

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

磁性流體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 Flow Measurements

研究生：吳啟鳴

指導教授：陳慶耀 博士

中華民國九十九年七月

磁性流體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 Flow Measurements

研究生：吳啟鳴

Student : Chi -Ming Wu

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

磁性流體電能轉換應用於流場量測之實驗研究

學生:吳啟鳴

指導教授:陳慶耀

國立交通大學機械工程學系碩士班

摘要

本文研究磁性流體電能轉換之實驗及理論方法於磁性流體通過線圈組之研究，並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，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。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。將實驗資料整理一圖表，來觀察速度、體積與感應電動勢之三者關係，最後為了預測最大感應電動勢，本文首先提出單位體積修正因子(α)加入法拉第感應電動勢方程式中，並且得到 $\alpha \sim 0.006$ 。

關鍵字：磁性流體，磁通量密度，感應電動勢。

誌謝

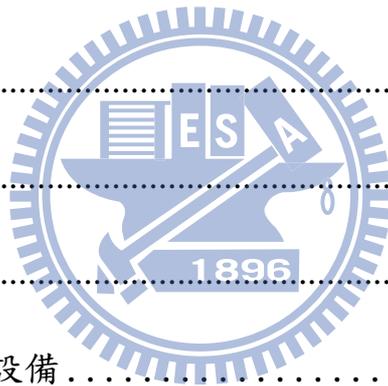
在這兩年中的碩班過程中，首先要感謝老師陳慶耀教授的教誨，給予學生在課業上以及人生方向上的指導與鼓勵；在學習過程中適時的提點，讓學生在研究期間得以依進度循序漸進，而完成整篇論文。並且更是在待人處事上給予適當的教導，使學生更懂得與人相處之道以及學習更多的時間管理方法，此外在學生遇到研究瓶頸時，特別的給予鼓勵和指引方向，使學生能夠克服困難且不放棄的持續進步。

此外，還要感謝學長姐的立杰、程雄、鴻筠、琦雯在實驗上以及人生經歷的分享以及奇軒、宏元、詒翔在我碩士班一年級時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，以及同窗好友的裕盛、柏瑋、佳芬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，以及學弟文良、杰民、世聰、國安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，還有高中同窗好友、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.....	I
誌謝.....	II
目錄.....	III
表目錄.....	V
圖目錄.....	VI
符號說明.....	X
第一章 緒論.....	1
1-1 前言.....	1
1-2 文獻回顧.....	3
1-3 研究目的.....	7
第二章 實驗原理、方法及設備.....	19
2-1 實驗儀器及說明.....	19
2-2 實驗步驟.....	19
2-3 理論背景.....	20
2-4 訊號分析.....	22
第三章 結果與討論.....	31
3-1 磁場與感應電壓之相對比較.....	31
3-1-1 位置與磁場之相對比較.....	31

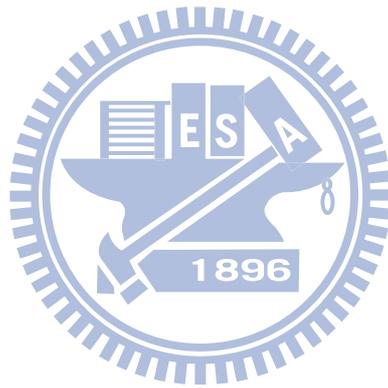


3-1-2 位置與電壓之相對比較.....	32
3-2 磁通量密度比較.....	32
3-2-1 磁鐵與磁液體比較.....	32
3-2-2 以體積速度為變數做比較.....	33
3-3 感應電壓比較.....	34
3-3-1 磁鐵與磁液體比較.....	34
3-3-2 以體積速度為變數做比較.....	35
3-4 固定速度與容積，以不同截面來感應.....	37
3-5 單位修正因子.....	37
第四章 結論.....	55
參考文獻.....	57



表目錄

表 1-1 磁性流體的製造方法	18
表 3-1 相同容積與不同截面容器數值	54



圖目錄

圖 1-1 磁性流體構成圖	9
圖 1-2 磁性流體吸移管作用原理 Greivell and Hannaford, [1997]。	9
圖 1-3 磁性流體閥門和幫浦在微流道內原理 Hartshorne et al. [2004]。 .	10
圖 1-4 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]。	10
圖 1-5 Chen 等人發現可互溶磁性液滴於毛細管中之運動數值模擬。	11
圖 1-6 Nicklin 等人發現感應電壓及速度之感應電壓關係.....	12
圖 1-7 Singh 利用振盪系統系統來感應電壓	12
圖 1-8 直流電與交流電之差別	13
圖 1-9 磁流體受磁場之感磁情形	13
圖 1-10 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.....	14
圖 1-11 不同空包率所產生之磁場	14
圖 1-12 Yamaguchi et al 比較靜止與流動兩相不同之感應電壓變化	15
圖 1-13 氣泡於垂直管中分布情況	15
圖 1-14 不同流動情況所產生之感應電壓	16
圖 1-15 利用兩組相同感應線圈(pick-up coils)來取得訊號.....	16
圖 1-16 兩組相同線圈之感應電壓所產生時間差	17

圖 2-1 實驗設備示意圖	24
圖 2-2 磁性流體示意圖	25
圖 2-3 磁性液體 EMG905 之磁化率曲線圖	25
圖 2-4 線圈組架構	26
圖 2-5 可程式電源供應器示意圖	26
圖 2-6 資料擷取器	27
圖 2-7 桌上型高斯計	27
圖 2-8 磁場在磁液體通過方向產生磁場	28
圖 2-9 STP4 步進馬達控制器	28
圖 2-10 磁流體在容積為 4ml 及 0.04 m/s 時之原始訊號與 利用 FFT 過濾後訊號。	29
圖 2-11 磁流體於容積 4ml 及速度 0.04 m/s 時之時間域轉為 頻率域圖形表示	29
圖 2-12 磁流體於容積 4ml 及速度 0.04 m/s 時之頻率域轉為 時間域圖形表示	30
圖 3-1 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。	41
圖 3-2 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。	42

圖 3-3 磁鐵與磁液體之磁通量密度比較	43
圖 3-4 磁通量密度比較(同體積、不同速度)	43
圖 3-5 磁通量密度比較(不同體積、同速度)	44
圖 3-6 磁鐵與磁液體之感應電動勢比較	44
圖 3-7 在相同速度以不同容積之磁液體產生之感應電壓.....	45
圖 3-8 在相同容積以不同速度之磁液體產生之感應電壓.....	45
圖 3-9 在相同速度下以不同容積之磁液體產生之感應電壓.....	46
圖 3-10 在相同速度下以不同容積之磁液體產生之感應電壓.....	47
圖 3-11 不同速度及不同體積相對應之最大電壓值比較圖.....	48
圖 3-12 不同速度及不同體積相對應之最小電壓值比較圖.....	49
圖 3-13 速度與波寬關係圖	50
圖 3-14 相同容積與不同截面容器圖	50
圖 3-15 利用相同容積但不同容器，在相同速度下所產生之感應電壓與磁場強度	51
圖 3-16 面積與磁場隨時間之改變圖	51
(a) 磁流體感應面積隨時間之改變量	51
(b) 磁流體感應感應磁場隨時間改變量	51
圖 3-18 面積與磁場對時間微分圖	53
(a)磁流體感應面積對時間微分	53

(b)磁流體感應磁場對時間微分.....	53
圖 3-19 實驗與理論值比較($\alpha=0.0052$).....	53
圖 3-20 同相對速度、磁液體體積和不同容器體積下.....	54
之單位體積修正因子 α	54



符號說明

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	線圈匝數
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
α	單位體積修正因子
v_0	為磁液體體積



第一章 緒論

1-1 前言

早期的流場量測是利用接觸式測量，因接觸式的量測，影響到流場變化，在近年來，有學者利用攝影法量測流場資訊，但侷限於儀器部分偏貴，以及量測範圍受限制，如當液滴進入線圈中心時，受線圈外殼所影響，導致於影像部分受阻礙，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，但缺點為儀器部分偏貴。本文將利用電磁感應原理應用於流場量測，優點為非接觸式量測，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，以及可以探討當磁性液滴之濃度改變時會對量測出情形。

本文之磁性液滴移動是利用外部馬達，施以一外力，讓流場有變化狀況，以及外部加 Helmholtz coil，給予一垂直梯度磁場，則當磁液體通過垂直梯度磁場時，會有感磁情況，再經由電磁感應，量取之訊號。

磁性流體(Ferrofluid)發展於 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。

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。

磁性流體是由懸浮於載基流體中之奈米級的鐵磁微粒組成之，磁性流體組合如圖 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。

磁流體現階段一般應用在此列出三部分:(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。

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)。

1-2 文獻回顧

目前磁液體與電磁鐵結合的研究方向多注重於量測，其中包括液滴大小量測、流體移動速度以及磁場的變化、等。根據 Nancy E. Greivell and Blake Hannaford[1]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 1-2。

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，在未來的運用可以利用磁力來驅動流場[2-3]，且可精準控制磁力來驅動流體，圖 1-3 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。

此外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，在生醫上之應用，磁性流體也可應用在醫療上，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。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。根據hen等人 [4,5](如圖 1-4)，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1-5. 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，此運用亦可預知在血管中之流動情況。

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[6]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 [7]所做出之法拉第實驗，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 1-6 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。

利用電能轉換來測量速度，wood 等人[8]亦利用重力加速度關係式，以計算方法求出磁鐵通過線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[7,8]乃利用自由落體方法來量測感應電壓，kingman 等人[9]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。在法拉第定理中磁通量密度亦跟電壓相關，Singh 等人[10]利用振盪系統，將磁鐵固定於一圓弧狀之軌道上如圖 1-7，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。

上述之研究多偏向於直接以磁鐵產生感應電壓，感應電壓產生之原理可由法拉第定理得知，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 1-8，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 1-9 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電磁線圈量測於一靜態溶液中磁粒子之體積分率 Kwon et al.[11] 圖 1-10，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。

感應磁場可利用 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感應之電壓(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，且靜止與流動空包率相同時，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

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)，再利用線圈差來反推速之距離度。磁性流體也可被應用在微機電系統 (MEMs) 中閥門 (valves) 和幫浦 (pumps) 的設計以及生化工程領域 [4,5]。

依據法拉第定律 (Faraday' s law) [6,7]，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 [2,3]，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]

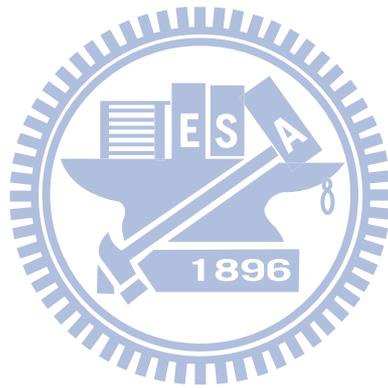
1-3 研究目的

磁液體可由磁生電可由上述之文獻回顧中得知，但現今之研究尚未有發現利用此相關原理來量測磁場之動態情形，其原因為使用交流電為線圈輸入源，線圈所產生為一不穩態磁場，使其因交流電之頻率因而影響到感應電壓產生，進而無法得知流場之狀態。

在本文中相同利用非接觸式量測來量取流體狀態，但與文獻不同處為線圈中通入直流電，以致讓線圈產生一均勻磁場，故此磁場不受電流之正負頻率影響而可直接量取流體狀態(如磁液體之體積、速度)，再利用不同大小體積與速度來感應電壓，以及量取磁場密度，

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。



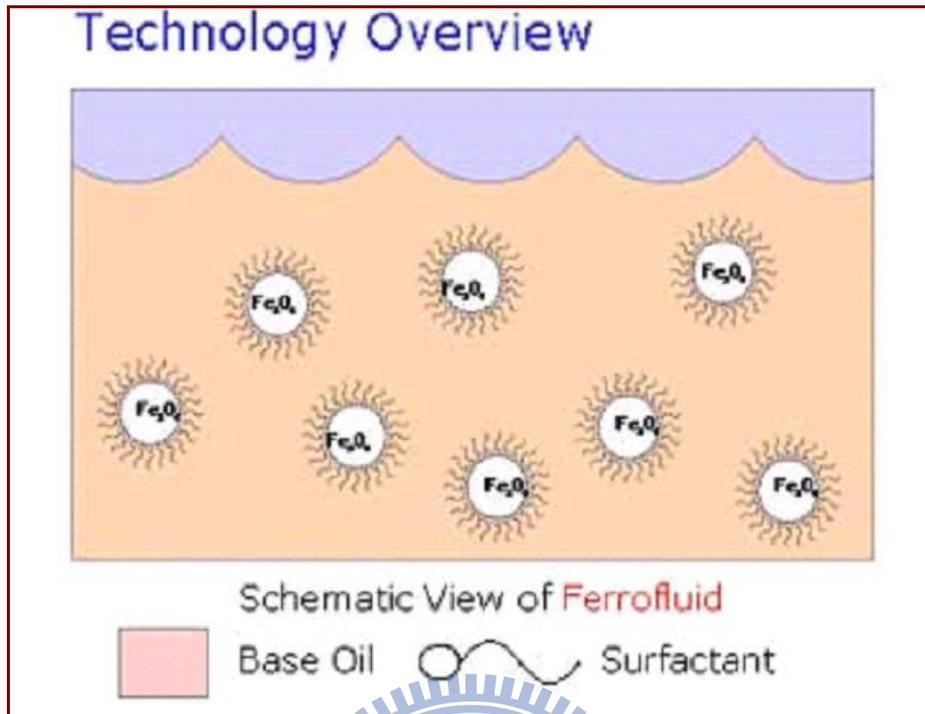


圖 1-1 磁性流體構成圖

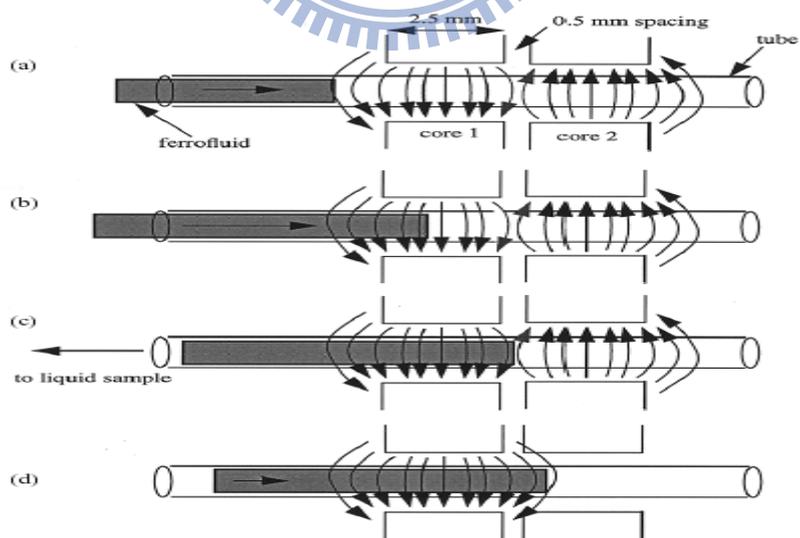


Fig. 7. The idea of the gradient-field modulation scheme for ferrofluid position control. In (a), core 1 and core 2 are energized simultaneously. The ferrofluid moves through the air-gap of core 1 in (b) and stops at a point in the space between the two air-gaps in (c). At this point, the end of the 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 1-2 磁性流體吸移管作用原理 Greivell and Hannaford, [1997]。

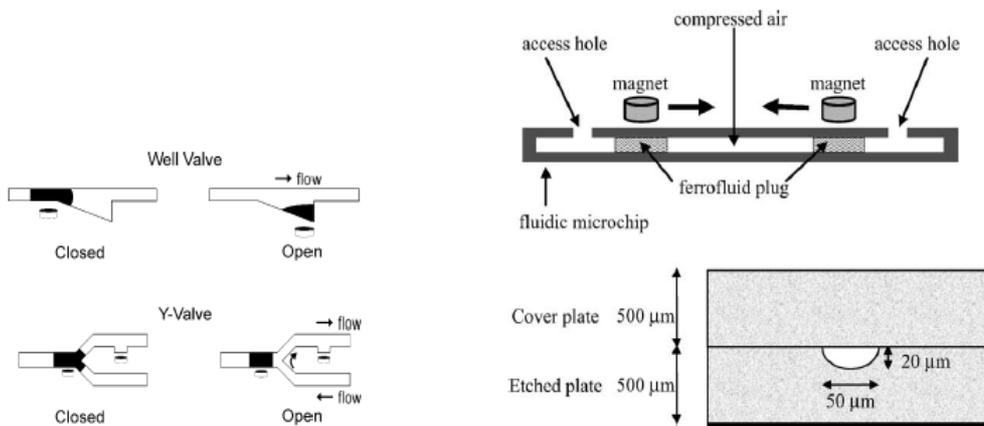


圖 1-3 磁性流體閥門和幫浦在微流道內原理 Hartshorne et al. [2004]。

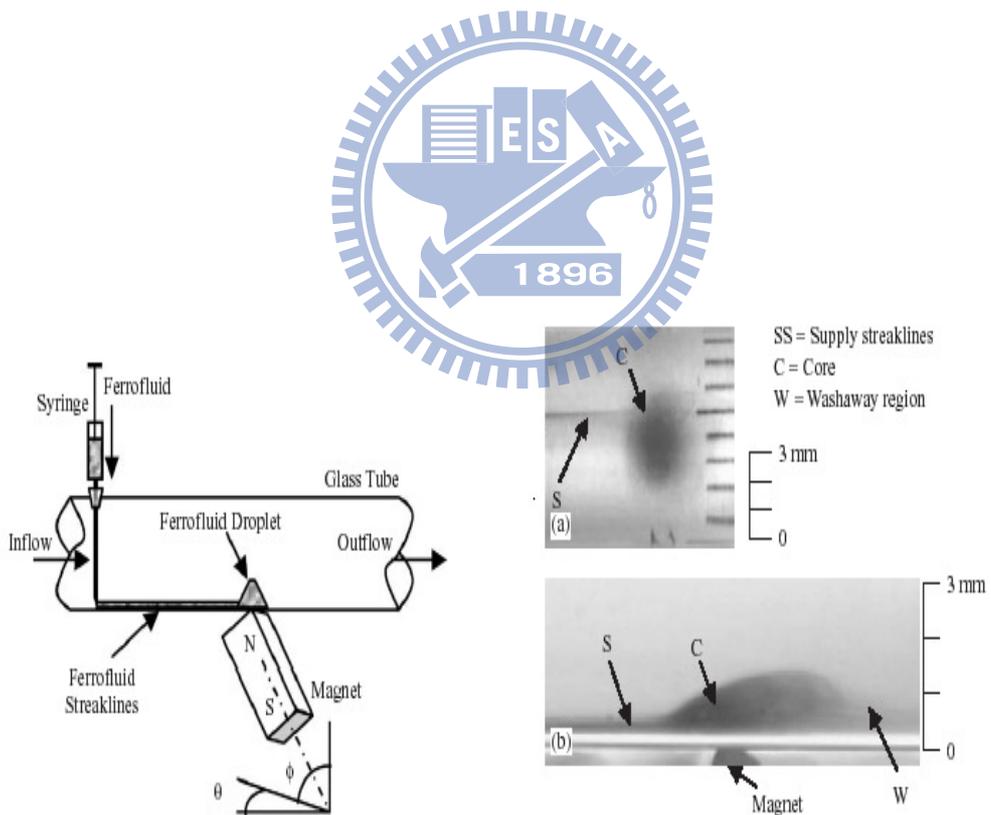


Fig. 1. The experimental setup.

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 1-4 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]。

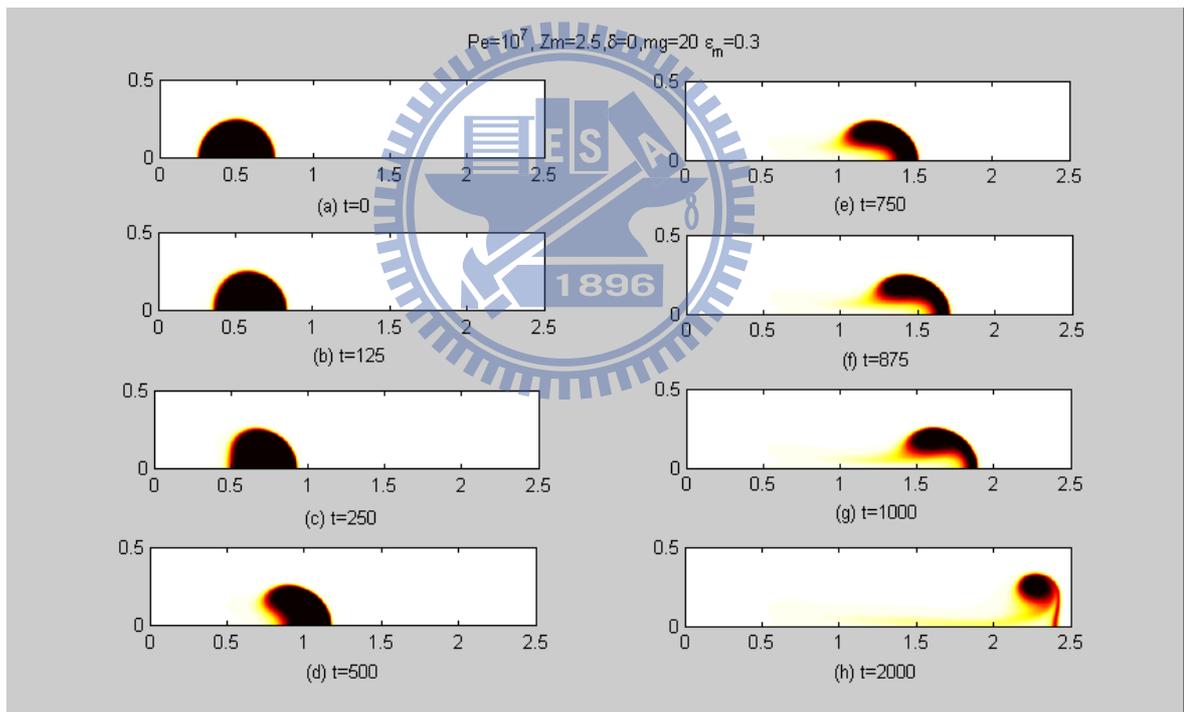


圖 1-5 Chen 等人發現可互溶磁性液滴於毛細管中之運動數值模擬。

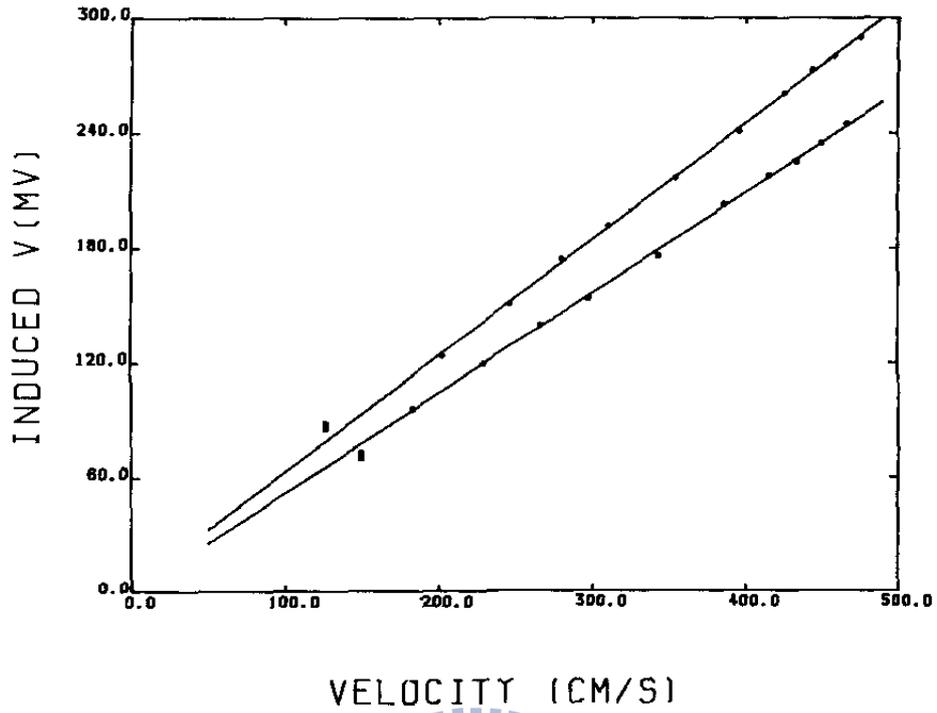


圖 1-6 Nicklin 等人發現感應電壓及速度之感應電壓關係

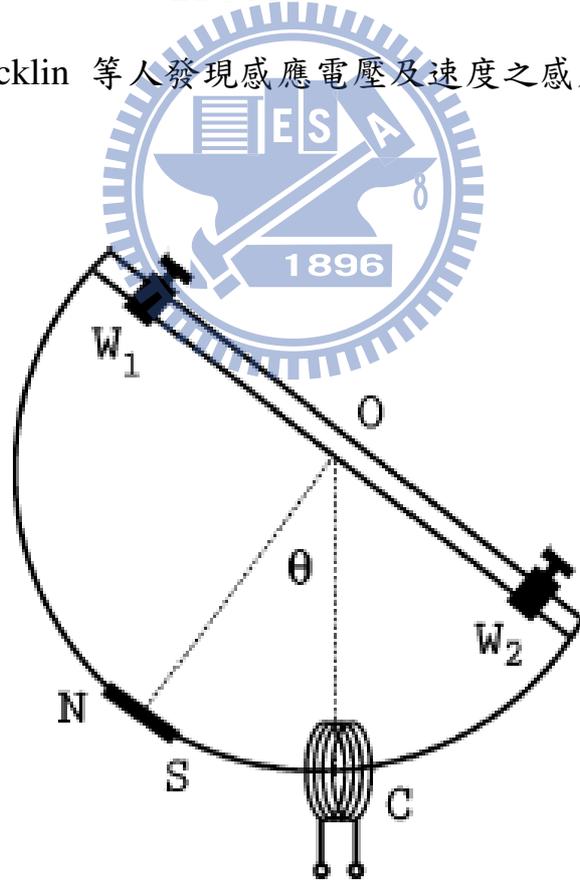


Fig. 1. A magnet (NS) attached to an oscillating system passes through a coil (C) periodically, generating a series of emf pulses.

圖 1-7 Singh 利用振盪系統系統來感應電壓

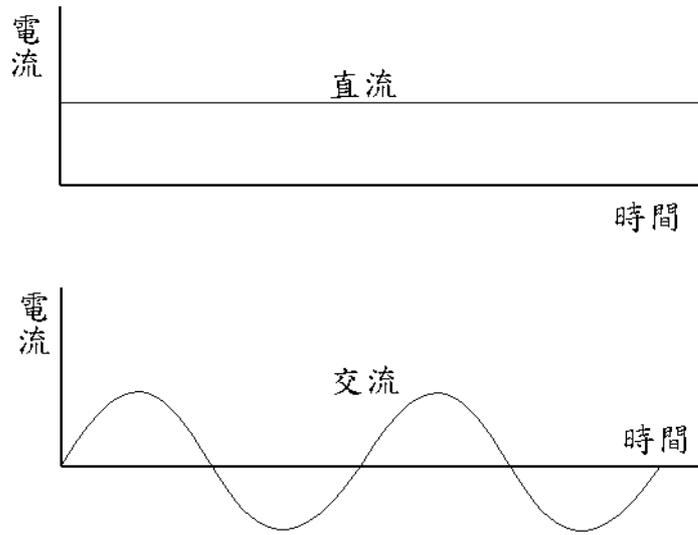


圖 1-8 直流電與交流電之差別

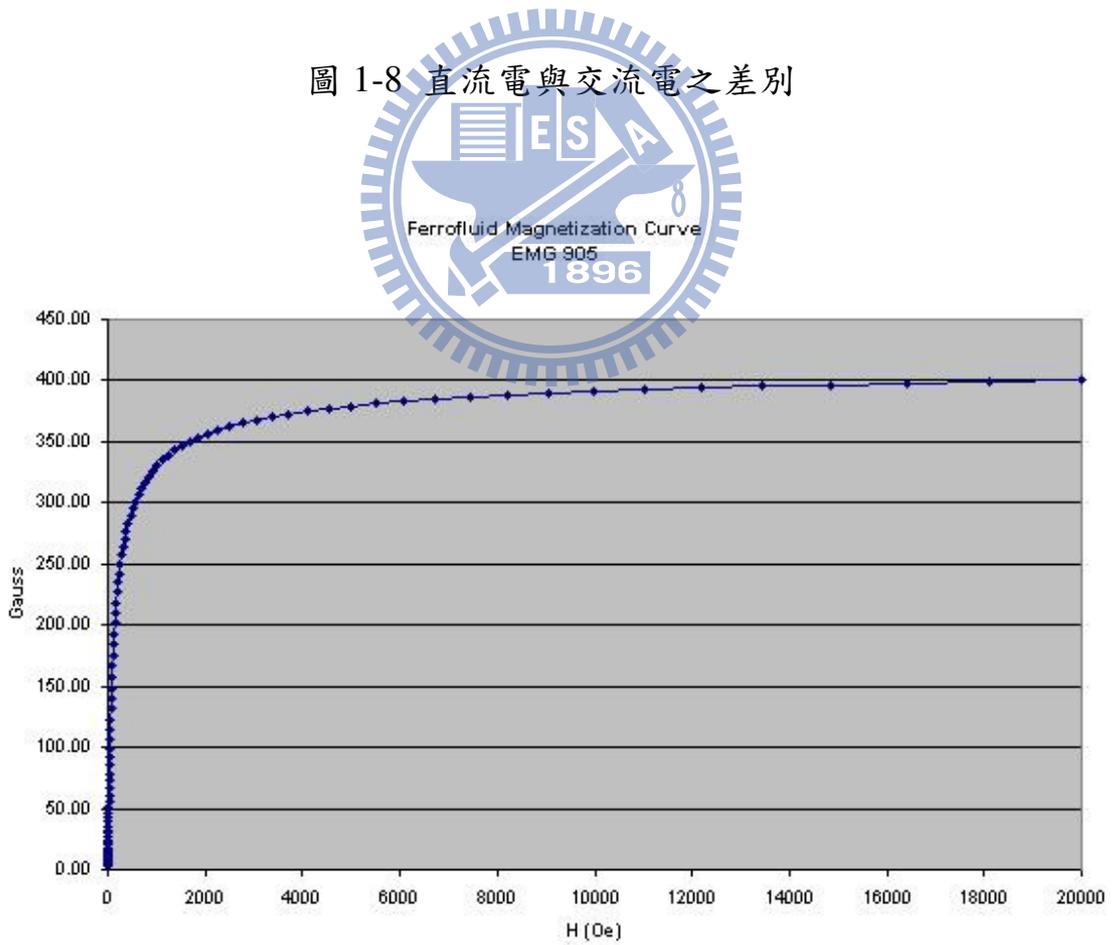


圖 1-9 磁流體受磁場之感磁情形

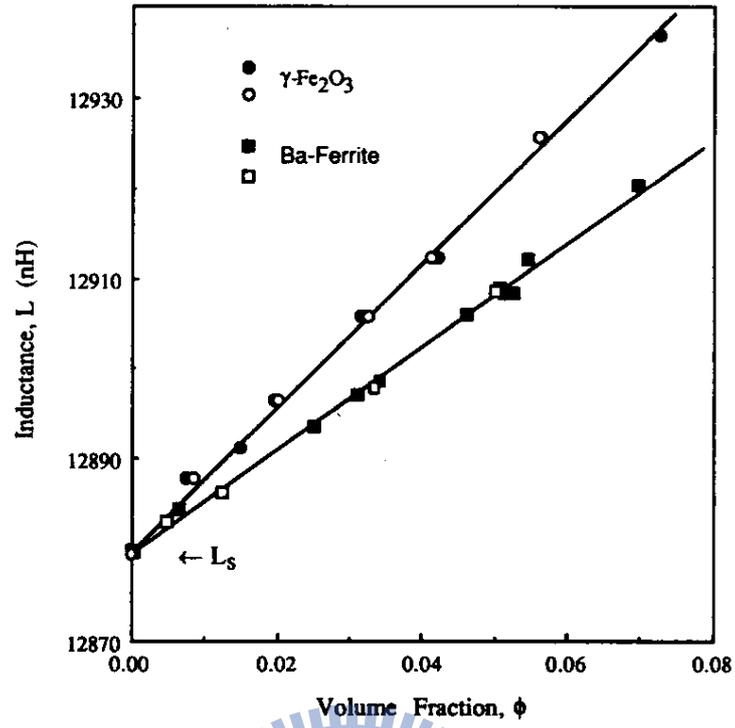


圖 1-10 Kwon et.al 利用交流電磁線圈量測於一靜態溶液中磁粒子之體積分率

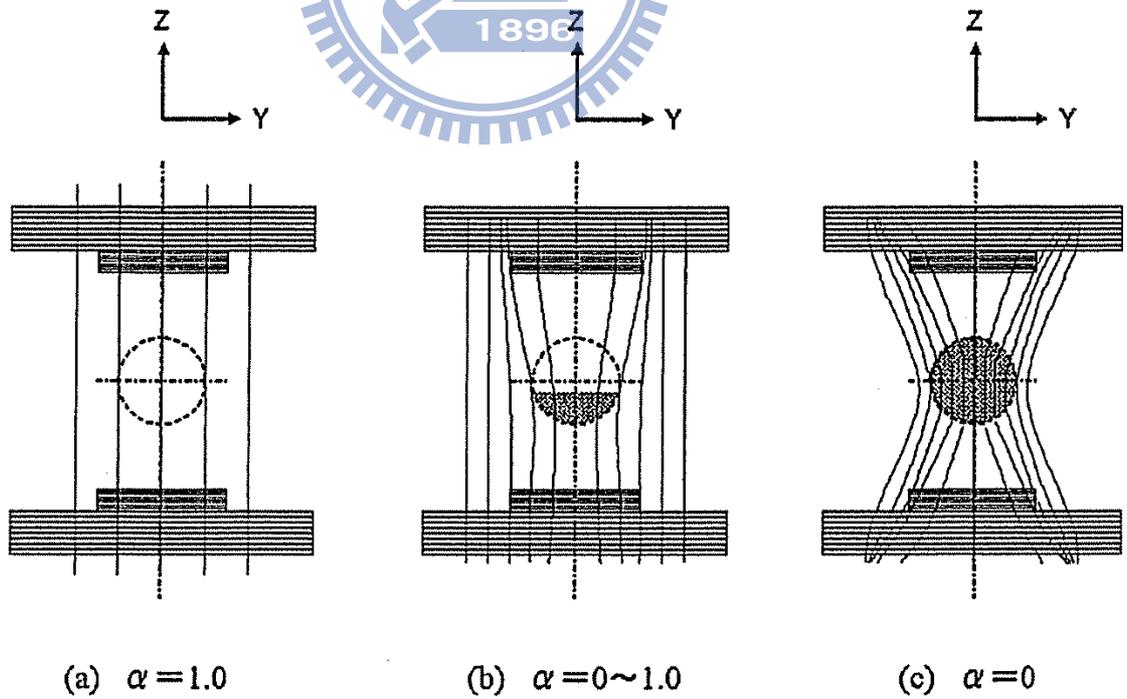


圖 1-11 不同空包率所產生之磁場

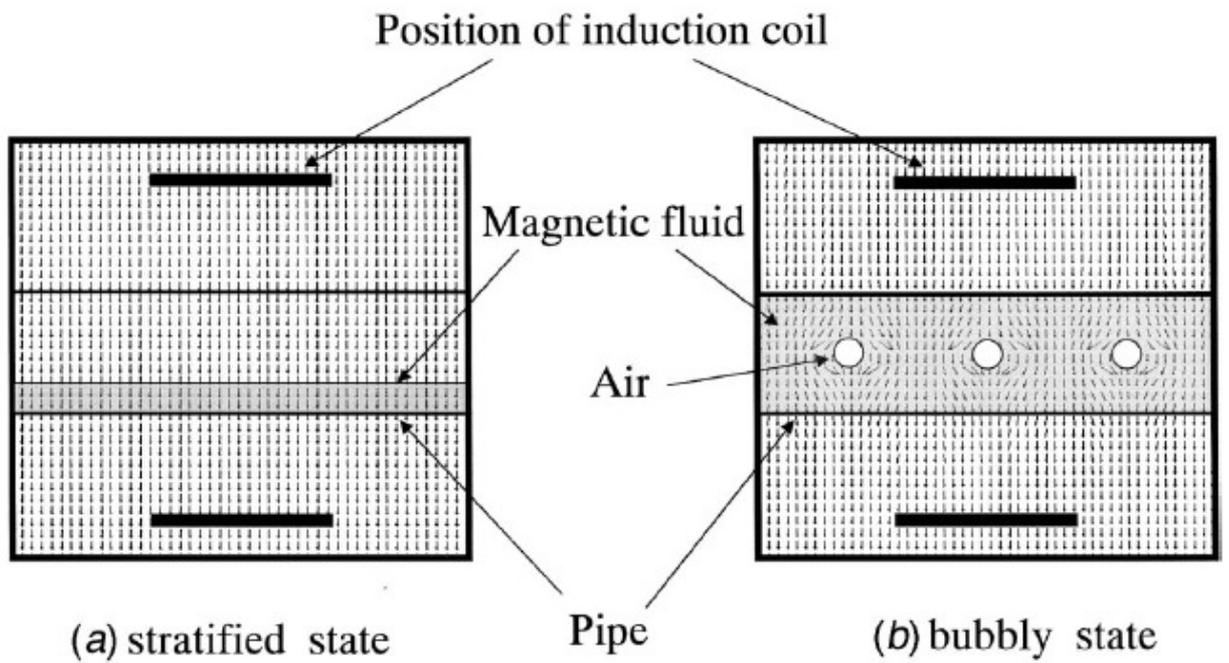


圖 1-12 Yamaguchi et al 比較靜止與流動兩相不同之感應電壓變化

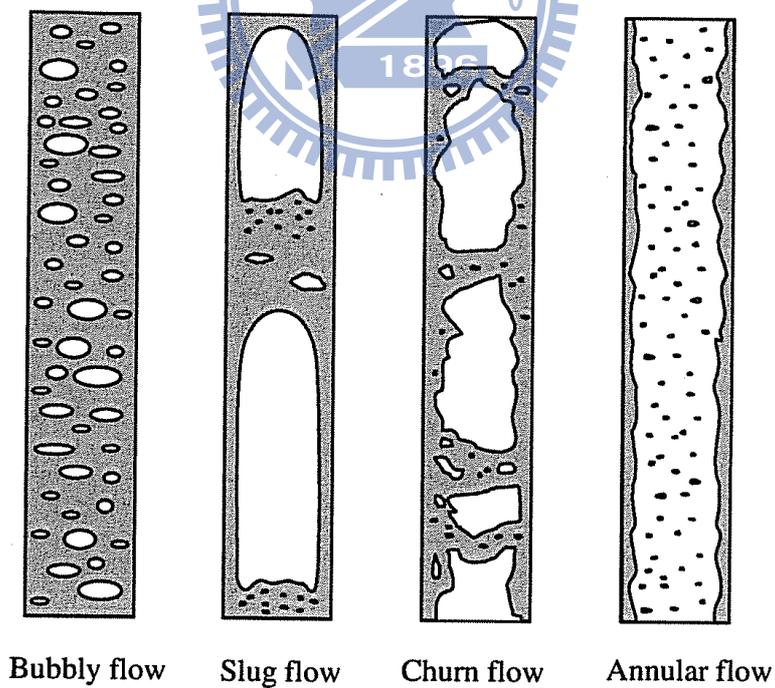


圖 1-13 氣泡於垂直管中分布情況

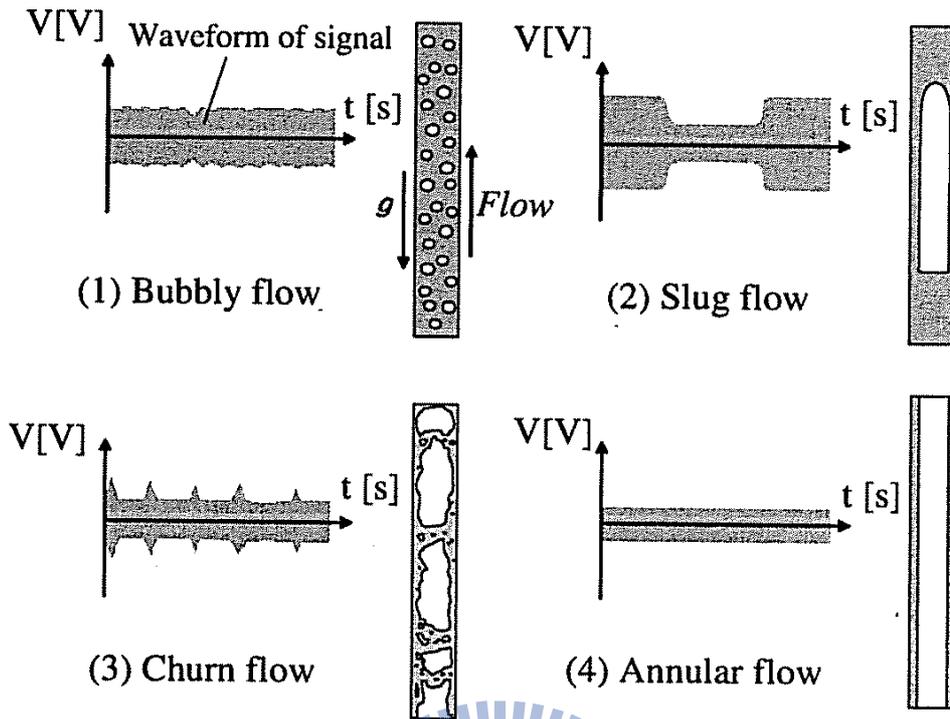


圖 1-14 不同流動情況所產生之感應電壓

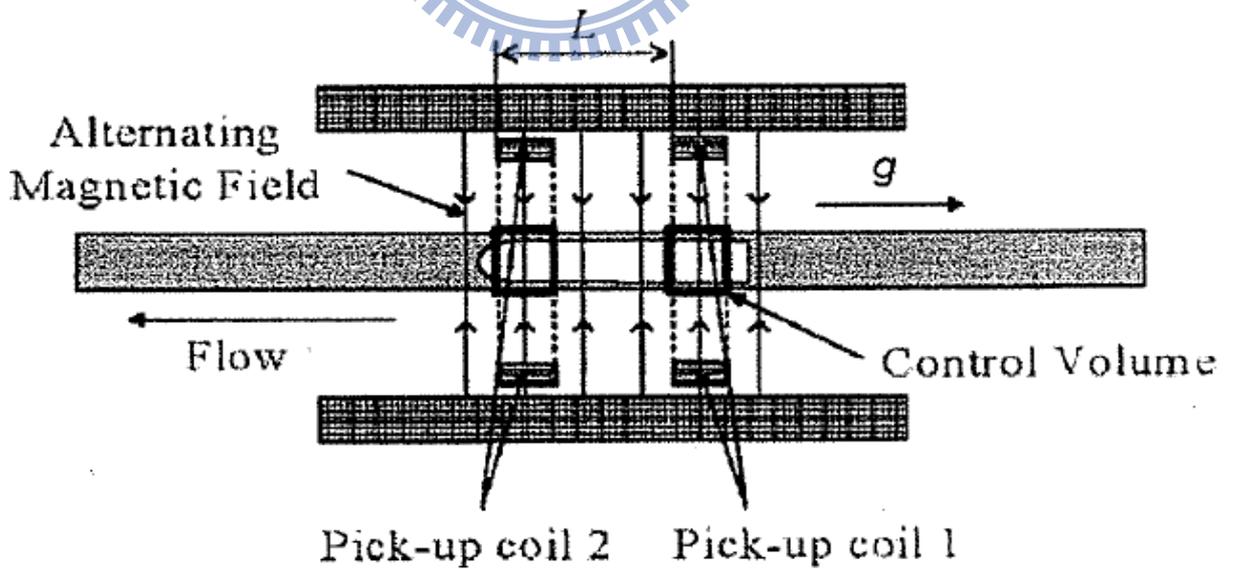
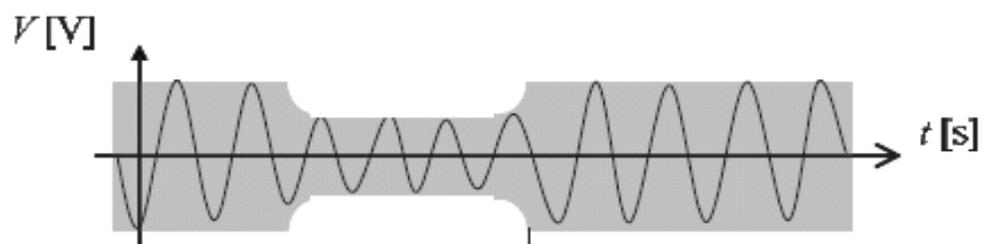
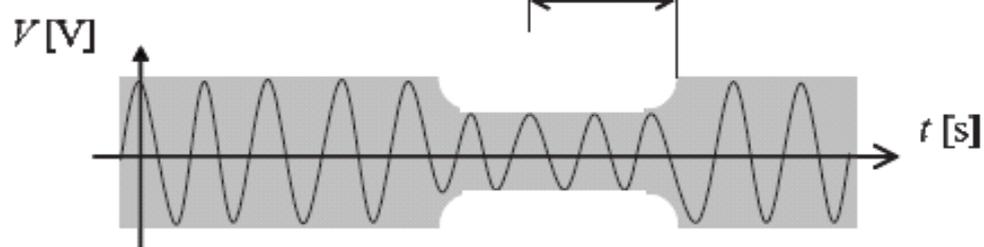


圖 1-15 利用兩組相同感應線圈(pick-up coils)來取得訊號

Wave signal in induction coil 1



Wave signal in induction coil 2



(2) Signals in induction coils

圖 1-16 兩組相同線圈之感應電壓所產生時間差



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 實驗儀器及說明

本實驗設備包含激磁線圈組、感應線圈組、高斯計、資料擷取器、磁性流體、變速馬達組、STP4 步進馬達控制器及電腦。將本實驗設備繪製成圖 2-1 所示，利用此架構可以觀測出磁性流體通過感應線圈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。本實驗中所使用磁性流體為型號 EMG905 的輕礦油基磁性流體。其中 EMG905 磁性流體的黏滯度 $\mu=9$ cp、密度 $\rho_d=1.24$ g/ml、飽和磁化率 $M_s=473.7$ Oe 和原始磁化率 $X=1.9$ ，如圖 2-2、2-3。

2-2 實驗步驟



開始實驗前之前置作業為，調整馬達轉速至實驗中所需之速度，輸入激磁線圈(如圖 2-4)所需之電壓及電流至電源供應器(如圖 2-5)中，連接資料擷取器(如圖 2-6)和高斯計(如圖 2-7)於電腦，利用磁場的開啟來測試激磁線圈與感應線圈是否有平行放置(如排放不平行時，磁力線無互相平行)。磁性流體體積控制乃利用體積與密度關係，來控制體積量。

為了確保實驗時所用的磁場為垂直磁場，實驗前先將線圈進行供電產生磁場後以高斯計探棒(如圖 2-7)進行磁場的量測，量測後結果如圖 2-8 所示。

開始實驗時，先將磁流體連接在馬達轉軸連接線上，此時不啟動馬達，先開啟電源供應器，將電流調整至實驗所需值，使 Helmholtz

線圈通電後產生磁場，檢視電腦(開啟 Fluke DAQ 4.0)產生訊號是否有外來雜訊，若有，檢視線圈間之平行度、以及外在之背景雜訊，檢查完畢，並關閉電源供應器以及資料擷取器之軟體，此時利用 STP4 步進馬達控制器(如圖 2-9)先決定實驗速度。

確定量測速度以及所量取的體積，此時，開啟資料擷取器之軟體，以及開啟電源供應器，等待量測值到達穩定後，啟動變速馬達，此時，磁液體將由感應線圈中通過，當訊號無改變後，停止馬達轉動，及關閉電源供應器及資料擷取器之軟體，

當單一實驗結束後，調整至下一實驗所需之參數，並重複上述步驟。當線圈溫度溫熱時停止實驗，並等待線圈溫度冷卻至常溫。

當實驗結束後，將量測數值以 Excel 形式匯出，並且以 MATLAB 進行繪圖，以及分析動作。



2-3 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 ($H=\text{constant}$)，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(圖 2-8 表示)。

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

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

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。

2-4 訊號分析

因實驗裝置所造成誤差(來自於環境、儀器...等)，固使得磁通量密度及感應電動勢之原始訊號有雜訊產生(圖 2-10)，由圖 2-10 原始訊號(虛線部分)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)[19]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 $G(n/N \cdot \Delta T)$ ，如圖2-13所示，訊號主導頻率為中間域。

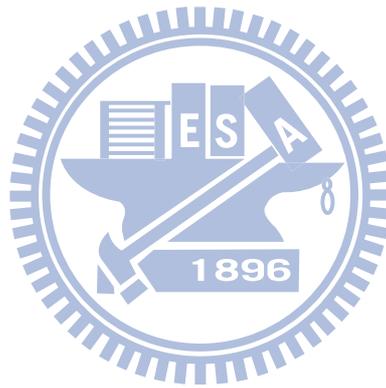
- (2) 過濾高頻的雜訊；
- (3) 將過濾完畢的頻率域利用逆傅立葉轉換 (inverse FFT) 轉變成時

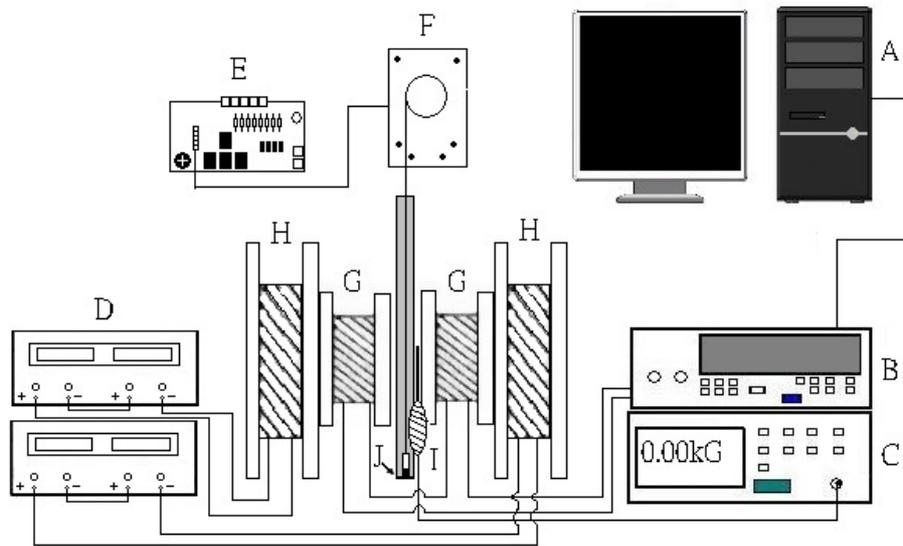
間域

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

轉換後之圖形如圖2-12中表示，經由FFT過濾後留下主要頻域，刪除雜訊波後之訊號表現的比原訊號更平滑。

在圖3-3之後圖形皆有利用上述方法加以處理分析。





- | | |
|----------------|-------------------------------|
| A:PC | F:Three-Phase Induction Motor |
| B:Data Logger | G:Induction Coil |
| C:Gauss Meter | H:Excitation Coil |
| D:Power Source | I:Transverse Probe |
| E:STP-4 | J:Ferrofluid |

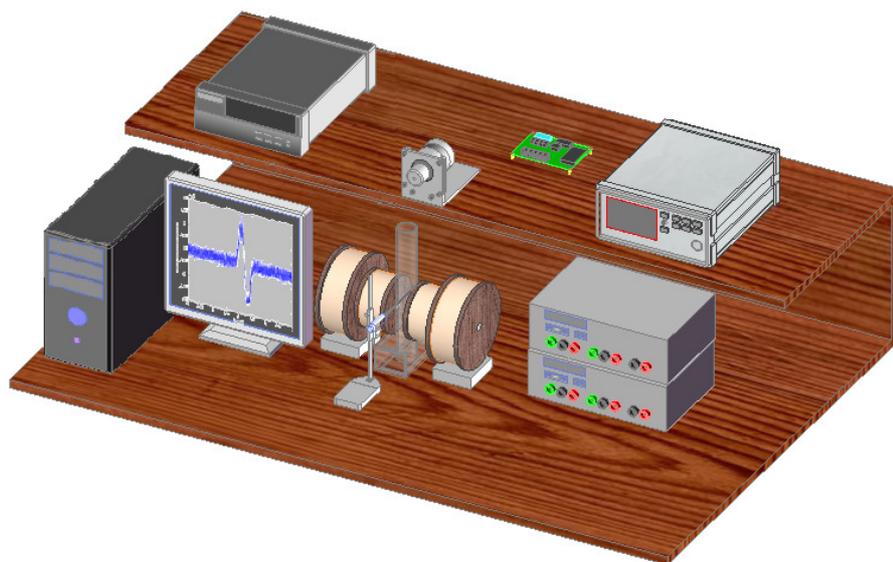


圖 2-1 實驗設備示意圖

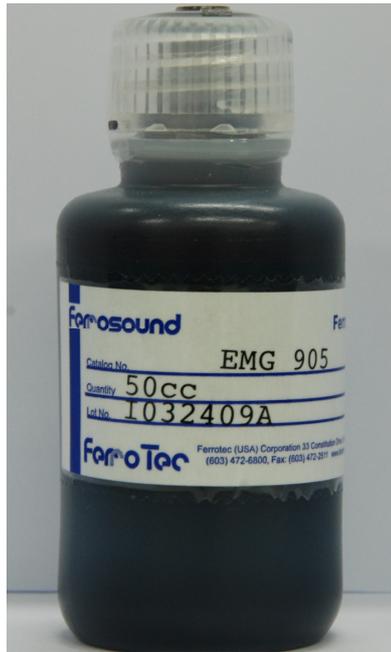


圖 2-2 磁性流體示意圖

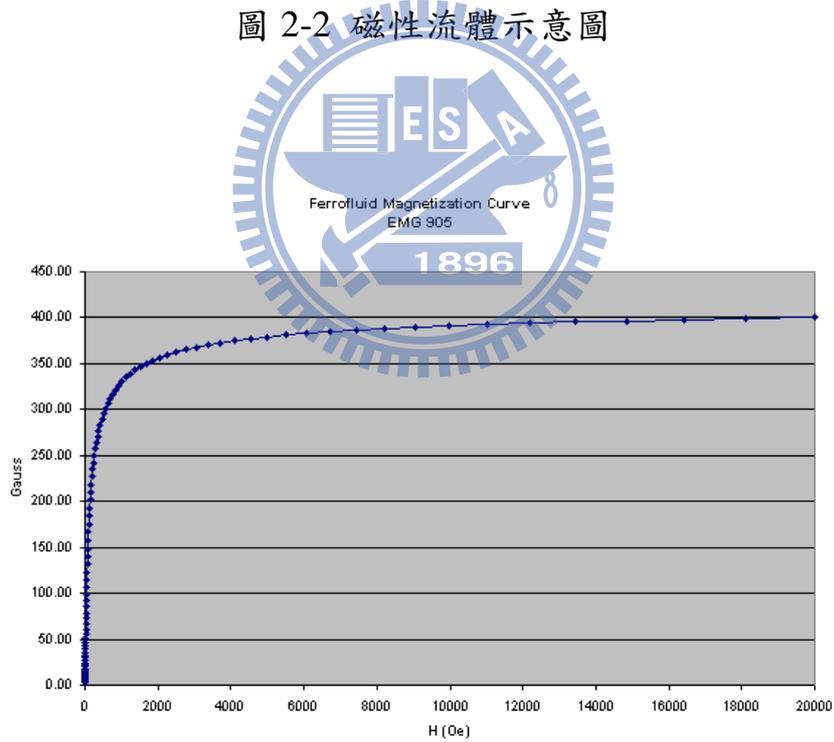


圖 2-3 磁性液體 EMG905 之磁化率曲線圖

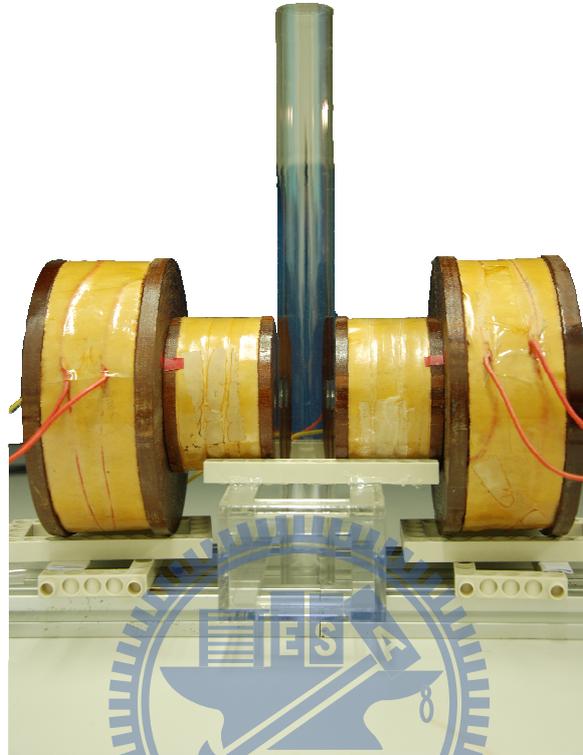


圖 2-4 線圈組架構



圖 2-5 可程式電源供應器示意圖



圖 2-6 資料擷取器



圖 2-7 桌上型高斯計

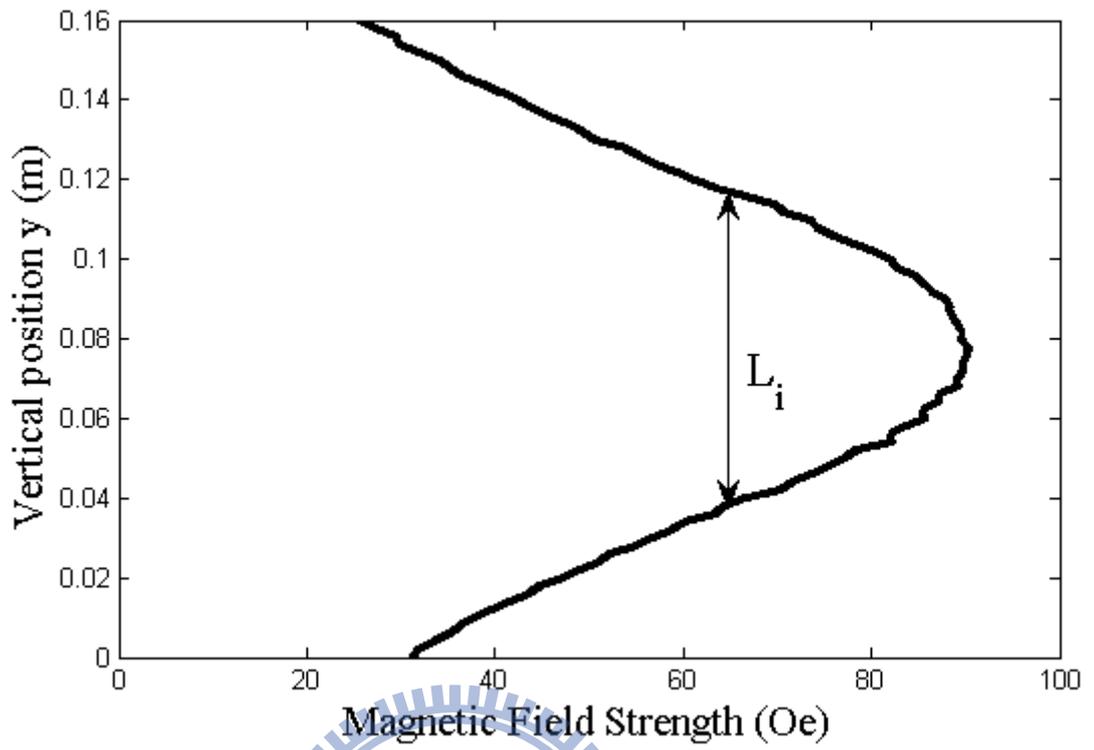


圖 2-8 磁場在磁液體通過方向產生磁場

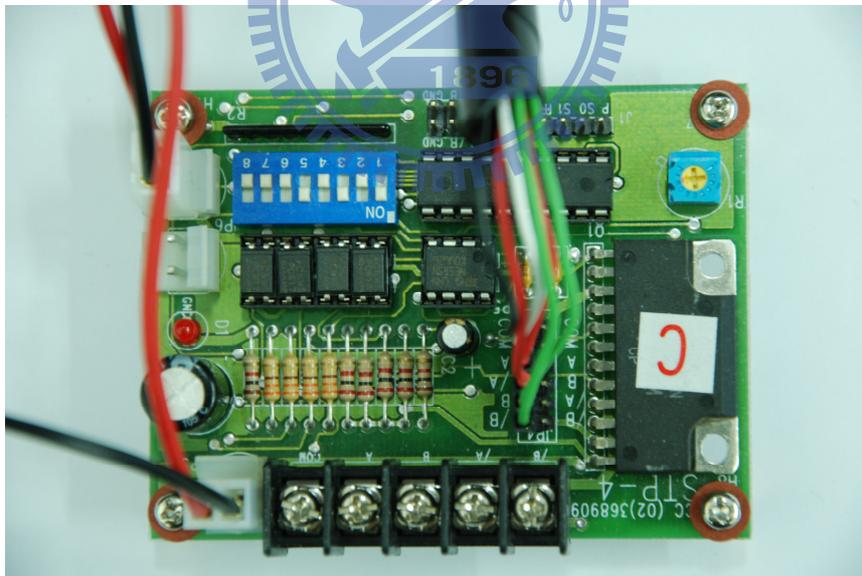


圖 2-9 STP4 步進馬達控制器

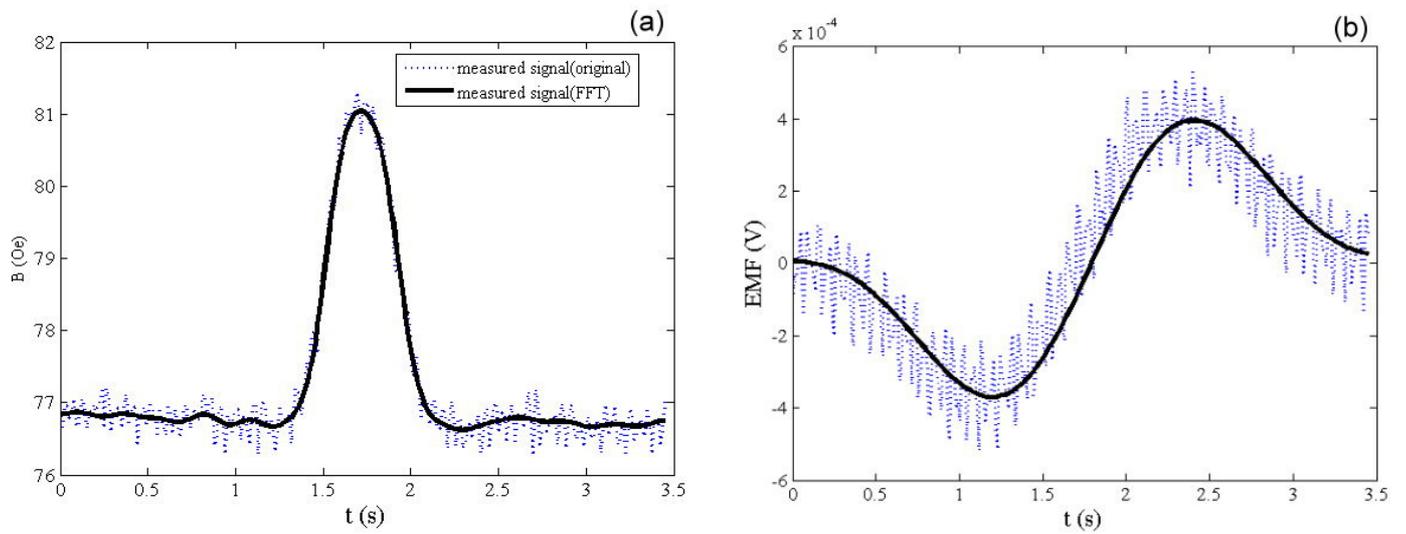


圖 2-10 磁流體在容積為 4ml 及 0.04 m/s 時之原始訊號與

利用 FFT 過濾後訊號。

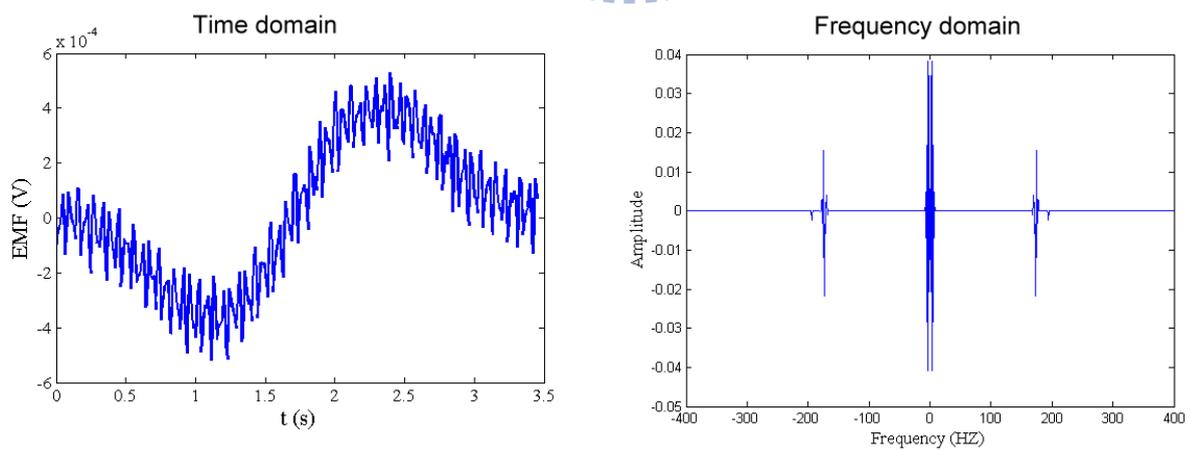


圖 2-11 磁流體於容積 4ml 及速度 0.04 m/s 時之時間域轉為

頻率域圖形表示

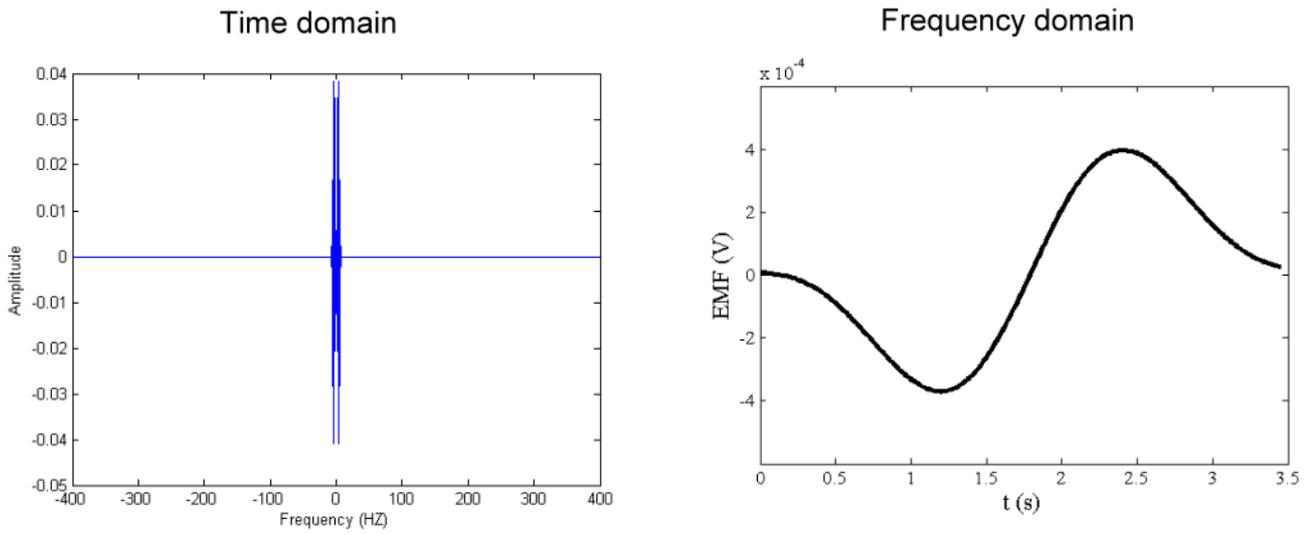
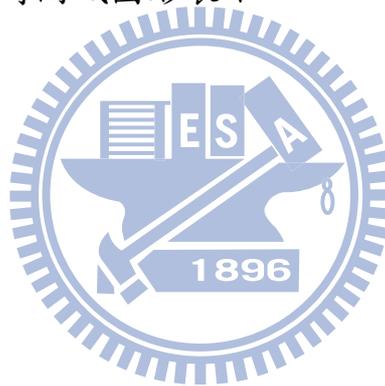


圖 2-12 磁流體於容積 4ml 及速度 0.04 m/s 時之頻率域轉為

時間域圖形表示



第三章 結果與討論

本研究目的主要研究磁性流體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。

本研究為了預測最大感應電動勢，在理論方程式中加入修正因子 α ，並且利用計算出之理論值以及實驗值之間比例關係來求出修正因子。

3-1 磁場與感應電壓之相對比較

3-1-1 位置與磁場之相對比較



圖 3-1 顯示為當磁流體通過一組 Helmholtz coils 時，由探棒所量測出感應磁場及磁流體之間之相互關係。圖中右方部份為磁性流體與線圈之關係圖，其餘部分為感應磁場與時間之關係圖(x 軸為時間、y 軸為磁通量密度)。感應磁場的生成是由激磁線圈磁場(H)以及磁流體導磁率(M)所造成，在圖 3-1(a)及圖 3-1(b)所受的磁場大小單純只受激磁線圈(H)影響，圖 3-1(c)為磁液體剛進入感應線圈之前，由上述之圖可以發現，當磁流體未與碳棒相接觸時，磁場(B)亦不會受改變。而當磁流體正進入感應線圈，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)，所以當磁流體通過探棒時，磁流體會受線圈磁場影響導致面積(A)慢慢增大以及磁通量密度(B)慢慢增大。圖 3-1(e)中為 B 之最大值，此時磁流體位置恰好與碳棒平行，此時表示磁流體對磁場之影響對大(磁流體感磁率(M)為最大)。圖 3-1(d)與圖 3-1(f)中為磁場與時間之斜率之極值(dB/dt 為極值)，此

時亦可表示感應電壓值為最大(可由圖 3-2(d)與 3-2(f)得知)，當磁流體離開探棒時，磁流體之感磁率已經不受線圈磁場影響，所以磁場變成由線圈磁場主導。

3-1-2 位置與電壓之相對比較

感應電壓是由磁場不穩態所產生，造成磁場不穩定是因為線圈組與磁性流體之間相對運動所造成。以圖 3-2 之範例說明感應電壓與磁流體關係，圖中左下部份為磁流體與線圈之關係圖，其餘部分為感應電壓與時間之關係圖(x 軸為時間、y 軸為感應電動勢)。如圖 3-2(a)與圖 3-2(b)所示，當磁性流體未進入感應線圈時，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($d\Phi/dt$)項與時間無關，表示此段時間為穩態之狀態。圖 3-2(c)可以表示為磁流體未進入感應線圈時，並無感應電壓產生，原因在於激磁線圈為 Helmholtz coils，Helmholtz coils 之磁力線為垂直線圈側面，且磁力線較均勻，所以當磁流體未進入感應線圈時，磁場亦不會變化。圖 3-2(d)顯示電壓為一最低值，原因為法拉第定律中($d\Phi/dt$)之值為最小。圖 3-2(e)中表示對 Φ 微分之斜率為零，以及此時的 Φ 值為最高(此時感應面積與磁通量密度皆為最大值)。圖 3-2(f)為斜率最大值，圖 3-2(g)與圖 3-2(h)為磁性流體離開感應線圈時，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。

3-2 磁通量密度比較

3-2-1 磁鐵與磁液體比較

磁鐵有磁偶極(N、S 極)，且本身可以產生磁場，能吸引鐵磁性物質，磁鐵本身具有磁鐵異極則相吸，同極則排斥；磁流體本身為懸浮於載流體中之奈米級的鐵磁微粒組成，所以磁流體為一順磁性材料，巨觀來看磁流體不具有同異極間之情況。所以本實驗中磁流體的感磁，須靠外力(外來磁場 H)來驅動。圖 3-3 為磁鐵(3000oe 以上)與磁液體(2ml)分別在相同速度(0.08 m/s)下所量取之磁場。由圖中清楚得知磁鐵與磁液體之磁場的差異性，磁鐵本身具有 N-S 極，且探棒可判別磁力現所通過之方向性(磁力線是由 N 向 S，所以當 N 極通過探棒時，磁力線是由磁鐵出發，在圖型表現上都為一正值；相反的，當 S 極通過探棒時，磁力線回歸至磁鐵，在圖型表現上都為一負值)，所以在圖中可以明顯看出一波形，產生波形原因是當探棒越靠近磁極時，磁場越大，而探棒遠離磁極時，磁場越小；相對的，磁流體本身具為順磁性，受激磁線圈激磁時磁化率會相對上升，且通量密度為感應磁場以及磁化率之總和，以至於在通過激磁線圈中點(探棒感測區)時磁通量密度最大，所以說磁場大小決定於磁場對磁流體的影響。本時驗中磁鐵與磁液體在相同速度，波寬兩者相差不多，表示磁鐵磁力線範圍與磁流體所產生之磁力線相差不多。

3-2-2 以體積速度為變數做比較

在 3-1-1 中有介紹磁場產生原理，這部分利用體積或速度當成實驗變數來比較實驗差別。當利用相同體積，不同速度時，可由圖 3-4 表示，這邊以 x 軸以位置函數為基準，目的在於說，為了了解在哪個位置上會發生不同狀態所提出的。圖中零點表示初始啟動點，在圖中可以發現，速度大小不會影響到磁通量密度最大值，這是因為磁通量密度為磁場強度與磁流體磁化強度的函數(由(6)式可看出 B 與 v 不互

相影響)，且當速度不同時，轉為位置函數後頻寬與大小皆相差不多，由此可見得，磁流體通過現圈每一點時，所表現出之情況皆相同，由其在相同體積時(無論速度有無相同)，結果亦同。

當在不同體積，同速度時，可由圖 3-5 表示，初始點皆相同，於圖中可以明顯看出磁通量密度最大值隨磁液體體積增加而增加。圖 3-5 可看出磁液體體積完全反應至磁通量密度，當體積越多時，磁粒子數量多相對於感應量增多，所以對照(4)式，當磁場強度為一固定值時，磁流體磁化強度會隨著體積增大而增大，另外可對照圖 1-9，磁場強度與感磁率之關係圖，本實驗最大外加磁場約 80 Oe，對照圖 1-9 時，並未到達磁性飽和程度，所以在數值計算上，須以不同方式計算之。

3-3 感應電壓比較

3-3-1 磁鐵與磁液體比較

感應電動勢生成((7)式中有說明)為磁場改變、感應面積改變及速度有關，在此節比較同速度之下之磁流體及磁鐵。圖 3-3 說明磁鐵及磁流體之間磁通量密度與時間之關係，現以相同規格之磁流體及磁鐵來量取感應電動勢。圖 3-3 所示磁鐵之磁通量密度有兩峰值，而磁液體之磁通量密度有單一峰值(其差別於 3-2-1 有說明)，圖 3-6 為感應電壓，磁流體有 2 峰值原因於前面有所說明，上下峰值相差不多，因通過線圈組之速度為等速。磁鐵電壓有數個峰值，相較之下磁鐵之電壓比磁流體大，原因在於外加磁場輸出有散熱問題，所以外加磁場能輸出之電流有限，以至於磁鐵生成之磁場較大，圖中相同可以了解在同速度下，磁鐵之磁通量密度感應範圍比磁流體大，原因為磁鐵磁力線



範圍較磁流體大。

3-3-2 以體積速度為變數做比較

在 3-1-2 中有提及感應電壓產生方法，在這討論相同容積之磁液體在不同速度下所產生之感應電壓以及討論不同容積磁液體在相同速度下所產生之感應電壓比較。圖 3-7 之實驗條件在速度為 0.04 m/s 時，分別用 1ml、2ml 及 4ml 之磁流體，來量取感應電壓，1ml 感應出之最大電壓為 1.3×10^{-4} 、2ml 感應出之最大電壓為 2.5×10^{-4} 及 4ml 感應出之最大電壓為 3.9×10^{-4} ，在電壓值相比之下，雖無呈現線性變化，原因在於磁流體可能受到外界影響，磁化率亦相對會降低，但在圖中可看出在相同速度下，以不同體積時，體積大小會直接反映於磁通量密度大小之改變，體積越大，磁通量密度越大。在相同速度之下，會產生相同頻寬，所以可以證明訊號的波寬是由速度所主導的，所以會直接影響到感應電動勢。

速度不僅會對頻寬有直接影響，也會對電壓極值有影響，當相同容積磁液體在不同速度時，感應電壓之變化情形。圖 3-8 之實驗條件為磁液體 2ml 時，分別用 0.02 m/s、0.04 m/s、0.08 m/s 之速度，來量取感應電壓，圖中 x 軸以位置函數為基準，為了了解在哪位置上會發生不同狀態所提出的，由圖形可得知，在 0.02 m/s 時感應電壓為 1.3×10^{-4} 、0.04 m/s 時感應電壓為 2.5×10^{-4} 及 0.08 m/s 時感應電壓為 5.1×10^{-4} ，在電壓值相較之下，以等比速度感應出之電壓，會生成，當速度越快時，感應電壓亦會更大，其原因在於磁通量密度之微分值($d\Phi/dt$)變大時， $d\Phi/dt$ 可經由連鎖率方法導出速度項，且理論方程式之速度項與感應電動勢成正比關係，以導致速度越大時，電壓變大。

本實驗為了分析更多實驗上的數據，以相同速度在不同體積時，作出實驗值(如圖 3-9)，以及以相同體積在不同速度下，作出實驗值(如圖 3-10)，由圖可知，在最小速度(0.02 m/s)及體積最小(1 ML)時，感應電壓值為最低，原因在於當體積最小時，磁液體本身之感磁率亦會降低，所以磁通量密度亦會降低，連帶影響感應電壓值($d\Phi/dt$)值降低);相反地以最大速度(0.05 m/s)及體積最大(4 ML)時，感應電壓值為最大，原因在於體積最大時，磁流體感磁率增加，所以會導致($d\Phi/dt$)更大。在圖 3-10 中以相同體積不同速度來比較，這邊 x 軸以時間函數代表，以時間函數為 x 軸含意是在於了解不同速度下對電壓產生之頻寬(波寬)之差別，當在相同容積下，速度越快時，波寬顯得越窄，且感應電壓值越大;相反地，當在相同容積下，速度越慢時，波寬顯得越大，感應電壓值越小，磁流體體積與感應電動勢兩者關係在前面皆有完整介紹。

經由圖 3-11 及圖 3-12 分別為不同速度以及不同容積下所對應的最大以及最小感應電壓極值，這邊最小感應電壓極值定義為利用取出之最小負值取絕對值。在圖中可明確了解速度、容積以及感應電壓極值三者相互關係，由圖 3-11(a)與圖 3-12(a)中，體積與電壓極值成一線性關係，表示當體積越多時，電壓會隨體積的量呈現性變化，另外圖 3-11(b)與圖 3-12(b)中，也可看出速度與電壓成一線性關係。所以可以利用此 3-D 圖形，來反推當知道電壓、速度或電壓極值時，三者中之兩者時，可以利用圖形，來推算其一變數。

在上段敘述中，利用三個變數之相互關係，在圖 3-13 中，利用波寬來反推與速度之關係圖。利用圖 3-11 及圖 3-13 兩圖可以反推一訊號，所在於之狀況。

假設狀況為所知一訊號，此訊號可以利用分析軟體，來判別訊號

頻寬以及最大電壓大小，其步驟如下，先用已知之頻寬透過圖 3-13 來反推算出實驗之速度，接著利用最大電壓以及上述步驟 1 所推算出之速度經由圖 3-11 來反推磁流體體積。

假設另一狀況為已知速度及體積，可以利用圖 3-11 或圖 3-12 中，左側視圖或者右側試圖皆可以查出所呈現之速度項。其範例與上段範例最大差別在於有無速度項之差別，如未知速度項可經由圖 3-13 來查詢，再反推所需值。

3-4 固定速度與容積，以不同截面來感應

以上述之磁流體狀態皆為於相同容器(底面積相同容器)中，此節藉著當固定磁液體之量並以不同底面積罐子來產生感應電壓時來產生不同變化，並比較之。在圖 3-14 中，利用相同容積之磁流體且分裝在不同容器中時，來比較感應電壓以及磁通量密度的差別。圖 3-15 中，訊號之波寬甚差不大，但磁通量密度因受單位長度內磁流體的含量的多寡而有了變化，4 ml 罐子產生之感應電壓為 2.7×10^{-4} 、6 ml ml 罐子產生之感應電壓為 2.9×10^{-4} ，8 ml 罐子產生之感應電壓為 3×10^{-4} 及 10 ml 罐子產生之感應電壓為 3.4×10^{-4} ，。10ml 罐子所產生之感應電壓以及磁通量密度稍多過於 4ml，表示底面積越大之罐子，單位高度內的 B(磁通量密度)值越大，亦可說明為磁流體中之磁顆粒較緊密靠近關係，故感應電壓也會跟著微量增加。

3-5 單位修正因子

以上為實驗做出之資料點作定量分析，並找出其關係。在這節將加入理論值方式並且找出與實驗上之關係，最後並提出一單位修正因

子觀念，來加入至方程式。

為了預測當一磁流體通過線圈組時，所造成之感應電動勢，本文提出了單位修正因子(unit volume correction parameter)之方法來驗證理論及實驗值之間關係。

單位修正因子必須先假設外部磁場為一均勻磁場，且磁通量密度之假設方法為探棒需與移動中的磁流體跟著移動，以量測到磁流體在線圈中每一點所感測到之磁通量密度。計算方式利用(2)式中磁通量密度與面積為磁通量之函數，寫如下式：

$$\phi = B \cdot A \quad (10)$$

利用法拉第定理中 ϕ 對時間微分觀念，將(10)式中兩變數做一全微分形式，以 B 及 A 兩數為變數之想法是將感應線圈當成一感應區，以至於當磁流體進入感應區時，磁通量密度以及感應面積會隨進入感應區之磁流體量而改變，其微分結果如下：

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{dB}{dt} \cdot A + B \cdot \frac{dA}{dt} \quad (11)$$

其中 B 為感應磁場以及磁流體本身之磁化率之總和，所以當磁場為一均勻狀態時，利用進入感應線圈之磁流體感應量來計算出磁通量密度(B)及感應面積(A)。

以下利用範例(2 ml&0.08 m/s)來證明，如上說明磁場為一均勻磁場，如(11)式說明需求出 A、B 兩數值，圖 3-16 分別為磁流體進入感應線圈數值，在圖 3-16(a)中，感應面積取的大小是照進入感應線圈之後，與磁力線互相正交之面積；磁通量密度之取法，首先先取出不同速度同體積之磁通量密度圖(圖 3-5)，並取之磁通量密度最大值如

圖 3-17 鐘表示，x 軸為磁液體體積，y 軸為磁流體感磁量(M)，接著將 M 值加入磁場所感應出之值(H)，及可求出 B 值。圖 3-16 中之正斜率斜線為磁流體從未進入至完全進入(即圖 3-18 磁流體通過 B 區時之反應)；圖 3-16 之負斜率斜線為磁流體從完全進入至完全離開(即圖 3-18 磁流體通過 D 區時之反應)，中間平線為完全進入感應線圈(B 區至 D 區)階段。

得到 A、B 兩數值後，將 A、B 對時間微分，即得 dA/dt 、 dB/dt 兩項，如圖 3-18 所示，在圖 3-19(a)與 3-19(b)中可以明顯得知圖 3-16 斜線之斜率為固定值。

利用(11)式在加入其餘參數，如以下所示

$$V = -(\alpha v_0)N \left(\frac{dB}{dt} \cdot A + B \cdot \frac{dA}{dt} \right) \quad (12)$$

其中 v_0 為磁液體體積，N 為感應線圈匝數(感應線圈每顆匝數為 1800 匝)，此實驗使用一組(兩顆)感應線圈，所以這邊取 3600 匝。

利用(10)式計算出之數值加入其餘常數後另外加入單位修正因子(α)讓實驗感應電動勢最大值與理論感應電動勢最大值為相同大小並求得一比值並處以體積，讓之比值為一單位比值，如圖 3-20 所示 $\alpha \approx 0.0052$ 。在實驗中加入更多實驗數據來驗證單位修正因子是否為相同數值，圖 3-21 分別在以下不同參數所作之數據：

- (1) 相同速度下，不同磁液體體積時之狀況
- (2) 相同磁液體體積下不相同速度時之狀況
- (3) 不同底面積罐子裡，相同磁液體體積及相同速度時之狀況

以上之三種情況下計算出之單位修正因子約略靠近 $\alpha \approx 0.0056$ 。從圖中可明顯觀察出單位修正因子(α)並不隨不同參數

(體積、速度、管子截面積)變化而改變。



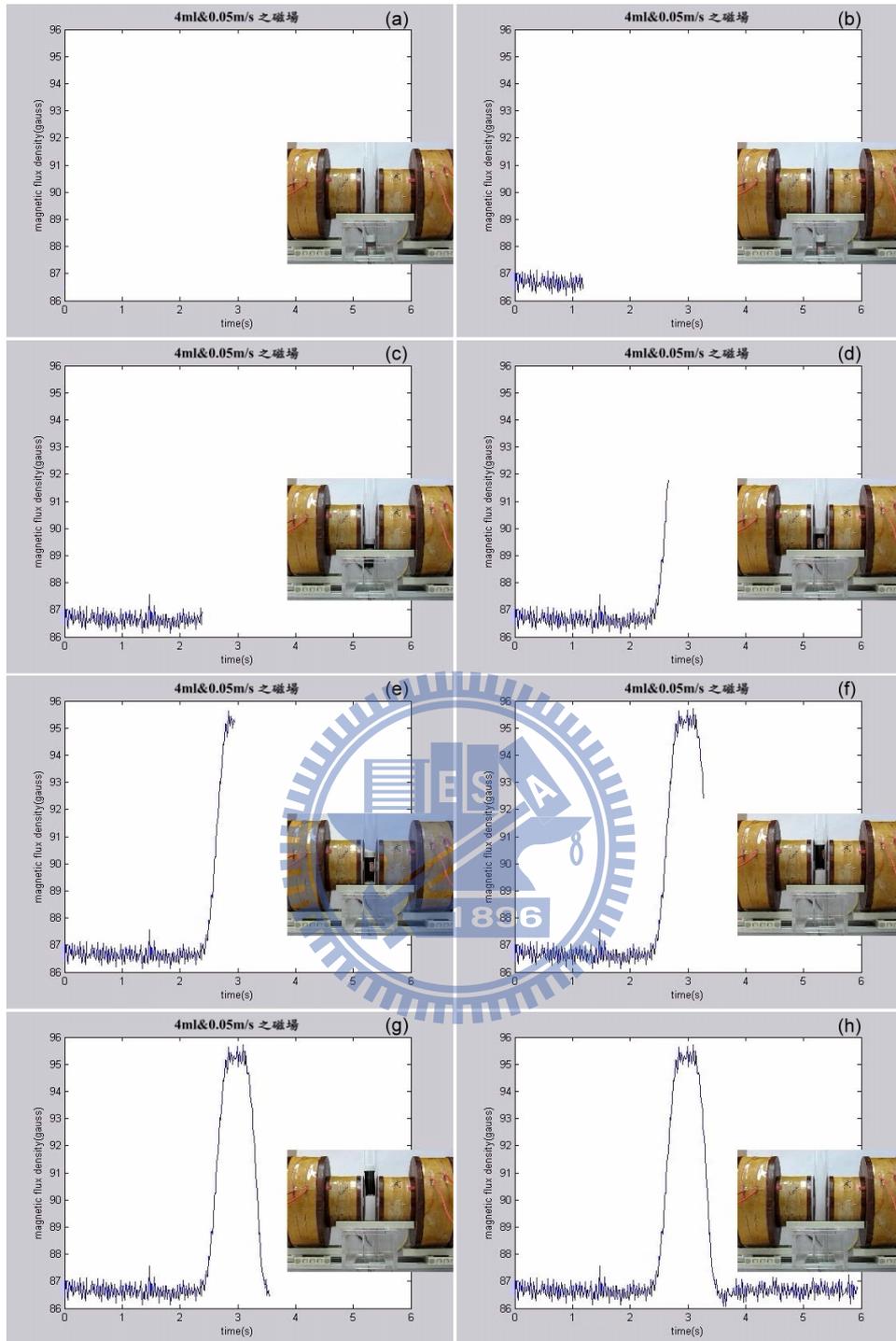


圖 3-1 磁性流體(4 ml)受外力以移動(0.05 m/s)產生感應磁場(B)之時間磁場圖。

(a)t=0s;(b)t=1.20s;(c)t=2.41s;(d)t=2.69s;(e)t=3s;(f)t=3.30s;(g)t=3.59s;(h)t=6s

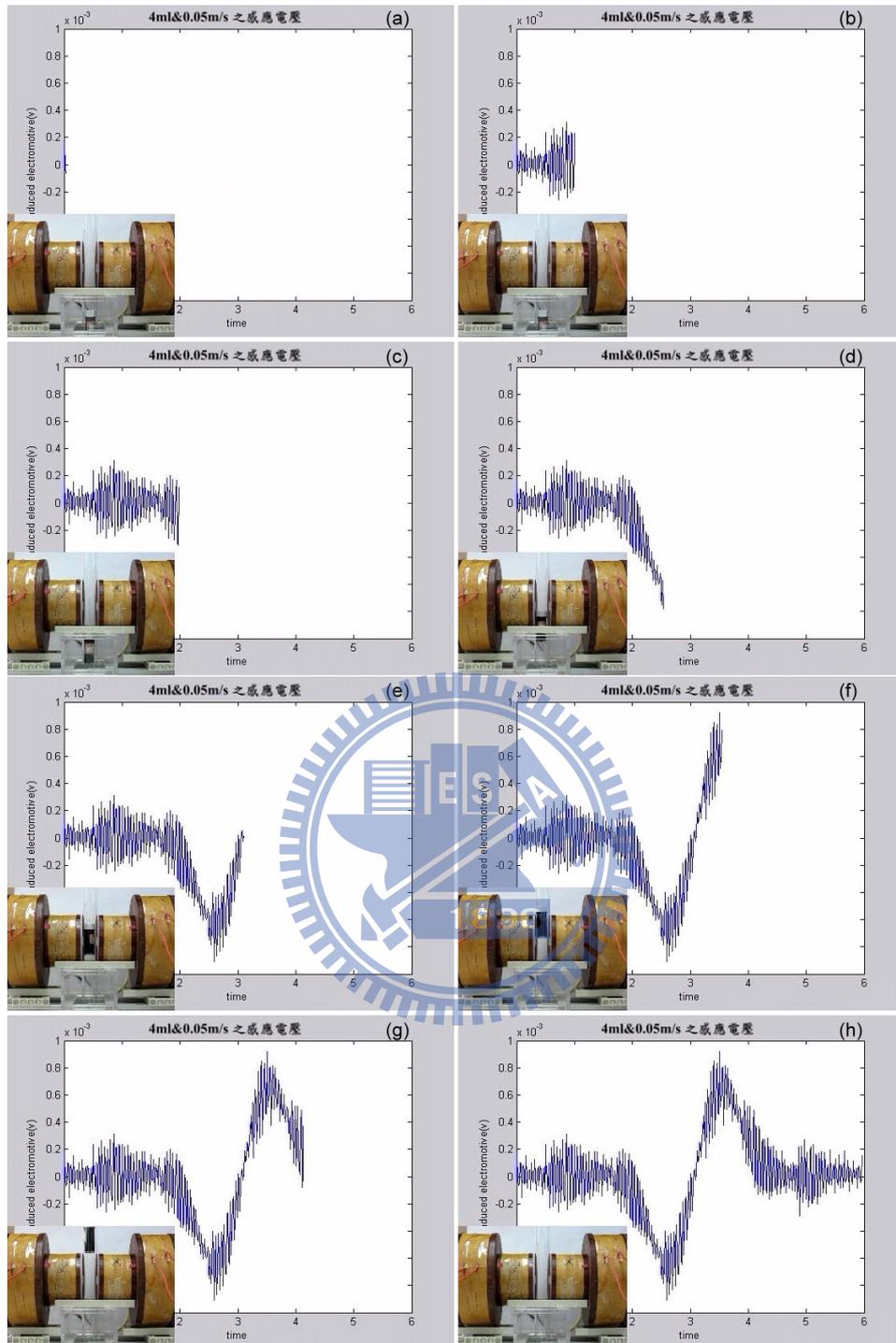


圖 3-2 磁性流體(4 ml)受外力以移動(0.05 m/s)產生感應電壓(V)之時間電壓圖。

(a)t=0s;(b)t=0.99s;(c)t=1.98s;(d)t=2.54s;(e)t=3.11s;(f)t=3.54s;(g)t=4.14s;
(h)t=6s

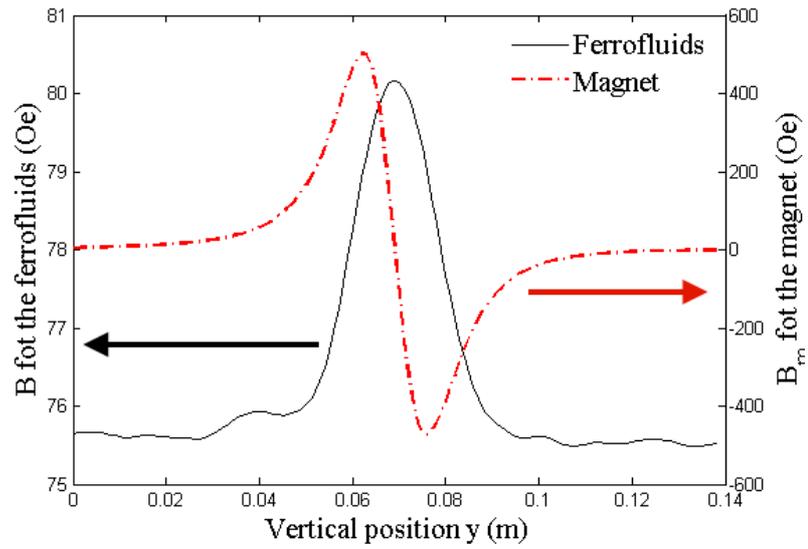


圖 3-3 磁鐵與磁液體之磁通量密度比較

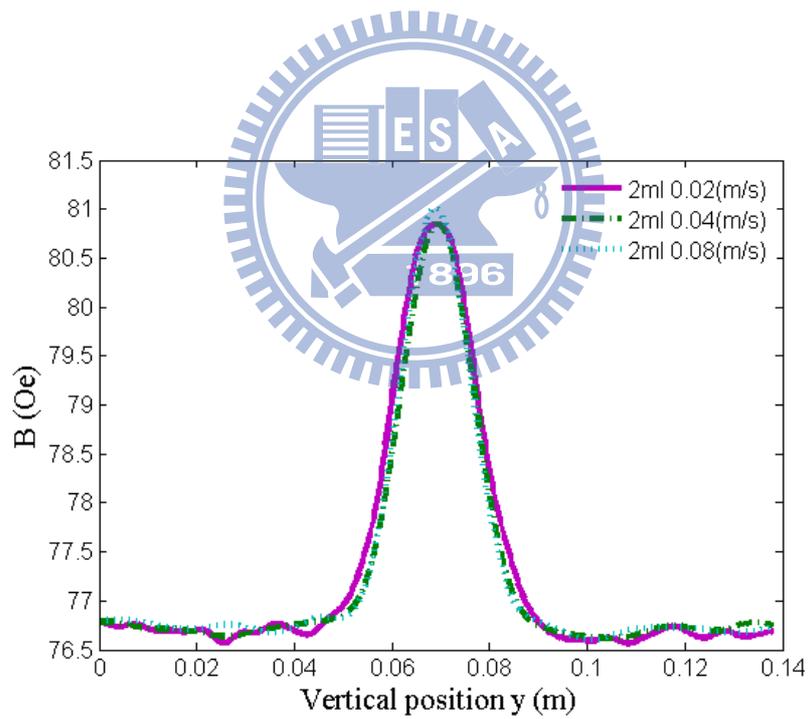


圖 3-4 磁通量密度比較(同體積、不同速度)

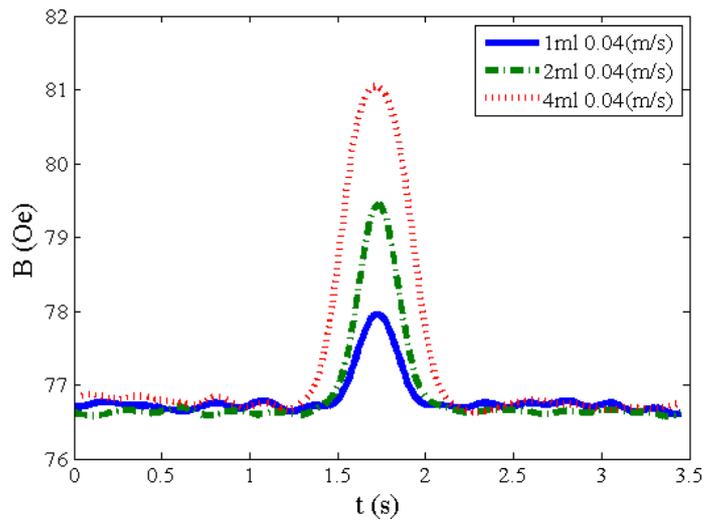


圖 3-5 磁通量密度比較(不同體積、同速度)

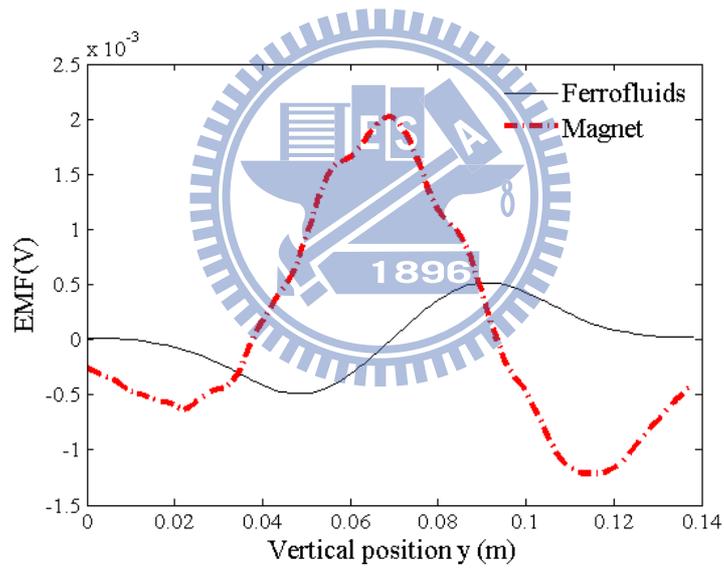


圖 3-6 磁鐵與磁液體之感應電動勢比較

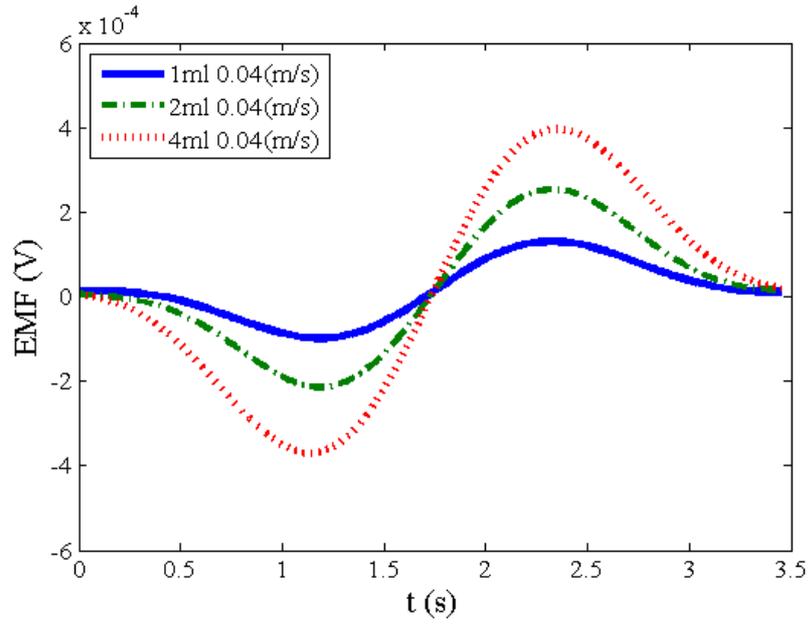


圖 3-7 在相同速度以不同容積之磁液體產生之感應電壓

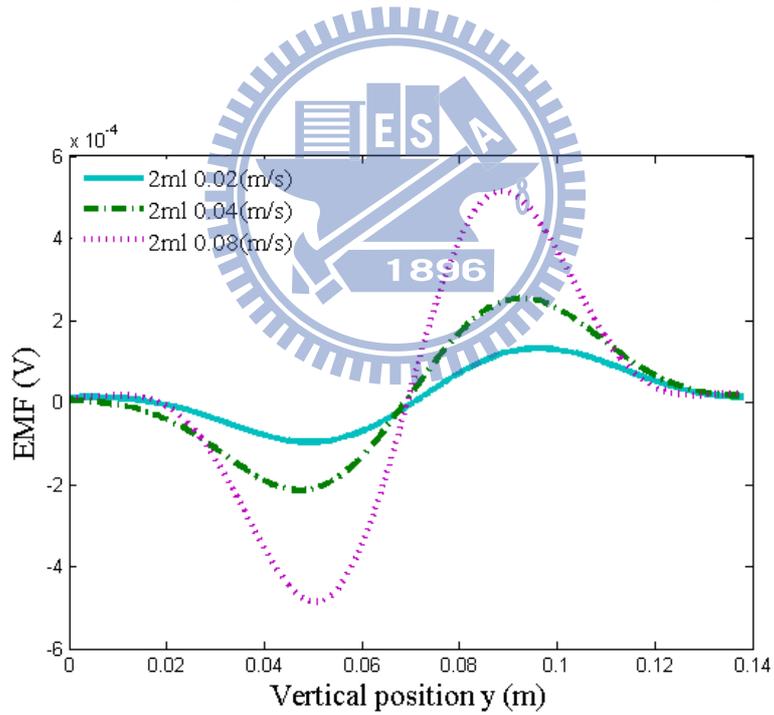


圖 3-8 在相同容積以不同速度之磁液體產生之感應電壓

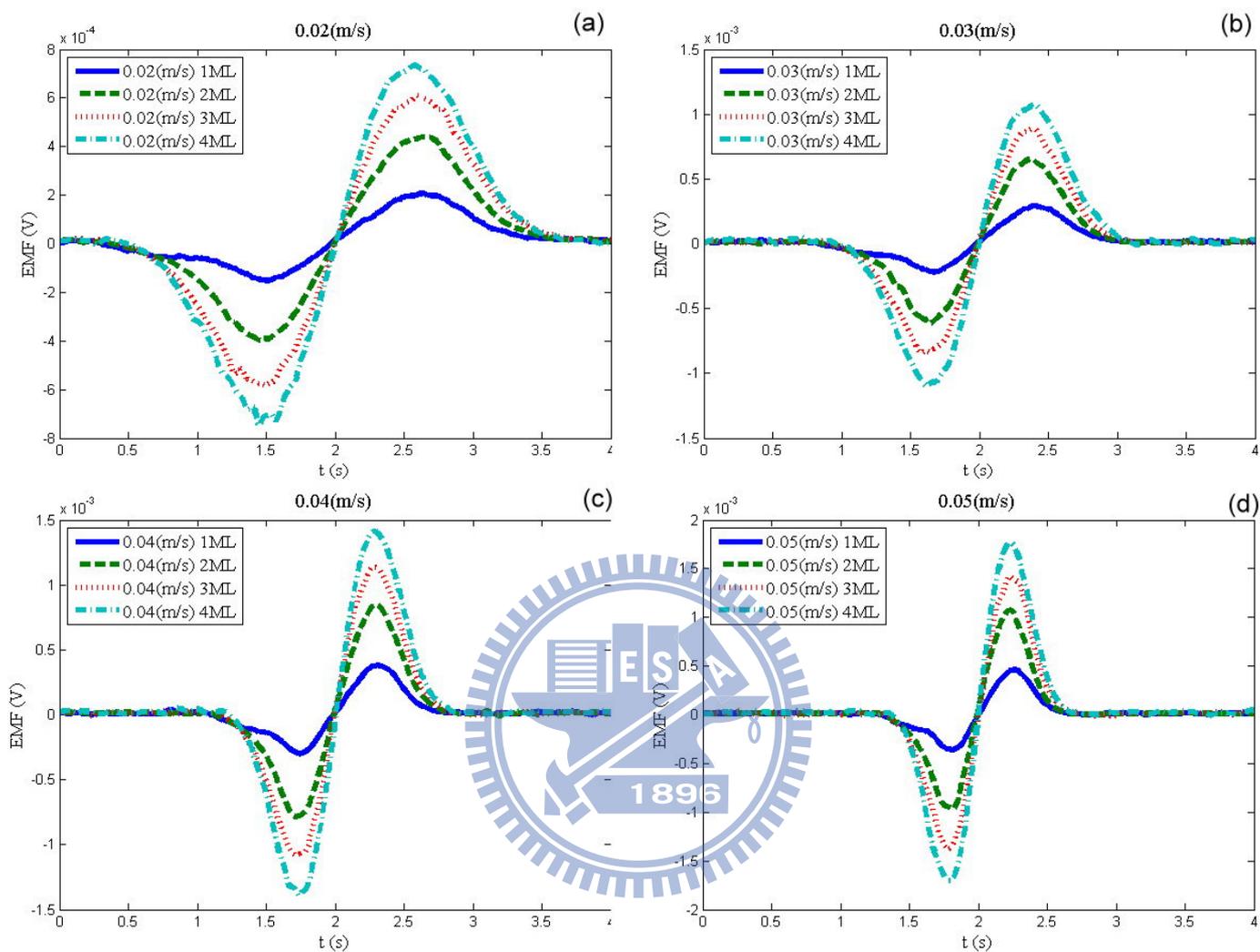


圖 3-9 在相同速度下以不同容積之磁液體產生之感應電壓
 (a) $v=0.02$ m/s (b) $v=0.03$ m/s (c) $v=0.04$ m/s (d) $v=0.05$ m/s

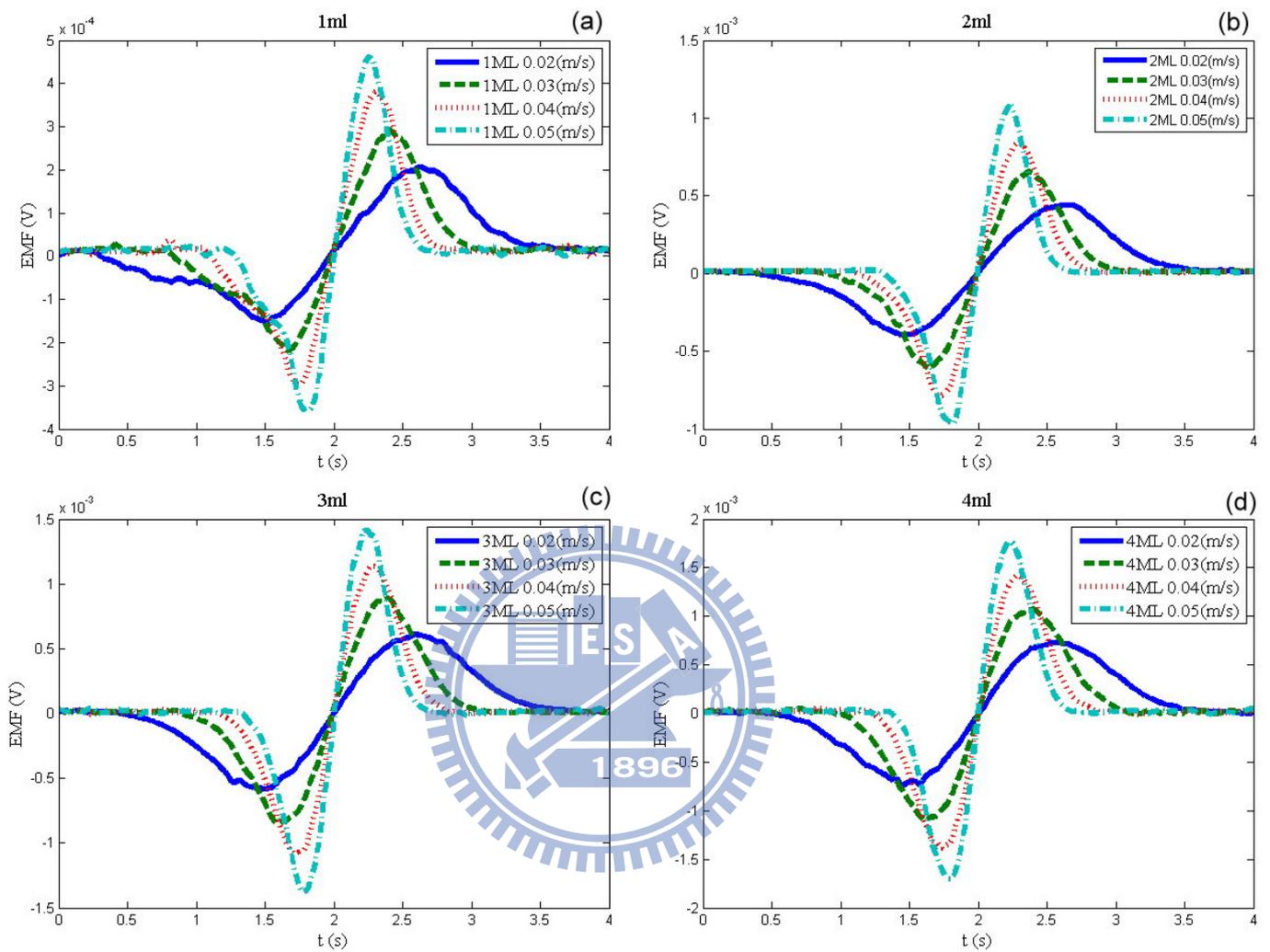


圖 3-10 在相同速度下以不同容積之磁液體產生之感應電壓

(a)1 ml (b) 2 ml (c) 3 ml (d) 4 ml

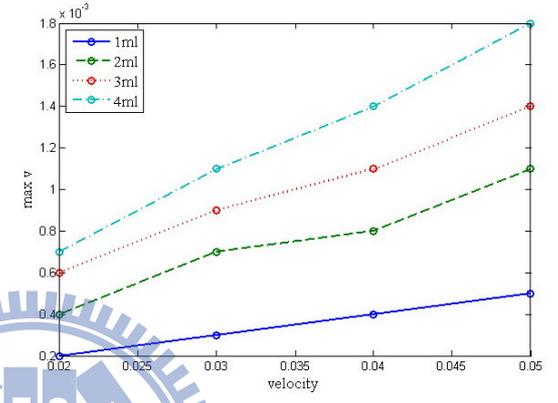
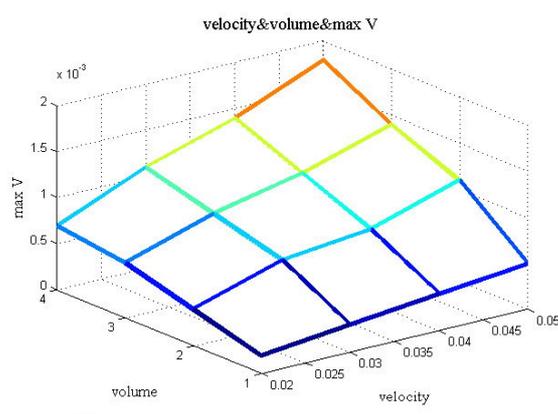
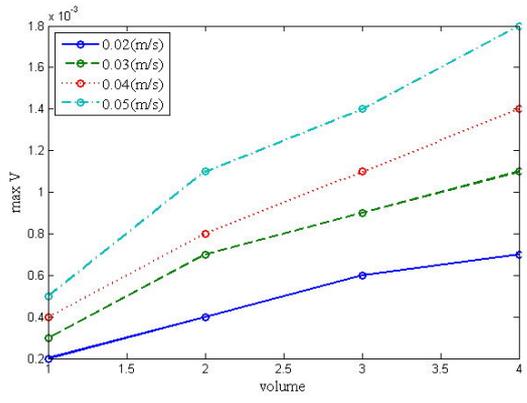
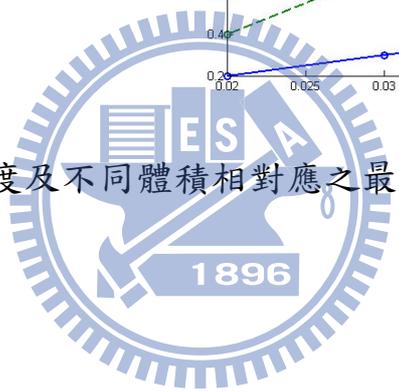


圖 3-11 不同速度及不同體積相對應之最大電壓值比較圖



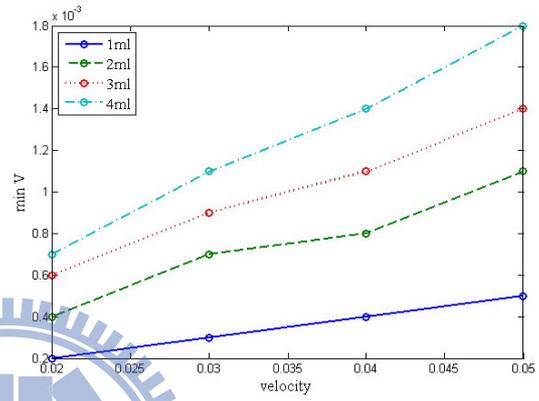
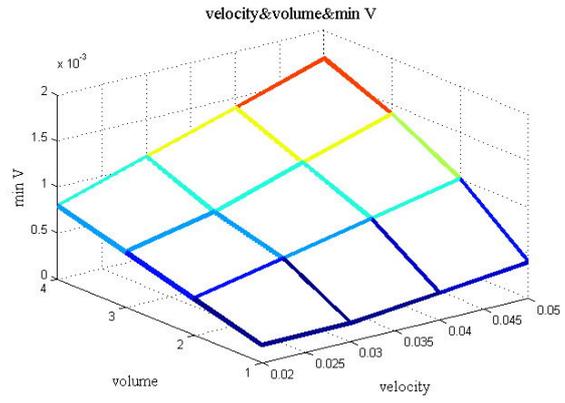
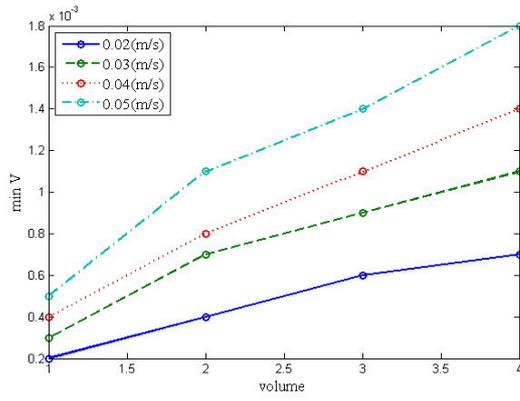


圖 3-12 不同速度及不同體積相對應之最小電壓值比較圖



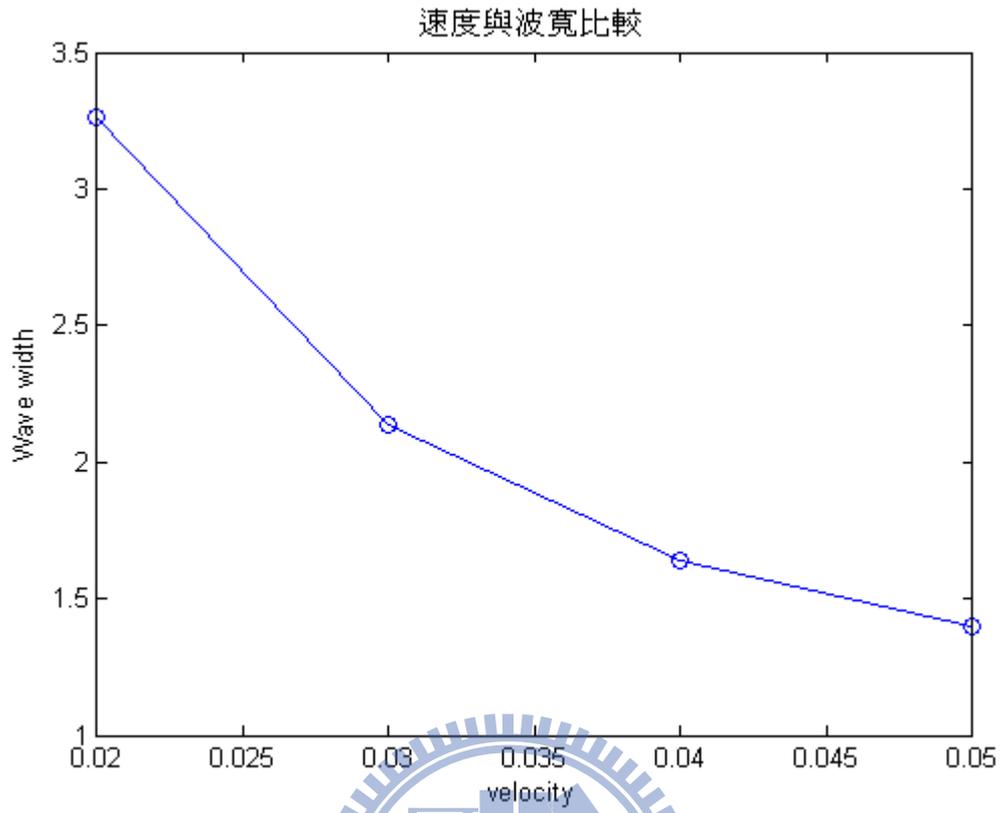


圖 3-13 速度與波寬關係圖

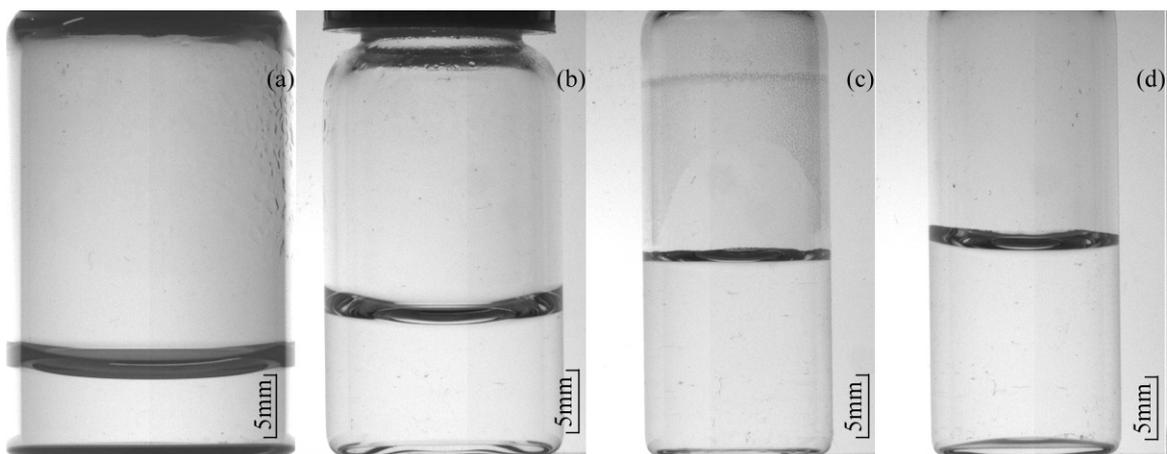


圖 3-14 相同容積與不同截面容器圖

(a)10 ml (b)8 ml (c)6 ml (d)4 ml

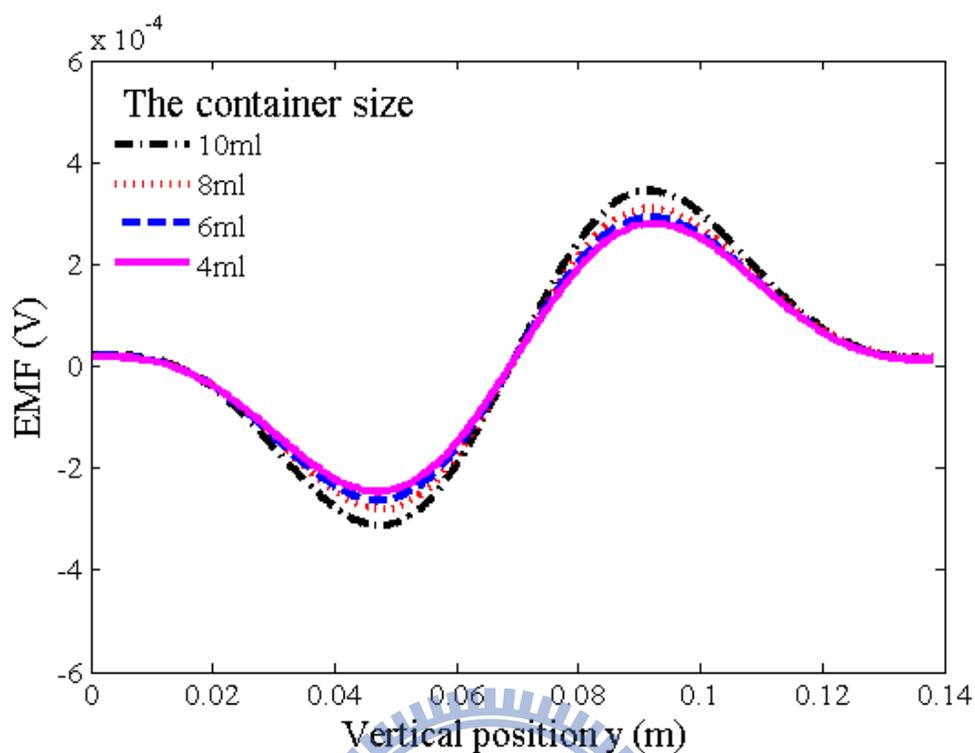


圖 3-15 利用相同容積但不同容器，在相同速度下所產生之感應電壓

與磁場強度

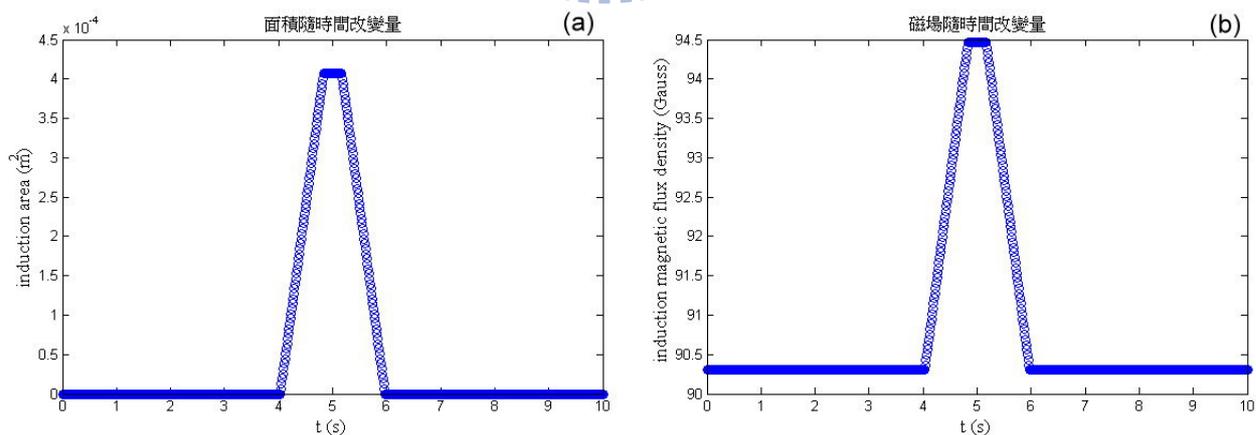


圖 3-16 面積與磁場隨時間之改變圖

(a) 磁流體感應面積隨時間之改變量

(b) 磁流體感應感應磁場隨時間改變量

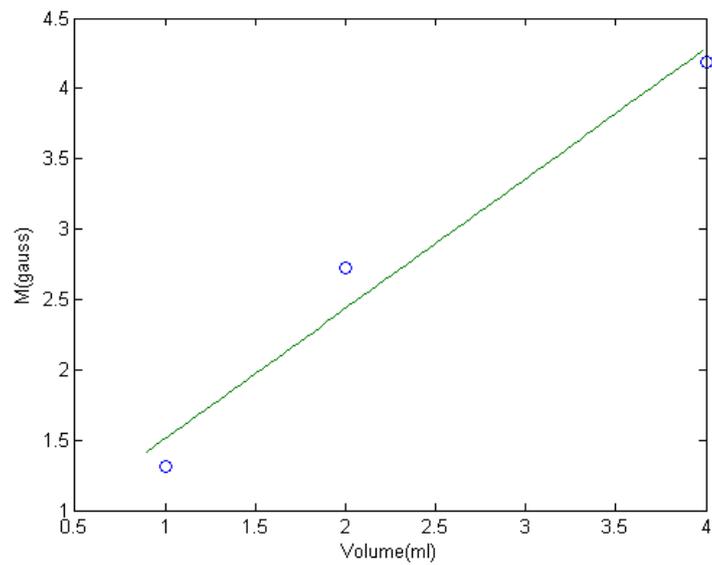


圖 3-17 不同體積對應之磁通量密度

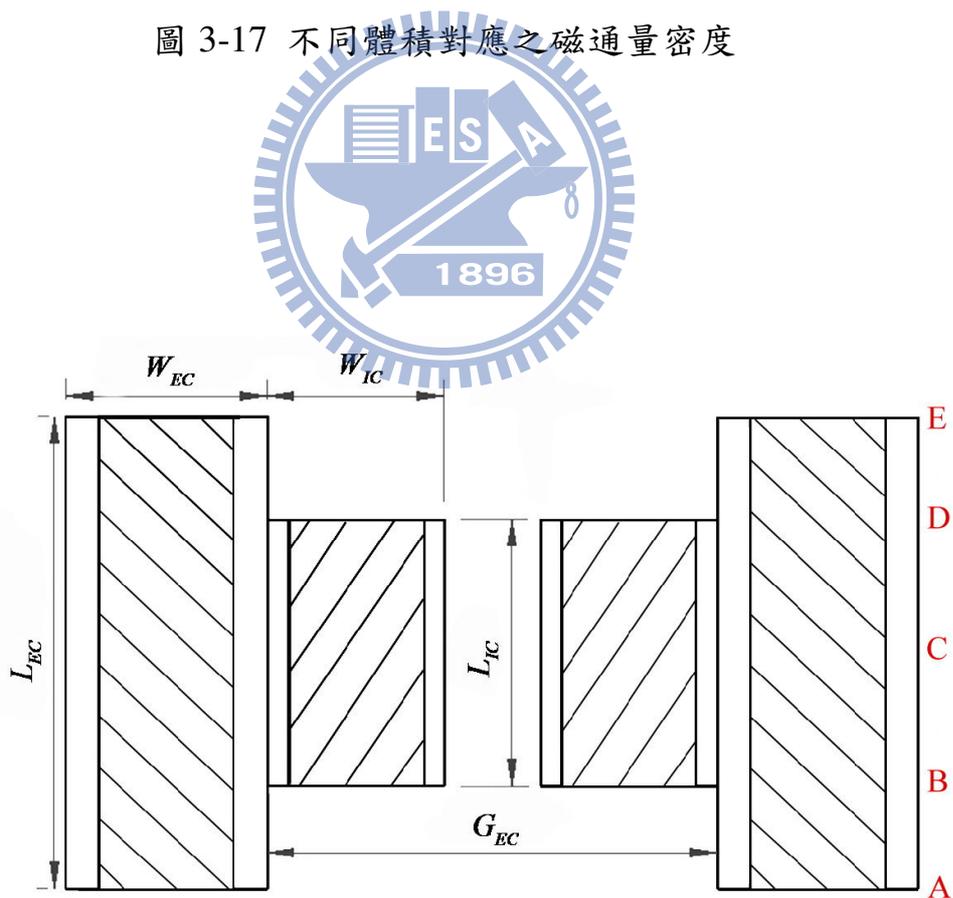


圖 3-18 線圈位置對照圖

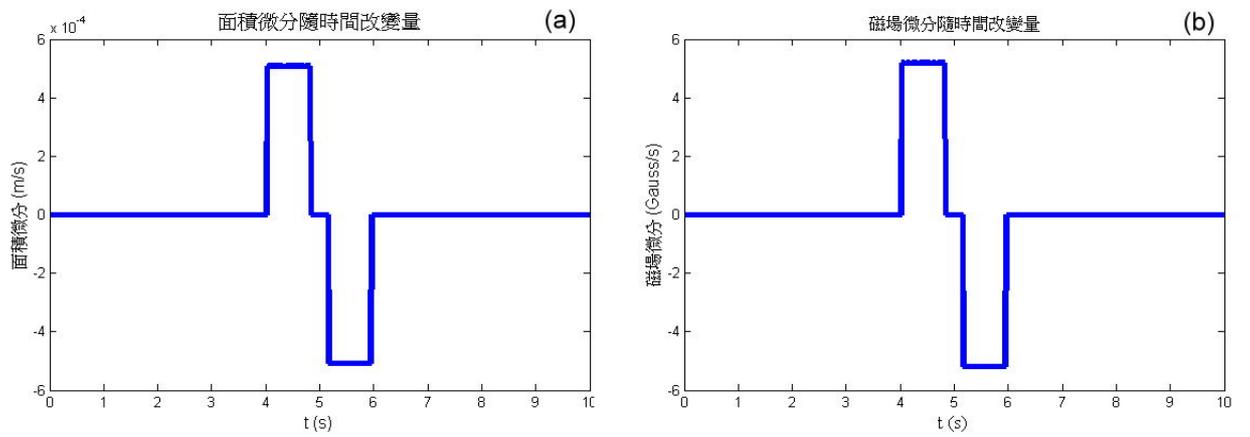


圖 3-19 面積與磁場對時間微分圖

(a) 磁流體感應面積對時間微分

(b) 磁流體感應磁場對時間微分

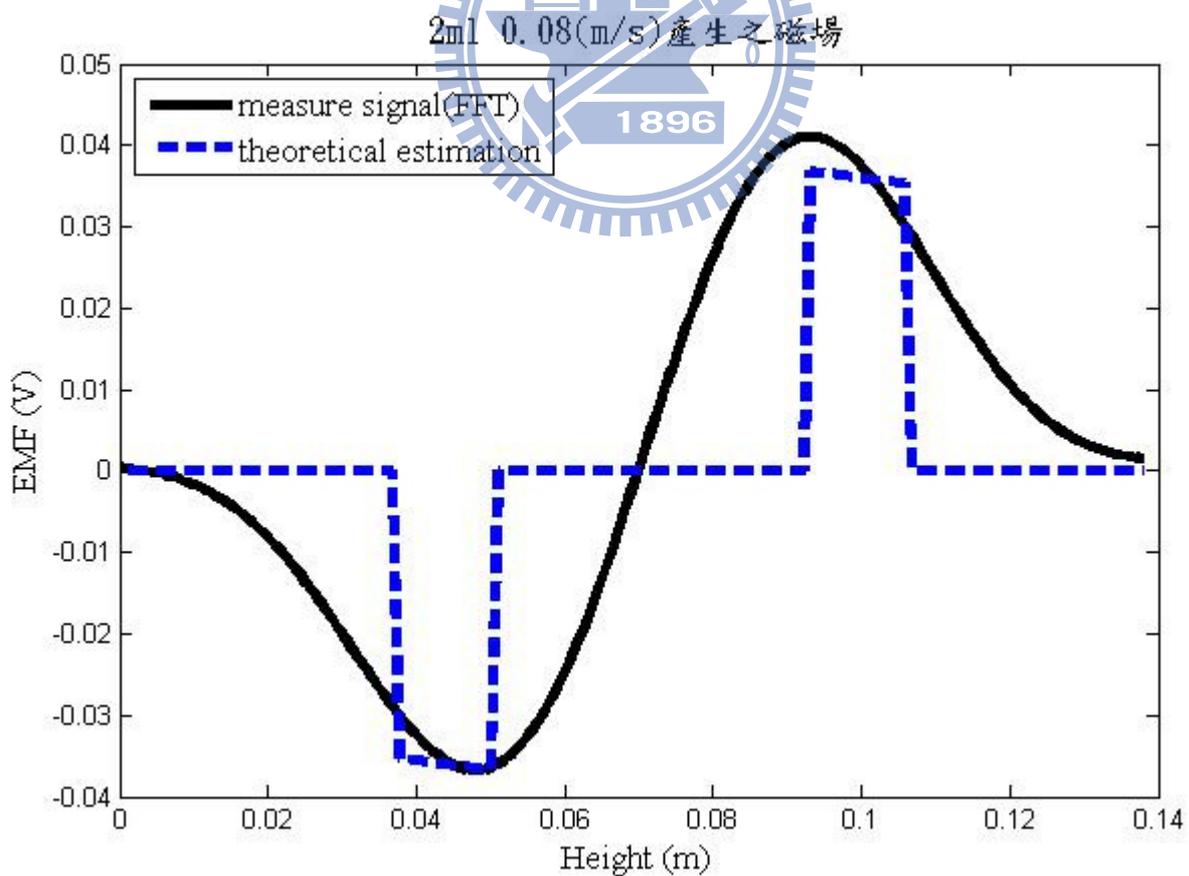


圖 3-20 實驗與理論值比較($\alpha=0.0052$)

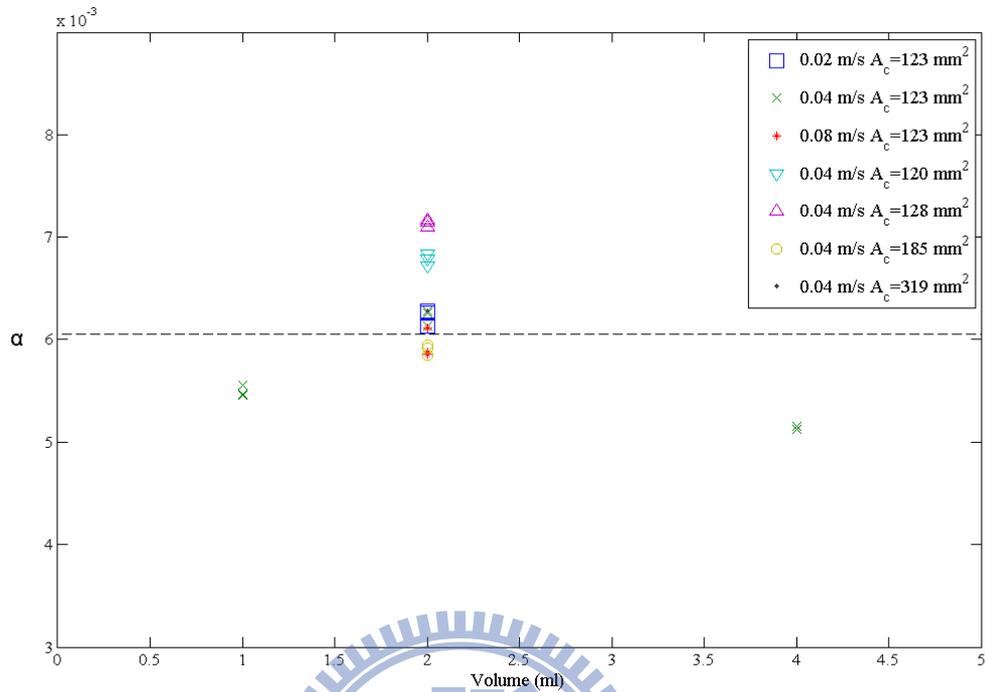


圖 3-21 同相對速度、磁液體體積和不同容器體積下之單位體積修正因子 α

表 3-1 相同容積與不同截面容器數值

罐子大小	裝入的體積 mm^3	質量 g	罐子截面積 mm^2	高度 mm
4cc	2000	3.06	120.7373272	16.5648855
6cc	2000	3.06	128.4313726	15.57251908
8cc	2000	3.06	185.8156028	10.76335878
10cc	2000	3.06	319.5121951	6.259541985

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。在本文實驗首先主要探討磁流體在不同參數(速度、體積)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，並探討兩變數不同時所造成影響。

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，且實驗之激磁線圈中心點為磁場最大處，所以磁通量密度最大值發生於線圈中心點。經由實驗之資料彙整，利用一 3D 圖來表示速度、體積與最大感應電動勢之三者關係，以及可以利用速度與頻寬之間關係來找出速度值，藉由 3D 圖及速度頻寬圖可以推算一量測訊號情況。

感應電動勢隨磁液體的體積及相對速度改變，且經由理論方法可知，當要預測磁流體通過線圈組時，可利用此方法來求得最大感應電動勢之大小及頻寬。在本文裡亦有提到修正因子 $\alpha \approx 0.006$ ，這將有助於實驗流場分析，即使於不同容積之容器下，得到之單位修正因子亦為相同。

本研究最後目的應用於磁性流體流場量測，將線圈組裝置於流場流道，並量取感應電動勢，並以理論方法計算出磁流體之大小及磁流

體於流場之速度，這將有助於流場量測，並不干擾流場之流動行為，
亦可得之所需數值。



参 考 文 献

- [1] 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).
- [2] 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)
- [3] 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)
- [4] 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)
- [5] R. Ganguly, B. Zellmer and I. K. Puric, "Field-induced self-assembled ferrofluid aggregation in pulsatile flow," PHYSICS OF FLUIDS , Vol. 17 097104(2005)
- [6] M. Zahn, "Magnetic fluid and nanoparticle applications to nanotechnology," Journal of Nanoparticle Vol. 3, 73-78(2001)
- [7] R. C. Nicklin, "Faraday's law-Quantitative experiment," American association of physics teachers, vol. 54, 422-428(1986)
- [8] 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)
- [9] 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).
- [10] 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).
- [11] 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)
- [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] Terry, A., Oakey, J., and Marr, D. W. M., *Microfluidic control using colloidal devices*, *Science*, Vol. 296, pp. 1841-1844, 2002.
- [20] Dreyfus, R., Baudry, J., Roper, M. L., Fermigier, M., Stone, H. A., and Bibette, J., *Microscopic artificial swimmers*, *Nature*, Vol. 437, pp. 862-865, 2005.
- [21] Bension, H., *University physics*, John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [22] Kubasov, A. A., *Electromotive force generation due to ferrofluid motion*, *Journal of*
- [23] Raj, K., Moskowitz, B., and Casciari, R., *Advance in ferrofluid technology*, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 149, pp. 174-180, 1985.
- [24] Berkovsky, B., Medvedev, V., and Krakov, M., *Magnetic Fluids Engineering Applications*, Oxford University Press, New York, 1993.
- Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 173, pp. 15-19, 1997.
- [25] Chen, C. Y., Lin, H. C., Tsai, W. K., and Lin, C. H., *Motion of miscible magnetic fluids in a vertical capillary tube*, *Journal of Mechanics*, Vol. 24, pp. 311-317, 2008.
- [26] Chen, C. Y., Chen, C. H., and Lee, W. F., *Experiments on breakups of a magnetic fluid drop through a micro-orifice*, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 321, pp. 3520-3525, 2009.
- [27] Ramirez, R. W., *The FFT: fundamentals and concepts*, Englewood Cliffs: Prentice-Hall, c1985.