

國立交通大學
機械工程學系碩士班
碩士論文

無閥式微型壓電幫浦的研製



Development of a Miniature Valveless
Piezoelectric Pump

研究生：黃國彰

指導教授：尹慶中博士

中華民國九十五年七月

國立交通大學

博碩士論文全文電子檔著作權授權書

(提供授權人裝訂於紙本論文書名頁之次頁用)

本授權書所授權之學位論文，為本人於國立交通大學機械工程系所
固控組，94學年度第2學期取得碩士學位之論文。

論文題目：無閥式微型壓電幫浦的研製
指導教授：尹慶中

■ 同意

本人茲將本著作，以非專屬、無償授權國立交通大學與台灣聯合大學系統圖書館：基於推動讀者間「資源共享、互惠合作」之理念，與回饋社會與學術研究之目的，國立交通大學及台灣聯合大學系統圖書館得不限地域、時間與次數，以紙本、光碟或數位化等各種方法收錄、重製與利用；於著作權法合理使用範圍內，讀者得進行線上檢索、閱覽、下載或列印。

論文全文上載網路公開之範圍及時間：

本校及台灣聯合大學系統區域網路	<input checked="" type="checkbox"/> 立即公開
校外網際網路	<input checked="" type="checkbox"/> 中華民國 98 年 8 月 29 日 公開

■ 全文電子檔送交國家圖書館

授權人：黃國彰

親筆簽名：黃國彰

中華民國 95 年 8 月 29 日

國立交通大學

博碩士紙本論文著作權授權書

(提供授權人裝訂於全文電子檔授權書之次頁用)

本授權書所授權之學位論文，為本人於國立交通大學機械工程系所
固控組，94學年度第2學期取得碩士學位之論文。

論文題目：無閥式微型壓電幫浦的研製
指導教授：尹慶中

■ 同意

本人茲將本著作，以非專屬、無償授權國立交通大學，基於推動讀者間「資源共享、互惠合作」之理念，與回饋社會與學術研究之目的，國立交通大學圖書館得以紙本收錄、重製與利用；於著作權法合理使用範圍內，讀者得進行閱覽或列印。

本論文為本人向經濟部智慧局申請專利(未申請者本條款請不予理會)的附件之一，申請文號為：_____，請將論文延至____年____月____日再公開。

授權人：黃國彰

親筆簽名： 黃國彰

中華民國 95 年 8 月 29 日

國家圖書館 博碩士論文電子檔案上網授權書

(提供授權人裝訂於紙本論文本校授權書之後)

ID:GT009314574

本授權書所授權之論文為授權人在國立交通大學機械工程系所 94 學年度第 2 學期取得碩士學位之論文。

論文題目：無閥式微型壓電幫浦的研製

指導教授：尹慶中

茲同意將授權人擁有著作權之上列論文全文（含摘要），非專屬、無償授權國家圖書館，不限地域、時間與次數，以微縮、光碟或其他各種數位化方式將上列論文重製，並得將數位化之上列論文及論文電子檔以上載網路方式，提供讀者基於個人非營利性質之線上檢索、閱覽、下載或列印。

※ 讀者基於非營利性質之線上檢索、閱覽、下載或列印上列論文，應依著作權法相關規定辦理。

授權人：黃國彰

親筆簽名：黃國彰

民國 95 年 8 月 29 日

國立交通大學

論文口試委員會審定書

本校 機械工程 學系碩士班 黃國彰 君

所提論文(中文) 無閥式微型壓電幫浦的研製

(英文) Development of a miniature valveless piezoelectric pumps

合於碩士資格水準、業經本委員會評審認可。

口試委員：馬劍清 _____

蕭國樸 _____

楊哲化 _____

指導教授：王慶中 _____

系主任：傅武雄 教授

中華民國 九十五 年 七 月 二十七 日

無閥式微型壓電幫浦的研製

Development of a Miniature Valveless Piezoelectric Pump

研究生：黃國彰

Student: Eric Huang

指導教授：尹慶中 博士

Advisor: Dr. Ching-Chung Yin

國立交通大學



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 2005

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十五年七月

無閥式微型壓電幫浦的研製

研究生:黃國彰

指導教授:尹慶中 博士

國立交通大學機械工程學系碩士班

摘 要

本文以實驗方式探討碟型壓電致動器泵動開放式無閥微幫浦的工作原理，將蜂鳴片的電極等分成兩個半圓形作為壓電致動器，施以單相或雙相驅動，評估基本對稱(W_{00})與反對稱(W_{01})模態致動幫浦的流量。採用有限元素套裝軟體 ANSYS 分析蜂鳴片承受流體負載的共振頻率及模態，並以實驗及疊加法模擬雙相時諧致動所產生振動位移。實驗以 Hasegawa *et al* (2005)的實驗架構為基礎，量測各個驅動頻率達成的流量。實驗結果顯示碟型致動器的共振頻率會因流體負載效應、導管與致動器的間距變小而降低， W_{00} 與 W_{01} 模態致動幫浦的最大流量分別為 133.13 及 9.63 ml/min，幫浦效率最高的驅動頻率略低於流體負載之蜂鳴片的共振頻率。蜂鳴片表面經疏水性處理後，流體負載的共振頻率反而低於未處理前，顯示以附加質量法模擬流體負載之結構共振頻率的論點仍有待進一步研究。

關鍵詞：無閥式微幫浦、蜂鳴片、共振模態、流體負載效應

Development of a Miniature Valveless Piezoelectric Pump

Student: Eric Huang

Advisor: Dr. Ching-Chung Yin

Department of Mechanical Engineering
National Chiao Tung University

ABSTRACT

This thesis investigates experimentally the working principle of a valveless micropump with an open chamber actuated by a circular piezoelectric unimorph. Electrode of the piezoelectric buzzer is segmented into two semi-circular portions driven by single-phase or dual-phase AC signals with a phase difference. The first symmetric mode, W_{00} , and the first antisymmetric mode, W_{01} , are excited to pump fluid inside the chamber. Resonant frequencies and corresponding vibration modes of the buzzer are calculated by using the finite element code ANSYS. Time-harmonic displacements of the unimorph induced by dual-phase signals are measured and simulated by superposition method. The experimental setup for measuring flow rate of the open-chamber micropump driven by a buzzer is after Hasegawa et al (2005). Experimental evidence indicates the resonant frequencies decrease due to fluid loading effect and by reducing the gap between leading tube and the buzzer. The maximum flow rate pumped by W_{00} mode is 133.13 ml/min and 9.63 ml/min by W_{01} mode. It occurs at the driving frequency slightly lower than the corresponding resonant frequency. The fluid loaded resonant frequencies for the buzzer whose backplane treated by hydrophobic process are lower than those without treatment. It results that a further formulation is needed to determine the resonant frequencies of fluid loaded structures exclusive of hypothesis of adding mass.

Keywords: Valveless micropump, Buzzer, Resonant modes, Fluid loading effect



誌謝

在此論文定稿之際，衷心的感謝 尹慶中博士兩年來的殷切指導，引領國彰踏入學術的殿堂，尹老師的諄諄教誨，使國彰學習到許多的經驗並獲得成長，在此致上由衷的謝意。同時感謝蕭國模老師、馬劍清老師及楊哲化老師撥允擔任學生口試委員，給予指導。

國彰最感謝的是偉大的母親，謝碧珠女士，給予國彰無匱乏的生活及無限的關懷與支持，求學之路有您的寬容與呵護，讓國彰在無憂無慮下成長且在無後顧之憂完成學業。

感謝學長游泰和、許世明、王多聞、劉育翔、李雨青、溫子達、孫繼增、黃俊傑、許家豪及蔡德新提供國彰生活上與學業上寶貴的經驗，幫助國彰提早適應實驗室的生活。同學陳俊宏、張桓禎，有你們的陪伴讓國彰的求學之路並不孤單，並給予了許多扶持與幫助，感謝學弟楊欣岳、李振良、施文彬、蘇欲為過去一年來的陪伴，有你們的陪伴讓國彰的生活增添不少樂趣，在此預祝你們論文順利。還有許多不及被載但曾經幫助過或指導過國彰的朋友，給予國彰許多寶貴的意見及協助，國彰亦銘記在心，在此僅以此論文獻給你們。

目 錄

中文摘要	i
英文摘要	ii
致謝	iv
目錄	v
表目錄	vii
圖目錄	viii
第一章 緒論	1
1.1 研究動機	1
1.2 文獻回顧	1
1.3 研究範疇	5
第二章 碟型壓電致動器振動分析	6
2.1 碟型壓電致動器振動的模擬	6
2.2 碟型壓電致動器的雙相致動	8
2.3 流體負載對於壓電致動器的影響	8
第三章 微型幫浦之設計與量測	11
3.1 微型幫浦與測試平台	11
3.2 碟型壓電致動器頻譜響應及振動量測	12
3.3 微型幫浦流量量測	14
3.4 疏水性表面處理	16
第四章 結論及未來展望	18
4.1 結論	18
4.2 未來展望	19
4.2.1 幫浦的壓力與流場分析	19

4.2.2 幫浦驅動裝置	19
4.2.3 幫浦流量量測	20
參考文獻	21
附錄 PB50 功率放大器及相移器的電路設計	24



表目錄

表 2.1	PZT-4 的材料常數	25
表 2.2	黃銅的材料常數	25
表 2.3	碟型蜂鳴片的前 10 模態共振頻率之數值結果	26
表 2.4	水深 5mm 的負載下，蜂鳴片共振頻率數值結果與起始搜尋之關係	26
表 2.5	負載流體深度對於蜂鳴片前兩個共振頻率計算值的影響	27
表 3.1	蜂鳴片共振頻率分析與實驗結果	28
表 3.2	疏水性處理前後不同水深之蜂鳴片的共振頻率	29



圖目錄

圖 1.1	無閥式壓電幫浦吸水狀態	30
圖 1.2	無閥式微型幫浦排水狀態[3]	30
圖 1.3	黏滯力無閥式微型幫浦排水狀態[8]	31
圖 1.4	黏滯力無閥式微型幫浦排水狀態[8]	31
圖 1.5	Hasegawa <i>et al</i> [16]所設計之無閥式微型幫浦	32
圖 1.6	壓電梁式雙向泵動陣列多孔噴射泵浦示意圖[17]	32
圖 2.1	碟型蜂鳴片結構的上視圖與側視圖	33
圖 2.2	碟型蜂鳴片之有限元素網格的二維規劃圖	33
圖 2.3	ANSYS 建模完成圖	34
圖 2.4	碟型蜂鳴片邊界條件的設定	34
圖 2.5	碟型蜂鳴片 W_{00} 振態圖 (共振頻 3,799 Hz)	35
圖 2.6	碟型蜂鳴片的 W_{01} 振態圖(共振頻 8,384 Hz)	35
圖 2.7	碟型蜂鳴片距圓心為 6mm 處面外位移的頻率響應	36
圖 2.8	含結構阻尼之蜂鳴片 W_{00} 振態的時諧分析結果	36
圖 2.9	含結構阻尼之蜂鳴片 W_{01} 振態的時諧分析結果	37
圖 2.10	蜂鳴片直徑上各點受雙相驅動 W_{01} 振態的面外位移	37
圖 2.11	流體負載之碟型蜂鳴片之二維分析規劃圖	38
圖 2.12	流體負載之碟型蜂鳴片分析的建模完成圖(水深 10mm)	38
圖 2.13	流體負載之碟型蜂鳴片的 W_{00} 振態	39
圖 2.14	流體負載之碟型蜂鳴片的 W_{01} 振態	39
圖 2.15	流體負載之碟型蜂鳴片共振頻率的模擬與量測結果	40
圖 3.1	Hasegawa [16]之微型幫浦結構示意圖	40
圖 3.2	幫浦水槽實體圖	41

圖 3.3	碟型壓電致動器電極塗佈完成圖	41
圖 3.4	固定碟型壓電致動器底座部分(下半部)	42
圖 3.5	固定碟型壓電致動器底座部分(上半部)	42
圖 3.6	相移器電路圖	43
圖 3.7	相移器實體圖	43
圖 3.8	PB50 功率放大器非反相放大器電路圖(放大 11 倍)	44
圖 3.9	PB50 功率放大器製作完成圖	44
圖 3.10	量測平台結構示意圖	45
圖 3.11	固定用之壓克力平板	45
圖 3.12	電性頻率響應量測示意圖	46
圖 3.13	蜂鳴片一的頻率響應曲線	46
圖 3.14	蜂鳴片二的頻率響應曲線	47
圖 3.15	蜂鳴片三的頻率響應曲線	47
圖 3.16	蜂鳴片振動頻率響應量測實驗示意圖	48
圖 3.17	阻抗量測實驗示意圖	48
圖 3.18	蜂鳴片一之阻抗曲線	49
圖 3.19	雙相驅動蜂鳴片 W_{01} 振態的實驗示意圖	49
圖 3.20	相位差 90° 雙相驅動蜂鳴片 W_{01} 振態直徑 PQ 的振幅分佈	50
圖 3.21	90° 相位雙相致動下，蜂鳴片圓心左側 7.5mm 處的振幅與 施加電壓之變化	50
圖 3.22	蜂鳴片三受流體負載前後的頻率響應曲線	51
圖 3.23	實驗量測架構示意圖	51
圖 3.24	幫浦實際驅動的照片	52
圖 3.25	W_{00} 振態泵水實驗示意圖	52

圖 3.26 流體負載之蜂鳴片一頻率響應曲線	53
圖 3.27 流體負載之蜂鳴片一的 W_{00} 振態頻率響應曲線	53
圖 3.28 W_{00} 振態驅動蜂鳴片一的泵水流量圖	54
圖 3.29 流體負載之蜂鳴片二的 W_{00} 振態頻率響應曲線	54
圖 3.30 W_{00} 振態驅動蜂鳴片二的泵水流量圖	55
圖 3.31 右半邊致動之 W_{01} 振態泵水實驗示意圖	55
圖 3.32 流體負載之蜂鳴片一右半邊致動 W_{01} 振態的頻率響應曲線	56
圖 3.33 蜂鳴片一受右半邊致動之 W_{01} 振態的泵水流量圖	56
圖 3.34 流體負載之蜂鳴片二右半邊致動 W_{01} 振態的頻率響應曲線	57
圖 3.35 蜂鳴片二受右半邊致動之 W_{01} 振態的泵水流量圖	57
圖 3.36 蜂鳴片受左半邊致動之 W_{01} 振態泵水實驗示意圖	58
圖 3.37 流體負載之蜂鳴片一左半邊致動 W_{01} 振態的頻率響應曲線	58
圖 3.38 蜂鳴片一受左半邊致動之 W_{01} 振態的泵水流量圖	59
圖 3.39 流體負載之蜂鳴片二左半邊致動 W_{01} 的頻率響應曲線	59
圖 3.40 蜂鳴片二受左半邊致動之 W_{01} 振態的泵水流量圖	60
圖 3.41 蜂鳴片一與二之 W_{00} 振態共振頻與間距關係	60
圖 3.42 蜂鳴片一與二之右半 W_{01} 振態共振頻與間距關係	61
圖 3.43 蜂鳴片背面疏水性處理流程圖	61
圖 3.44 未經疏水性處理之蜂鳴片背面與水接觸角	62
圖 3.45 經疏水性處理後蜂鳴片背面與水的接觸角	62
圖 3.46 表面張力計算示意圖， W 代表水滴之重力， F 為表面對水的拉力	63
圖 3.47 疏水性處理前後之蜂鳴片的頻率響應曲線	63
圖 3.48 疏水性處理前後不同水深之蜂鳴片共振頻率	64

圖 A.1 放大器虛短路示意圖	64
圖 A.2 PB50 功率放大器 PSpice 模擬電壓對時間關係圖 (輸入—輸出圖)	65
圖 A.3 PB50 功率放大器 PSpice 模擬李沙育圖(輸入—輸出圖)	65
圖 A.4 PB50 功率放大器 PSpice 模擬頻率響應圖	66



第一章 緒 論

1.1 研究動機

在微流(microfluidics)系統中，微型幫浦是不可或缺的一個元件，扮演的角色有如人類循環系統的心臟，是整個系統的動力來源，目前微型幫浦主要是應用微機電系統(Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS)的製程製造，微機電系統製程具有高準確度、可大量生產的優點，故現今已廣泛應用於生化醫療的供藥系統、化學檢測及印刷噴墨頭。

微型幫浦的致動方式大都是應用電或磁效應，如電磁效應、壓電效應等，驅動渠道壁的致動腔，使渠道壁的兩端產生壓力差而導致流體流動。有些微型幫浦還增設單向閥，防止逆流，提升流體在目的方向的傳輸效率，但是微型幫浦閥門的可靠度普遍不高。故無閥式微型幫浦的研發工作日趨重要，應用一些物理現象或原理來代替閥門。

1.2 文獻回顧

微流系統的研究自噴墨噴嘴[1]開始，迄今已有三十多年的歷史。微型幫浦的構造分為有閥式與無閥式兩類，有閥式的起源較早，因為閥門結構容易產生疲勞破壞，無閥式的相關研究逐漸躍升為主流。

有閥式微型幫浦的研究起源於史丹佛大學(Stanford university)的Smits[2]，為主動式閥門(active valve)的研究，以矽為基材，做微型加工。幫浦分為三個工作腔室，致動的方式是將壓電碟片黏貼於閥門上面，利用不同相位的輸出訊號，使渠道壁形成蠕動方式朝目標方向移動，在壓力為零的情況下，輸出的流量可達 100 μ l/min。

1993 年，Stemme 和 Stemme[3]設計一個無閥式微型幫浦，幫浦腔室的直徑為 19mm，最大流量為 16ml/min，入口端和出口端最大壓差為 2m 水(H₂O)柱。幫浦主要的工作原理是應用噴嘴(nozzle)及漸散器(diffuser)的幾何尺寸效應，如圖 1.1 所示，當幫浦成吸水模式時，幫浦右端開口部分流體由 A 向 B 流動，流體產生漸散器效應，其壓降係數為 ξ_d 。左端的流體由 D 向 C 流動，產生噴嘴效應，其壓降係數為 ξ_n ，由幾何尺寸效應的影響可知 $\xi_n > \xi_d$ 。幫浦呈排水模式時，右端為噴嘴效應，左端為漸散器效應，循環一週期所排出流體體積為

$$V_o = 2V_x \left[\frac{(\eta_{nd})^{1/2} - 1}{(\eta_{nd})^{1/2} + 1} \right] \quad (1.1)$$

其中 $\eta_{nd} = \xi_n / \xi_d$ 且 V_x 為腔室的最大變化振幅。

1995 年，Olsson *et al* [4]將兩個無閥式微型幫浦並聯以提高流量。1996 年 Olsson *et al* [5]研究擴散器的長度和開口角度，發現開口角度為 4 度時，流損(flow loss)為最低，結論指出在紊流情況下，幫浦的效率較好。

1998 年，Ullmann[6]建立分析微型幫浦流量與參數研究的數學模型，並結論指出應用串聯形式連結的效率高於並聯形式。1998 年，Jiang *et al* [7]探討噴嘴及漸散器的開口角，提出雷諾數(Renault number)大於 10^5 及小於 50 情況下的解析解。

1999 年，Mu *et al*[8]以 Stemme 與 Stemme[3]設計的幫浦為基礎，將兩個壓電致動器設置於幫浦上下兩側，驅動幫浦腔室。使用 ANSYS 模擬，比較以鋁、銅和矽作為幫浦之碟型致動器基材的驅動振幅大小，找出致動器的最佳化尺寸。模擬結果顯示採用直徑 10mm，厚度 0.1mm 的鋁質碟型致動器，以 W_{00} 振態泵水，幫浦能產生的最大體積變化為 800 μ l。

1999 年，Matsumoto *et al* [9]提出了不同型式的微型幫浦，參考圖 1.3 的排水模式及圖 1.4 的吸水模式，因為流體在不同溫度下擁有相異黏滯係數的特性，會造成在出入口流動的難易。以適當時序驅動出入口處的加熱器和壓電致動器，推動流體。實驗結果可獲得 5.5 μ l/min 的流量，加熱時間越長，流量越大。

2001 年，Nguyen 與 Huang[10]以實驗方式發現低頻驅動微幫浦碟型壓電薄膜能產生較大的流率。壓電致動器的碟型壓電材料的直徑為 12mm，厚度為 175 μ m，銅片部分直徑 15mm，厚度 95 μ m，當驅動頻率到達 100Hz 時，流率會趨向一個定值。此結果和 Gerlach 與 Wurmus[11] 及 Gerlach *et al* [12]的結論類似，當頻率達到一個最佳值時，所得到的流率會最大，在高頻時，流率會迅速的銳減。

2003 年，Li 和 Chen[13] 將碟型壓電致動器視作壓電材料、黏著劑及金屬材料組成的三層複材結構，當碟盤產生彎曲時，每一層結構的面內應變在碟盤厚度方向呈現線性分佈，由應力與應變關係求出每層結構的應力分佈，最後以這三層結構的合力矩為 0 的條件下，推導出無閥式幫浦碟型壓電致動器振動的解析解，並與有限元素套裝軟體 ANSYS 比較。結論指出驅動器厚度與直徑比值為 0.02 時，碟盤中心可具有最大的位移量，達成最佳致動效果。

2004 年，洪正翰[14]以厚膜光阻 SU-8 及 UV-LIGA 技術製作單層及雙層壓電片致動的微幫浦，使用軟體 CFDRC 分析 Stemme 與 Stemme[3]所提出之壓電蜂鳴片微型幫浦的腔室和流道，依據不同尺寸的漸縮管和漸散器中流場與固體耦合的狀態，找出最佳效能的腔室和流道幾何尺寸。若以單層壓電片驅動，腔室直徑設為 7mm，擴散口全長 1.093mm，窄口的寬度分別為 0.08mm、0.27mm，驅動電壓 60V 及

頻率 20Hz 的情況下，可以得到最大流量 160.61ul/min。若以雙層壓電片驅動，腔室直徑為 7mm，擴散口全長 2mm，窄口的寬度分別為 0.12mm、0.47mm，在驅動電壓 100V 及頻率 30Hz 的情況下，可以得到最大流量 165.632ul/min。

2005 年，張晉祥[15]並聯兩個或以上的微型幫浦，配合驅動器的運轉。在驅動電壓為 140V，驅動頻率為 20Hz 時，單一微幫浦可獲致最大流量 91 μ l/min。若並聯兩個幫浦，流量可達 139.67 μ l/min，並聯三個幫浦則為 184.67 μ l/min，由此可知並聯幫浦可以提高流率。

2005 年，Fan *et al*[16]以考慮電、結構和流體三個方面耦合推導長方形壓電致動器的統御方程式，配合套裝軟體 CFD-ACE+模擬無閥式微型幫浦的流場。當壓電致動器振動頻率小於 7.5kHz 時，幫浦流量會隨著頻率的上升而提高。頻率高於 7.5kHz 時，則因振動模態的改變，幫浦流量隨著頻率的上升而下降。

Hasegawa *et al*[17]於 2005 年國際超音波會議(World Congress on Ultrasonics)中，提出一種簡單的無閥式微型幫浦架構，如圖 1.5 所示，以碟型蜂鳴片的第一共振模態 W_{00} 作為幫浦致動器，探討管端與碟型壓電致動器的間距對於流量的影響。

2005 年，辜得嘉[18]採用方形壓電懸臂梁為幫浦驅動裝置，如圖 1.6 所示，壓電梁設置於幫浦封閉腔室的流道中，利用壓電梁第一振態之雙向的振動泵動流體自上方陣列孔排出，並造成液體霧化的效果。以套裝軟體 CFD-RC 計算流場，使用正弦波形驅動壓電梁，幫浦的工作流體選定為水、類蜂蜜及類橄欖油，分析的工作頻率為 20、40 及 50KHz，壓電致動器位移量設為 5 及 12 μ m，模擬結果顯示黏滯度越小或是壓電致動器位移量越大，幫浦流率及液體霧化的效果越好。

2006 年，Tao *et al*[19]以環形壓電致動裝置驅動無閥式微型幫浦，環形壓電致動器的外徑為 19.11mm，內徑為 6.3mm，厚度為 0.32mm，金屬部分為鋼材，腔室深度 0.08mm。理論分析應用板殼理論，探討沒有流體負載情況下，致動器上各點的振幅及體積變化，並配合有限元素軟體進行致動器的最佳化設計。以實驗量測流體負載前後的頻譜響應曲線，在 200Hz 有一個響應較大的共振頻率，以此頻率驅動幫浦，流量可以達到 5ml/min。

1.3 研究範疇

本研究是以日本東京工業大學 Ueha 教授研究團隊(Hasegawa *et al*[16])提出的實驗模型為基礎，改採用蜂鳴片的第二共振模態致動幫浦，取代無閥式微型幫浦通常採用的噴嘴或漸散器。理論分析主要以有限元素套裝軟體 ANSYS 分析碟型壓電致動器的共振頻率及共振模態，模擬雙相致動方式產生的振動位移。微幫浦的實驗與實作則是以市售的蜂鳴片作為致動裝置，自行塗佈半圓形電極及驅動電路建立實驗裝置。實驗分別量測流體負載下，碟型蜂鳴片第一共振模態(W_{00})及第二共振模態(W_{01})致動所產生的流量，探討兩種共振模態致動幫浦的差異性。碟型壓電致動器受到流體負載所引致共振頻率的偏移現象將依實驗量測結果，進行討論。

第二章 碟型壓電致動器的振動分析

2.1 碟型壓電致動器振動的模擬

ANSYS 為一套有限元素分析軟體，整合了建模、分析兩大部分，以電性、溫度和結構耦合等部分較常被使用。ANSYS 軟體的前處理 (preprocessor) 包含元素的選擇、模型的建立及邊界條件的設定。解析部分 (solution) 主要包括靜態分析 (static analysis)、模態分析 (modal analysis) 等，後處理 (general postproc) 部分包含分析結果的處理與展示，時間歷程的後處理 (timehist postpro) 部分主要處理的是結構響應的歷時變化。

本文分析之三維碟型壓電致動器模型如圖 2.1 所示，壓電材料的直徑 D_{pzt} 為 20mm，厚度 h_{pzt} 為 0.45mm，材質為壓電陶瓷 PZT-4。金屬部分的直徑 D 為 27mm，厚度 h 為 0.2mm，材料為黃銅。假設黏合壓電材料與金屬的膠極薄，可以忽略不計。選用 SOLID5 作為 ANSYS 的分析元素，SOLID5 為三維、具有壓電性質的固體元素，節點的自由度除了三個直角座標方向的位移外，還包括了節點的電壓，可以探討電性及結構彈性變形耦合的問題。壓電材料常數採用吳朗[20]書中的 PZT-4 材料係數，一般書中所提供的壓電陶瓷材料常數皆為 z 方向極化，本文採用的碟型壓電致動器材料亦為 z 方向極化，壓電材料及黃銅的材料係數列於表 2.1 及表 2.2。

建立模型的步驟是先在 xz 平面上面繪出一個如圖 2.2 所示的截面，其中 AB 為 z 軸， AC 長 0.01m， BG 長 0.0135m，截面 $ACDE$ 規劃為壓電材料，截面 $EFGB$ 則為金屬，再將此截面繞 z 軸旋轉 360 度，成為一個圓柱體。規劃時，將截面多分割出 $AHIE$ 及 $EIJB$ ，可使得此截面模型所建立出的體域免於網格劃分不均，造成分析結果的誤差。

本研究將 AH 設定為 0.1mm，使其面積盡量縮小，建模完成圖如圖 2.3 所示。

設定碟型壓電致動器的邊界條件時，為了與實驗裝置相符，在碟片周向邊界增設了 1 個寬 1mm 的元素予以固定。依據碟型壓電致動器的第二振態(W_{01})，將壓電材料的表面塗佈成兩個半圓形電極，並將右半圓之壓電材料的兩極設為短路的電性邊界條件，分析時兩極的電壓設定為 0volt。圖 2.4 所示為邊界條件設定的完成圖。

在 ANSYS 中，結構阻尼可選擇輸入 α 與 β 阻尼值，依據實驗試片一獲得的頻率響應曲線計算 α 與 β ，詳細說明可參考[21]。

最後一個步驟為選擇分析的方式，先選擇模態分析計算共振頻率及模態。在 ANSYS 中，Block Lanczos 演算法為系統預設計算模態特徵值的方法，Lanczos[22]遞迴法比 Subspace 法準確又快速。求解中，高頻模態與低頻模態的計算速度是相同的，不會受到頻率範圍的影響。因此，數值計算的起始搜尋頻率可直接設於高頻，不會花較多的時間，共振頻率的計算值也與起始搜尋的頻率無關。

根據後處理的結果整理(results summary)，獲得的前 10 個共振頻率結果列於表 2.3。另外，也可以選擇繪製等高線圖(contour plot)的選項，圖 2.5 與 2.6 所示分別為獲得的第一共振模態 W_{00} 與第二共振模態 W_{01} 的振態圖。

ANSYS 模態分析輸出的共振頻受限於有效數位，因此在第二模態的共振頻率前後各 50Hz 的頻寬範圍內進行時諧分析，圖 2.7 所示為碟型蜂鳴片直徑上距圓心為 6mm 處的 z 方向位移頻率響應曲線，第二模態的共振頻率落在 8,477Hz。

2.2 碟型壓電致動器的雙相致動

碟型蜂鳴片的材料性質加入結構阻尼後，時諧分析會產生複數型態的振幅，振幅的實部與虛部平方和之開根號才為實際振幅。圖 2.8 所示為第一振態的時諧分析結果，圖 2.9 所示則為第二振態的時諧分析結果。時諧分析無法同時考慮雙相驅動，必須分別計算單相致動的響應，再予以疊加處理。碟型蜂鳴片之第二振態是對於直徑對稱的共振模態，利用單組電極先單相驅動蜂鳴片，獲得特定頻率 ω 激振引致之 z 方向位移響應 v_A ，由對稱關係推測另一組電極驅動的同一點 z 方向位移響應 v_B ，將兩者相加即可獲得雙相驅動的 z 方向位移為

$$v_{combine} = v_A \sin(\omega t) - v_B \sin(\omega t + \tau) \quad (2.1)$$

其中 τ 為相位差，x 方向的振幅 $u_{combine}$ 也可以相同方式處理，圖 2.10 所示為以第二共振頻率 8,477Hz 雙相驅動蜂鳴片的位移響應，其中，相位差分別為 30° 、 60° 及 90° 。W₀₁ 振態雙相驅動蜂鳴片的振動變化以 90° 相位差為最大，造成幫浦左右腔室的體積變化也最大。

2.3 流體負載對於壓電致動器的影響

沒入流體中的固體結構振動受到流體負載的影響，共振頻率明顯下降。一般結構的共振頻率與剛性平方根成正比，與質量平方根成反比。因此流體負載的結構振動分析通常將流體的質量附加於結構質量上，稱為結構的附加質量(adding mass)，使其共振頻率降低。結構振動分析時，將幫浦腔室的流體視為彈性體，與壓電致動器結構形成複合平板，流體的勁度矩陣設為

$$[E]=\begin{bmatrix} E_u & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E_u & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & E_u & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

其中，水的微體模數(bulk modulus) $E_u=2.15\text{GPa}$ ，其值參考 Munson[21]，假設水為理想流體，其剪力模數(shear modulus)設為 0。

模型的建立方式和無流體負載相似，元素網格的二維規劃如圖 2.11 所示，將此截面繞 z 軸旋轉一圈，形成如圖 2.12 所示之體域。與無流體負載情況相異的部分是金屬部分的切割不同，加上了一塊材質為(2.2)式的圓柱體。流體負載情況的總元素個數為 32,064。碟型壓電致動器的邊界條件，與無流體負載時相同，流體四周壁面的邊界條件分為滑動(slide)及不滑動(no slide)兩種情況來分析。不滑動邊界是限制了流體周圍節點的 x、y、及 z 方向位移，模態分析也是採用 Block Lanczos 演算法，分析的模態數設為 20，起始頻率為 1Hz。當水深為 10mm 以上時，ANSYS 的模態分析無法將所有的特徵根求出，所以將所需分析的模態數改為 25 個，起始分析頻率改為 200Hz，表 2.4 所列表 2.4 所列為水深 5mm 的負載下，起始搜尋設為 0 與 200Hz 的數值結果，兩者沒有差異，設定值的改變不影響計算的結果。本文分析的水深範圍為 5~30mm，圖 2.13 及圖 2.14 分別為水深 10mm 時 W_{00} 與 W_{01} 的共振模態。圖 2.15 所示為不同水深下，蜂鳴片前兩個共振頻率的數值結果與實驗數據，不論流體邊界設為固定或滑移，對於前兩個共振頻率的計算結果影響有限，由於固定邊界的拘束程度大於滑移，前者的共振頻率稍微高於後者的結果。數值結果與實驗數據之間仍有很大的差異，可供後續修正數值分析模型的參考。因為水的楊氏係數較

小，若把水當成結構之一部份予以分析時，水深越深，壓電致動器的共振頻率會隨之下降。流體邊界設為滑動與不滑動所得的共振頻率差異列於表 2.5。



第三章 微型幫浦之設計與量測

3.1 微型幫浦與測試平台

本文採用類似 Hasegawa [16] 的微型幫浦實驗架構進行流量量測，幫浦的腔室為開放式，結構示意圖與實體圖分別如圖 3.1 及圖 3.2 所示。幫浦由三個部分構成，第一個部分為碟型壓電致動器，使用市售的蜂鳴片，蜂鳴片為壓電材料及銅片組合成的層狀複合材料圓板，尺寸如第二章所描述。市售的蜂鳴片已佈好一個圓形電極，適合 W_{00} 振態的產生，本研究為探討 W_{00} 振態與 W_{01} 振態的流量，以硝酸將此電極去除，再使用網版印刷的方式，將銀膠以手工塗佈成兩個半圓形電極，完成圖如圖 3.3 所示。固定幫浦碟型壓電致動器的底座材質為不銹鋼。圖 3.4 所示為底座的下半部，圖 3.5 為底座的上半部，長與寬皆為 50mm，厚度為 5mm，中間貫穿圓孔直徑為 25mm。半圓電極塗佈完成之蜂鳴片放置於圖 3.4 所示底座的中央，以兩片鋼材固定碟型壓電片邊緣的邊界條件比較接近所模擬的邊緣箝制邊界。

第二部分為盛載流體的容器，材質為透明且便於觀察的壓克力。壓克力水槽高度為 60mm。導管為化學實驗所使用的滴定管，市售滴定管尾部為一漸縮管，為消除漸縮管效應及降低管壁流阻效應，將滴定管頭尾截短，成為均勻的圓形導管，導管的壁厚為 2.1mm，外徑為 6.5mm，內徑為 2.3mm，長度為 255mm，導管的頂部套著一透明水管，可將泵出的流體導出。實驗時，另設有一個大水缸，應用連通管原理補充液體，維持水位高度。

第三個部份為電源供應的部份，蜂鳴片在圓周邊界固定的情況下所產生的位移振幅較小，要使驅動的效果增加必須放大位移振幅。放大

位移振幅有兩種方法，其一是在蜂鳴片的共振頻率下驅動，可以獲得較大的位移。其次為增加驅動電壓，函數產生器的輸出訊號最大振幅範圍為-10 V~10 V，必須要外接功率放大器增益訊號。以單相驅動時，使用函數產生器 HP33250，配合高速雙極性功率放大器 NF HSA4051 驅動蜂鳴片。雙相致動時，採用前述的函數產生器，配合自製的相移器電路輸出相位不同的兩組訊號，相移器線路圖及實體照片如圖 3.6 及 3.7 所示，最後再以 PB50 和 μ A741 所組成的功率放大器，放大相移器所傳出的訊號。圖 3.8 及 3.9 所示分別為功率放大器的線路圖及實體照片。此種自行設計的功率放大器可將訊號增益 11 倍，放大原理為虛短路效應，詳細說明參閱附錄 A。

量測平台結構如圖 3.10 所示，基座為一個底面邊長皆為 30 cm 的正方形，厚度為 1 cm，底座上面有一組 Mitutoyo 的 xy 平台，最大調整幅度為 25mm，精度為 0.01 mm。xy 平台上鎖了一塊厚度為 5 mm，長度為 190 mm 及寬 130 mm 的壓克力平板，如圖 3.11 所示，平板上設一凹槽放置幫浦。A 部分凹槽深為 2mm，B 部分深為 3mm，B 部分凹槽規劃為放置幫浦驅動器的電極導線。架設的導管分為兩組，第一組在離底座高 180 mm 處裝置了 z 方向平台，用來固定導管，並調整導管與碟型壓電致動器的間距。第二組平台距離第一組平台的 x 方向約 100 mm 處，第二組平台除設有 z 方向平台，還增加 x 方向的平台，可調整兩支導管的距離，平台精度同底座上之 xy 平台。

3.2 碟型壓電致動器頻譜響應及振動量測

為量測無流體負載的狀況下的蜂鳴片之頻率響應函數，本研究採用 Signal Lab 的動態訊號分析儀 model 20-42，配合盛威公司的雷射都卜

勒干涉儀，與阻抗分析儀 HP4195A，分別量測電性、機械振動的面外(out-of-plane)位移與阻抗之頻率響應。圖 3.12 所示為電性頻率響應量測的示意圖。Signal Lab 動態訊號分析儀具有函數產生器、訊號擷取及分析的功能，量測時將頻寬為 10 kHz 的白雜訊(white noise)輸入右半邊電極，左半邊因壓電片變形產生電流訊號，圖 3.13、3.14、3.15 所示的實線為不同蜂鳴片的電性量測結果。蜂鳴片機械振動的面外位移頻率響應是以 Signal Lab 動態訊號分析儀配合雷射都卜勒干涉儀，圖 3.16 所示為實驗架構的示意圖。以右半邊電極驅動蜂鳴片，量測點同為右側距邊緣 Q 點 9.15mm。圖 3.13、3.14、3.15 所示的虛線分別為不同蜂鳴片的機械振動面外位移之頻率響應。圖 3.15 的量測點改移至蜂鳴片的中心。由圖 3.15 可以觀察出 W_{00} 振態在中心點的振幅確實較 W_{01} 振態大。實驗結果顯示機械振動與電性量測的共振頻率重合。蜂鳴片的電極切割成兩個半圓，故可以同時自電性與機械振動量測結果發現 W_{00} 與 W_{01} 振態的共振頻率。

參考 Meirovitch[19]的振動教科書，結構阻尼可由頻率響應函數的 Q 值(quality factor)獲得。本文以蜂鳴片一之振動頻率響應函數計算第一及第二共振頻率的阻尼係數，第一個共振頻率振幅之-3dB 處的兩個頻率，分別為 3,821.9Hz 及 3,965.6Hz，第二個共振頻率振幅之-3dB 處的兩個頻率分別為 6,762.5Hz 及 7,096.8Hz。以此數據計算獲得 α 阻尼為 54.97， β 阻尼為 5.88×10^{-6} 。

實驗的第三步驟是以阻抗分析儀量測蜂鳴片的阻抗曲線，透過 GPIB 介面，擷取各頻率對應的阻抗值，實驗架構圖如圖 3.17 所示。壓電材料具有電感、電容及電阻的綜合特性，量測阻抗值是了解材料電性最直接的一種方法，並可以了解壓電驅動器電極的塗佈狀況。量

測結果顯示在機械振動的共振頻率之阻抗值為相對低點。圖 3.18 所示為透過 Screen Capture 2 軟體擷取蜂鳴片一的阻抗曲線。蜂鳴片一的第一個共振頻率所對應的阻抗約為 $30\ \Omega$ ，第二個共振頻率對應的阻抗約為 $20\ \Omega$ 。蜂鳴片二的第一個共振頻率為 $3,466\ \text{Hz}$ ，對應的阻抗為 $45.18\ \Omega$ ，第二個共振頻率 $7,192\ \text{Hz}$ ，對應的阻抗為 $25.65\ \Omega$ 。蜂鳴片三的第一個共振頻率為 $3,781\ \text{Hz}$ ，阻抗為 $56.74\ \Omega$ ，第二個共振頻率 $7,453\ \text{Hz}$ 的阻抗為 $43.59\ \Omega$ 。量測的共振頻率與 ANSYS 分析的比較結果列於表 3.1。

振動量測的實驗架構圖如圖 3.19 所示，採用相差 90° 的雙相驅動方式驅動蜂鳴片一，以雷射都卜勒干涉儀量測流體未負載前，蜂鳴片的直徑 PQ 上各點振幅大小，量測點的間距為 $1\ \text{mm}$ ，驅動電壓為 $1\ \text{volt}$ ，量測結果如圖 3.20 所示。距離 P 點 $6\ \text{mm}$ 及 $20\ \text{mm}$ 處分別有振幅的極大值發生。將量測點固定於距 P 點 $20\ \text{mm}$ 處，記錄不同驅動電壓對應的面外位移振幅，結果如圖 3.21 所示。

流體負載後，蜂鳴片之共振頻率會往低頻移動約 $1\ \text{kHz}$ ，如圖 3.22 所示。受到幫浦結構的限制，無法量測流體負載時的面外位移，本文只能量測電性頻率響應，藉此獲得 W_{00} 振態與 W_{01} 振態的共振頻率，量測結果與第二章模擬比較如圖 2.16 所示，當水越深，對應的共振頻率也越低。

3.3 微型幫浦流量量測

幫浦流量的實驗架構示意圖及照片如圖 3.23 及 3.24 所示，採用量測範圍 $150\ \text{g}$ 、精度 $0.005\ \text{g}$ 的微量天平測得流體的重量，再利用水的密度 $1\ \text{g/cm}^3$ 將之換算為體積。實驗時，幫浦水深設定為 $30\ \text{mm}$ ，水溫控制在

攝氏 23.3 度。為了量測蜂鳴片之 W_{00} 振態的泵水流量，將導管豎立在蜂鳴片的圓心部分，如圖 3.25 所示。實驗裝置架設完成後，以前一節量測電性頻率響應的方式，量測蜂鳴片的共振頻率。當導管底部與碟型壓電致動器接觸時，共振頻率會往高頻移動約 1 kHz，如圖 3.26 所示，故將共振頻率往高處飄移時的導管底部位置訂為基準點。流量量測時，先設定導管下緣與蜂鳴片的間距，並驅動蜂鳴片的全圓電極，以工作頻率及間距為參數，量測流量變化曲線。施加電壓為 100 Volt，量測時間為一分鐘，工作頻率變化的間隔為 50Hz。圖 3.27 及 3.28 所示分別為蜂鳴片一的電性頻率響應曲線及流量變化。在間距 $40\mu\text{m}$ 處，蜂鳴片一的共振頻率為 1,721.88 Hz，但是當工作頻率於 1,550 Hz 時，可獲致最大流量 68.155 ml/min。蜂鳴片二的電性頻率響應曲線與流量如圖 3.29 及 3.30 所示，在間距 $80\mu\text{m}$ 處，共振頻率為 1,490 Hz，但是最大流量為 133.13 ml/min 發生於工作頻率 1,300Hz。

若以 W_{01} 模態的共振頻率驅動右半圓電極蜂鳴片只會發生 W_{01} 模態的振動，以其致動幫浦腔室量測泵水流量。圖 3.31 所示為 W_{01} 泵水實驗的示意圖，其中，導管的圓心必須先對準蜂鳴片右半圓電極的最大振幅點。蜂鳴片 W_{01} 振態的共振頻率會因流體負載的影響，向低頻偏移，隨著導管下緣與蜂鳴片的間距減少，共振頻率的偏移量會增加。圖 3.32 及 3.33 所示分別為蜂鳴片一受流體負載的頻率響應曲線及流量變化。在間距 $40\mu\text{m}$ 處， W_{01} 的共振頻率為 3,981.25 Hz，最大流量 4.98 ml/min 發生於工作頻率 3,650 Hz 時。蜂鳴片二的頻率響應曲線及流量變化分別如圖 3.34 及 3.35 所示，最大流量 9.63 ml/min 發生於間距 $20\mu\text{m}$ 、工作頻率 4,050Hz 的條件下，間距 $20\mu\text{m}$ 處的 W_{01} 的共振頻率為 4,078.10Hz。

以左半圓電極驅動 W_{01} 振態的流量的實驗步驟同右半圓電極致動，導管的圓心必須對準蜂鳴片左半圓電極的最大振幅點，泵水實驗示意圖如圖 3.36 所示。圖 3.37 及 3.38 所示分別為蜂鳴片一受流體負載的頻率響應曲線及流量變化。在間距為 $40\mu\text{m}$ 處， W_{01} 的共振頻率為 4246.88 Hz ，最大流量 4.37 ml/min 發生於工作頻率為 3900 Hz 時。蜂鳴片二的頻率響應曲線及流量變化分別如圖 3.39 及 3.40 所示，最大流量 4.315 ml/min 發生於間距為 $20\mu\text{m}$ 、工作頻率為 $4,100\text{ Hz}$ 的條件下，間距 $20\mu\text{m}$ 處的 W_{01} 的共振頻率則為 $4,237\text{ Hz}$ 。 W_{01} 振態是對於直徑對稱的共振模態，蜂鳴片一的右半與左半邊 W_{01} 振態泵水的最大流量發生在間距同為 $40\mu\text{m}$ ，蜂鳴片二的最大流量則發生在間距則同為 $20\mu\text{m}$ 的時候。

流體負載之蜂鳴片的 W_{00} 與 W_{01} 共振頻率與間距的關係分別整理如圖 3.41 及 3.42 所示。



3.4 疏水性表面處理

為了探討流體與固體耦合效應中，流體的附加質量對於共振頻率的影響，本文針對碟型蜂鳴片背面的銅質表面做了疏水性(hydrophobic)處理，改變流體沾附於蜂鳴片的能力。物體表面的疏水性處理可分為三種型式：表面修飾法，化學修飾法，及表面結構法。本文所選用表面修飾法，以 3000 rpm 轉速，旋轉塗佈質量濃度 1% 的鐵弗龍(teflon)溶液於蜂鳴片的背面，歷時 30 秒鐘，鐵弗龍的厚度約為 55 nm ，流程如圖 3.43 所示。濃度 1% 的鐵弗龍溶液是將 1 克的鐵弗龍溶於 99 克的 FC-77 溶劑而成。表面張力的量測方法有很多種，適用於本文的有滴外形法及滴重法。滴重法因水滴較容易提早脫落，較不易量測，本文採

用滴外形法中的旋滴法測量表面張力。使用 LITE 磁性定位分注器吸取 3 μ l 的水量，以吊掛水珠的方式拍攝，未作疏水性處理前的實照如圖 3.44 所示，接觸角為 54°；圖 3.45 所示為疏水性處理完後的實照，接觸角度變化為 98°。表面張力採用二維平面三力平衡的方式計算，未經疏水性處理前已知水的密度為 1 g/cm³，水的重量為 0.003 g，圖 3.46 所示為三力平衡圖，角 α 為水滴與蜂鳴片背面的接觸角。故可知蜂鳴片背面施予水滴的拉力 $F=1.854\times 10^{-3}$ g，表面張力 γ 表示式為(3.1)式

$$\gamma = \frac{F}{2l} \quad (3.1)$$

其中 l 為接觸長度，假設液滴為一個半球體，未經疏水性處理前表面張力 γ 為 2.619×10^{-3} g/cm。同理可知，疏水性處理後表面張力為 2.139×10^{-3} g/cm。

本文將蜂鳴片三作疏水性處理，並量測經疏水性處理、無流體負載之振動與電性頻率響應曲線，與處理前的頻率響應曲線比較，比較圖如圖 3.47 所示。流體負載後，不同水深對於共振頻率的偏移影響如圖 3.48 所示，數值結果整理於表 3.2。在水深 5mm 時，表面疏水性處理後之 W_{00} 與 W_{01} 振態的共振頻皆比處理前高， W_{00} 振態的共振頻提高 43Hz， W_{01} 振態提高 106Hz。水深 10~30 mm 時，疏水性處理後之 W_{00} 與 W_{01} 振態的共振頻卻比處理前低，共振頻率差距會隨水深增加而變大。這說明了以附加質量的方式模擬蜂鳴片受到負載流體的沾附，而致使共振頻率降低的假說不完全正確，仍有改進空間。

第四章 結論及未來展望

4.1 結論

本文以碟型蜂鳴片泵浦開放腔室之微幫浦，以實驗、實作方式比較 W_{00} 及 W_{01} 兩種共振模態致動的流量變化。採用 ANSYS 套裝軟體對於流體負載前後之蜂鳴片進行模態分析，無流體負載的蜂鳴片 W_{00} 振態的共振頻為 3799Hz， W_{01} 振態的共振頻為 8384Hz，因材料常數及邊界條件與真實情況存有差異，故與實際量測的共振頻率略有不同。由蜂鳴片量測結果可知 W_{00} 振態在中心點的振幅較大。雙相致動時，使用都卜勒干涉儀量測相位差 90° 之蜂鳴片的直徑的振幅可觀察出與模擬結果有相同的趨勢，且距中心 7.5mm 處有最大的位移。幫浦流體負載後會造成蜂鳴片共振頻率下降，本文利用附加質量的方式模擬流體負載對於蜂鳴片共振頻率的影響，開放腔室的水深在 5mm 時，模擬與實驗的結果即相符合，水深越深，兩者的差異越大。

蜂鳴片以 W_{00} 振態泵水，幫浦的最大流量為 133.13 ml/min，若以 W_{01} 振態泵水，最大流量為 9.63 ml/min。蜂鳴片以 W_{00} 振態泵水，導管與蜂鳴片間距越大，最佳泵水效率的工作頻率越低。若蜂鳴片以 W_{01} 振態泵水，導管與蜂鳴片間距越大，流體負載之蜂鳴片共振頻率越高。理論上，蜂鳴片以右半圓電極驅動 W_{01} 模態泵水的流量應該與左半圓驅動相同，但因電極塗佈無法達到百分之百左右對稱，故造成流量結果不同。蜂鳴片以 W_{00} 與 W_{01} 模態驅動，泵水效率最高的工作頻率皆比流體負載的蜂鳴片之共振頻率低。蜂鳴片經疏水性處理後，會造成表面張力下降，流體負載後，在水深 10~30mm 下蜂鳴片的共振頻率會比處理前降低，以 W_{01} 振態差距較大，這說明了以附加質量的方式模

擬蜂鳴片受到負載流體的沾附，而致使共振頻率降低的假說不完全正確，仍有改進空間。

4.2 未來展望

4.2.1 幫浦的壓力與流場分析

流體負載後，蜂鳴片的共振頻率會產生向低頻偏移的現象，此問題必須考慮壓電材料、金屬基板和流體之間的耦合，分析流體邊界移動的速度與位移時，必須考慮蜂鳴片不同振態及雙相、多相致動的情形。未來若以 Navier-Stokes 運動方程式配合流體與固體結構耦合的移動邊界作流場分析，流場模擬的網格屬於移動網格，故 Navier-Stokes 運動方程式必須先做座標轉換再進行計算。

4.2.2 幫浦驅動裝置

在實驗方面，蜂鳴片的單相驅動裝置為函數產生器搭配 NF 的高速雙極性壓電放大器，後者內部有保護電路，接線正確就可確保安全。雙相驅動的裝置為函數產生器搭配自製相移器及放大電路，需要特別注意碟型蜂鳴片的電極塗佈良窳，避免因短路造成 PB50 功率 IC 的燒毀，此外，PB50 功率 IC 會因過熱造成訊號輸出的不穩定，未來應增加散熱設計改善此狀況。

本研究之壓電致動器的電極塗佈採用網版印刷方式，較無法掌握塗佈的品質，影響幫浦流量。未來可以採用微機電製程製作壓電致動器，較能穩定掌握壓電致動器的品質。

4.2.4 幫浦流量量測

碟型壓電致動器的位移為微米級($1\mu\text{m}=10^{-6}\text{m}$)的變形，本研究的實驗採用的 z 方向量測平台精度與結構穩定性都不適用於此精度。未來在設計導管支撐平台應使用精度與結構穩定度高的 z 平台。本研究採用的導管管壁厚為 2.1mm，未來實驗規劃可考慮不同管壁厚度對於幫浦流場與流量的影響，並探討導管長短的流阻的效應。



參考文獻

- [1] K. E. Petersen, "Fabrication of an integrated planar silicon ink-jet structure" *IEEE Trans. Electron Devices*, **ED-26**, 1918-1920, 1979.
- [2] J. G. Smits, "Piezoelectric micropump with three valves working peristaltically" *Sens. Actuator A-Phys*, **21-23**, 203-206, 1990.
- [3] E. Stemme and G. Stemme, "A valveless diffuser nozzle based fluid pump" *Sens. Actuator A-Phys*, **39**, 159-167, 1993.
- [4] A. Olsson, E. Stemme, and G. Stemme, "A valveless planar fluid pump with two pump chambers," *Sens. Actuator A-Phys*, **46-47**, 549-556, 1995.
- [5] A. Olsson, E. Stemme, and G. Stemme, "Numerical and experimental studies of flat-walled diffuser elements for valve-less micropump," *Sens. Actuator A-Phys*, **84**, 165-175, 1996.
- [6] A. Ullmann, "The piezoelectric valveless pump performance Enhancement analysis," *Sens. Actuator A-Phys*, **69**, 97-105, 1998.
- [7] X. N. Jiang, Z. Y. Zhou, X. Y. Huang, Y. Li, Y. Yang, and C. Y. Liu, "Micronozzle/diffuser flow and its application in micro valveless pumps," *Sens. Actuator A-Phys*, **70**, 81-87, 1998.
- [8] Y. H. Mu, N. P. Hung and K. A. Ngoi, "Optimisation design of a piezoelectric micropump," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **15**, 573-576, 1999.
- [9] S. Matsumoto, R. Maeda, and A. Klein, "Characterization of a valveless Micropump based on liquid viscosity," *Microscale Thermophys. Eng.*, **3**, 31-42, 1999.
- [10] N. -T. Nguyen and X. Huang, "Miniature valveless pumps based on printed circuit board technique," *Sens. Actuator A-Phys*, **88**, 104-111,

2001.

- [11] T. Gerlach, and H. Wurmus “Working principle and performance of the dynamic micropump” *Sens. Actuator A-Phys*, **50**, 135-140, 1995.
- [12] T. Gerlach, M. Schuenemann, and H. Wurmus, “A new micropump principle of the reciprocating type using pyramidic micro flowchannels as passive valves,” *J. Micromech. Microeng.*, **5**, 199-201, 1995.
- [13] S. Li and S. Chen, “Analytical analysis of a circular PZT actuator for valveless micropumps,” *Sens. Actuator A-Phys*, **104**, 151-161, 2003.
- [14] 洪正翰(2003)，無閥式壓電蜂鳴片微幫浦，雲林科技大學機械工程學系碩士班，台灣，雲林縣。
- [15] 張晉祥(2005)，壓電驅動式微幫浦製作與分析，國立清華大學動力機械工程學系碩士論文，台灣，新竹市。
- [16] B. Fan, G. Song, and F. Hussain, “Simulation of a piezoelectrically actuated valveless micropump,” *Smart Mater. Struc.*, **14**, 400-405, 2005.
- [17] T. Hasegawa, S. Ueha, and K. Nakamura, “A miniature ultrasonic pump using a bending disk transducer and a gap,” presented in World Congress on Ultrasonics-Ultrasonics International 2005, Beijing, China, 29 August-1 September, 2005.
- [18] 辜得嘉(2005)，壓電式雙向泵動微孔噴射泵浦兩流混合模擬實驗分析，國立中正大學機械工程學系碩士論文，台灣，嘉義市。
- [19] T. Zhang and Q. M. Wang, “Performance evaluation of valveless micropump driven by a ring-type piezoelectric actuator” *IEEE trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, **53**(2), 463-473, 2006.
- [20] 吳朗，*壓電陶瓷*，pp. 29-31，全欣資訊圖書，台北市，民國 83 年。
- [21] L. Meirovitch (2001), *Fundamentals of vibrations*, McGraw-Hill

Higher Education, New York, 114-117.

- [22] R.G. Grimes, J.G. Lewis, and H.D. Simon, “A shifted block lanczos algorithm for solving sparse symmetric generalized eigenproblems,” *SIAM J. Matrix Anal. Appl.*, **15**, 228-272, 1994.
- [23] B. R. Muson, D. F. Young and T. H. Okiishi (1998), *Fundamentals of fluid mechanics*, third edition, John Wiley and Sons, Canada, Table 1.6.



附錄 A PB50 功率放大器的電路設計

驅動碟型壓電致動器除了要有足夠的電壓，還要有足夠的電流才能夠驅動。函數產生器 Agilent 33250A 輸出的最大振幅 V_{pp} 為 10V，不足以驅動壓電致動器產生足夠的變形，必須經功率放大器增強驅動的訊號。參考圖 A.1，利用虛短路原理 $V_- = V_+$ ，且 AB 及 BC 的線段電流值相同。

$$\frac{0 - V_i}{R_1} = \frac{V_i - V_o}{R_2} \quad (\text{A.1})$$

整理並求得增量(gain)為

$$G = \frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (\text{A.2})$$

若 R_2 與 R_1 的比值為 10，圖 A.1 之放大器的增益為 11 倍，圖 A.2 是以套裝軟體 Pspice 模擬此功率放大器之電壓對時間關係圖，圖 A.3 為對應之李沙育圖(Lissajous figure)，圖 A.4 所示則為對應的波德圖。

表 2.1 PZT-4 的材料常數

密度(g/cm ³)		剛性係數(GPa)			
ρ	c_{11}	c_{12}	c_{13}	c_{33}	c_{44}
7,500	139	77.8	74.3	115	25.6

壓電常數(C/m ²)				介電常數(10 ⁻¹² F/m)	
s_{13}^T (m ² /N)	s_{33}^T (m ² /N)	s_{44}^T (m ² /N)	s_{12}^T (m ² /N)	ϵ_{11}^T	ϵ_{33}^T
-5.2	15.1	39.0	-4.05	730	635



表 2.2 黃銅的材料常數

楊氏係數(GPa)	蒲松比	密度(kg/m ³)
E	ν	ρ
100	0.34	8,400

表 2.3 碟型蜂鳴片的前 10 模態共振頻率之數值結果

共振模態	一	二	三	四	五
共振頻率 (Hz)	3,799	8,357	8,383	14,022	14,051
共振模態	六	七	八	九	十
共振頻率 (Hz)	16,469	20,294	20,330	25,010	25,063

表 2.4 水深 5mm 的負載下，蜂鳴片共振頻率數值結果與起始搜尋之關係

共振頻率 (Hz)	共振模態				
起始搜尋 頻率(Hz)	一	二	三	四	五
0	1,306.1	2,204.3	2,219.8	2,399	2,642.9
200	1,306.1	2,204.3	2,219.8	2,399	2,642.9

表 2.5 負載流體深度對於蜂鳴片前兩個共振頻率計算值的影響

第一共振 頻(Hz)	水深(mm)					
	5	10	15	20	25	30
流體邊界 固定	2,398	1,907	1,630	1,447	1,315	1,213
流體邊界 滑移	2,396	1,904	1,626	1,442	1,310	1,207
蜂鳴片一 實驗值	2,356	2,166	1,978	1,900	1,875	1,866

第二共振 頻(Hz)	水深(mm)					
	5	10	15	20	25	30
流體邊界 固定	5,257	4,164	3,549	3,141	2,845	2,616
流體邊界 滑移	5,251	4,156	3,538	3,120	2,833	2,605
蜂鳴片一 實驗值	5,484	5,078	5,070	5,062	5,053	5,034

表 3.1 蜂鳴片共振頻率分析與實驗結果

共振頻率(Hz)	模 態 (蜂鳴片一)	
分析方法	W_{00}	W_{01}
ANSYS	3,799.7	8,383.6
振動頻率響應	3821.9	6,887.5
電性頻率響應	3,903.1	7,034.4

共振頻率(Hz)	模 態 (蜂鳴片二)	
分析方法	W_{00}	W_{01}
ANSYS	3,799.7	8,383.6
振動頻率響應	3,462.5	7,268.0
電性頻率響應	3,490.6	7,259.4

共振頻率(Hz)	模 態 (蜂鳴片三)	
分析方法	W_{00}	W_{01}
ANSYS	3,799.7	8,383.6
振動頻率響應	3,815.6	7,503.1
電性頻率響應	3,818.8	7,496.9

表 3.2 疏水性處理前後不同水深之蜂鳴片共振頻率

W_{00} 共振頻率(Hz)	水深(mm)					
	5	10	15	20	25	30
疏水處理前	2,675	2,228	2,090	1,984	1,947	1,921
疏水處理後	2,718	2,212	2,040	1,865	1,865	1,806

W_{01} 共振頻率(Hz)	水深(mm)					
	5	10	15	20	25	30
疏水處理前	5,441	5,022	4,968	4,959	4,959	4,956
疏水處理後	5,547	4,709	4,618	4,571	4,581	4,581



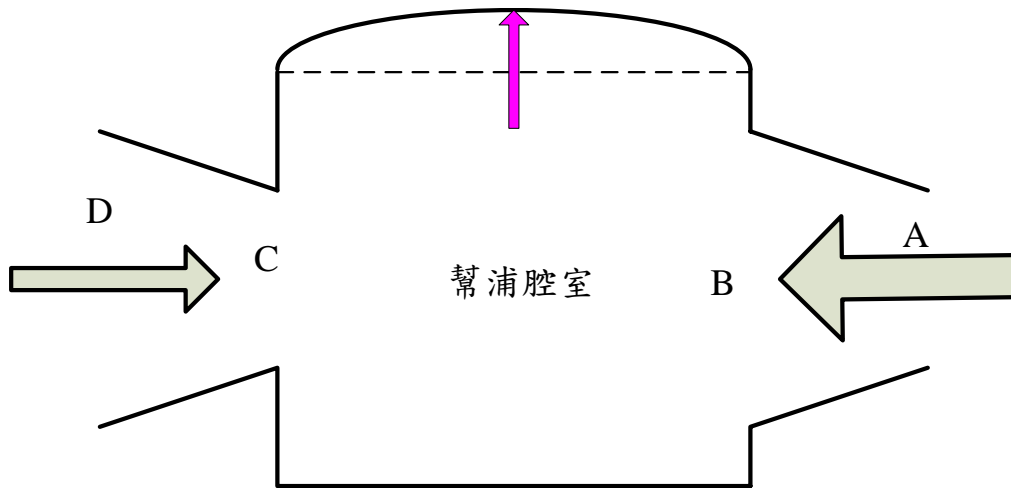


圖 1.1 無閥式壓電幫浦吸水狀態[3]

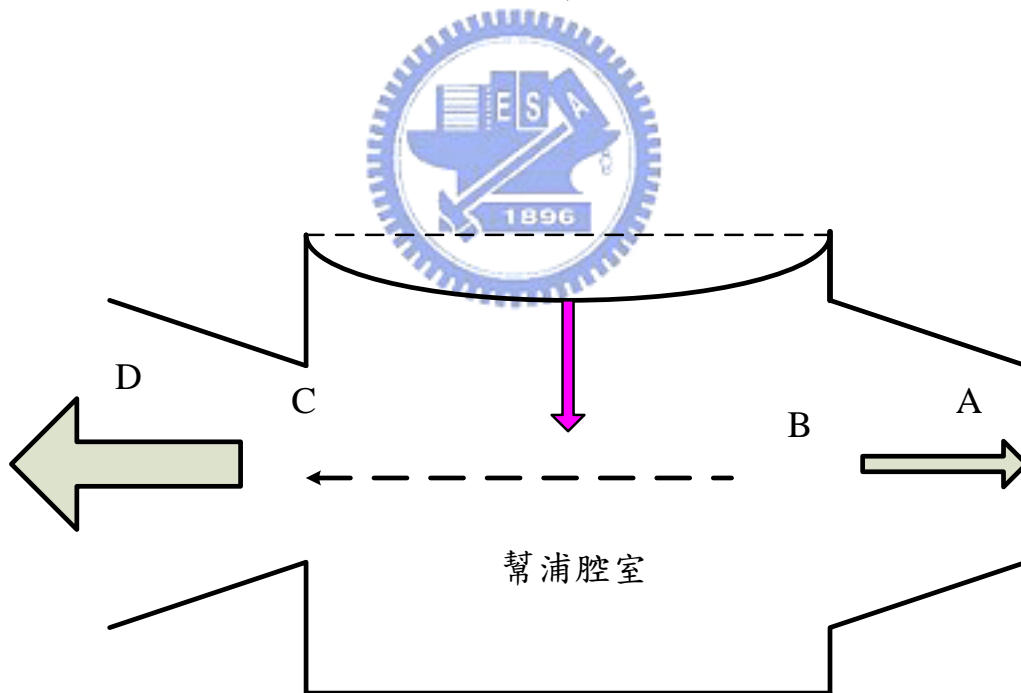


圖 1.2 無閥式微型幫浦排水狀態[3]

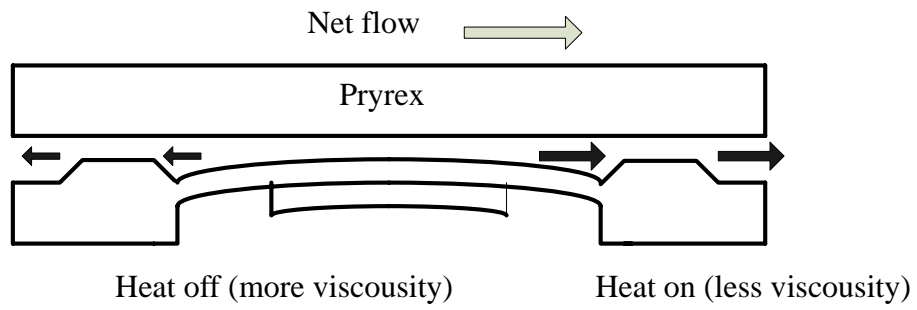


圖 1.3 黏滯型無閥式微型幫浦排水狀態[8]

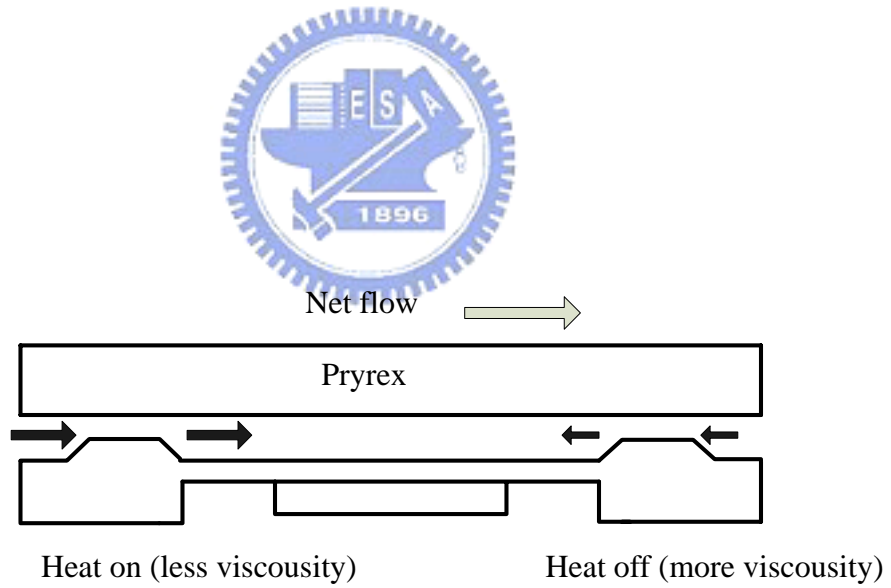


圖 1.4 黏滯型無閥式微型幫浦排水狀態[8]

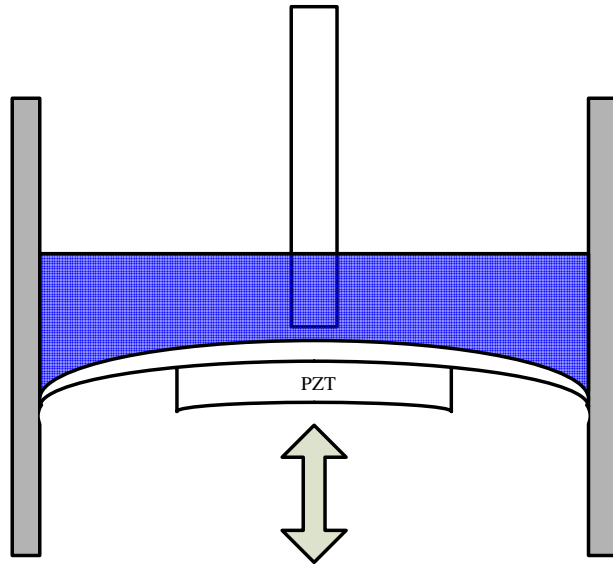


圖 1.5 Hasegawa *et al*[16]所設計之無閥式微型幫浦

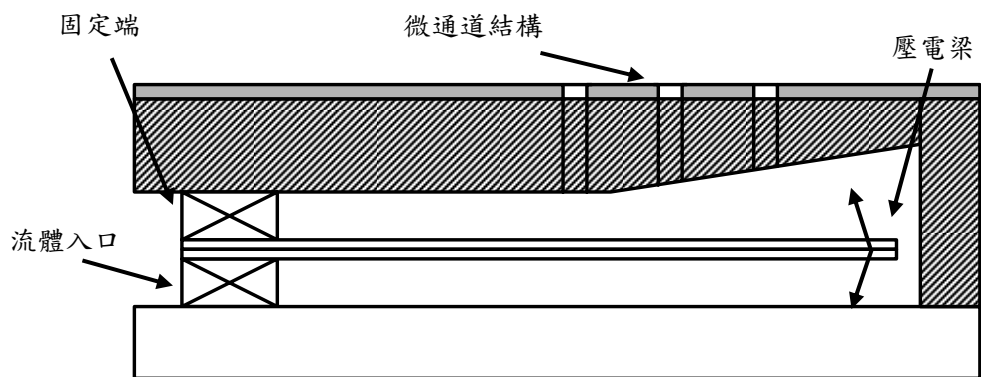


圖 1.6 壓電梁式雙向泵動陣列多孔噴射泵浦示意圖[17]

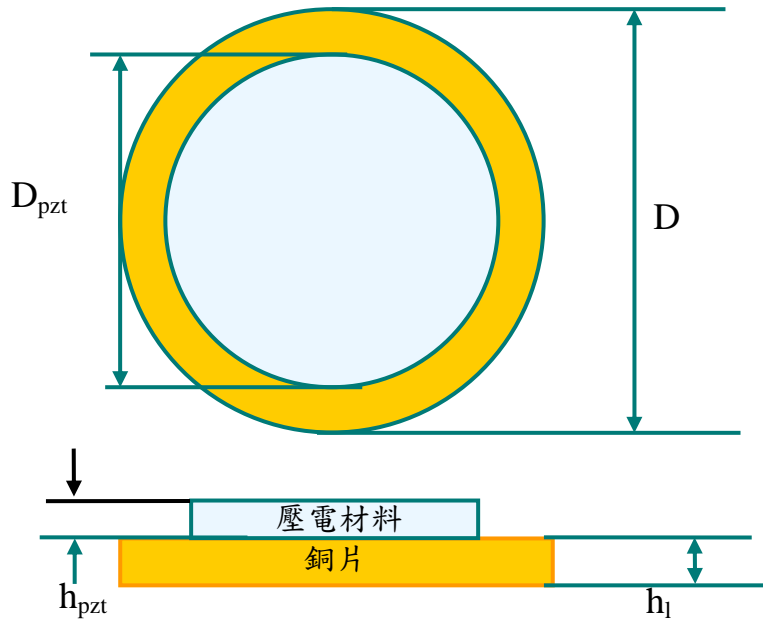


圖 2.1 碟型蜂鳴片結構的上視圖與側視圖

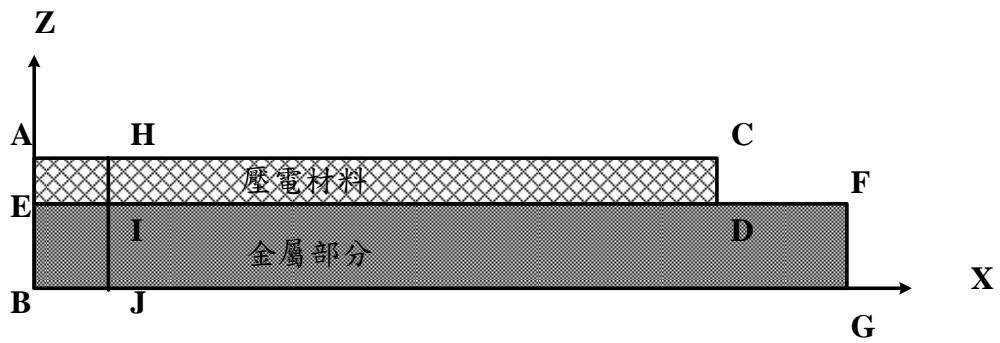


圖 2.2 碟型蜂鳴片之有限元素網格的二維規劃圖

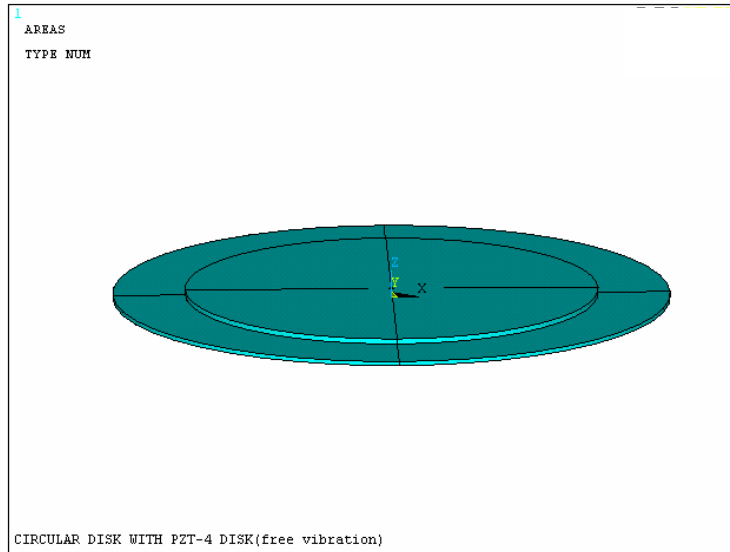


圖 2.3 ANSYS 建模完成圖

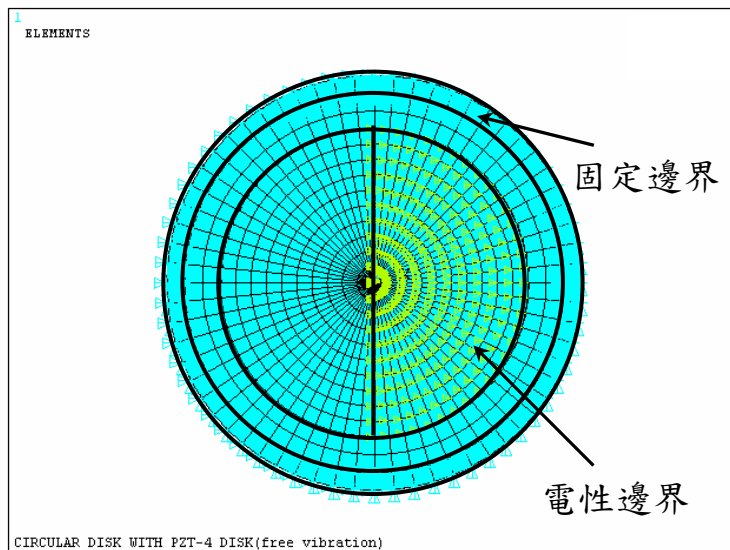


圖 2.4 碟型蜂鳴片邊界條件的設定

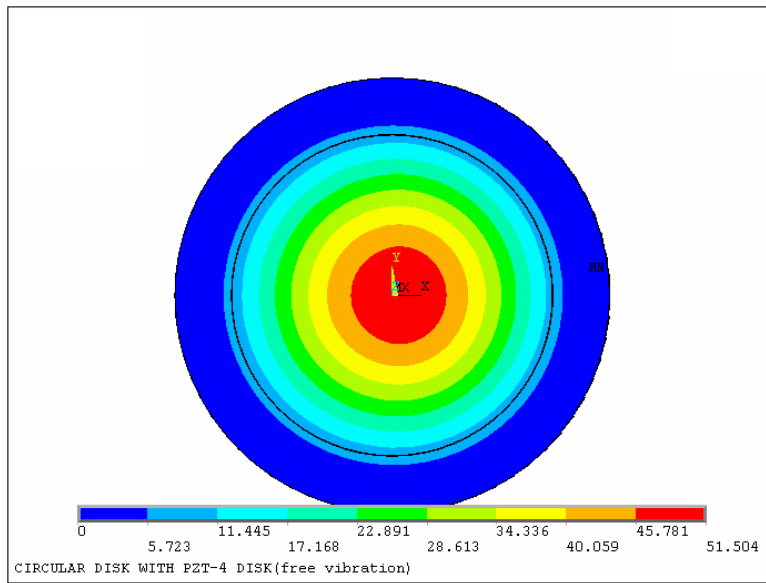


圖 2.5 碟型蜂鳴片的 W_{00} 振態圖 (共振頻 3,799 Hz)

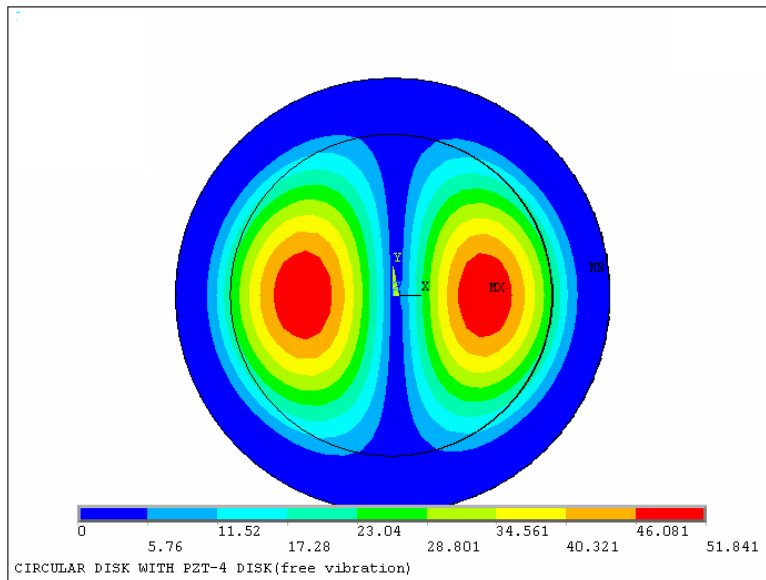


圖 2.6 碟型蜂鳴片的 W_{01} 振態圖(共振頻 8,384 Hz)

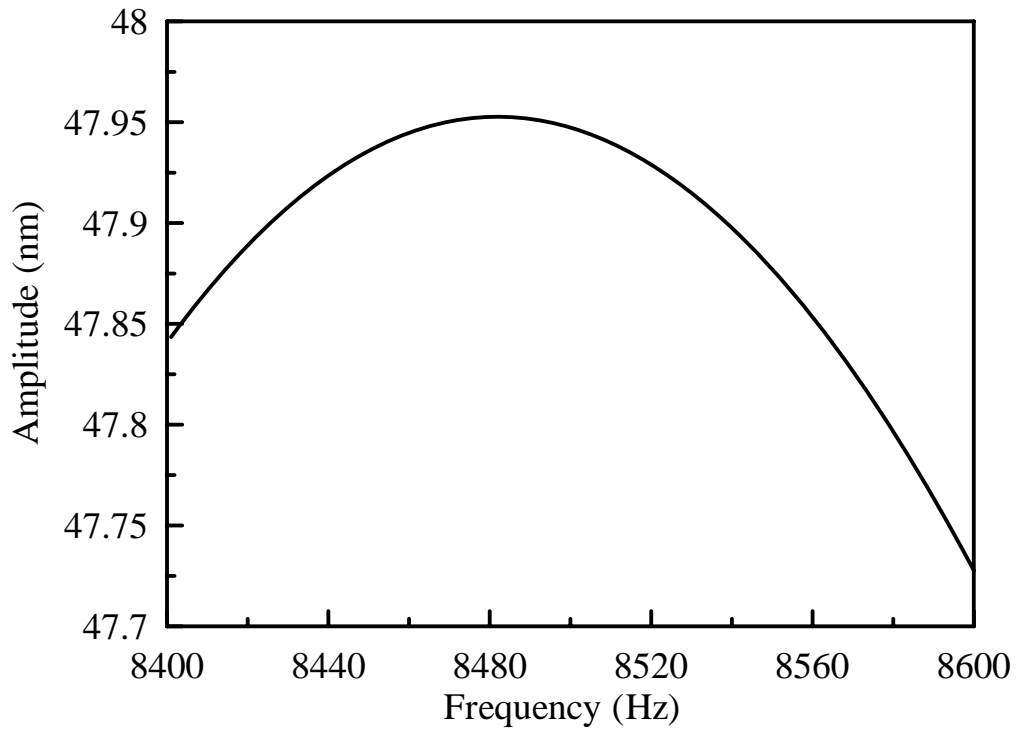


圖 2.7 碟型蜂鳴片距圓心為 6mm 處面外位移的頻率響應

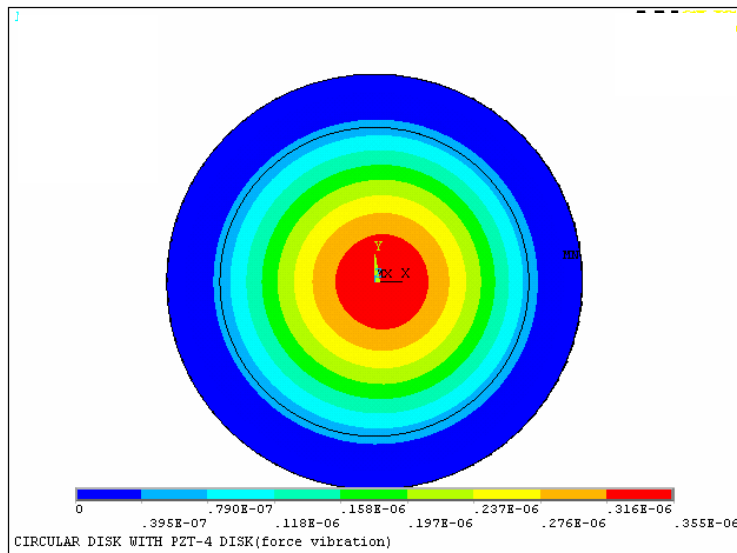


圖 2.8 含結構阻尼之蜂鳴片 W_{00} 振態的時諧分析結果

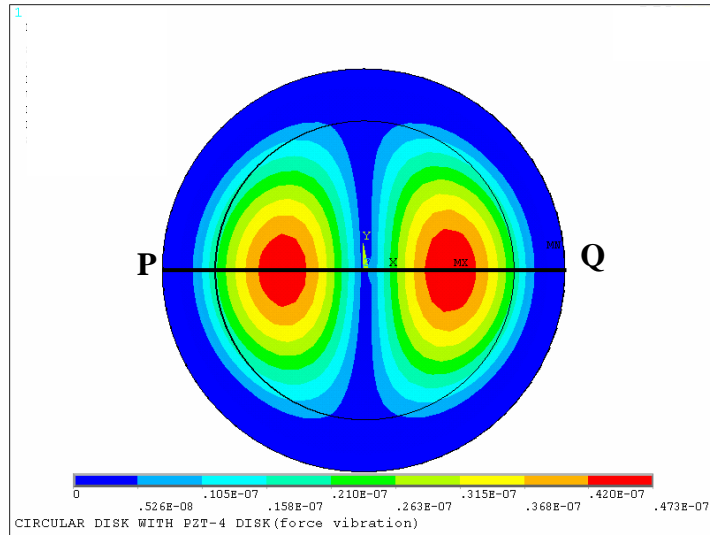


圖 2.9 含結構阻尼之蜂鳴片 W_{01} 振態的時諧分析結果

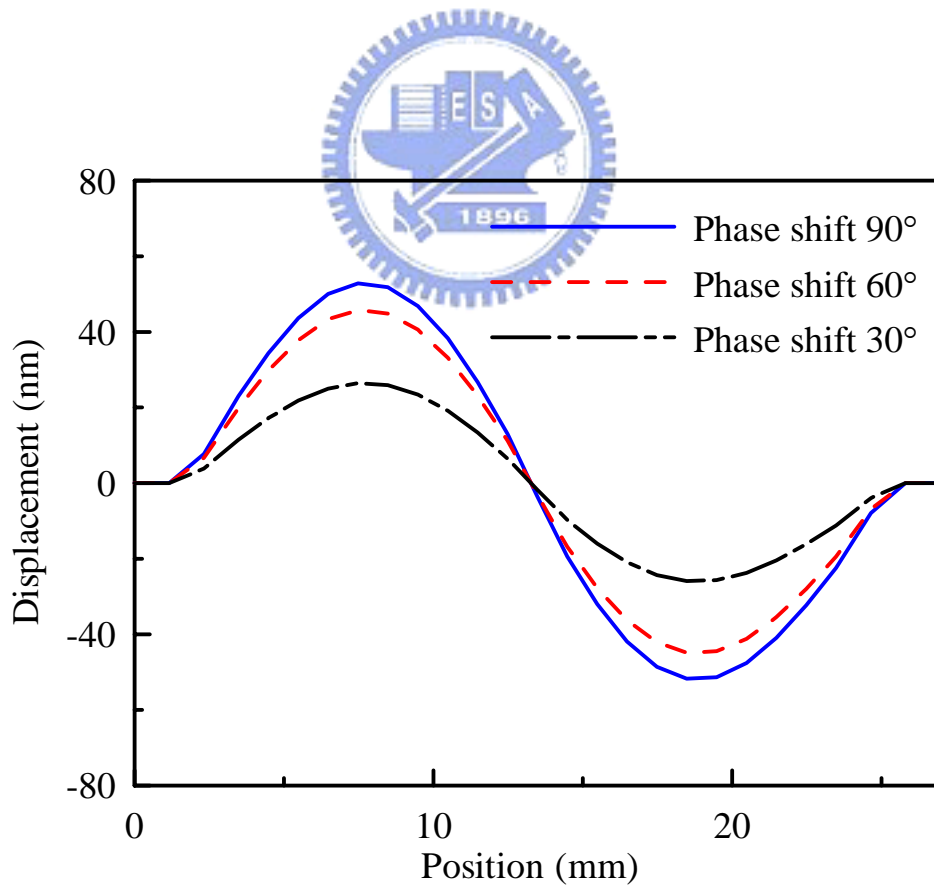


圖 2.10 蜂鳴片直徑上各點受雙相驅動 W_{01} 振態的面外位移

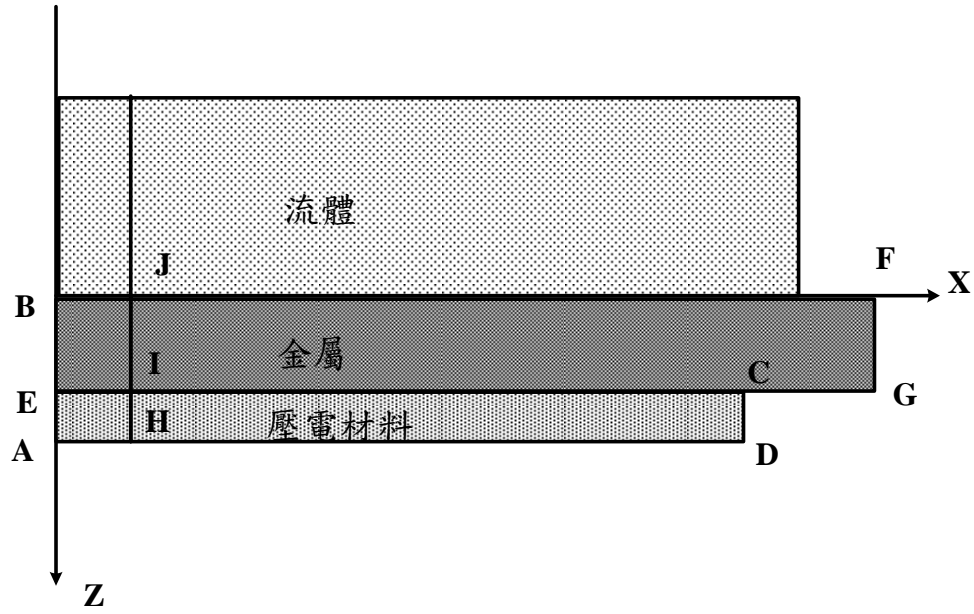


圖 2.11 流體負載之碟型蜂鳴片之二維分析規劃圖

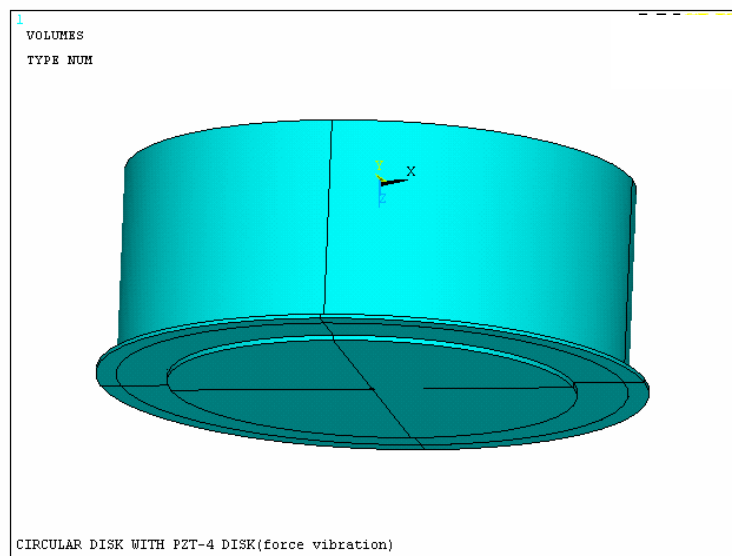


圖 2.12 流體負載之碟型蜂鳴片分析的建模完成圖(水深 10mm)

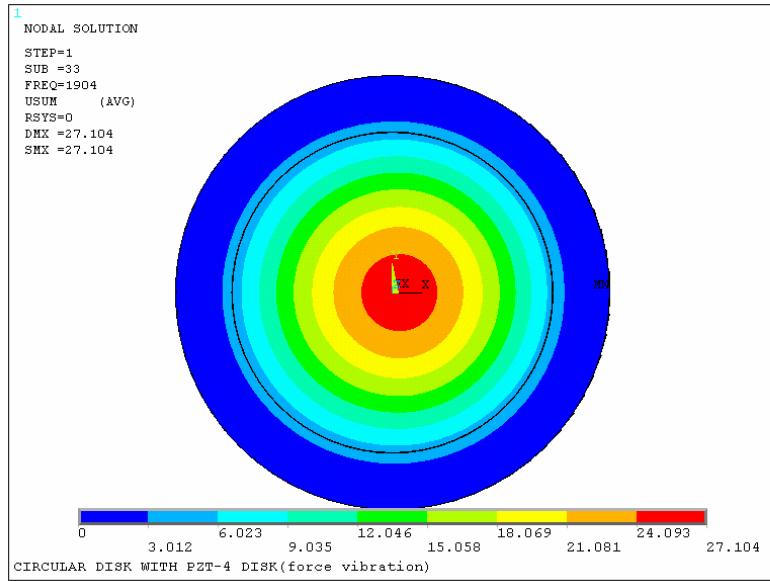


圖 2.13 流體負載之碟型蜂鳴片的 W_{00} 振態

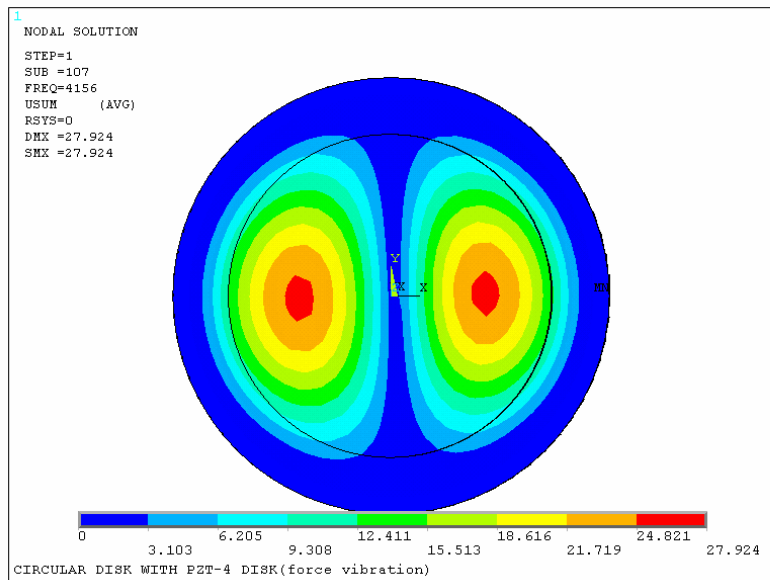


圖 2.14 流體負載之碟型蜂鳴片的 W_{01} 振態

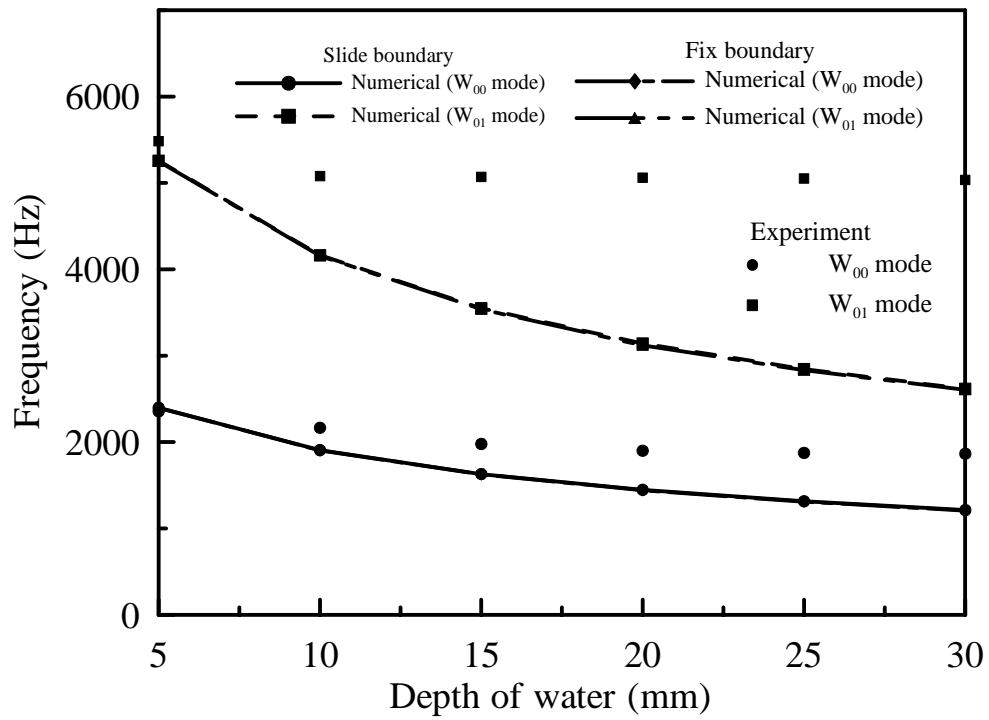


圖 2.15 流體負載之碟型蜂鳴片共振頻率的模擬與量測結果

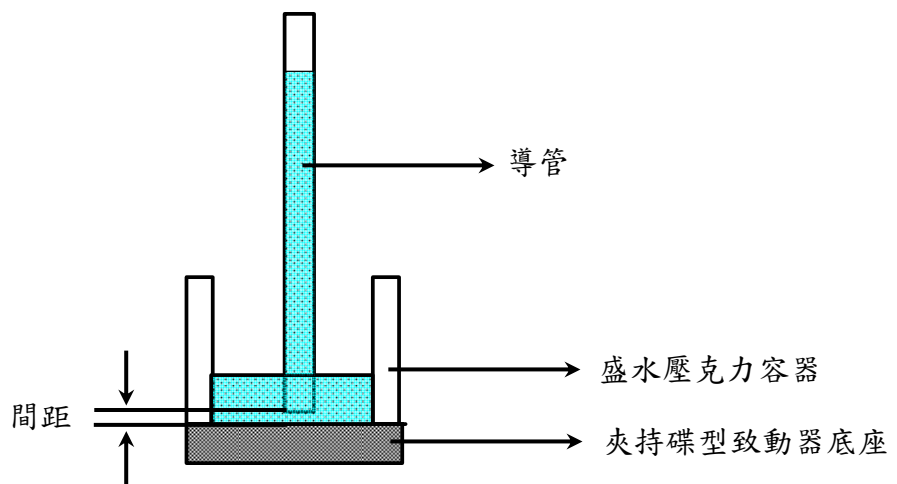


圖 3.1 Hasegawa [16]之微型幫浦結構示意圖

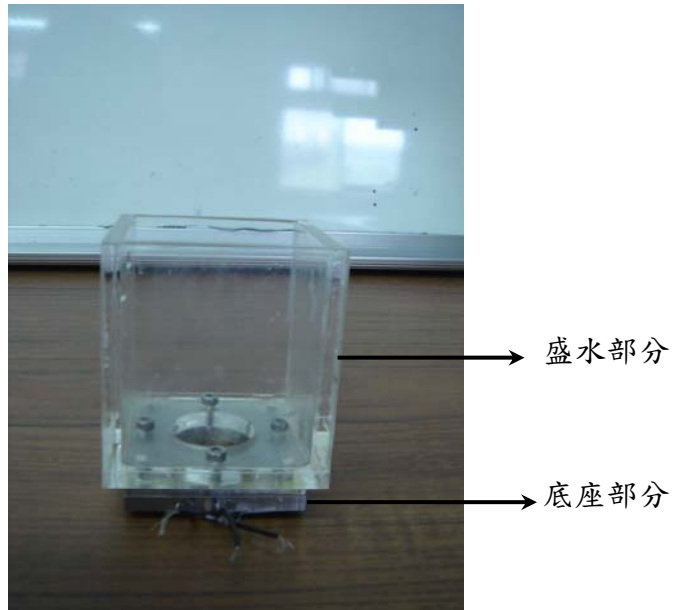


圖 3.2 幫浦水槽實體圖



圖 3.3 碟型壓電致動器電極塗佈完成圖

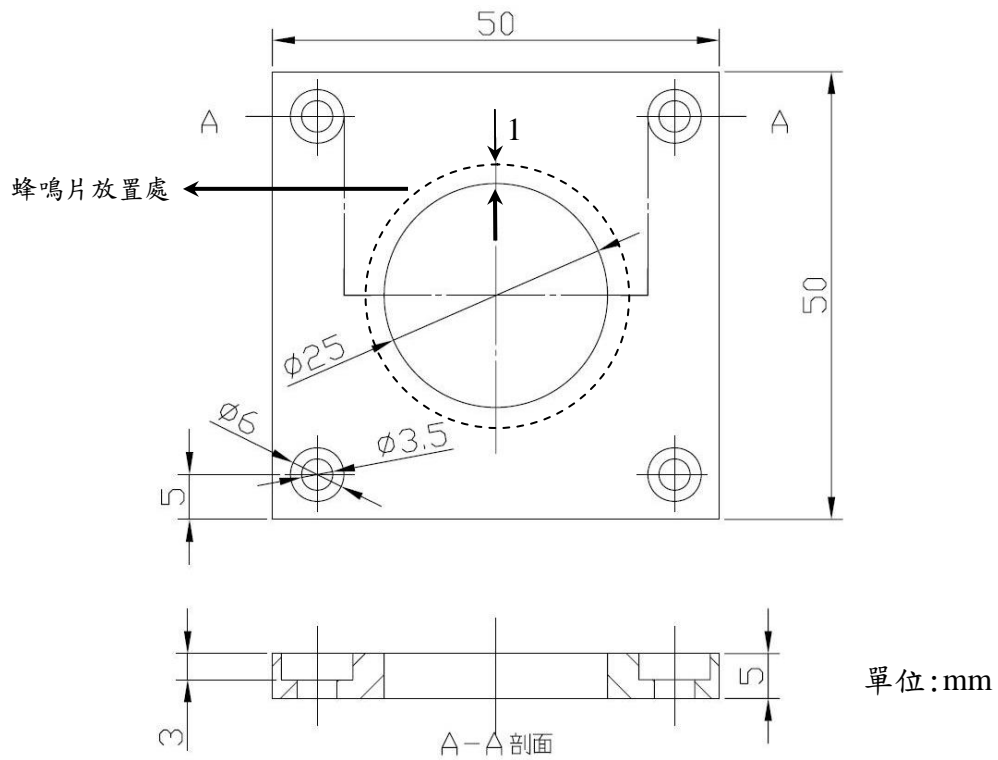


圖 3.4 固定碟型壓電致動器底座部分(下半部)

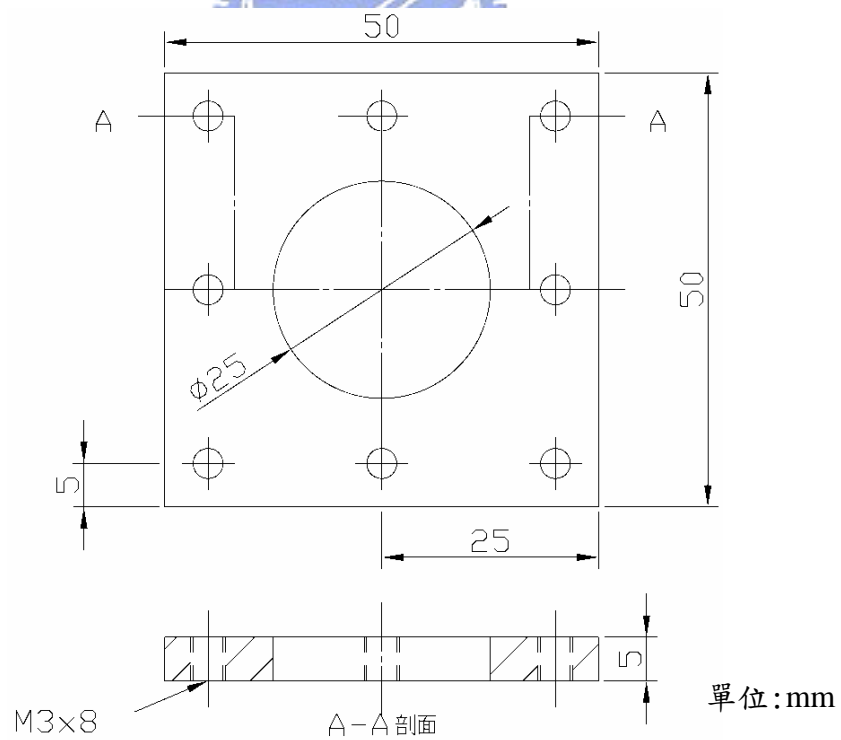


圖 3.5 固定碟型壓電致動器底座部分(上半部)

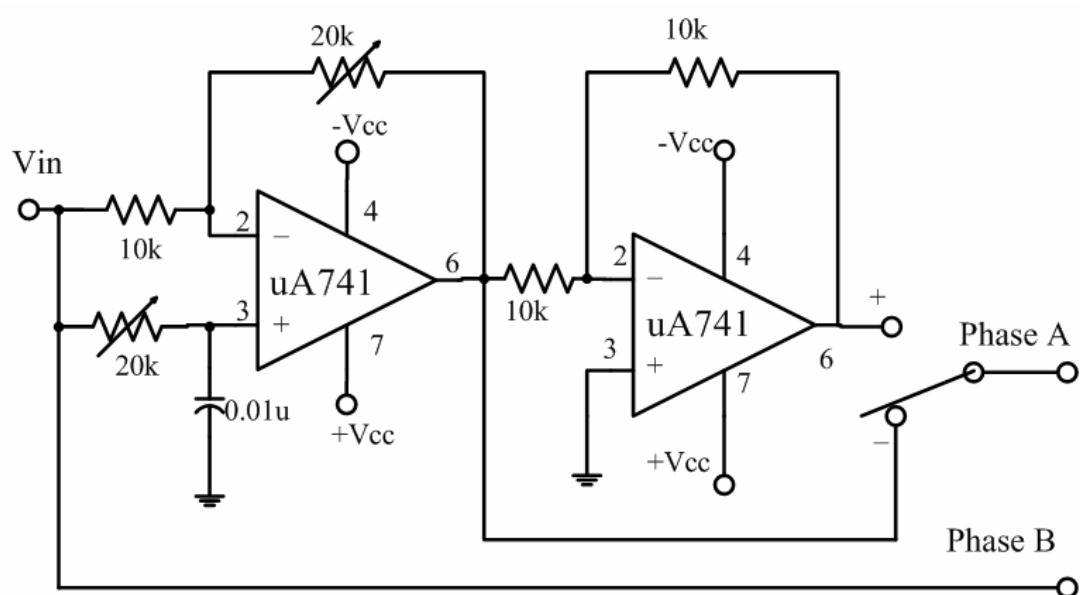


圖 3.6 相移器電路圖

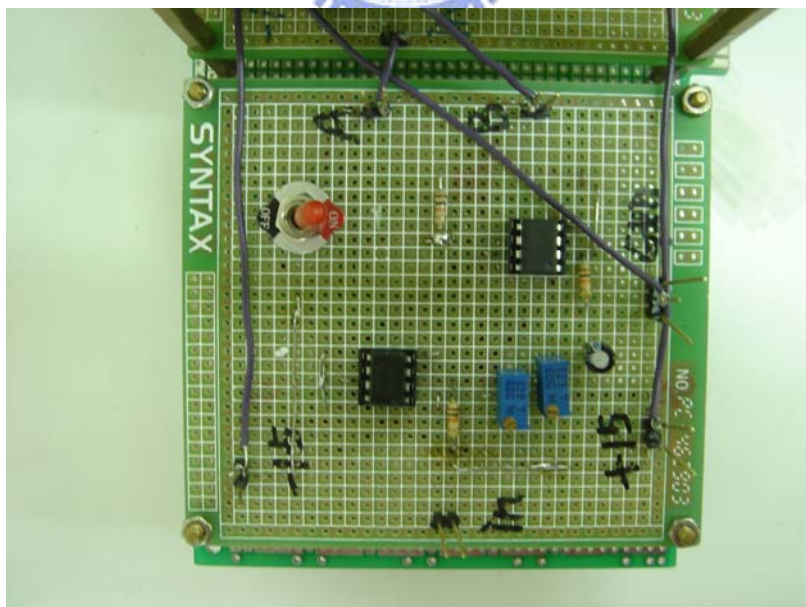


圖 3.7 相移器實體圖

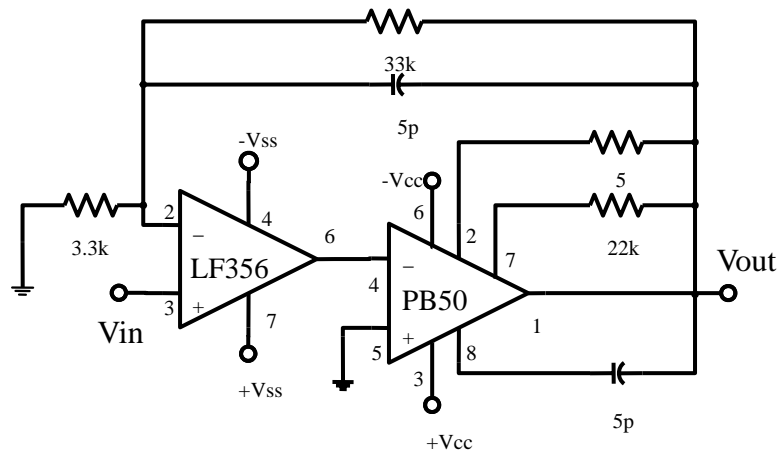


圖 3.8 PB50 功率放大器非反相放大器電路圖(放大 11 倍)



圖 3.9 PB50 功率放大器製作完成圖

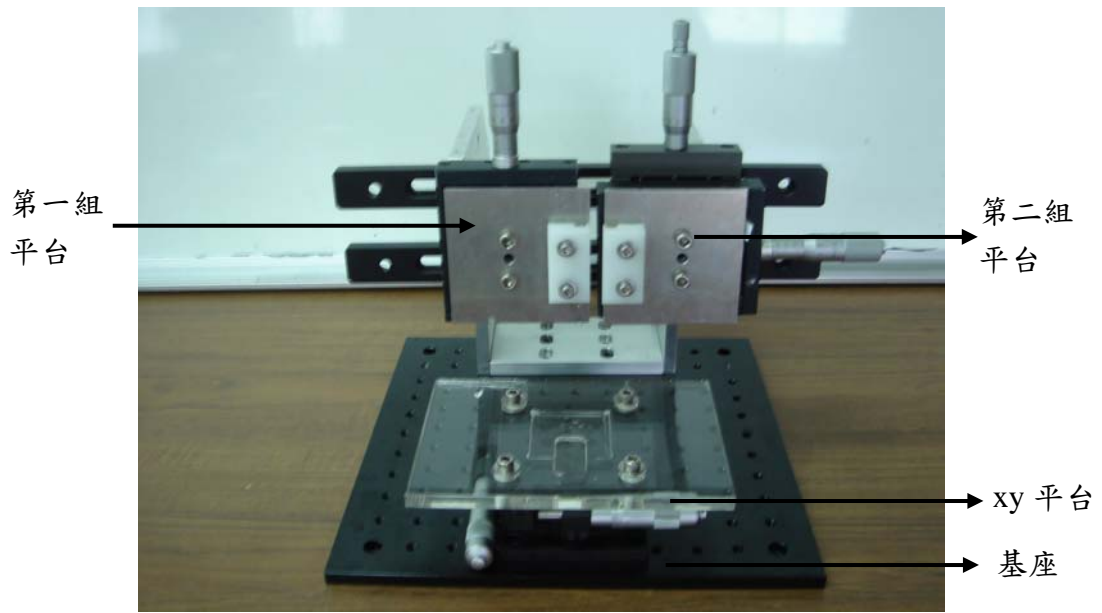


圖 3.10 量測平台結構示意圖

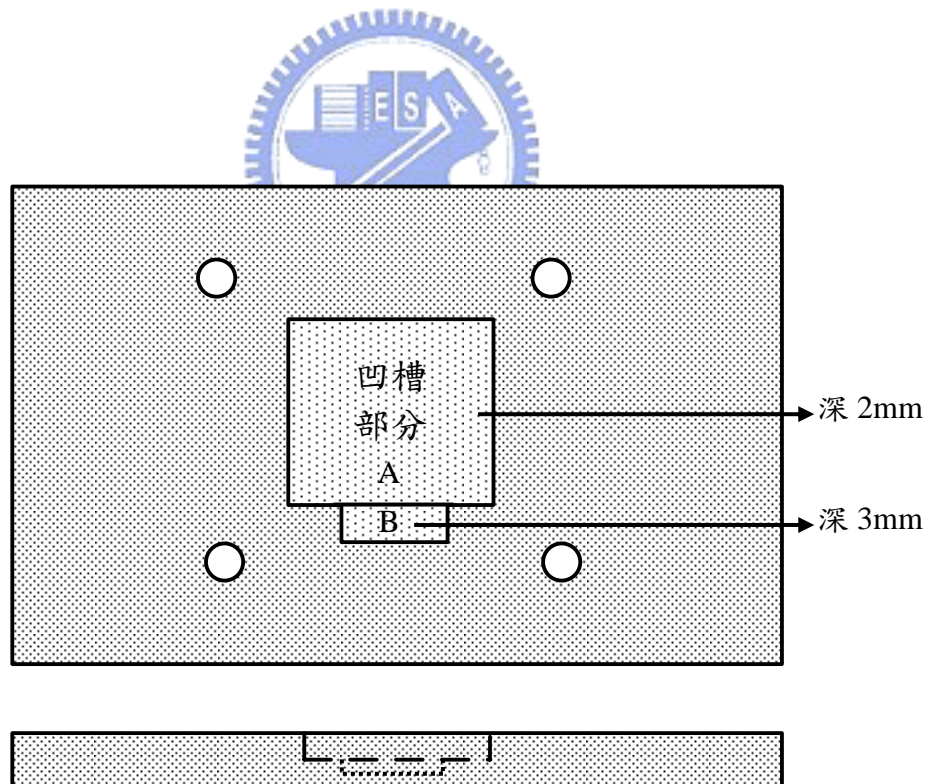


圖 3.11 固定用之壓克力平板

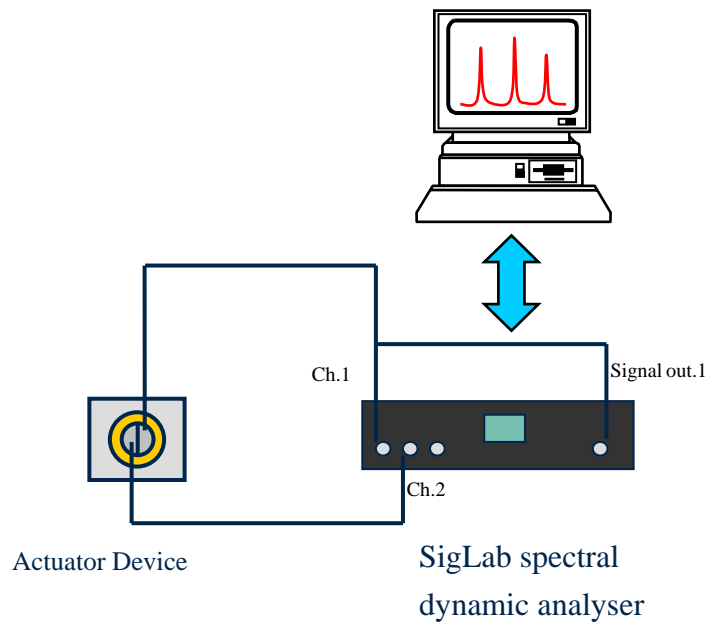


圖 3.12 電性頻率響應量測示意圖

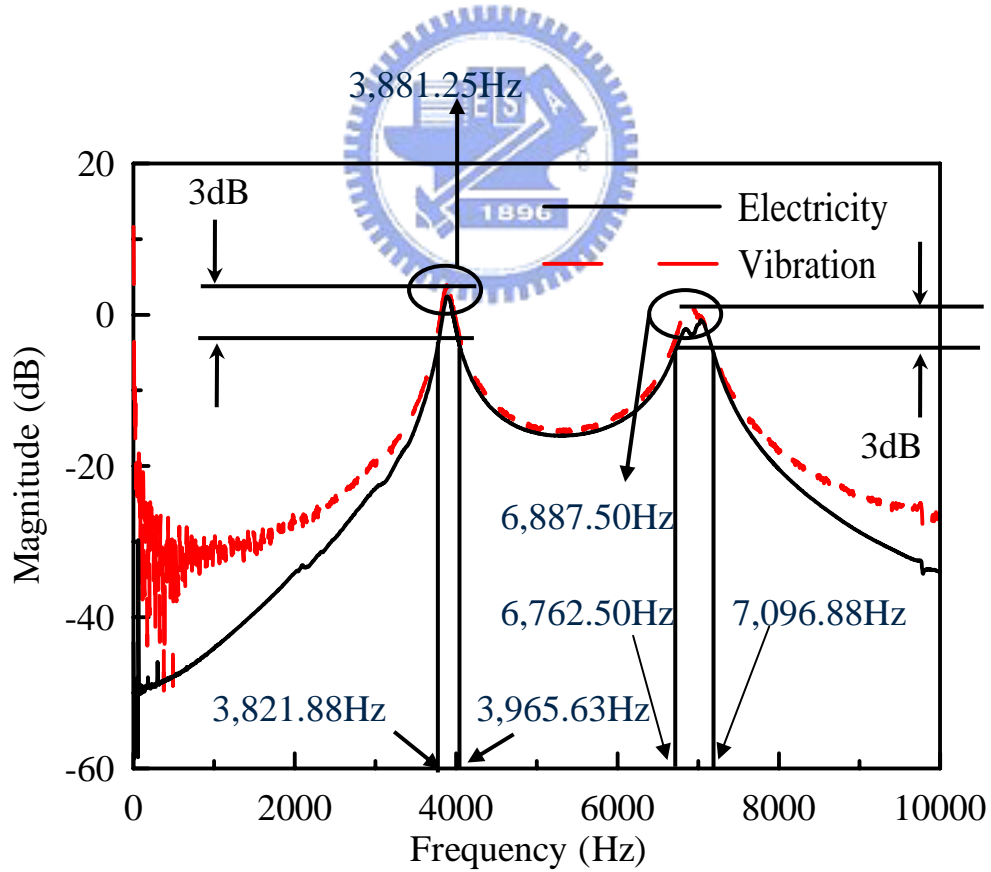


圖 3.13 蜂鳴片一的頻率響應曲線

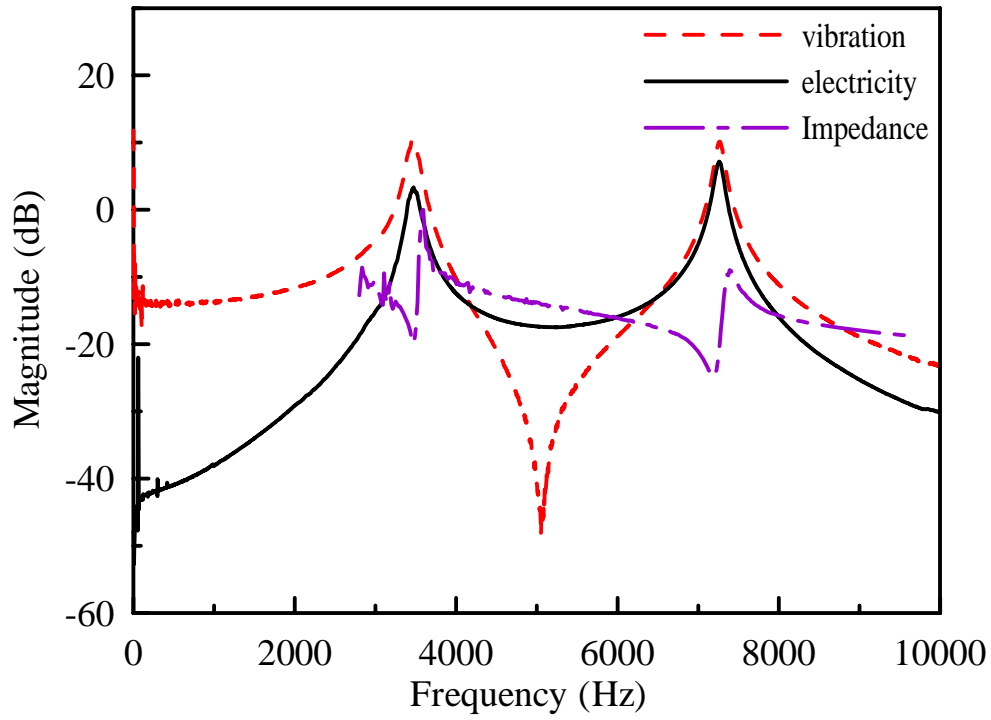


圖 3.14 蜂鳴片二的頻率響應曲線

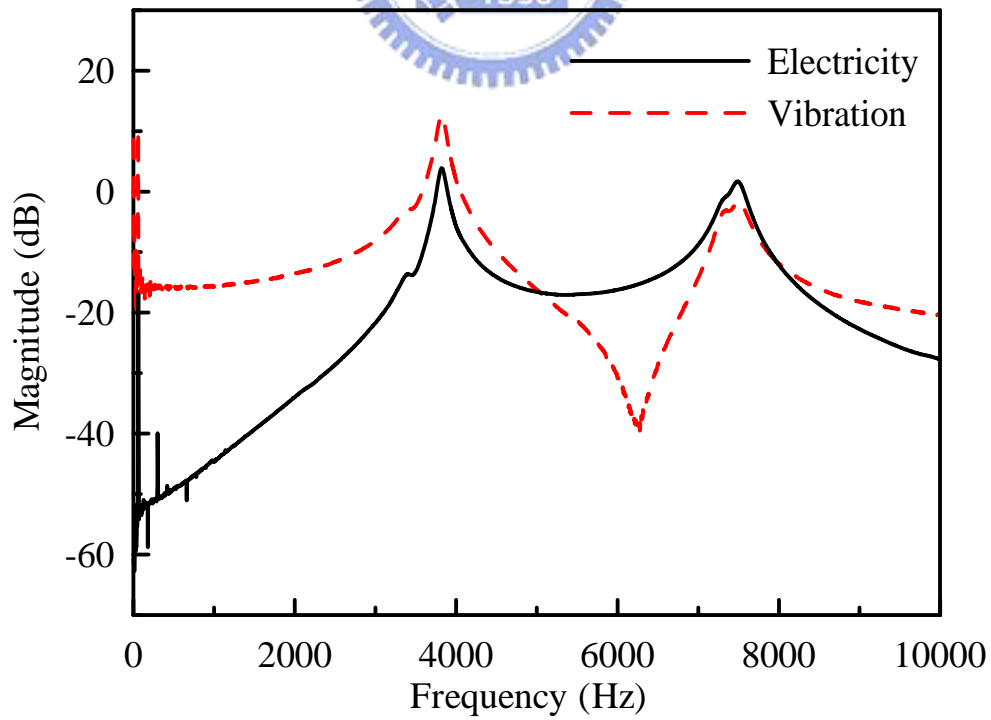


圖 3.15 蜂鳴片三的頻率響應曲線

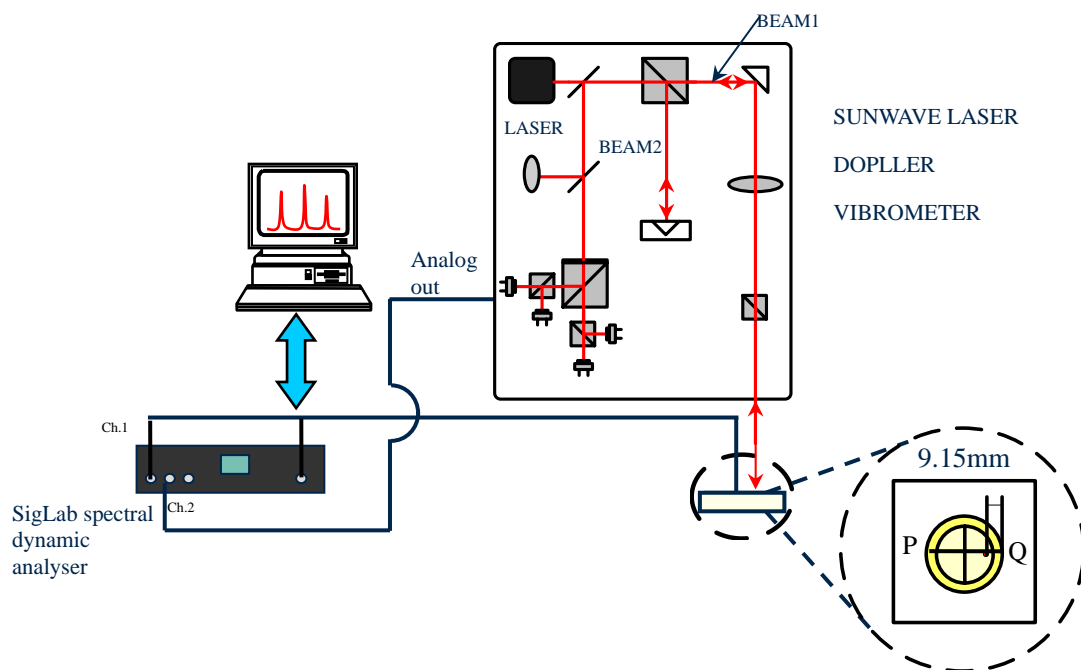


圖 3.16 蜂鳴片振動頻率響應量測實驗示意圖

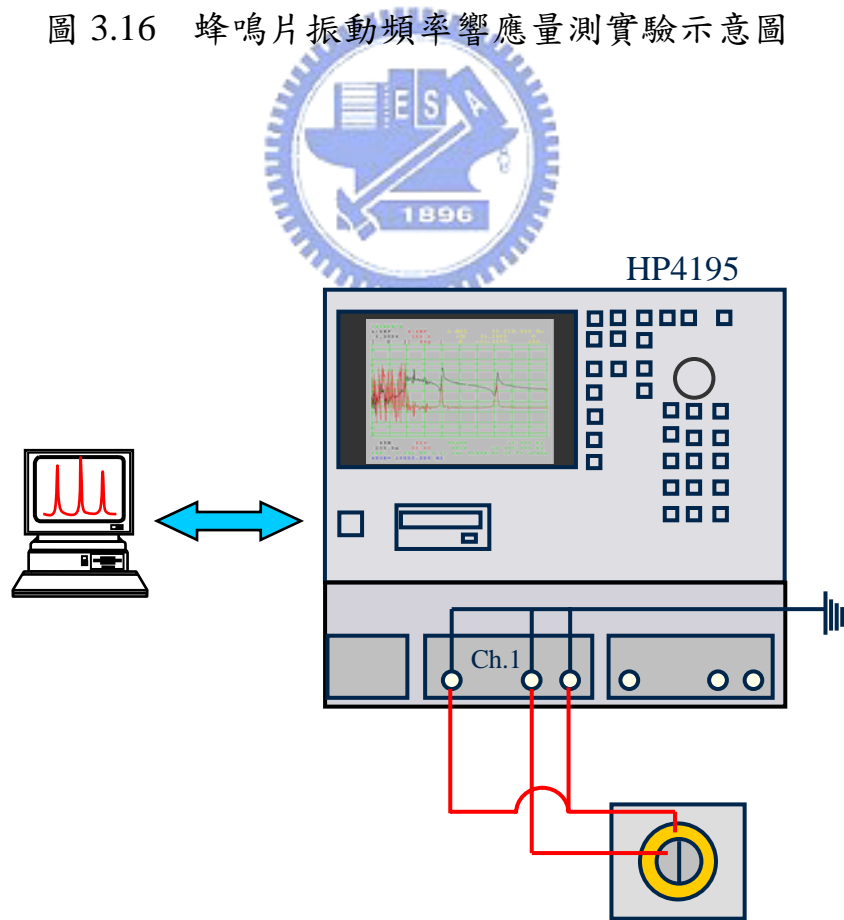


圖 3.17 阻抗量測實驗示意圖

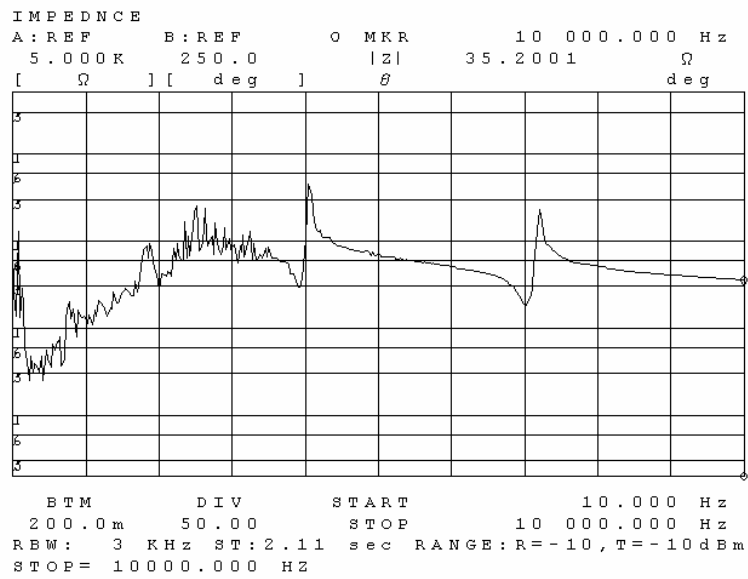


圖 3.18 蜂鳴片一之阻抗曲線

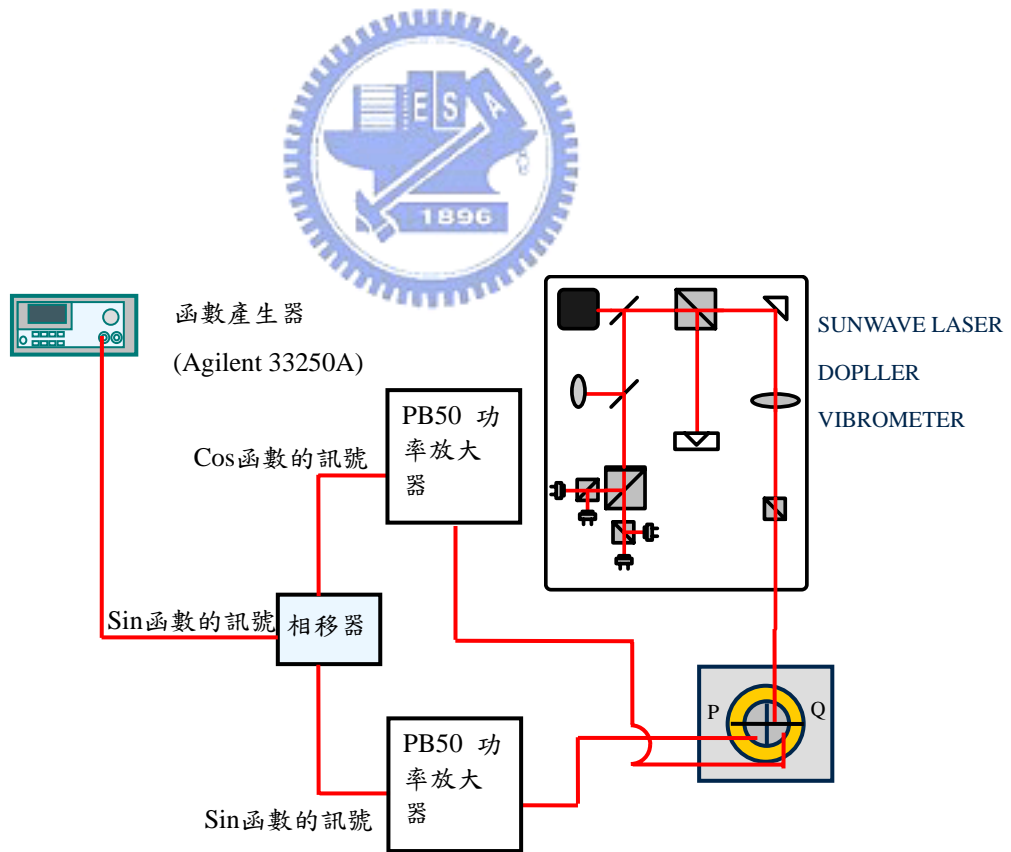


圖 3.19 雙相驅動蜂鳴片 W_{01} 振態的實驗示意圖

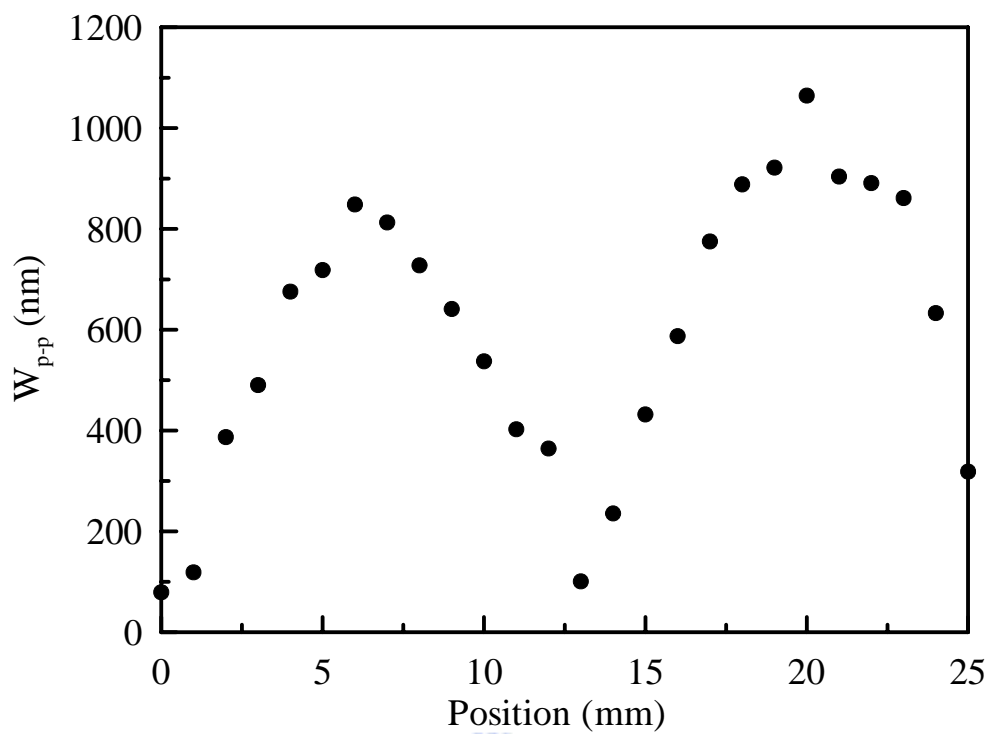


圖 3.20 相位差 90° 雙相驅動蜂鳴片 W_{01} 振態直徑 PQ 的振幅分佈

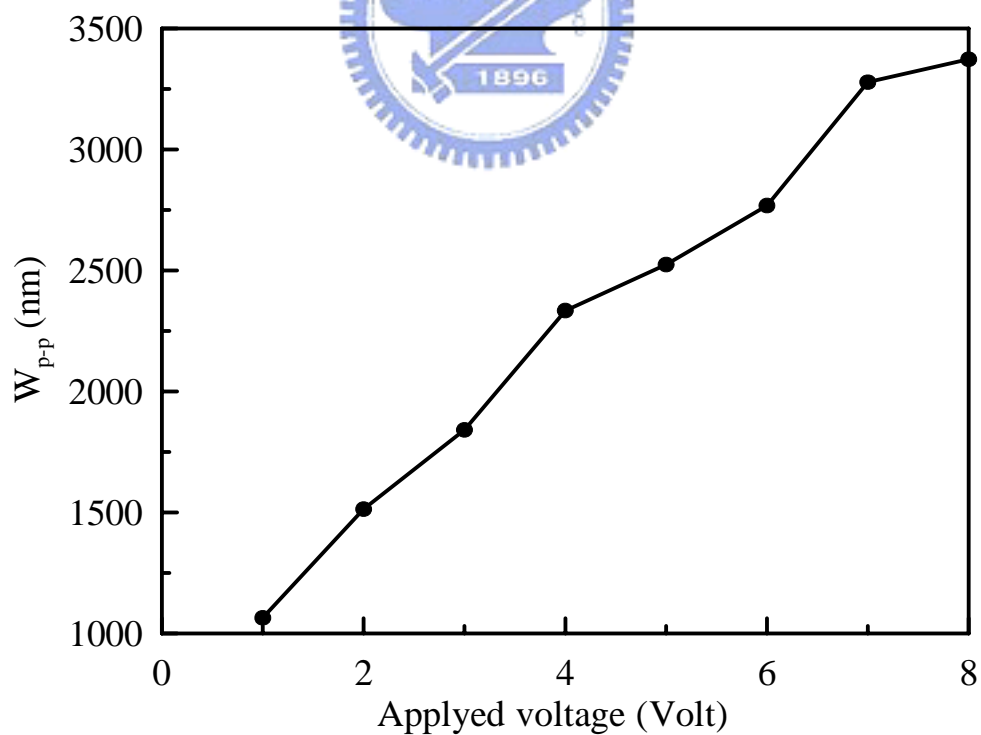


圖 3.21 90° 相位雙相致動下，蜂鳴片圓心左側 7.5mm 處的振幅與施加電壓之變化

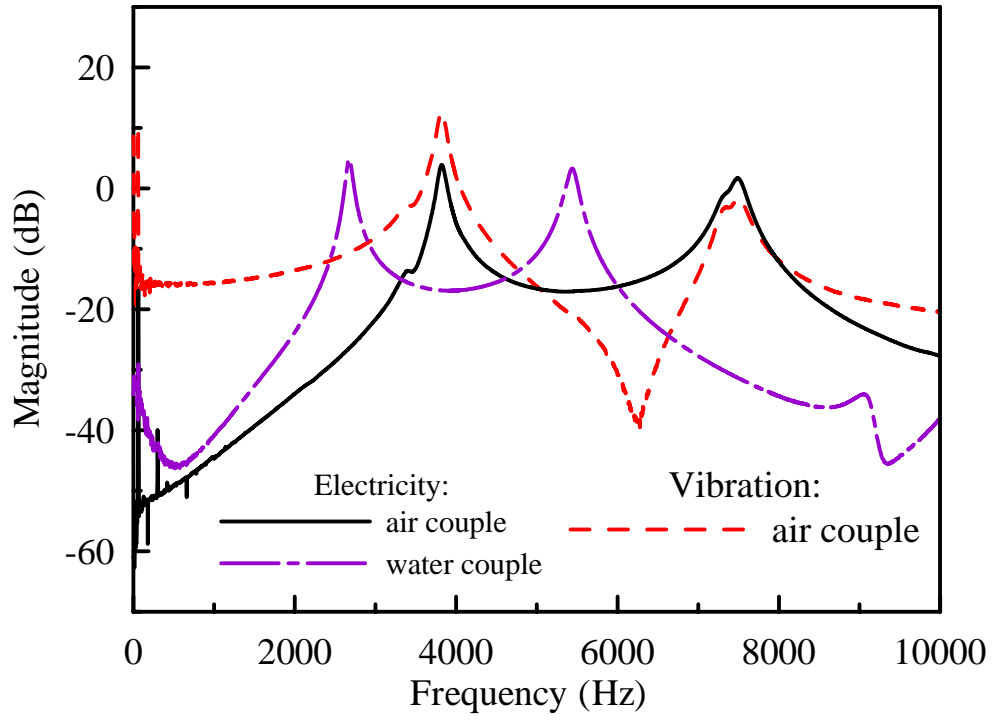


圖 3.22 蜂鳴片三受流體負載前後的頻率響應曲線

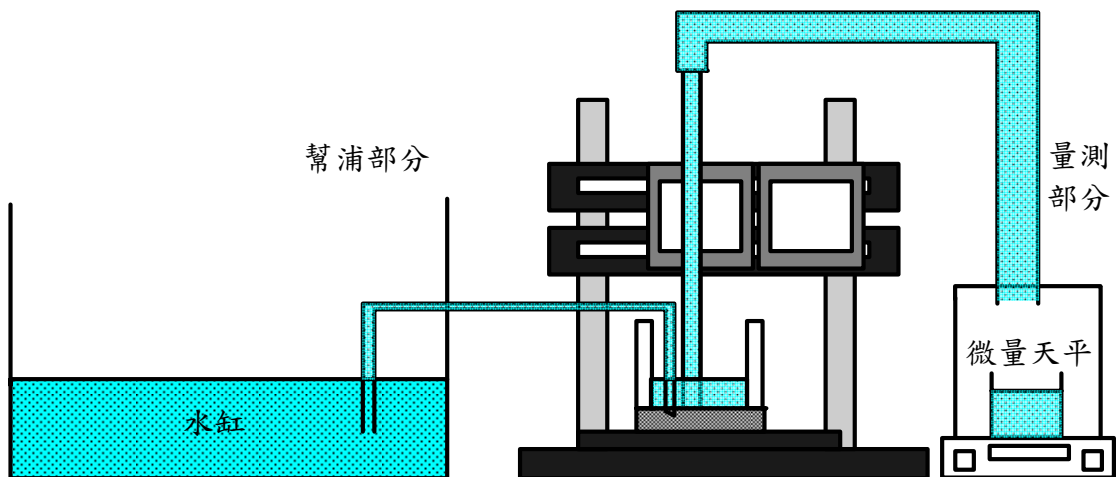


圖 3.23 實驗量測架構示意圖

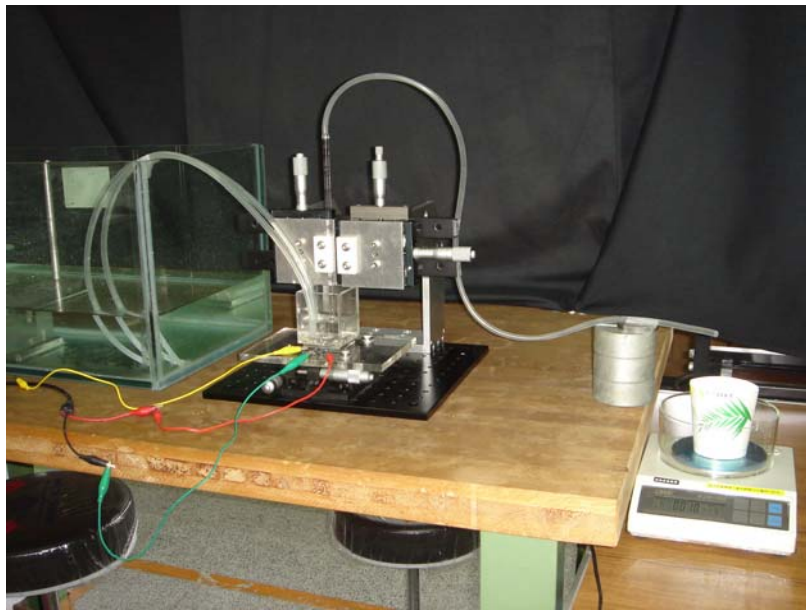


圖 3.24 幫浦實際驅動的照片

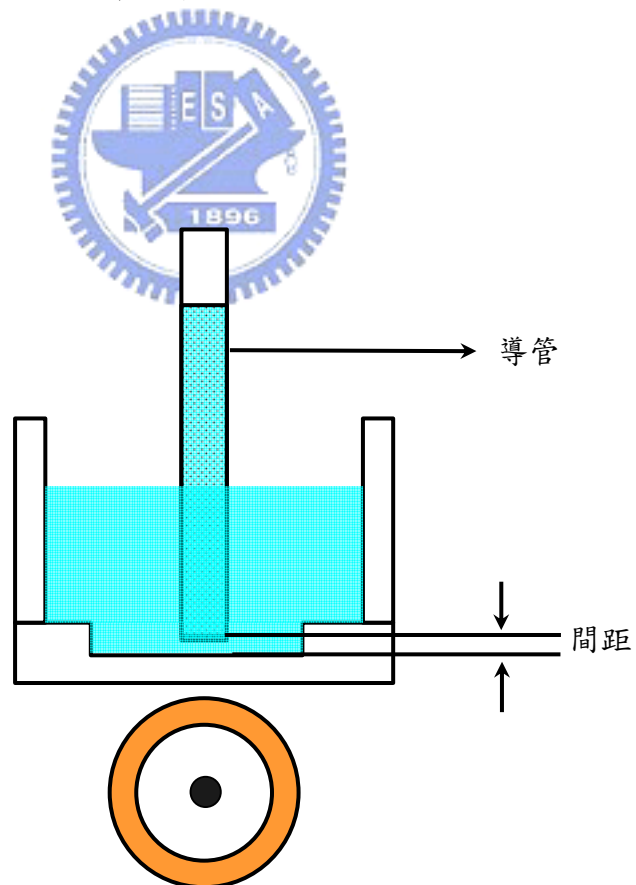


圖 3.25 W_{00} 振態泵水實驗示意圖

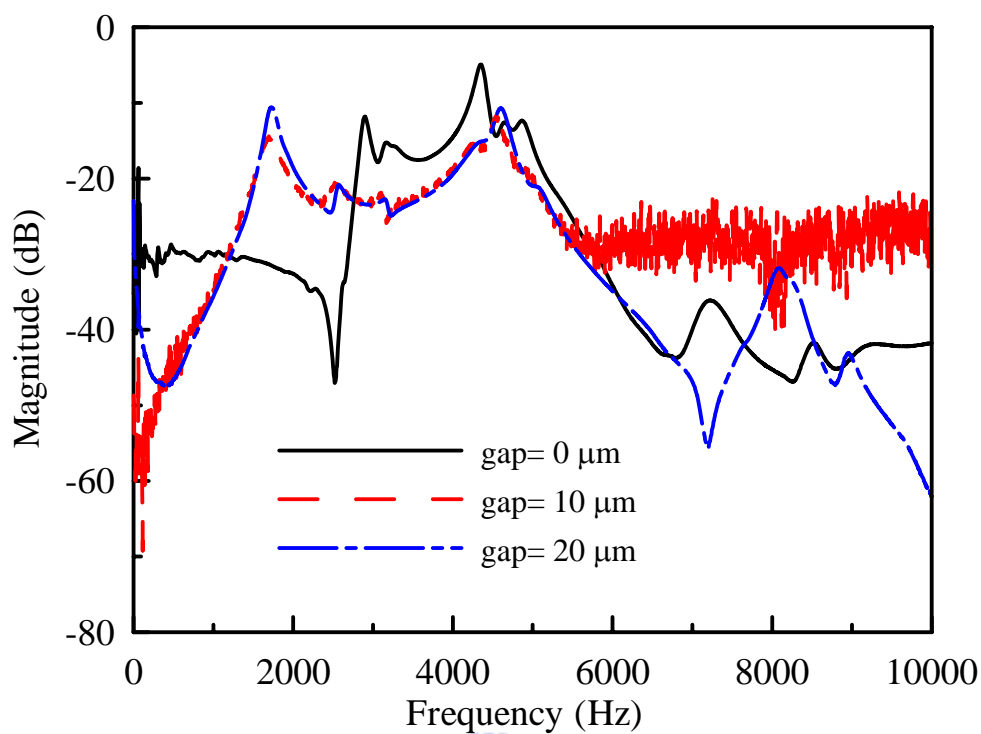


圖 3.26 流體負載之蜂鳴片一頻率響應曲線

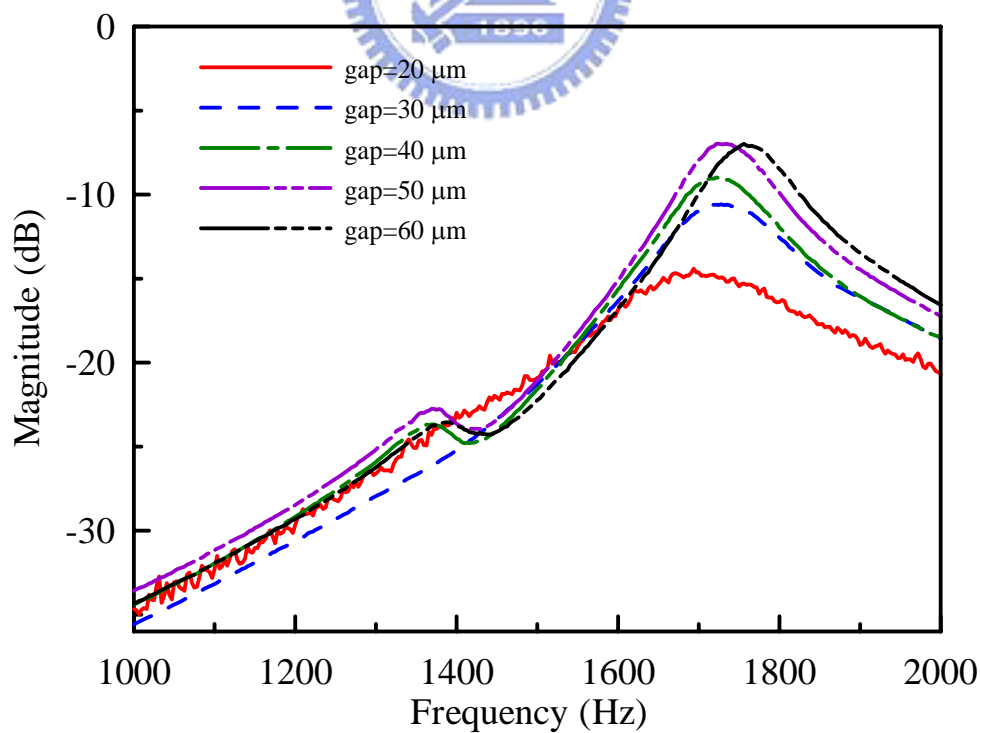


圖 3.27 流體負載之蜂鳴片一的 W_{00} 振態頻率響應曲線

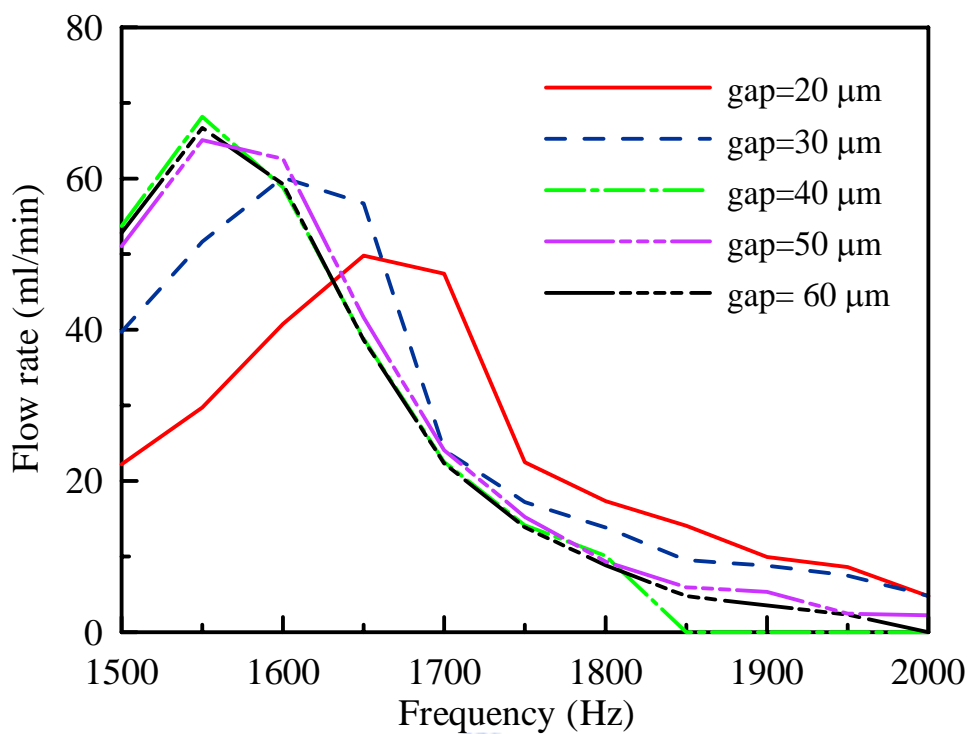


圖 3.28 W_{00} 振態驅動蜂鳴片一的泵水流量圖

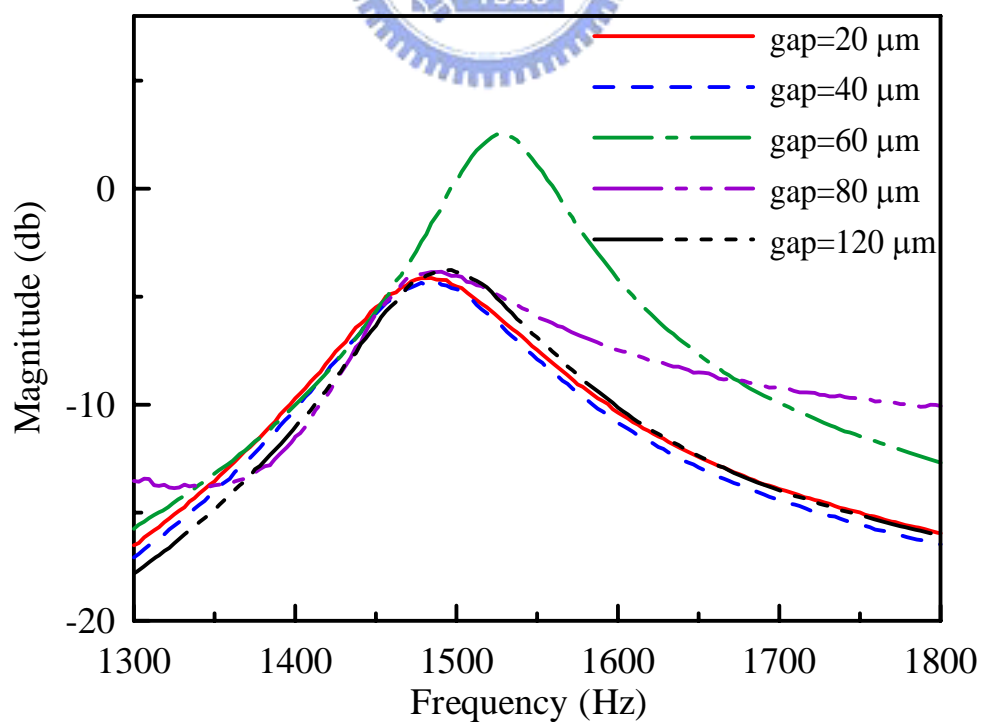


圖 3.29 流體負載之蜂鳴片二的 W_{00} 振態頻率響應曲線

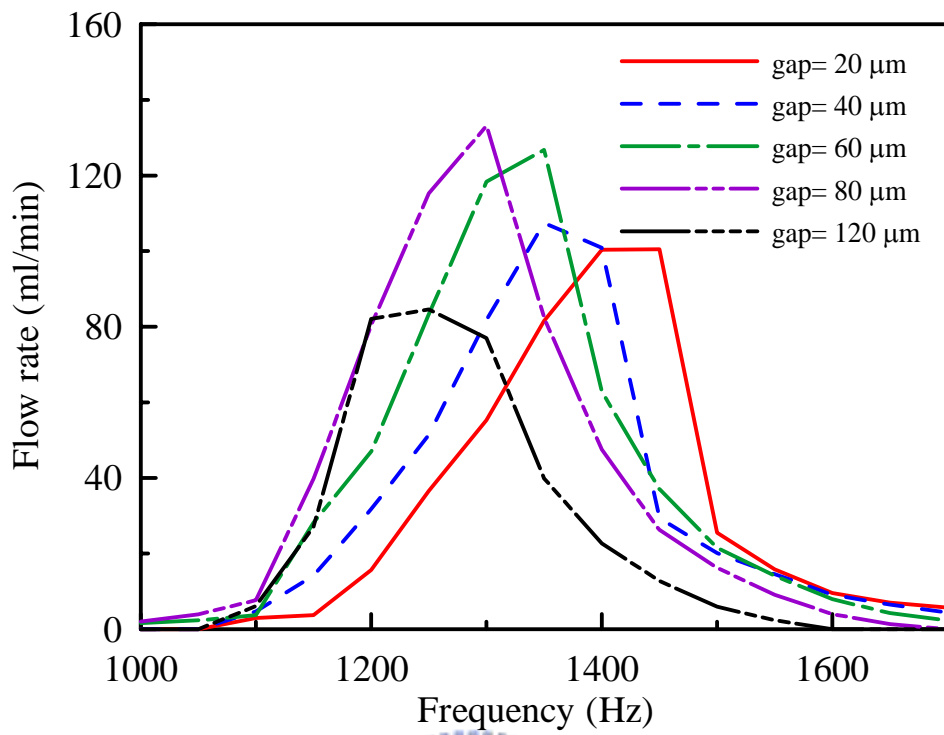


圖 3.30 W_{00} 振態驅動蜂鳴片二的泵水流量圖

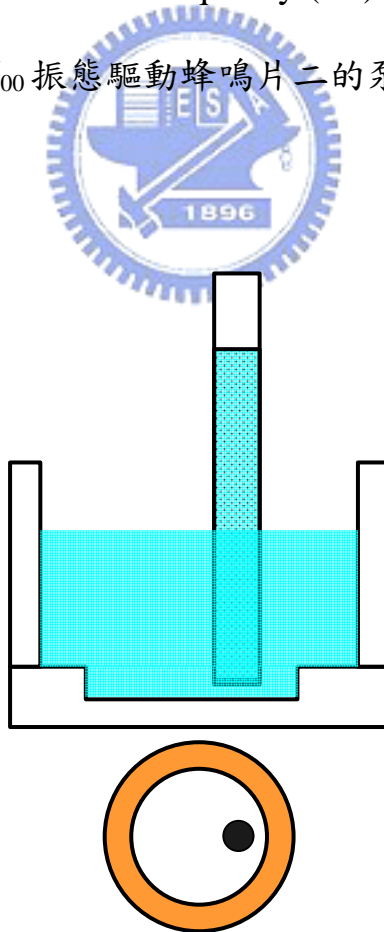


圖 3.31 右半邊致動之 W_{01} 振態泵水實驗示意圖

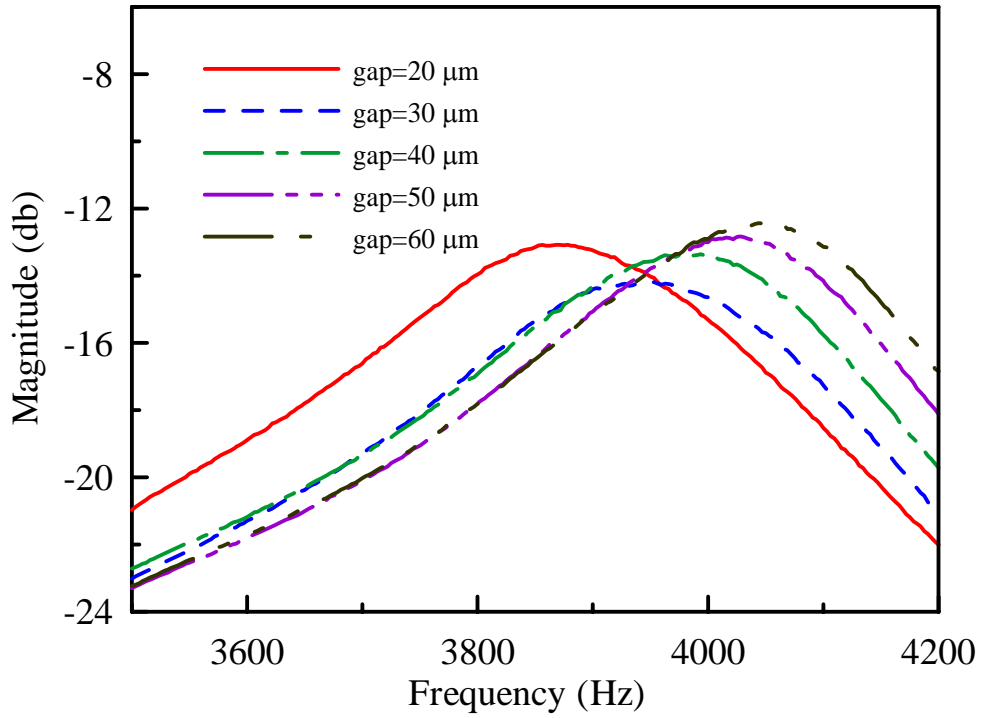


圖 3.32 流體負載之蜂鳴片一右半邊致動 W_{01} 振態的頻率響應曲線

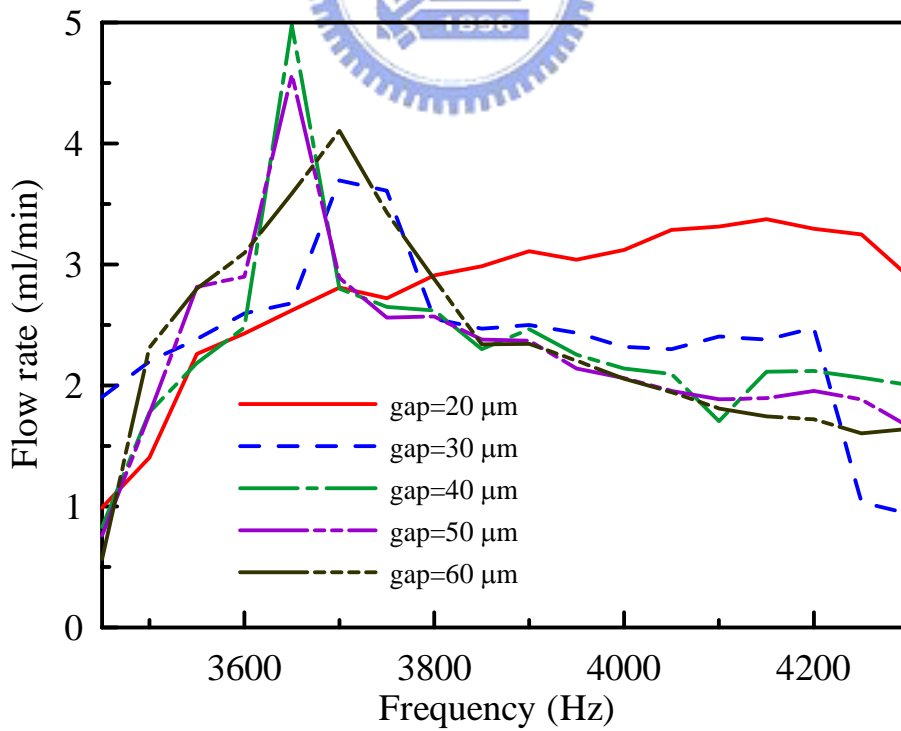


圖 3.33 蜂鳴片一受右半邊致動之 W_{01} 振態的泵水流量圖

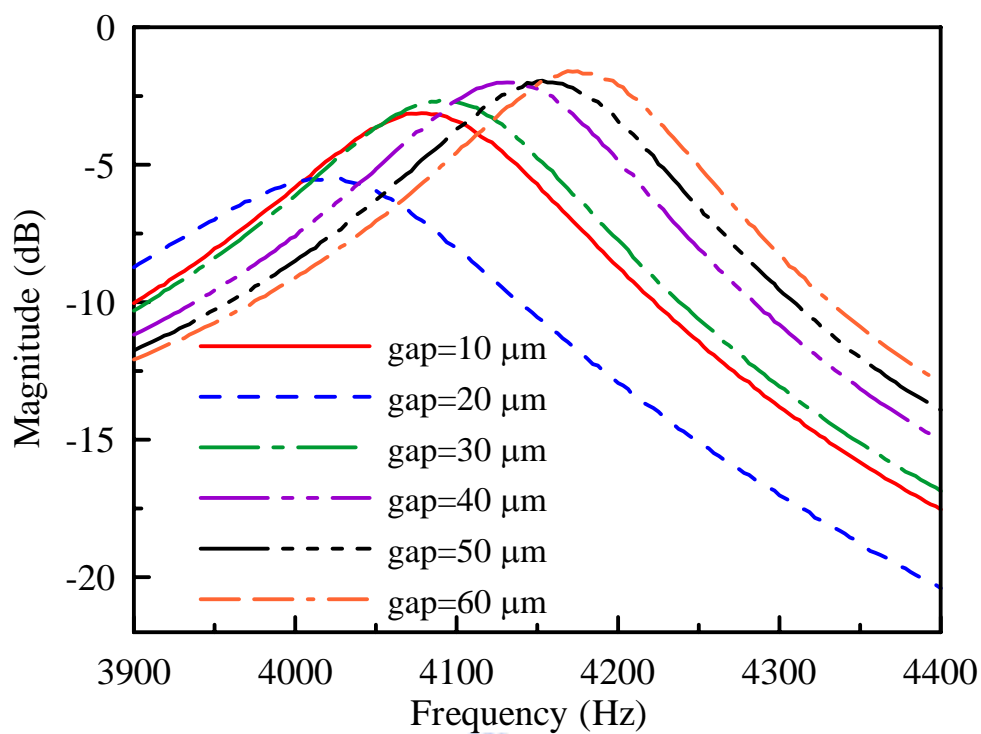


圖 3.34 流體負載之蜂鳴片二右半邊致動 W_{01} 振態的頻率響應曲線

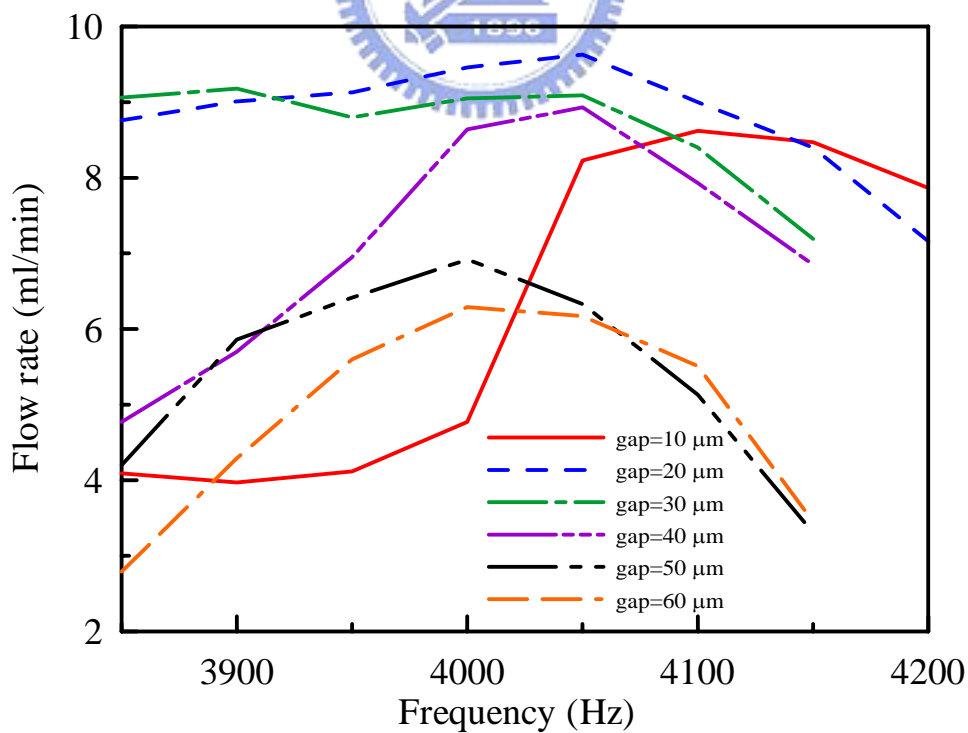


圖 3.35 蜂鳴片二受右半邊致動之 W_{01} 振態的泵水流量圖

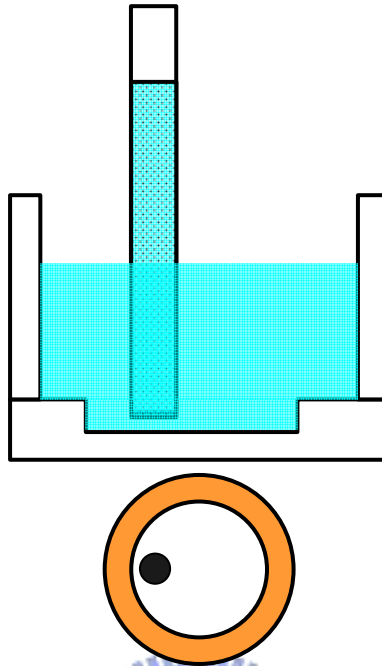


圖 3.36 蜂鳴片受左半邊致動之 W_{01} 振態泵水實驗示意圖

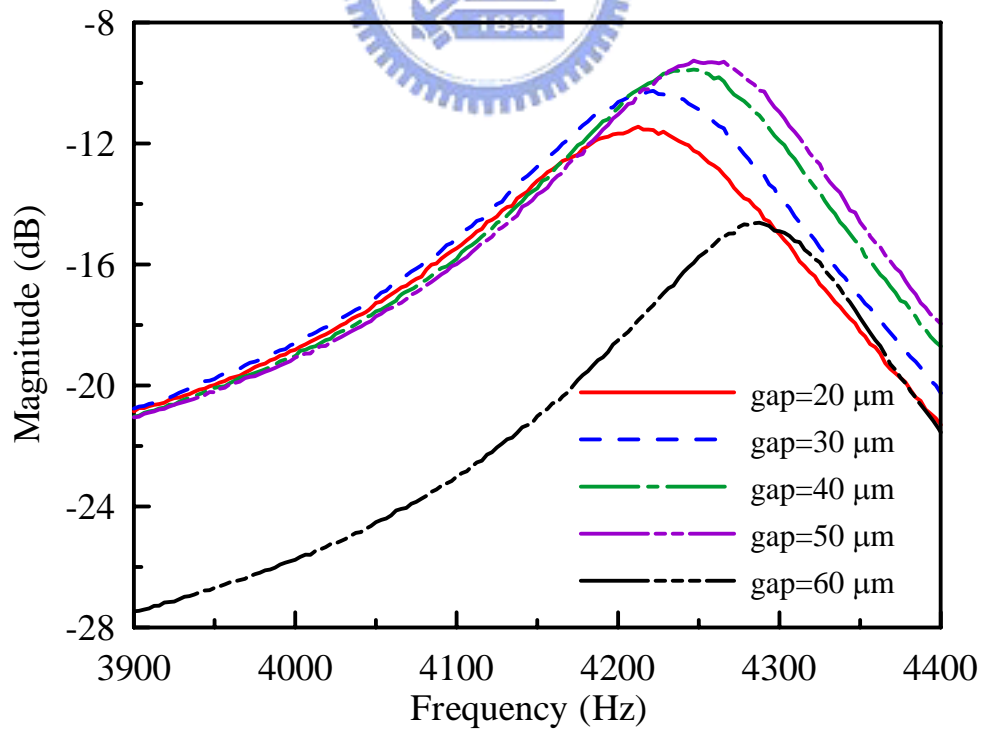


圖 3.37 流體負載之蜂鳴片一左半邊致動 W_{01} 振態的頻率響應曲線

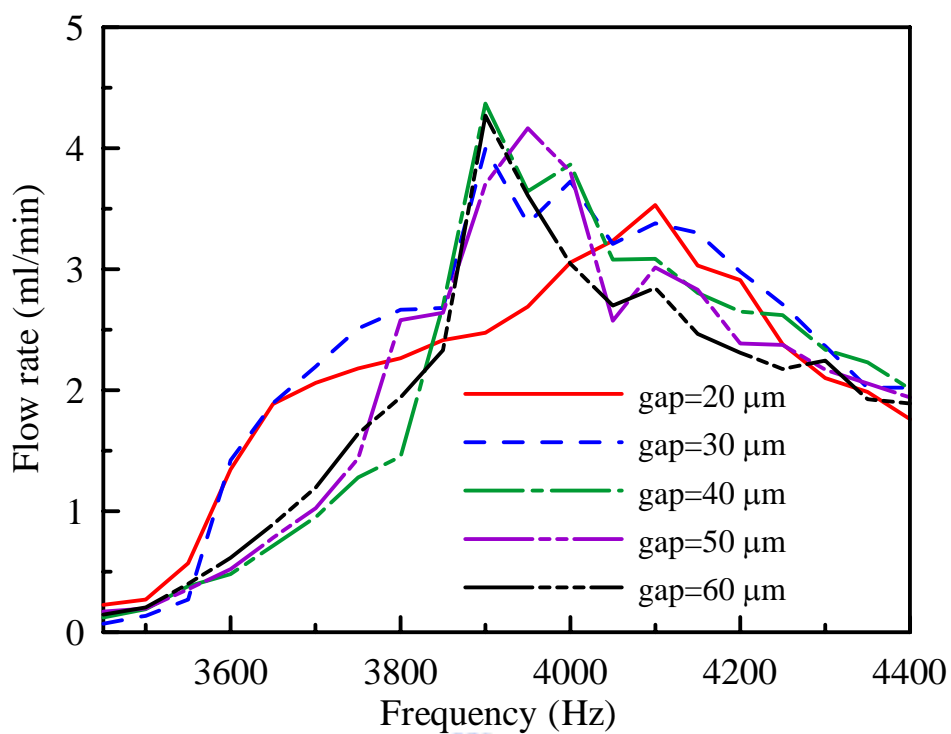


圖 3.38 蜂鳴片一受左半邊致動之 W_{01} 振態的泵水流量圖

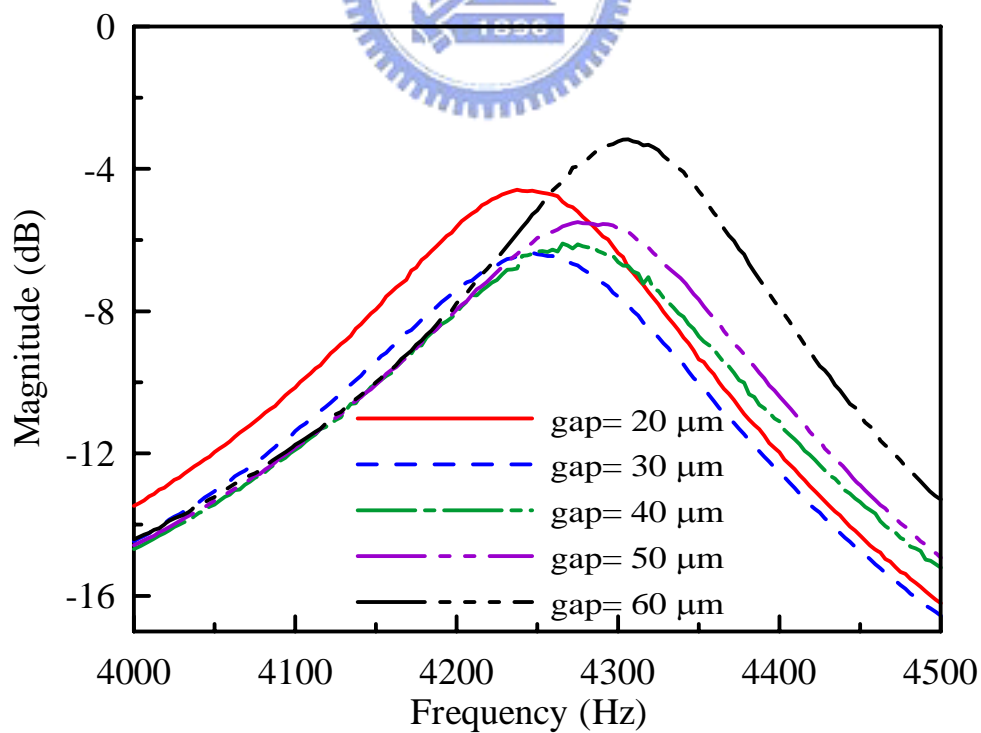


圖 3.39 流體負載之蜂鳴片二左半邊致動 W_{01} 的頻率響應曲線

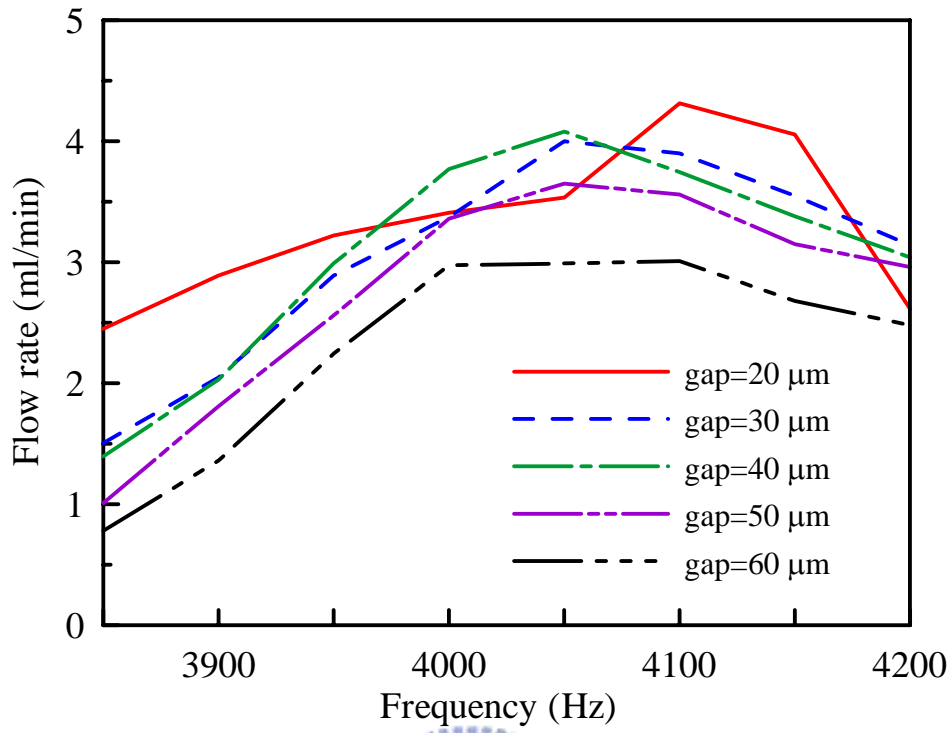


圖 3.40 蜂鳴片二受左半邊致動之 W_{01} 振態的泵水流量圖

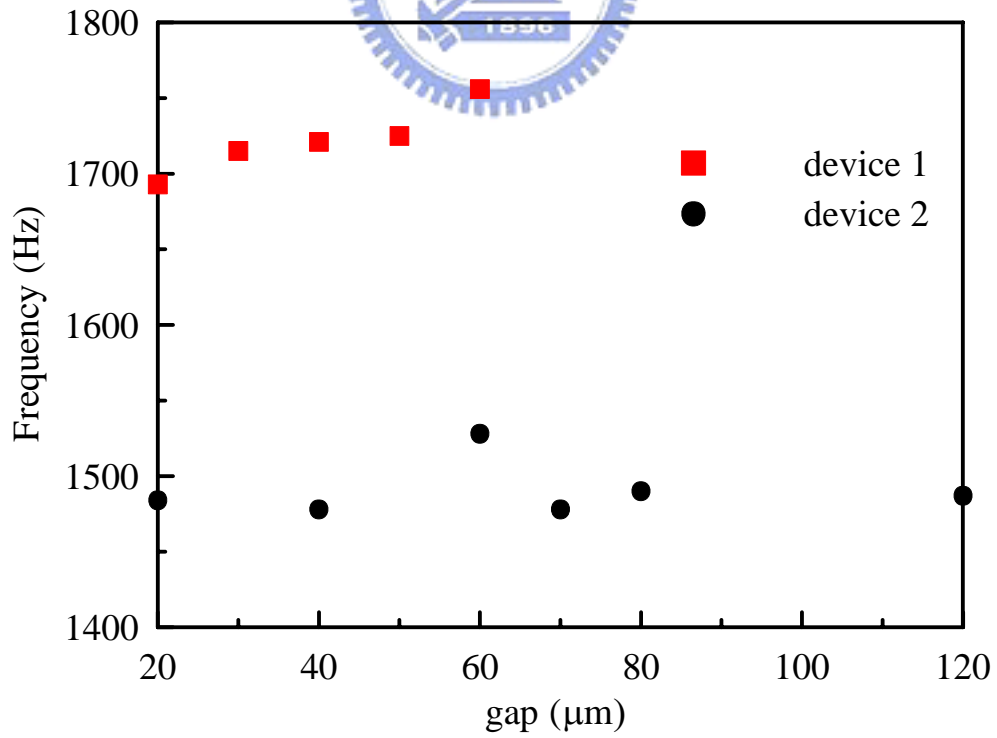


圖 3.41 蜂鳴片一與二之 W_{00} 振態共振頻與間距關係

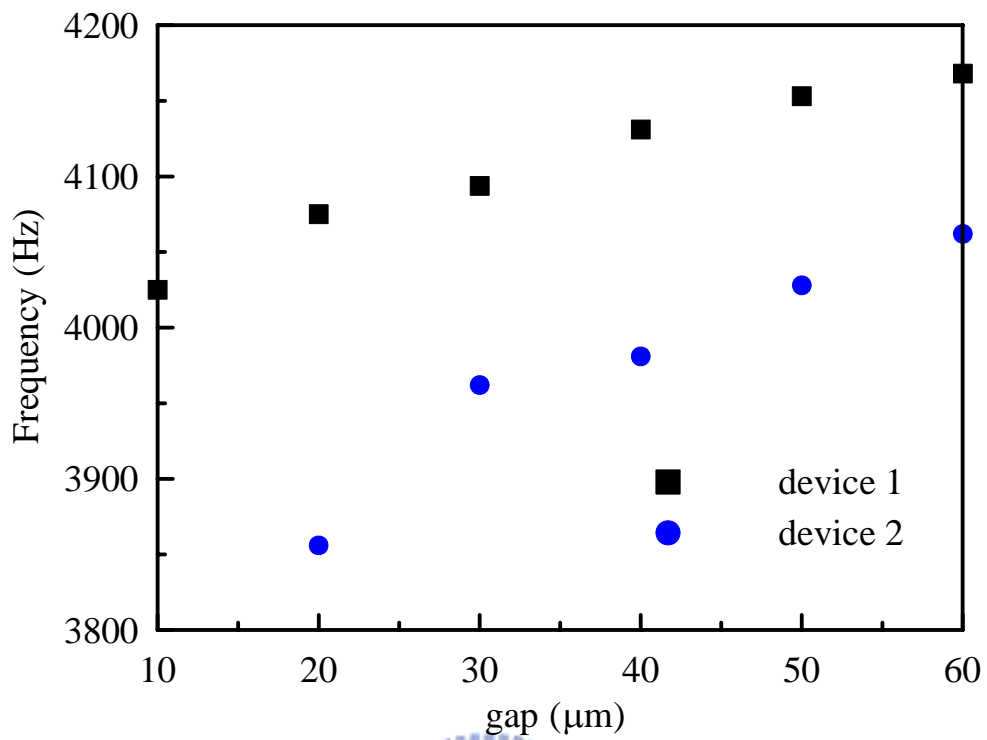


圖 3.42 蜂鳴片一與二之右半 W_{01} 振態共振頻與間距關係

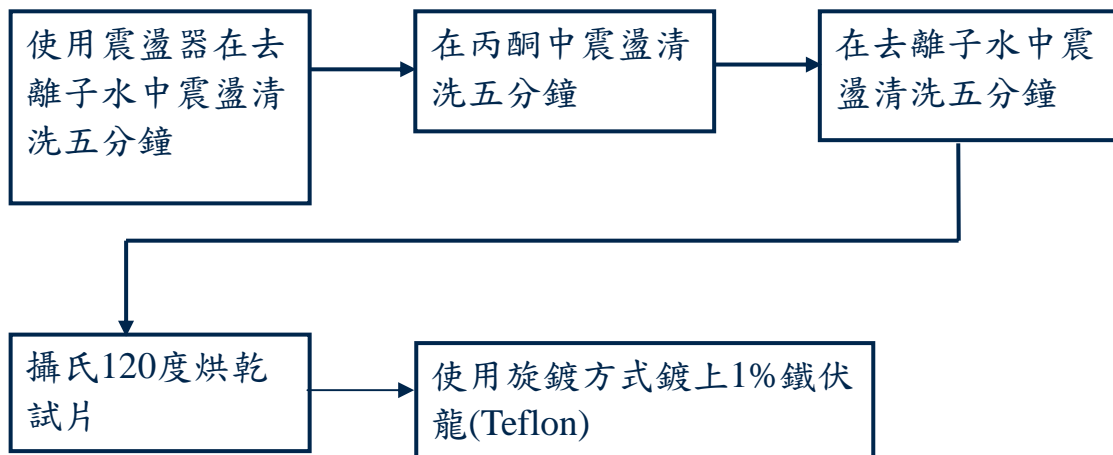


圖 3.43 蜂鳴片背面疏水性處理流程圖

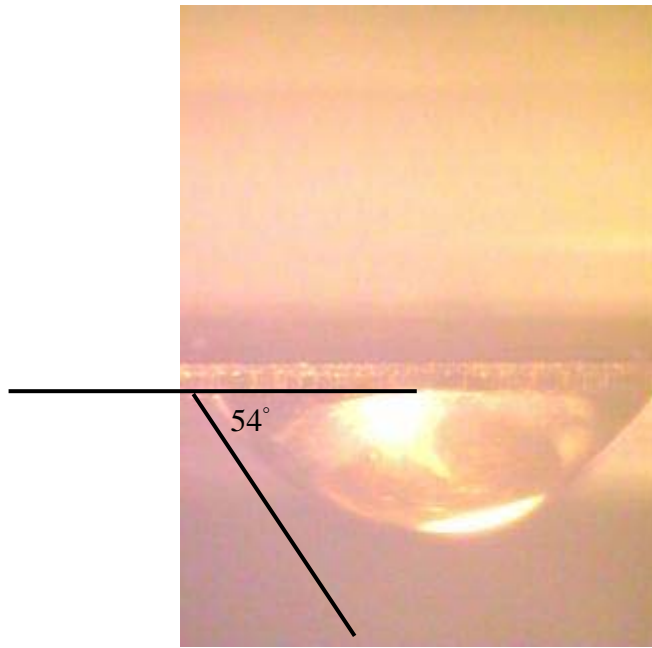


圖 3.44 未經疏水性處理之蜂鳴片背面與水接觸角

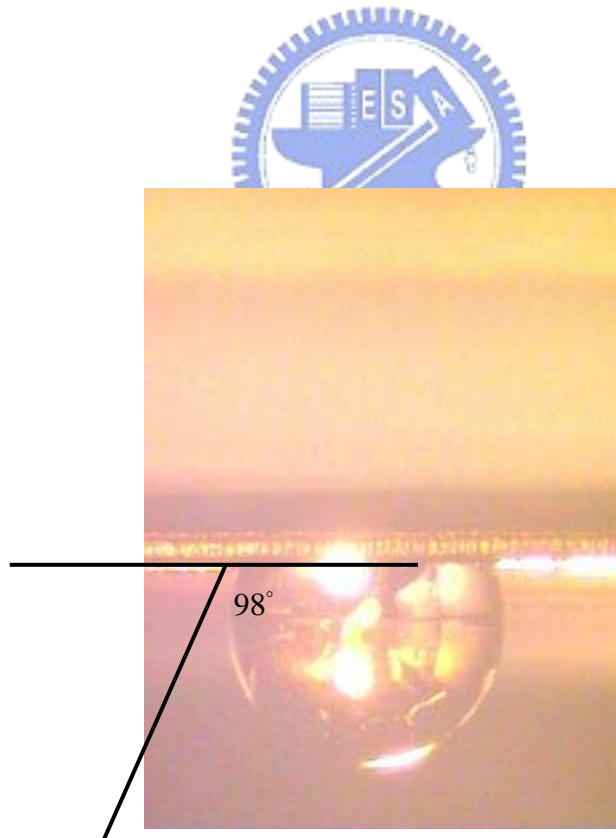


圖 3.45 經疏水性處理後蜂鳴片背面與水的接觸角

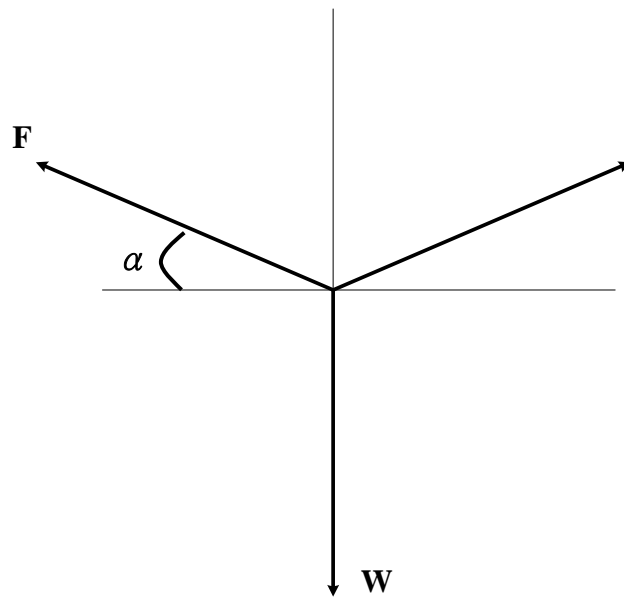


圖 3.46 表面張力計算示意圖， W 代表水滴之重力， F 為表面對水的拉

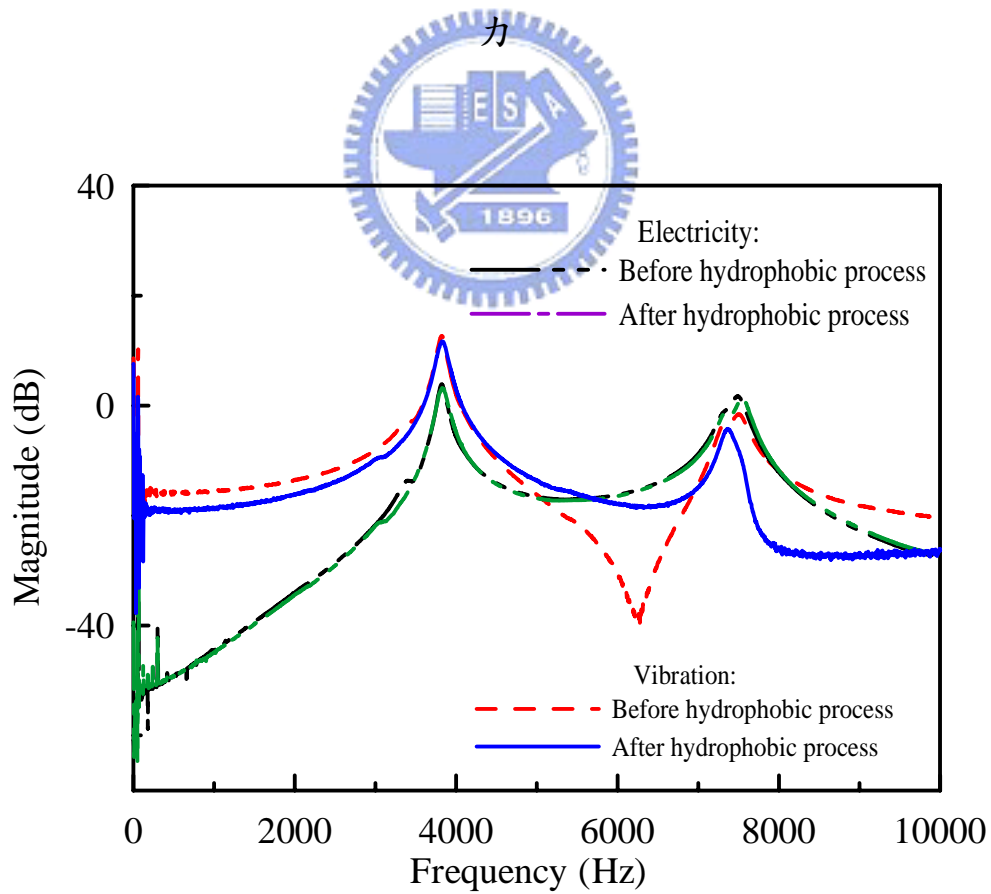


圖 3.47 疏水性處理前後之蜂鳴片的頻率響應曲線

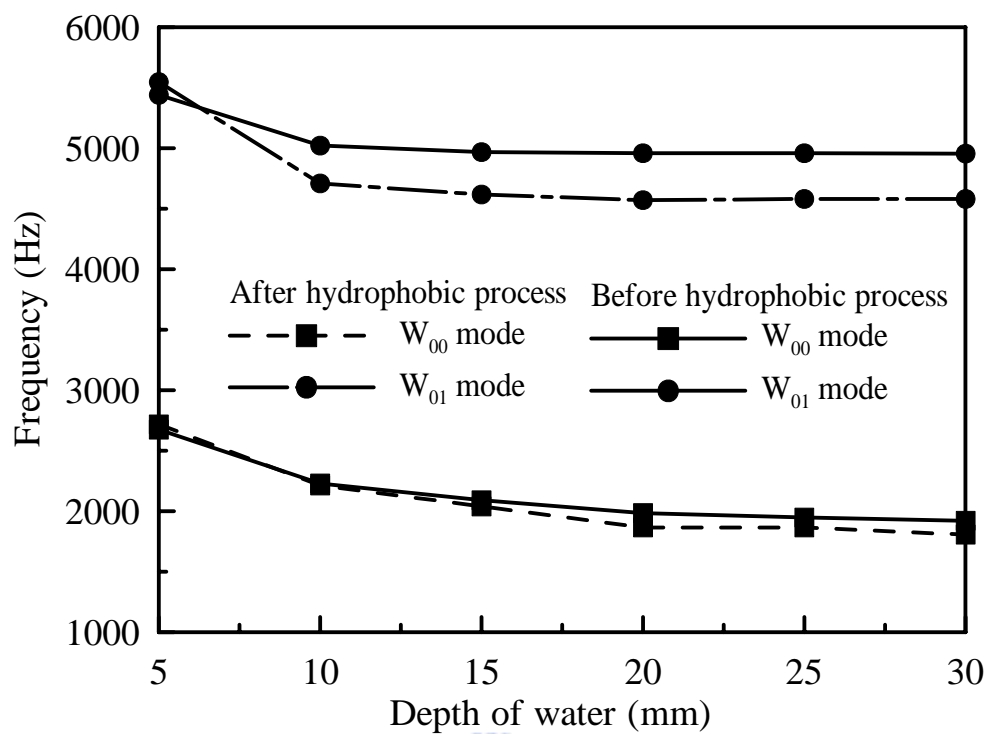


圖 3.48 疏水性處理前後不同水深之蜂鳴片共振頻率

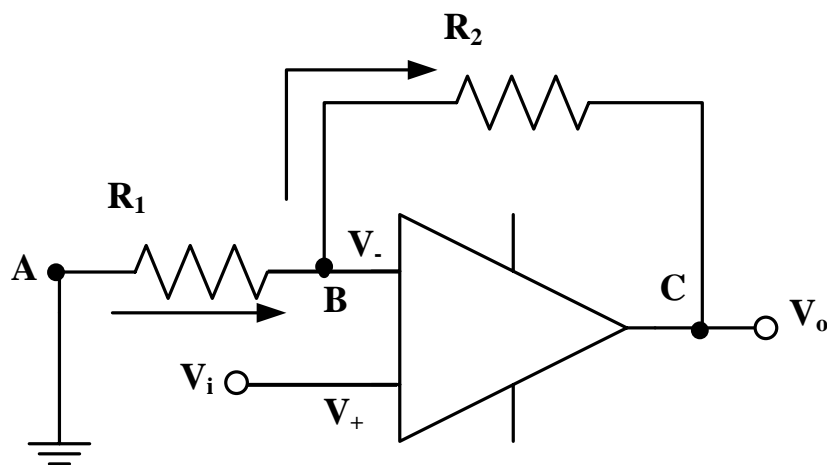


圖 A.1 放大器虛短路示意圖

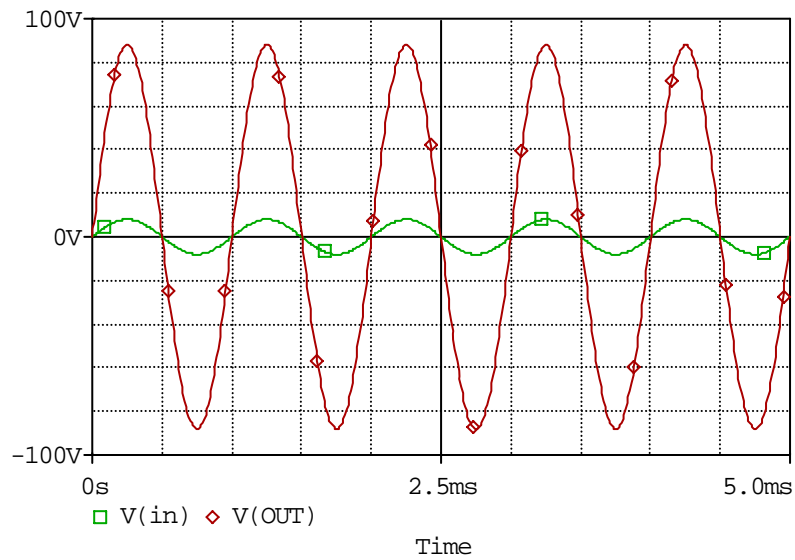


圖 A.2 PB50 功率放大器 PSpice 模擬電壓對時間關係圖
(橫軸為時間，縱軸為電壓值)

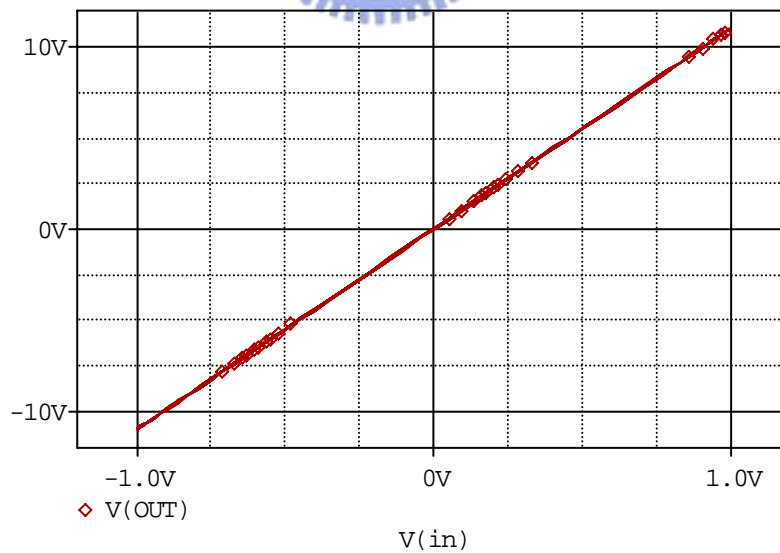


圖 A.3 PB50 功率放大器 PSpice 模擬李沙育圖
(橫軸為輸入電壓，縱軸為輸出電壓)

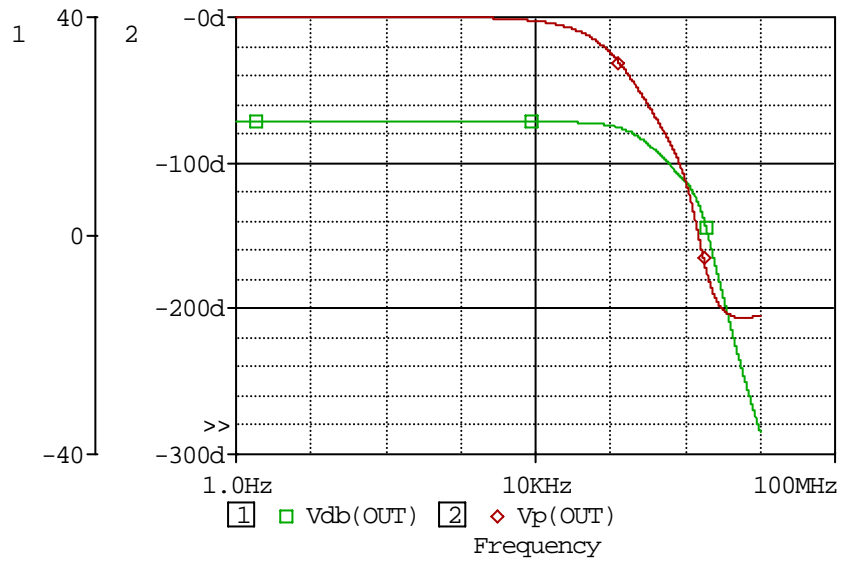


圖 A.4 PB50 功率放大器 PSpice 模擬頻率響應圖
 (橫軸為輸出電壓的頻率，縱軸左為電壓增益值，縱軸右為相位角度)

