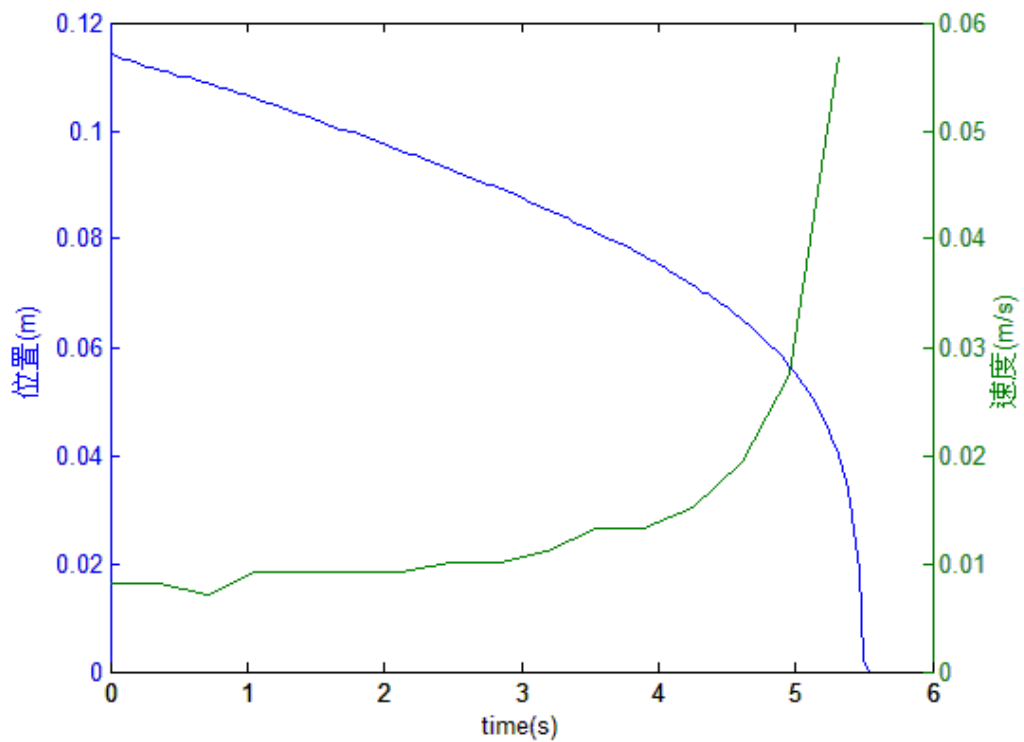


圖 3-10 當磁液滴為 $0.07cc$ 時使用永久磁鐵所量測得到的位置-時間及速度-時間圖

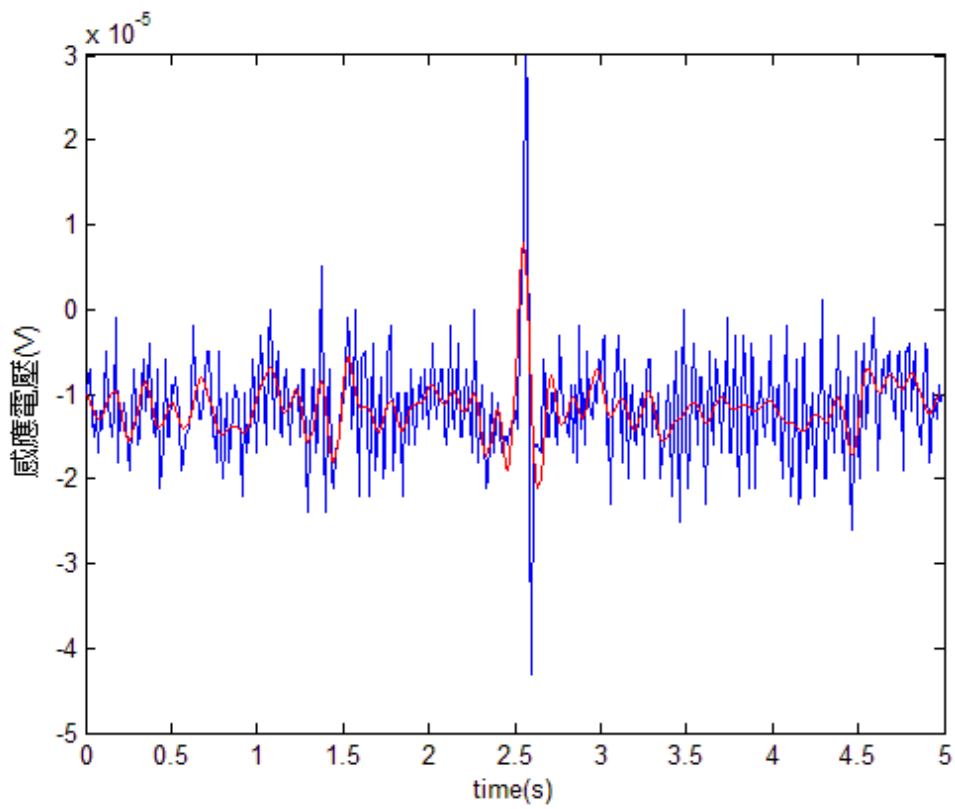


圖 3-11 當磁液滴為 0.07cc 時使用永久磁鐵測量得到的感應電動勢

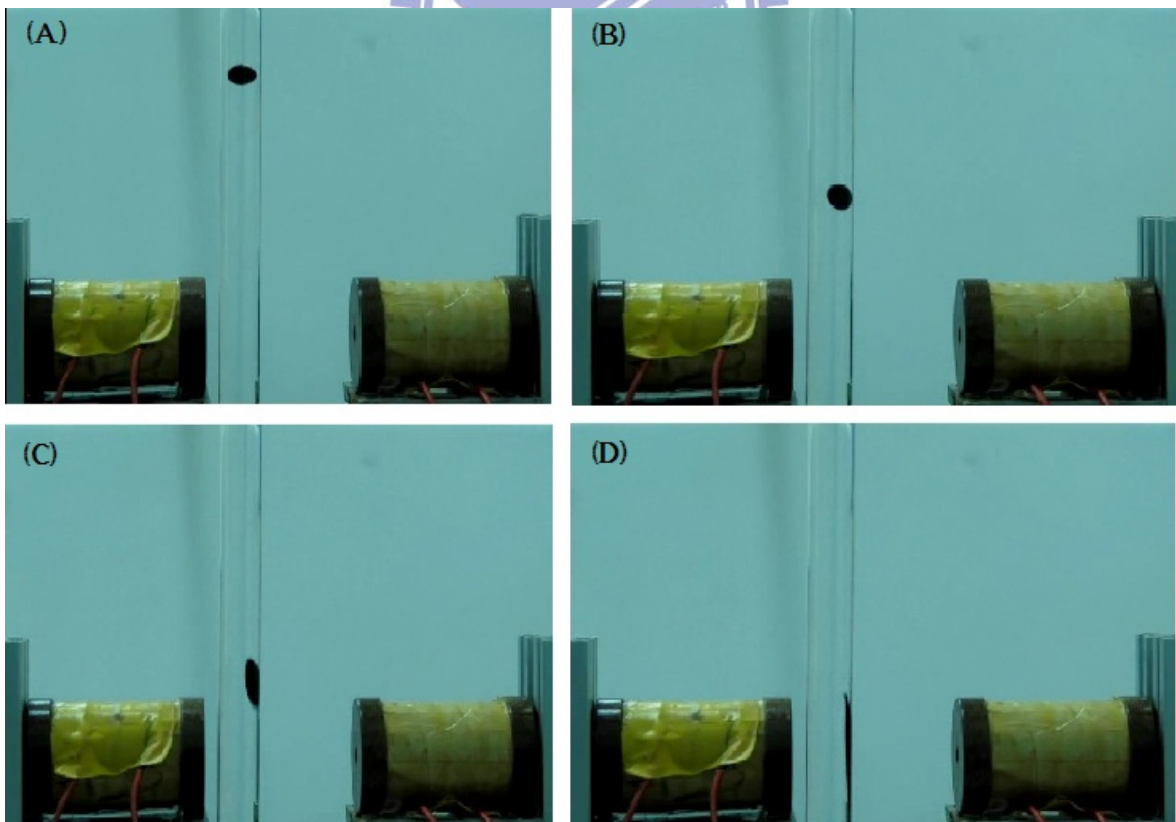


圖 3-12 下方為永久磁鐵時偏移中心 15mm 之垂直管流影片截圖

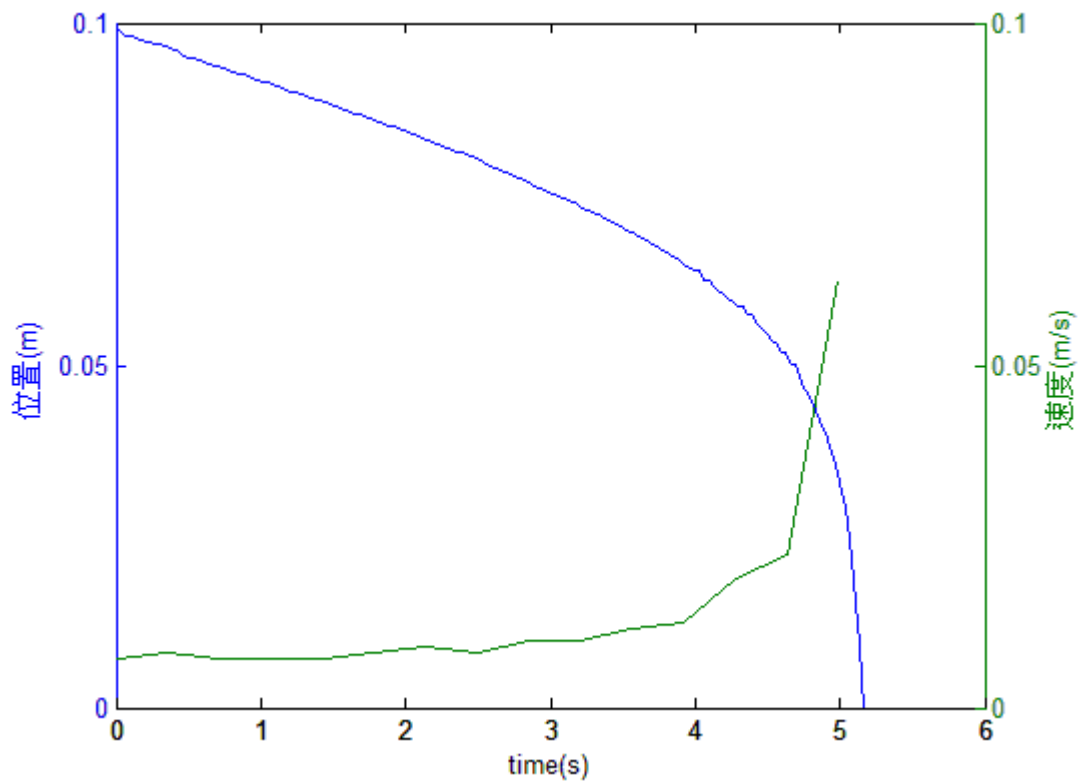


圖 3-13 當磁液滴為 0.15cc 時偏移中心 15mm 所量測得到的位置-時間及速度-時間圖

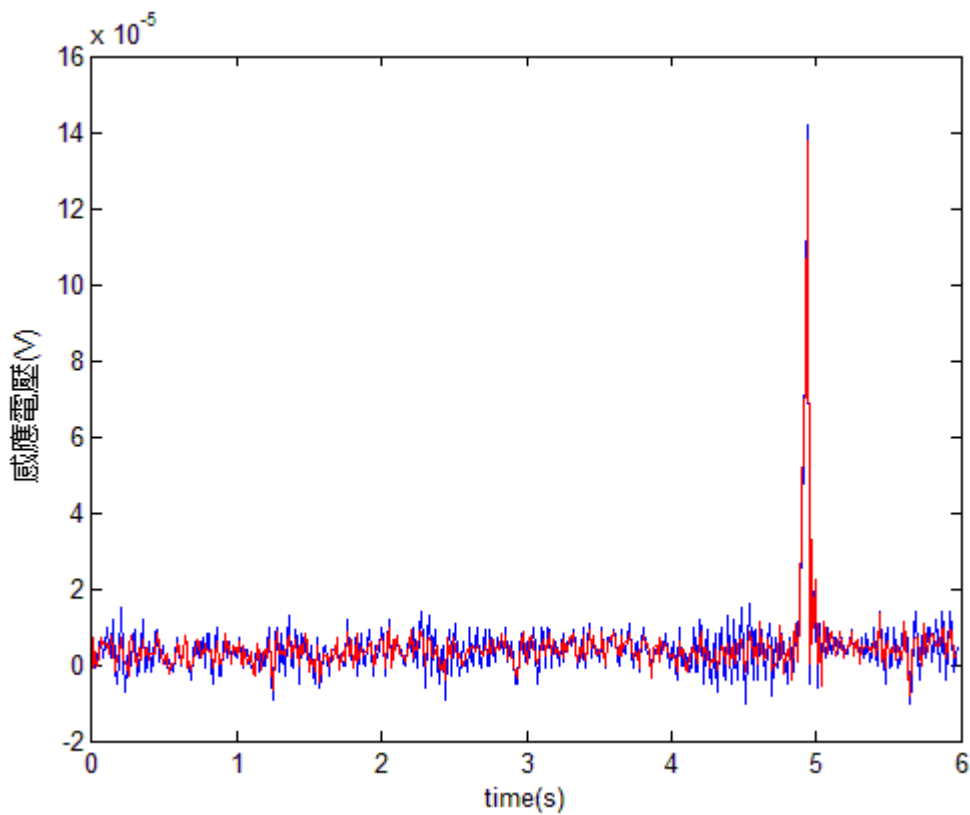


圖 3-14 當磁液滴為 0.15cc 時偏移中心 15mm 測量得到的感應電動勢

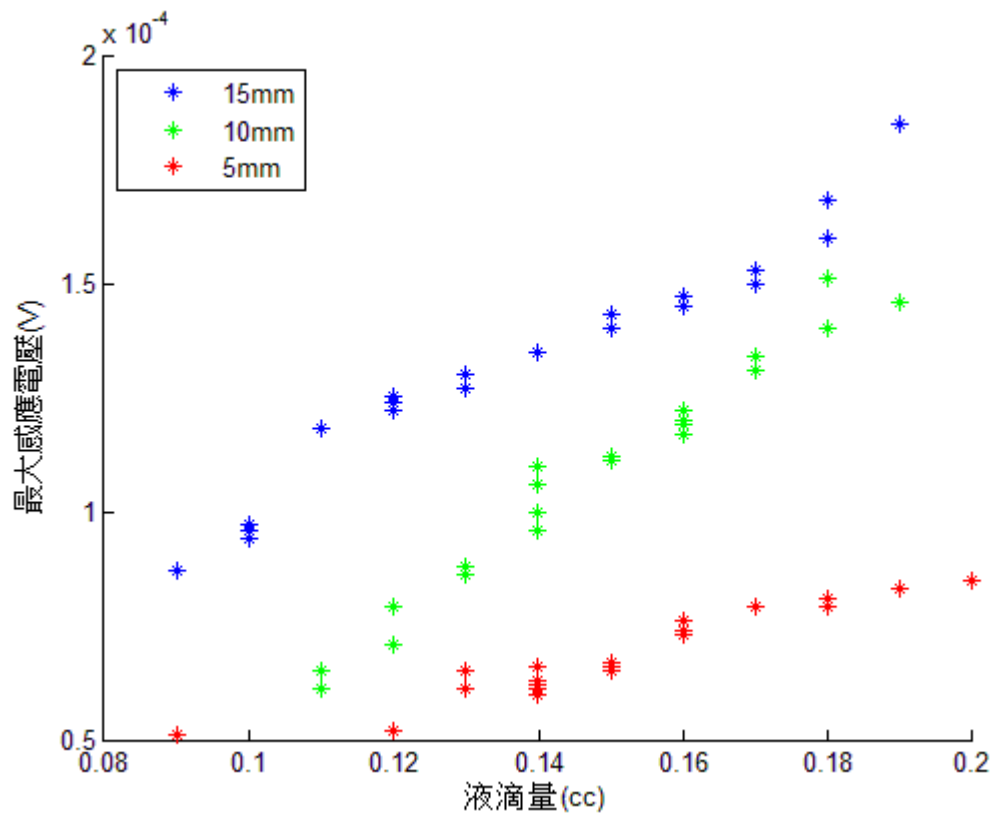


圖 3-15 當磁液滴偏移中心 15mm、10mm、5mm 測量得到的感應電動勢

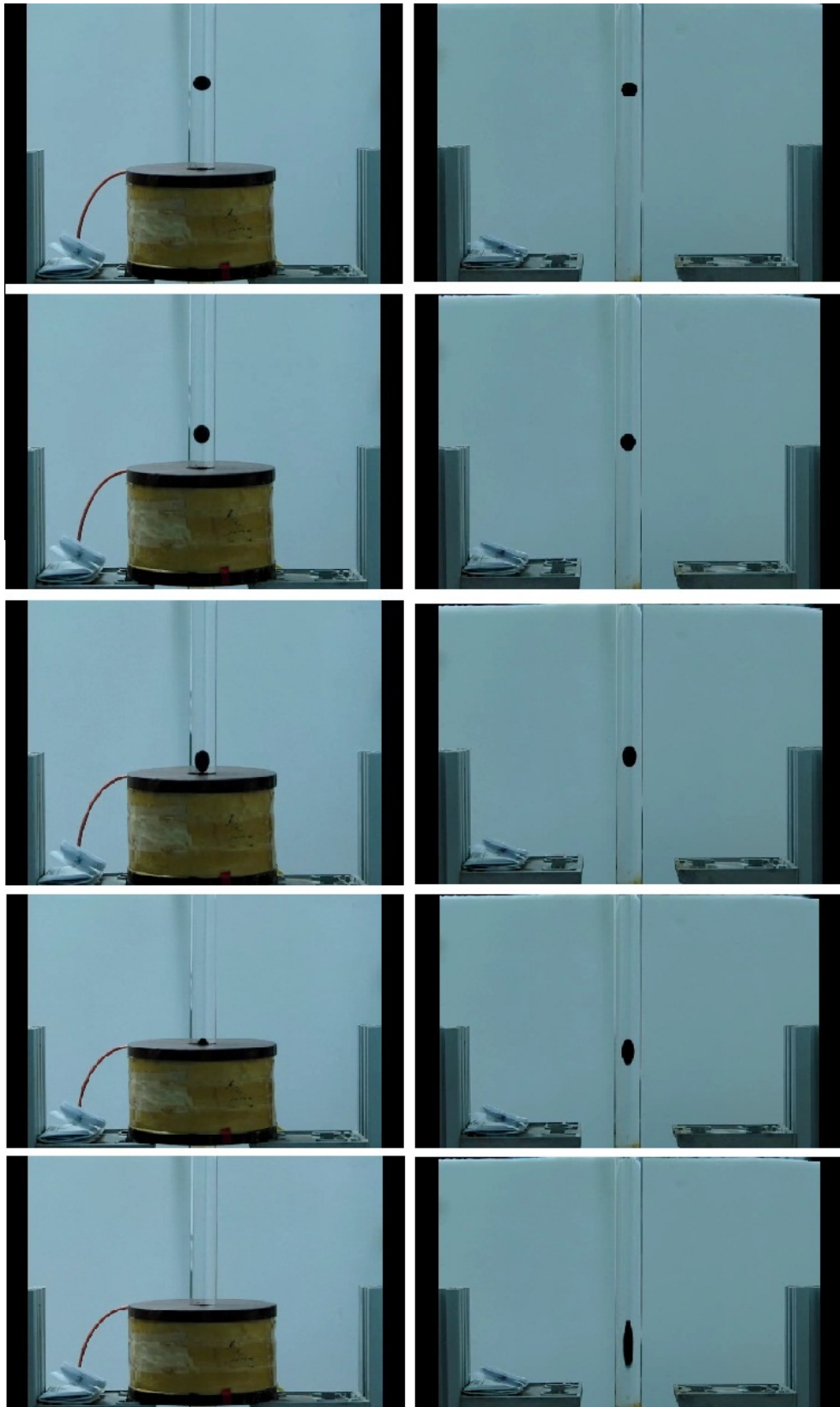


圖 3-16 將感應線圈橫放之影片截圖

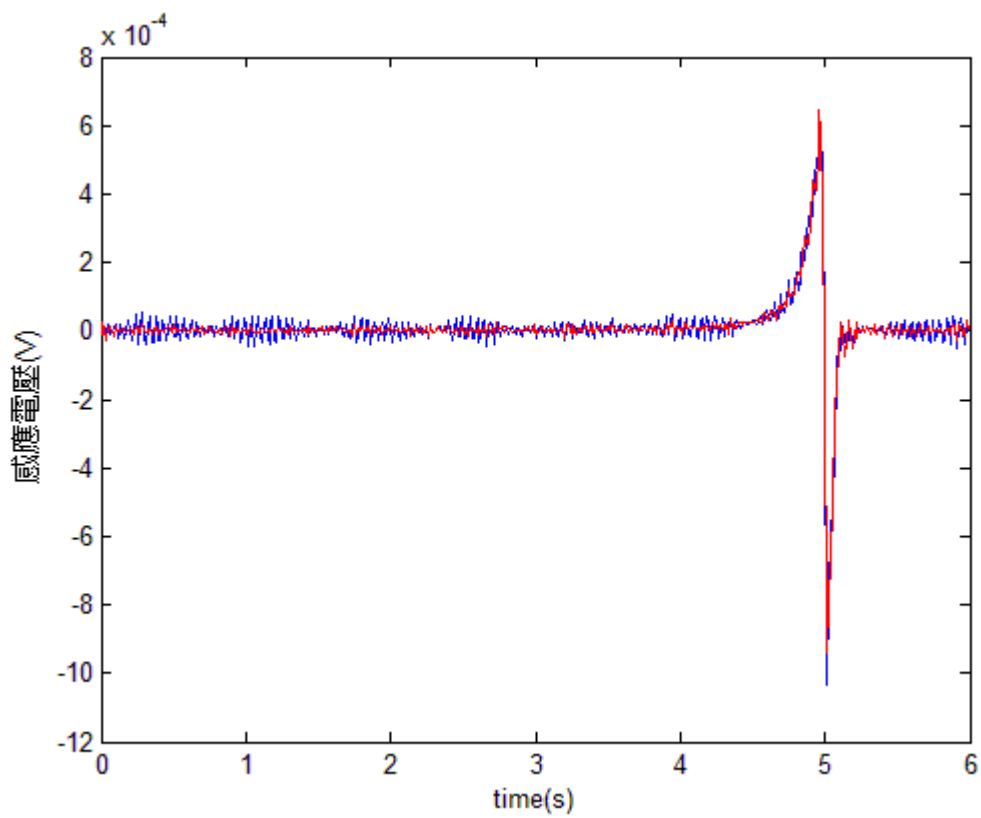


圖 3-17 當磁液滴為 0.15cc 時將感應線圈橫放測量得到的感應電動勢

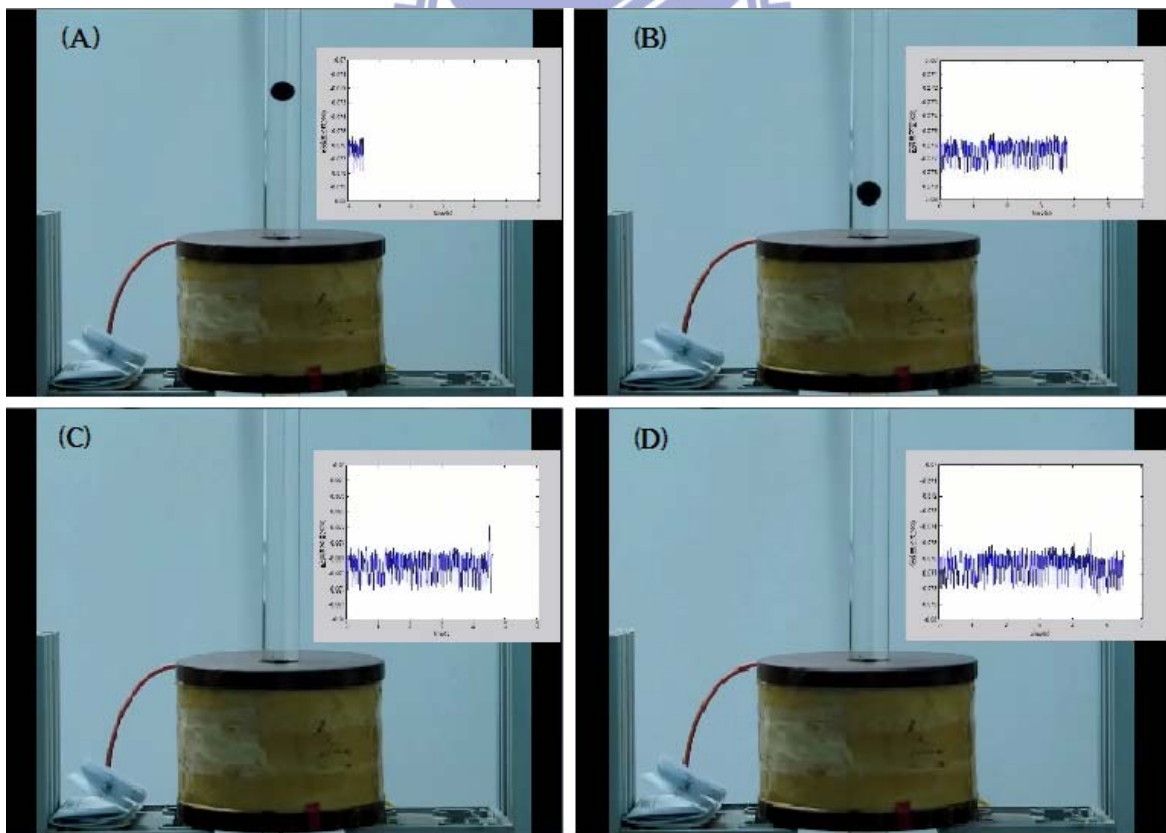


圖 3-18 當磁液滴(0.21cc)通過一顆感應線圈時，由探棒所量測出感應磁場

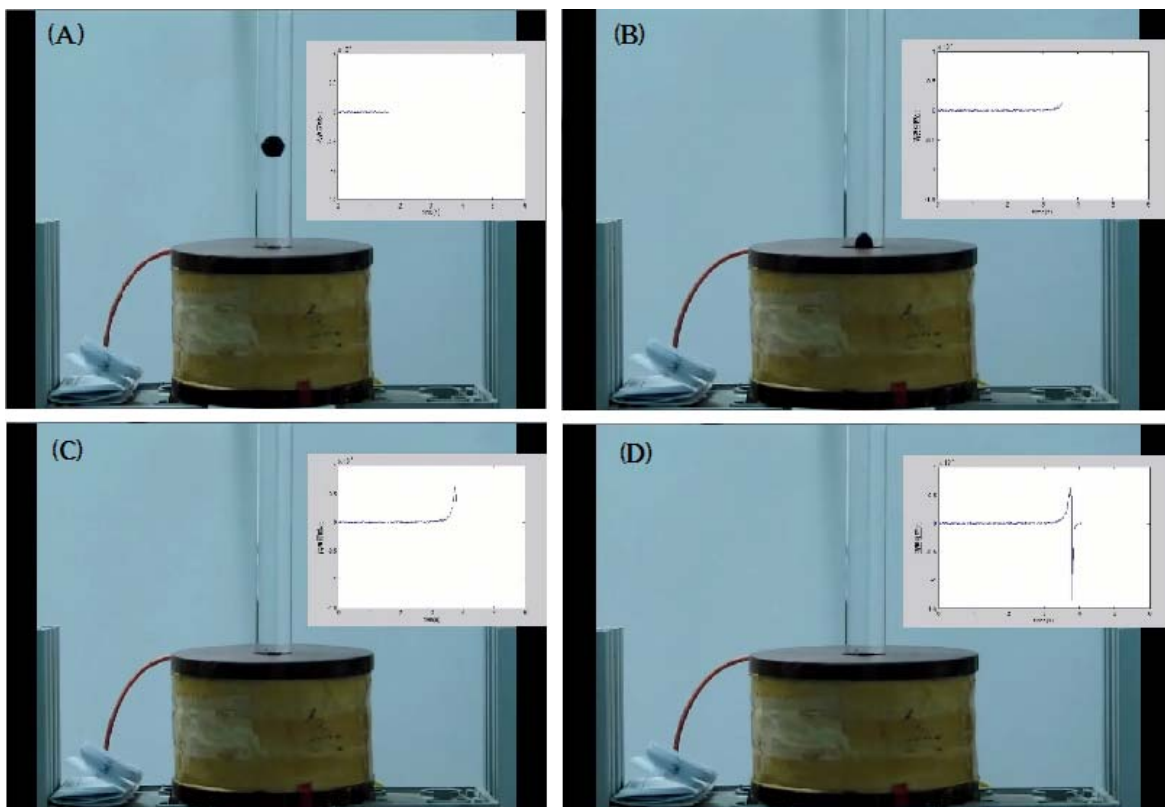


圖 3-19 當磁液滴(0.16cc)通過一顆感應線圈時，所量測到的感應電動勢

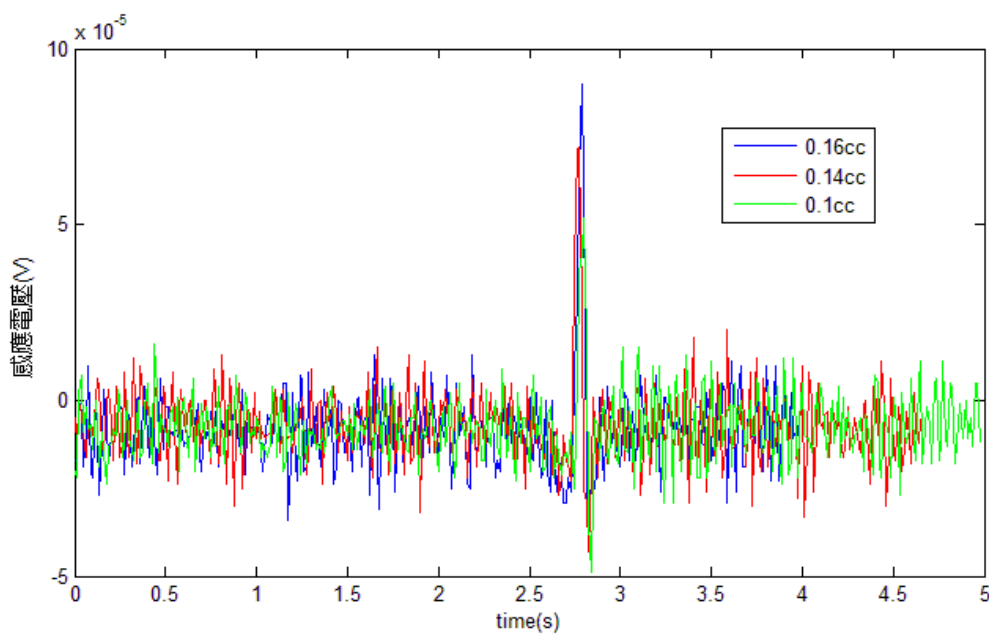


圖 3-20 為在使用旁邊為永久磁鐵及下方線圈為 120V、3A 時，分別用 0.1cc、0.14cc 及 0.16cc 之磁液滴來量取感應電壓

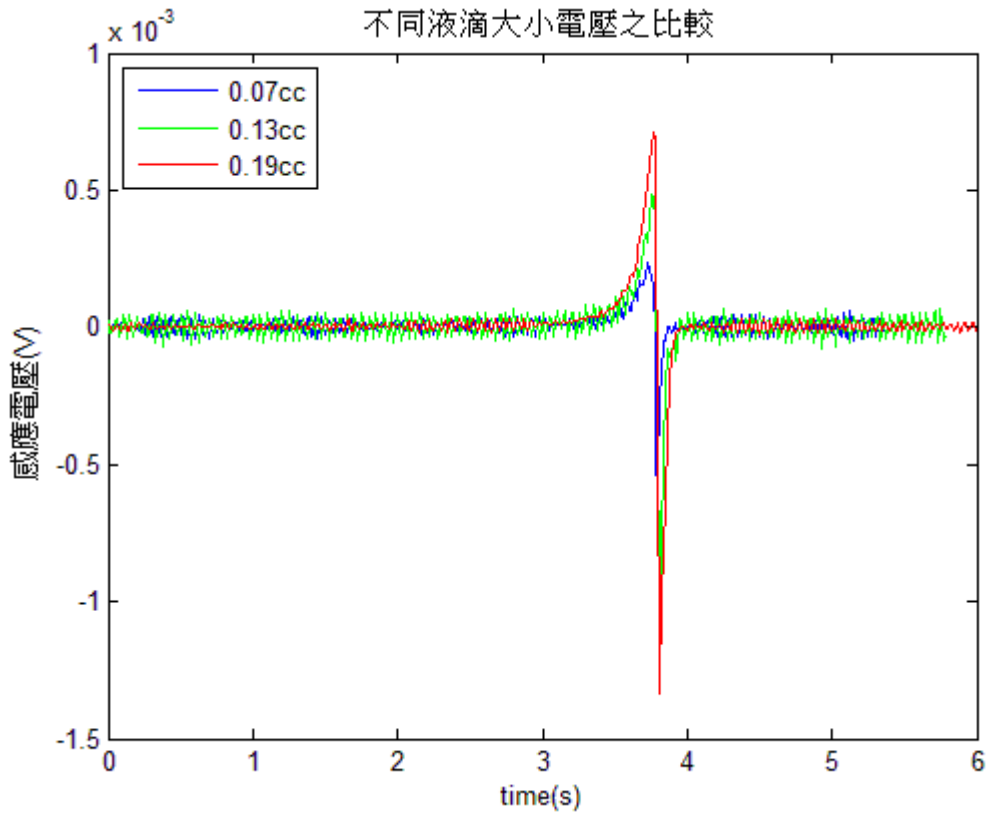


圖 3-21 為下方為永久磁鐵及橫放感應線圈時，分別用 0.07cc、0.13cc 及 0.19cc 之磁液滴來量取的感應電壓

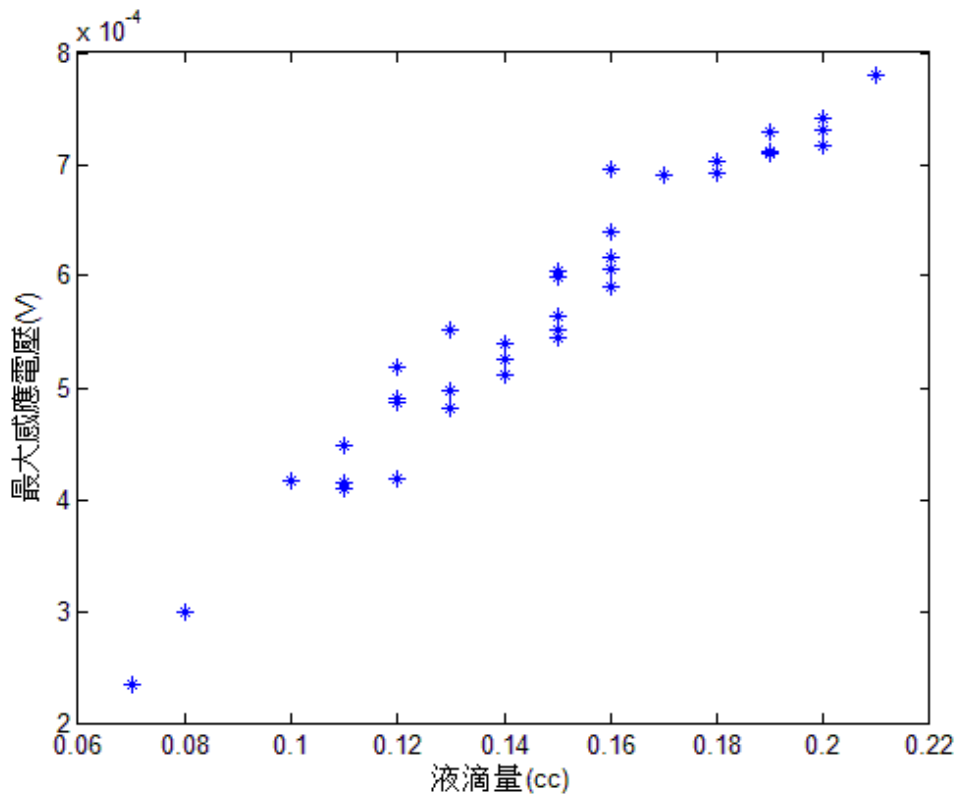


圖 3-22 為下方為永久磁鐵及橫放感應線圈時，分別用不同體積之磁液滴來量取的感應電壓

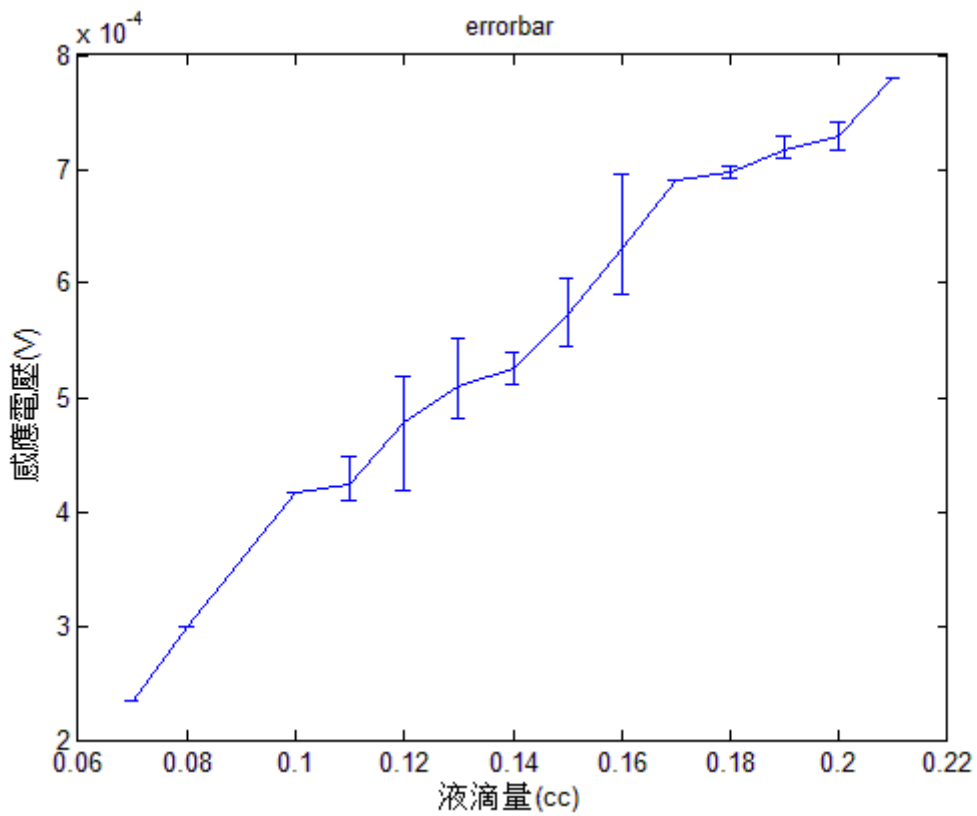


圖 3-23 為下方為永久磁鐵及橫放感應線圈時，分別用不同體積之磁液滴來量取的感應電壓誤差圖

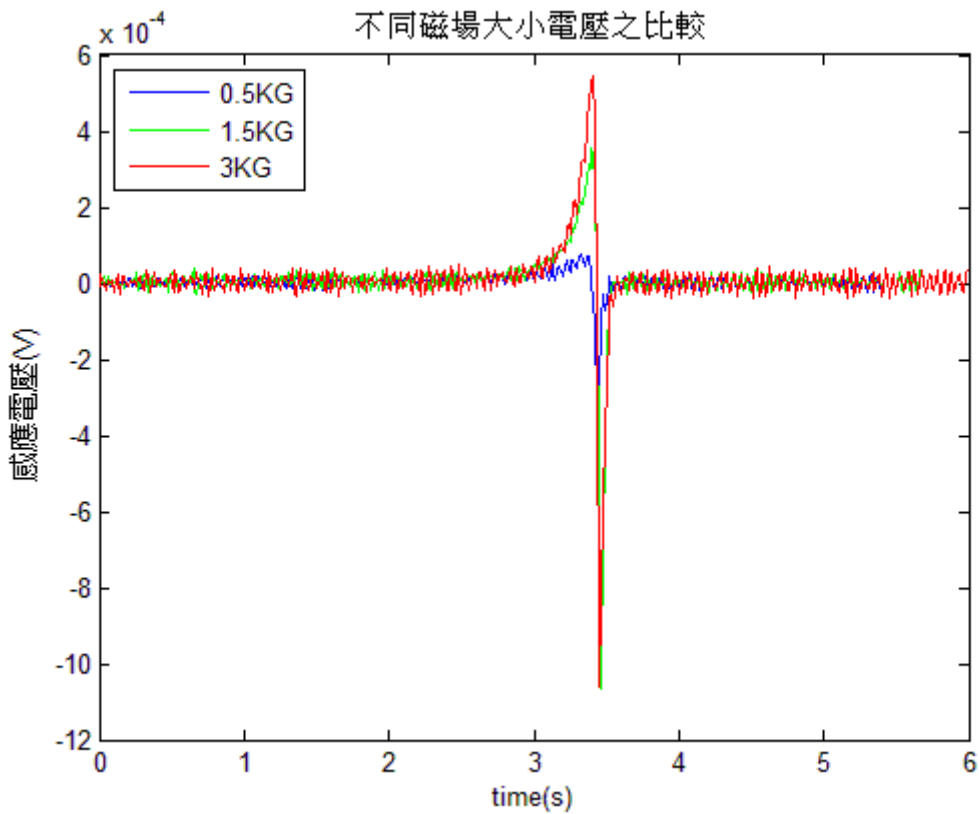


圖 3-24 為下方為永久磁鐵及橫放感應線圈時，分別使用數目不同之磁鐵來產生 0.5KG、1.5KG、3KG 的磁場來量取感應電壓

第四章 結論

本實驗撰寫磁性流體磁場之訊號量取方法及理論分析方法，並在本實驗裡以決定能測到最佳訊號的機構之設計，將磁性液滴實際注入管流中實驗，觀測磁性液滴在管流中運動時產生之感應電壓，探討磁流體在不同參數(體積、磁場)下通過線圈裝置造成之磁通量密度及感應電動勢變化，接著利用 FFT 過濾技術來轉換原始訊號，是訊號過濾雜訊之後更能被觀測出來。

磁通量密度會隨著磁液體體積增加而增加，不會隨速度而變化，感應電動勢隨磁液體的體積及磁場改變，且經由理論方法可知，液滴移動速度也是一個關鍵，不過本文之實驗因為液滴在流場中速度均變化不大，因此並沒有加入討論。

本研究最後目的是應用於磁性流體流場量測，將磁性流體在流場中實際應用，並將線圈組裝置於流場流道，量取感應電動勢，並設計出量取感應電動勢最佳之機制，這將有助於之後磁性液滴在流場實驗中之研究探討。

参 考 文 献

- [1] T. M. Kwon, M. S. Jhon and T. E. Karis, "A device for measuring the concentration and dispersion quality of magnetic particle suspensions," IEEE transactions on instrumentation and measurement, vol. 41, 10-16(1992)
- [2] M. Zahn, "Magnetic fluid and nanoparticle applications to nanotechnology," Journal of Nanoparticle Vol. 3, 73-78(2001)
- [3] R. C. Nicklin, "Faraday's law-Quantitative experiment," American association of physics teachers, vol. 54, 422-428(1986)
- [4] L. T. Wood, R. M. Rottmann and R. Barrera, "Faraday's law, Lenz's law, and conservation of energy," American Association of Physics Teachers, Vol. 72,376-380(2004)
- [5] R. Kingman, S. C. Rowland and S. Popescu, "An experimental observation of Faraday's law of induction," American Journal of Physics, Vol. 70 ,595-598(2002).
- [6] A. Singh, Y. N. Mohapatra and S. Kumar, "Electromagnetic induction and damping: Quantitative experiments using a PC interface," American Journal of Physics, Vol. 70, 424-427(2002).
- [7] C.-Y. Chen, C.-Y. Hong and L.-M. Chang, "Displacements of miscible magnetic fluids in a capillary tube," Fluid Dynamics Research, Vol. 32,85-98 (2003)
- [8] R. Ganguly, B. Zellmer and I. K. Puric, "Field-induced self-assembled ferrofluid aggregation in pulsatile flow," PHYSICS OF FLUIDS , Vol. 17 097104(2005)
- [9] N. E. Greivell and B. Hannaford, "The Design of A Ferrofluid Magnetic Pipette," IEEE TRANSACTIONS ON BIOMEDICAL ENGINEERING ,Vol. 44, No. 3, 129-135(1997).
- [10] R. Perez-Castillejos, J.A. Plaza, J. Esteve, P. Losantos, M. C. Acero, C. Cane and F. Serra-Mestres, "The Use of Ferrofluid in micromechanics," Sensors and Actuators, Vol. 84, 176-180 (2000)
- [11] H. Hartshorne, C. J. Backhouse and W. E. Lee, "Ferrofluid-based microchip pump and valve," Sensors and Actuators B-CHEMICAL, Vol. 99,592-600 (2004)
- [12] H. Yamaguchi, S. Shuchi, M. Takemura and T. Kuwahara, " Measurement of Void Fraction in Magnetic Fluid Using Electromagnetic Induction," The fifth SME-KSME fluid engineering conference, NOV. 17-21(2002)
- [13] S. Shuchi, H. Yamaguchi and M. Takemura, "Measurement of Void Fraction in Magnetic Fluid Using Electromagnetic Induction," Journal of Fluids Engineering, Vol. 125, 479 -486(2003)
- [14] T. Kuwahara and H. Yamaguchi, "Void fraction measurement in magnetic fluid," Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 289, 403-406(2005)
- [15] T. Kuwahara and H. Yamaguchi, "Void fraction measurement of gas-liquid two-phase flow using magnetic fluid," Journal of thermophysics and heat transfer ,

vol. 21, 173-180(2007)

[16] T. Kuwahara , F. D. Vuyst and H. Yamaguchi, “ Flow regime classification in air magnetic fluid two-phase flow,” Journal of Physics, Vol. 20, 204141(2008).

[17] T. Kuwahara ,H. Yamaguchi and F. D. Vuyst, “Measurement of Bubble Velocity in Air-Magnetic Fluid Two-Phase Flow for Slug and Churn Flows,” NSTL,133-140 (2007)

[18] T. Kuwahara, F. D. Vuyst and H. Yamaguchi, “Bubble velocity measurement using magnetic fluid and electromagnetic induction,” PHYSICS OF FLUIDS ,Vol. 21, 097101(2009)

[19]吳啟鳴,“磁性液滴電能轉換應用於流場量測之實驗研究,”國立交通大學機械工程學系,2010

[20] Terry, A., Oakey, J., and Marr, D. W. M., Microfluidic control using colloidal devices, Science, Vol. 296, pp. 1841-1844, 2002.

