



國立臺灣大學工學院機械工程學研究所

碩士論文

Department of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

雷射都卜勒振動儀之自動化全場聲振量測系統開發

Development of Automated Full-Field
Sound and Vibration Measurement System
for Laser Doppler Vibrometry

連振原

Jen-Yuan Lien

指導教授：黃育熙 博士

Advisor: Yu-Hsi Huang, Ph.D.

中華民國112年6月

June, 2023

論文口試委員審定書



國立臺灣大學碩士學位論文 口試委員會審定書

MASTER'S THESIS ACCEPTANCE CERTIFICATE
NATIONAL TAIWAN UNIVERSITY

雷射都卜勒振動儀之自動化全場聲振量測系統開發

Development of Automated Full-Field
Sound and Vibration Measurement System
for Laser Doppler Vibrometry

本論文係連振原君（學號 r10522502）在國立臺灣大學機械工程學系
完成之碩士學位論文，於民國 112 年 6 月 28 日承下列考試委員審查
通過及口試及格，特此證明。

口試委員 Oral examination committee:

黃育熙

(指導教授 Advisor)

洪志遠

王帆凡

林紀穎

系主任/所長 Director:

林淑華

致謝



首先，很榮幸能進入實驗力學實驗室，並且從大四開始接受指導教授黃育熙老師三年來用心的指導，不單單只指引我研究的方向，同時也對我未來人生及待人處事方面給予很中肯的建議，不只帶人更帶心，是一位讓人打從心底尊敬的老師。

接著感謝江信遠博士、林紀穎教授及王怡仁教授出席我的碩士口試，給予本論文寶貴的建議及論文上的修正，使得本論文內容更加完整。特別感謝江信遠博士在我進行聲學研究時給予許多寶貴的建議，並慷慨提供我聲學元件單體及實驗測試資料讓我能順利完成研究。

謝謝建佑學長與雅竹學姊，無論何時總是願意耐心的協助我進行實驗，在我實驗上遇到問題時也不吝給予幫助。謝謝上屆的御宸、浩安、國勛、秀宜，給予我研究及生活上很多的關懷，特別謝謝御宸學長及昇祐學長在聲學領域上給予的研究建議，並且陪我一起確診。謝謝同屆的揚開、明杰、家雋、奕安，兩年來一起修課，一起專研實驗及電腦問題，讓我在偌大的學校中找到歸屬感。謝謝優秀的碩一學弟們，淳期、景順、柏宇、紜廷，碩零學弟以信，希望你們能在碩士研究及未來人生道路上一路順利。謝謝台大桌球隊的大家，讓我在閒暇之餘去打球消解壓力。

最後感謝父母多年來的養育及栽培，以及哥哥在生活上給的幫助，讓我能無後顧之憂的完成這兩年的碩士學業。沒有你們，就不會有現在的我。

再次感謝幫助過我的所有人，讓我能夠順利完成碩士學位。



中文摘要

本研究基於單點式的雷射都卜勒振動儀(Laser Doppler Vibrometry, LDV)，搭配兩種不同的全域式掃瞄儀器，分別為龍門式二維位移平台(Gantry Platform System)以及微動振鏡系統(Galvano Scanning System)，整合為掃描型雷射都卜勒振動儀(Scanning Laser Doppler Vibrometry, SLDV)。SLDV 系統中整合了訊號產生器為激振儀器，示波器或資料擷取系統(NI-DAQ)為量測資料接收儀器。分別透過 MATLAB 及 LabVIEW 為控制語言，撰寫出其對應的圖形用戶介面(GUI)，方便量測者進行 SLDV 系統的使用。

接著對 SLDV 的量測訊號進行後處理，透過比較 LDV 的速度量測訊號及訊號產生器的輸入訊號，兩者之間的相位差，決定量測點的振動方向，並以頻率及相位判斷的方式優化量測資料，搭配所有離散點的座標內插後，即可繪出 2D 及 3D 的模態振形圖。隨後與不同的全域式面外振動量測法：電子斑點干涉術(Electronic Speckle Pattern Interferometry, ESPI) 量測的面外振動結果做比較，本研究開發的 SLDV 方法除了有更廣的速度量測範圍，同時可以數值化的顯示振動振幅與正確判斷全場振動相位。

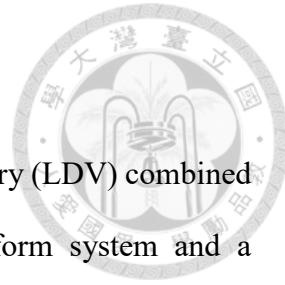
成功量測出聲學元件振膜的振動模態後，透過聲學理論解析找出振動速度和聲壓關係，將振動場推估到聲學場上，並將多個量測的離散點用雷利積分(Rayleigh Integral)的方式，計算出聲學元件整體的聲壓貢獻，是為分布參數法(Distributed Parameter Method, DPM)。與無響室(Anechoic Room)中使用麥克風對自由音場的聲壓量測結果進行比較，本研究開發的 DPM 方法，得以在任何環境中利用光學方法量測出試片的聲壓情形，大幅節省建造無響室所需要的成本；與 KLIPPEL 公司利用雷射位移計的聲壓量測方法相比，DPM 方法在高頻(3000Hz 以上)的區域有更佳的量測能力；與 Polytec 公司利用 LDV 結合振鏡系統的全場速度量測系統相比，本研究花費大約四分之一的建造成本，便可達成相同的功能，並可搭配聲學理論解析成功的將振動訊號直接推估到聲學領域上。



最後就本研究開發的 SLDV 進行改良。首先，開發出 SLDV 搭配掃頻(Chirp)訊號量測，此方法利用短時間內連續變化的頻率訊號為激振源，一次性完成所有頻率的量測，如此得以顯著提升量測效率，並快速判斷出試片全域的共振頻率；接著開發連續掃描型雷射都卜勒振動儀(Continuous Scanning Laser Doppler Vibrometry, CSLDV)，將原先逐點振動量測的系統改為逐線段量測，一次性量測整條線段的振動資料，顯著地提升系統的量測效率，同時維持不錯的量測精度。

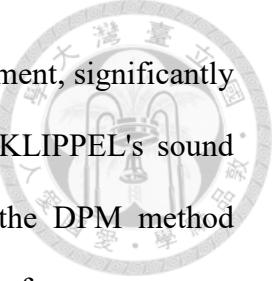
關鍵字：掃描型雷射都卜勒振動儀、全域式量測系統開發、聲固耦合分析、連續掃描型雷射都卜勒振動儀

ABSTRACT



This research is based on a single-point Laser Doppler Vibrometry (LDV) combined with two different full-field scanning instruments, a gantry platform system and a Galvano scanning system, integrated into a Scanning Laser Doppler Vibrometry (SLDV) system. The system incorporates a signal generator as an excitation instrument and an oscilloscope or NI-DAQ data acquisition system as a measurement data receiver. MATLAB or LabVIEW was used to develop corresponding graphical user interfaces (GUIs) to control and operate the entire system efficiently. Following that, we need to post-process the measurement data. We can determine the phase of vibration at each measurement point by utilizing the input signal from the signal generator and the measured signal from the LDV. The measurement data is then optimized using frequency and phase-based analysis methods. 2D and 3D mode shapes can successfully plot based on the optimized data. Subsequently, a comparison is made between the results obtained from the SLDV and Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI). The aim is to validate SLDV's feasibility and evaluate the strengths and weaknesses of the two different measurement methods. The SLDV method developed in this research not only has a wider range of velocity measurement but also enables the numerical display of vibration amplitudes and accurate determination of the phase of full-field vibrations.

After successfully measuring the global out-of-plane vibration of the acoustic component, acoustic theory analyzes and extrapolates the vibration field to the acoustic field. The relationship between the vibration velocity and the sound pressure is determined. Rayleigh Integral calculates the contribution of multiple discrete measurement points to a specific location. This method is known as the Distributed Parameter Method (DPM). Compared with the measurement results of free sound field using a microphone in an anechoic room, the DPM method allows for optical



measurements of the sound pressure of the test sample in any environment, significantly reducing the cost of constructing an anechoic room. Compared to KLIPPEL's sound pressure measurement method using a laser displacement sensor, the DPM method exhibits superior measurement capabilities, particularly in the high-frequency range (above 3000 Hz). Compared to Polytec's full-field velocity measurement system using LDV combined with a Galvano scanning system, this research achieves the same functionality at approximately one-fourth of the construction cost. Additionally, it successfully applies acoustic theory to directly estimate vibration signals in the field of acoustics.

Finally, improvements were made to the developed Scanning Laser Doppler Vibrometry (SLDV) system. Firstly, the SLDV system was integrated with the Chirp signal measurement method. This method utilizes a rapidly changing frequency excitation signal within a short time frame to measure all frequencies simultaneously. By measuring all frequencies at one time, the measurement efficiency is significantly improved, allowing for the rapid determination of the global resonance frequencies of the test sample. Next, a Continuous Scanning Laser Doppler Vibrometry (CSLDV) system was developed, replacing the previous point-by-point vibration measurement approach with a line-by-line measurement technique. It enables the simultaneous measurement of vibration data along the entire line segment, resulting in a significant improvement in measurement efficiency while maintaining a good level of accuracy.

Keywords: Scanning Laser Doppler Vibrometry (SLDV), Measuring System Development, Acoustic-Vibration Interaction Analysis, Continuous Scanning Laser Doppler Vibrometry (CSLDV)

目錄



| | |
|--------------------------|-----|
| 論文口試委員審定書 | I |
| 致謝 | II |
| 中文摘要 | III |
| ABSTRACT | V |
| 目錄 | VII |
| 圖目錄 | X |
| 表目錄 | XII |
| 第一章 緒論 | 1 |
| 1.1 研究動機 | 1 |
| 1.2 文獻回顧 | 2 |
| 1.3 論文內容簡介 | 5 |
| 第二章 實驗原理與架設 | 7 |
| 2.1 雷射都卜勒振動儀 | 7 |
| 2.2 電子斑點干涉術 | 11 |
| 2.3 阻抗分析儀 | 18 |
| 2.4 無響室量測 | 24 |
| 2.5 全域量測儀器介紹 | 26 |
| 2.5.1 龍門位移平台 | 26 |
| 2.5.2 微動振鏡組 | 28 |
| 第三章 雷射都卜勒之全域振動量測系統 | 30 |
| 3.1 龍門平台系統 | 32 |
| 3.1.1 控制方式 | 33 |



| | |
|---------------------------------------|----|
| 3.1.2 量測流程 | 33 |
| 3.1.3 量測 GUI 介面 | 34 |
| 3.1.4 龍門平台系統量測照片 | 35 |
| 3.2 微動振鏡系統 | 37 |
| 3.2.1 控制方式 | 38 |
| 3.2.2 量測流程 | 39 |
| 3.2.3 量測 GUI 介面 | 41 |
| 3.2.4 微動振鏡系統量測照片 | 42 |
| 3.3 量測參數選定 | 43 |
| 3.3.1 布點模式 | 43 |
| 3.3.2 量測模式 | 44 |
| 第四章 量測資料後處理與振動特性分析 | 45 |
| 4.1 量測資料後處理 | 46 |
| 4.2 相位處理 | 47 |
| 4.3 量測資料優化及繪圖 | 48 |
| 4.3.1 頻率判斷 | 49 |
| 4.3.2 相位差判斷 | 49 |
| 4.4 實際量測案例分析 | 50 |
| 4.4.1 串聯型壓電雙晶片以串聯電極連接方式於雙邊固定之模態量測 .. | 50 |
| 4.4.2 單層壓電圓盤薄板於自由邊界之模態量測 | 54 |
| 4.4.3 單邊固定之 PLA 懸臂板以壓電纖維激振之模態量測 | 58 |
| 4.5 SLDV 量測系統比較結果 | 60 |
| 第五章 聲學元件之振動解析與實驗量測 | 62 |

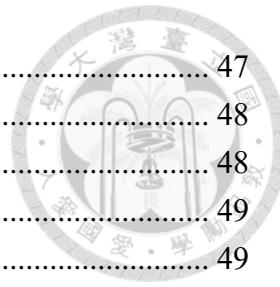


| | |
|----------------------------------|-----|
| 5.1 聲學元件於無限大障板下自由音場之振動特性分析 | 62 |
| 5.1.1 聲學試片於自由音場下聲學特性分析..... | 63 |
| 5.1.2 八音帶 Octave Band..... | 66 |
| 5.2 實際量測結果分析 | 67 |
| 5.2.1 高阻抗聲學元件: PE-68 | 68 |
| 5.2.2 低阻抗聲學元件: 動圈式揚聲器 | 72 |
| 5.2.3 聲學量測結果分析及比較..... | 76 |
| 第六章 改良型雷射都普勒振動儀 | 77 |
| 6.1 掃頻量測(Chirp Signal) | 77 |
| 6.1.1 掃頻量測流程..... | 78 |
| 6.1.2 後處理與量測結果..... | 80 |
| 6.1.3 Chirp 訊號量測結果 | 81 |
| 6.1.4 Chirp 量測比較及優勢 | 83 |
| 6.2 連續掃描型都卜勒振動儀(CSLDV) | 86 |
| 6.2.1 CSLDV 量測流程 | 88 |
| 6.2.2 CSLDV 後處理 | 89 |
| 6.2.3 CSLDV 量測結果 | 92 |
| 6.2.4 CSLDV 與 SLDV 優劣比較 | 95 |
| 第七章 結論與未來展望 | 96 |
| 7.1 結論 | 96 |
| 7.2 未來展望 | 98 |
| 參考文獻 | 99 |
| 附錄 | 101 |



圖目錄

| | | |
|--------|--------------------------------------------|----|
| 圖 2-1 | LDV-OFV505 | 8 |
| 圖 2-2 | LDV-OFV505 量測規格圖 | 9 |
| 圖 2-3 | 聲光調製器基本構造 | 9 |
| 圖 2-4 | LDV 內部光路圖 | 10 |
| 圖 2-5 | ESPI 水平面外架設圖 | 15 |
| 圖 2-6 | ESPI 垂直面外架設圖 | 16 |
| 圖 2-7 | 電子斑點干涉術水平面外架設-薄膜受揚聲器激振 | 17 |
| 圖 2-8 | 電子斑點干涉術水平面外架設-壓電式聲學元件 | 17 |
| 圖 2-9 | 阻抗分析儀量測示意圖 | 22 |
| 圖 2-10 | 棒形壓電材料 (d_{31} 型或 d_{32} 型) 示意圖 | 23 |
| 圖 2-11 | 壓電材料在特定共振頻率範圍內的頻率阻抗曲線 | 23 |
| 圖 2-12 | 無響室測量示意圖(虛線部分為無響室區域)..... | 24 |
| 圖 2-13 | 障板規格示意圖(AES2-1984 r2003 標準規範) | 25 |
| 圖 2-14 | 無響室實際量測圖 | 25 |
| 圖 2-15 | 龍門平台照片 | 27 |
| 圖 2-16 | 旅行商問題 | 28 |
| 圖 2-17 | 微動振鏡系統 | 28 |
| 圖 3-1 | RS-232 腳位 | 31 |
| 圖 3-2 | GPIB 腳位 | 32 |
| 圖 3-3 | InfiniiVision DSOX2004A 示波器 | 32 |
| 圖 3-4 | Agilent-33210A 訊號產生器 | 33 |
| 圖 3-5 | 龍門平台系統量測流程圖 | 34 |
| 圖 3-6 | MATLAB 龍門平台系統 GUI 介面 | 35 |
| 圖 3-7 | LabVIEW 龍門平台系統 GUI 介面 | 35 |
| 圖 3-8 | 龍門式量測系統照片-LDV 龍門平台 | 36 |
| 圖 3-9 | 龍門式量測系統照片-示波器、訊號產生器 | 36 |
| 圖 3-10 | NI-9234 資料擷取系統 | 37 |
| 圖 3-11 | NI-9775 資料擷取系統 | 37 |
| 圖 3-12 | Agilent-33512B 訊號產生器 | 38 |
| 圖 3-13 | ActiveX 控制示意圖 | 39 |
| 圖 3-14 | 微動振鏡系統量測流程圖 | 40 |
| 圖 3-15 | 微動振鏡量測系統聚焦示意圖 | 41 |
| 圖 3-16 | 微動振鏡量測系統 LabVIEW GUI | 41 |
| 圖 3-17 | 微動振鏡系統向下方量測照片 | 42 |
| 圖 3-18 | 微動振鏡系統向側方量測照片 | 42 |
| 圖 4-1 | 鏡組量測之角度補償 | 46 |



| | | |
|--------|------------------------------------|----|
| 圖 4-2 | 正向振動方向之相位差 | 47 |
| 圖 4-3 | 反向振動方向之相位差 | 48 |
| 圖 4-4 | 不佳的量測訊號結果 | 48 |
| 圖 4-5 | 量測數據優化前之模態圖 | 49 |
| 圖 4-6 | 量測數據優化後之模態圖 | 49 |
| 圖 4-7 | 串聯型雙晶片以串聯電極連接型式(SBS) | 52 |
| 圖 4-8 | 壓電纖維黏貼示意圖 | 58 |
| 圖 5-1 | 自由音場振動、聲學量測方法示意圖[3]..... | 63 |
| 圖 5-2 | 振膜固定於無限大障板示意圖 | 63 |
| 圖 5-3 | 脈動球源輻射示意圖 | 64 |
| 圖 5-4 | 點聲源於牆邊示意圖 | 65 |
| 圖 5-5 | 訊號產生器電路圖 | 67 |
| 圖 5-6 | PE-68 壓電式聲學元件 | 68 |
| 圖 5-7 | DPM 量測布點情形(PE-68 試片)..... | 69 |
| 圖 5-8 | PE-68 壓電耳機自由音場實驗量測結果 | 70 |
| 圖 5-9 | 動圈式揚聲器阻抗分析儀結果 | 72 |
| 圖 5-10 | 動圈式揚聲器 | 73 |
| 圖 5-11 | 動圈式揚聲器於自由音場聲壓量測結果 | 75 |
| 圖 5-12 | 動圈式揚聲器中心位移量測結果 | 75 |
| 圖 6-1 | Linear Sweep Sine 時域訊號圖 | 78 |
| 圖 6-2 | Logarithmic Sweep Sine 時域訊號圖 | 78 |
| 圖 6-3 | 掃頻量測流程圖 | 79 |
| 圖 6-4 | Chirp 量測模式 Ch1 頻率響應圖 | 80 |
| 圖 6-5 | Chirp 量測模式 Ch1 、 Ch2 相位差圖 | 80 |
| 圖 6-6 | Chirp 訊號後處理 GUI | 83 |
| 圖 6-7 | Chirp 頻率響應結果-多點平均 | 85 |
| 圖 6-8 | Chirp 頻率響應結果-單點 | 85 |
| 圖 6-9 | CSLDV 量測方式示意圖 | 86 |
| 圖 6-10 | CSLDV Application[14] | 87 |
| 圖 6-11 | CSLDV 量測流程圖 | 88 |
| 圖 6-12 | LabVIEW Block Diagram(同步化) | 89 |
| 圖 6-13 | CSLDV 後處理流程圖 | 89 |
| 圖 6-14 | CSLDV 原始量測資料 | 90 |
| 圖 6-15 | CSLDV 取包絡線後結果 | 90 |
| 圖 6-16 | 正向振動相位差(峰對峰)及反向振動相位差(峰對谷)..... | 91 |
| 圖 6-17 | CSLDV 量測結果(SBS Mode 6) | 92 |
| 圖 6-18 | SLDV 量測結果(SBS Mode 6)..... | 92 |



表目錄

| | | |
|--------|-------------------------------------------|----|
| 表 2-1 | LDV OFV-505 規格表 | 10 |
| 表 2-2 | 龍門平台規格 | 27 |
| 表 2-3 | 微動振鏡系統規格表 | 29 |
| 表 3-1 | 通訊方式比較表 | 32 |
| 表 3-2 | 資料擷取系統(NI-DAQ)規格比較表 | 38 |
| 表 3-3 | SLDV 布點類型 | 43 |
| 表 4-1 | SLDV 系統量測資料 | 45 |
| 表 4-2 | 壓電陶瓷材料(PSI-5A4E)參數 | 51 |
| 表 4-3 | 壓電陶瓷雙晶片中間層銅金屬材料常數 | 51 |
| 表 4-4 | SBS 試片模態量測結果 | 53 |
| 表 4-5 | PIC-181 圓盤直徑=70mm、厚度=1.5mm 試片模態量測結果 | 55 |
| 表 4-6 | PIC-181 圓盤直徑=84mm、厚度=1.0mm 試片模態量測結果 | 56 |
| 表 4-7 | PIC-181 圓盤直徑=45mm、厚度=1.0mm 試片模態量測結果 | 57 |
| 表 4-8 | 壓電纖維規格 | 58 |
| 表 4-9 | PLA 懸臂板以四片壓電纖維激振模態量測結果 | 59 |
| 表 4-10 | SLDV 量測系統比較表 | 60 |
| 表 4-11 | 示波器與 NI-9234 比較表 | 61 |
| 表 5-1 | PE-68 規格 | 69 |
| 表 5-2 | PE-68 模態振型圖 | 71 |
| 表 5-3 | KLIPPEL 及 DPM 微動振鏡量測系統比較表 | 76 |
| 表 6-1 | 掃頻量測參數表 | 79 |
| 表 6-2 | PE-68 於單頻及 Chirp 訊號之模態響應表 | 82 |
| 表 6-3 | SLDV 於 Swept Sine 及 Chirp 訊號之比較表 | 84 |
| 表 6-4 | CSLDV 量測 SBS 試片前六共振模態結果 | 93 |
| 表 6-5 | CSLDV 不同掃描頻率對量測結果的影響 | 94 |
| 表 6-6 | CSLDV 及 SLDV 優劣比較 | 95 |



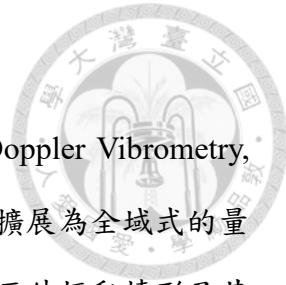
第一章 緒論

1.1 研究動機

振動現象在日常生活中隨處可見，在聲學領域上，我們可以利用元件的振動來生產出聲學單體，而在工業上，機台或是環境中的振動現象也會大大影響產品的品質。因此，如何有效且準確的量測振動是現今工業上很大的一個課題。

振動現象依人耳能聽到的頻率範圍，可粗略分為低頻(1000Hz 以下)、中頻(1000Hz-3000Hz)、高頻(3000Hz 以上)。業界上常用的振動量測方式有量測位移的：雷射位移計、量測加速度的：加速規、量測速度的：雷射都卜勒振動儀；直接量測聲壓的：無響室聲學量測法。其中，雷射位移計則有其量測距離的限制，適用於量測低頻的振動，在量測高頻的振動訊號時，其解析能力會較低；加速規適用於量測中低頻的振動現象，但由於是接觸式量測，會改變待測物的振動特性；而無響室量測需要很大的空間及經費才能打造出合乎標準的無響室規格，且無法得知待測物的實際振動情形。相較之下，雷射都卜勒振動儀有以下幾大優勢：量測空間小、量測時環境條件要求低、非接觸式量測、低、中、高頻的振動量測能力佳、量測精度高。

在聲學業界中，德國 KLIPPEL 公司有推出 Multi-Scanning Workbench，其原理為將雷射位移計搭配位移平台，固定雷射位移計位置，利用位移平台移動待測物，全域量測待測物表面的振動情形，並根據面外位移量測結果推估出試片聲響曲線。此一系統得以實現以光學量測的方式推估出聲學響應情形，但本身造價昂貴且在高頻（約略大於 3000 Hz，參考圖 5-8）處由於三角雷射位移計本身解析能力的限制，無法得到好的量測結果；而另一方面，德國 Polytec 公司也有設計出掃描型雷射都卜勒振動儀(Scanning Laser Doppler Vibrometry, SLDV)，將單點量測式的雷射都卜勒振動儀搭配微動振鏡組(Galvano Scanning System)，分別透過馬達控制兩面反射面鏡的角度，將雷射光反射到指定位置，以此方式達成全域式的面外振動量測系統。但此一系統同樣造價昂貴，且後端資料取得不易，在資料後處理的方面靈活



度低，無法直接將振動情形擴展至聲學領域中。

因此本研究會專注於使用單點式雷射都卜勒振動儀(Laser Doppler Vibrometry, LDV)，分別搭配龍門位移平台及微動振鏡組，將單點式的量測擴展為全域式的量測系統，而後搭配聲學理論解析，以光學量測方式得到待測物的面外振動情形及其聲響曲線結果。

1.2 文獻回顧

振動及聲音充斥在日常生活中，聽覺刺激很大一部分是由介質的振動所產生。當物體振動時，會引起周圍的介質運動，介質的分子又與相鄰分子相互碰撞，導致聲波振動透過介質傳遞到耳膜或感測元件，使我們能聽見或是紀錄聲音。

在環境中，輕微的振動發生時，會使人感到不舒適或是工作中的機台及精密儀器產生誤差；當振動現象劇烈時更會造成環境中的人體聽覺上的危害或機台儀器損害；大部分的機械、設備及結構都會有振動問題產生：如汽車引擎、飛機渦輪、機器馬達、工具機主軸、建築物的樓板等。因此全域式的振動量測技術格外重要，除了可以讓我們得知物體的振動特性，另一方面也可以由振動特性推出其聲學響應情形。

自從Yeh和Cummins[1]於1964年在實驗室中首次應用雷射都卜勒效應測得一個管中管流的平均速度分布和湍流度以來，至今已有50多年的歷史。在此期間雷射都卜勒振動儀從無到有，發展壯大，已成為振動量測的重要工具，但LDV的缺點是一次只能量測一個點，若要進行全域式的量測，則需要花費大量經費購買與其相匹配的微動振鏡系統(Galvano Scanning System)，且鮮少有人將此振動量測技術擴展應用於聲學領域上。

2015年黃至偉[2]利用程式將示波器、訊號產生器、3D列印機的移動平台、與雷射都卜勒振動儀整合成「雷射都卜勒自動化陣列式量測模組」來輔助壓電陶瓷的研究。控制訊號產生器給予電訊號激發壓電片振動，利用雷射都卜勒量測單點的振動情形，訊號傳回示波器，示波器再將訊號傳回電腦，利用電腦程



式控制移動平台進行逐點量測，如此一來可以用很低的經費達到自動化陣列式振動量測模組，全域量測出物體的面外振動情形。

2018年江信遠[12]利用「分布參數法 (Distributed Parameter Method, DPM)」，以KLIPPEL的全域式雷射位移計的面外振動量測結果，將壓電式聲學元件(PE-68)的聲學響應情形以光學量測方法得到，並與無響室之聲壓量測結果有很不錯的對應性，後續本研究也使用此壓電試片(PE-68)為量測的主要試片。

本文參考前述論文[2]，分別設計了兩款全域式量測工具，其一是龍門位移平台、其二是微動振鏡系統，分別利用 MATLAB 或是 LabVIEW 為程式語言進行自動化控制，將單點式的雷射都卜勒振動儀整合為自動化全域速度量測系統，即為掃描型雷射都卜勒振動儀 (Scanning Laser Doppler Vibrometry, SLDV)，得到的全域振動量測結果會與振幅變動電子斑點干涉術 (Amplitude-Fluctuation Electronic Speckle Pattern Interferometry, AF-ESPI) 進行交互驗證。

電子斑點干涉術 (Electronic Speckle Pattern Interferometry, ESPI) 量測法，它擁有即時、非接觸、全域式量測的優點，並可同時量測試片振動時的共振頻率及模態振形，這項光學技術是由底片顯影的全相術 (Holography) 演變而來，全相術為 Dennis Gabor 在 1948 年提出之記錄物體三維資訊的量測技術，當時由於缺乏理想的同調性光源，因此無法有顯著的進展，直到 1960 年代雷射發明以後，Leith 及 Upatnieks 將雷射應用到全相術中，此技術得到突破性的進展。1971 年 Butters 與 Leendertz [5]先將 ESPI 應用於圓板的振動模態量測上。1976 年 Hogmoen 及 Lokberg [6]利用參考光相位調制技術 (Reference Beam Modulation) 於 ESPI 量測系統，提高對物體微小振動振幅及相位的量測能力與影像解析度。1982 年 Wykes et al. [7]將 ESPI 技術應用於物體表面振動的靜態及動態量測上。1996 年 Wang et al. [8]提出振幅變動電子斑點干涉術 (Amplitude-Fluctuation Electronic Speckle Pattern Interferometry, AF-ESPI)，且比較影像訊號相減法 (Video-Signal-Subtraction Method)、



影像訊號相加法(Video-Signal-Addition Method)和 AF-ESPI，三種運算處理方法，並在文中推導 AF-ESPI 之基本理論，其中 AF-ESPI 之原理與影像訊號相減類似，只是參考影像為動態中抓取，可簡化量測的步驟與複雜性，並將 AF-ESPI 應用於面外量測單邊固定複合材料平板來比較三種影像處理法，認為 AF-ESPI 動態即時相減技術大幅提升了條紋清晰度與解析度。1998 年馬劍清和黃吉宏[9]以 AF-ESPI 及 FEM 對各類型壓電平板的振動以及切割電極的壓電陶瓷平板之三維振動特性進行詳細討論。2009 年黃育熙和馬劍清[10]以 AF-ESPI 配合 LDV 量測石英壓電材料在不同切面所造成的頻率響應以及振動特性。本論文主要採用全域式面外振動量測方法，即為 AF-ESPI 技術。

本研究利用 AF-ESPI 方法驗證自行開發的 SLDV 方法的量測準確性，並依據類似參考文獻[12]的聲振耦合方式將振動量測結果推估至聲學領域上，即為分布參數法，並以無響室的聲壓量測結果相比較，探討本研究開發之 DPM 系統於聲學領域的適用性。

最後參考 2010 年 M. Allen 及 M. Sracic[13]的實驗設計方式，將逐點量測式的 SLDV 改為逐線段量測的「連續掃描型雷射都卜勒振動儀 (Continuous Scanning Laser Doppler Vibrometry, CSLDV)」，進一步提升此振動量測系統的量測效率。



1.3 論文內容簡介

本論文主旨是發展出一個全域式自動化的振動量測系統，系統利用 LabVIEW、MATLAB 程式語言，控制訊號產生器、示波器、網路攝影機、資料擷取系統 NI-DAQ 等實驗儀器，達成實時監控、且結合訊號激振及振動量測為一體的自動化振動量測系統。隨後利用量測資料進行後處理，繪出待測物全域的面外振動情形，再由其振動情形搭配聲學理論，推估出待測物在自由聲場下的聲學響應情形，所得到的結果與無響室聲學測量（Acoustic Measurement, AM）及全像式電子斑點干涉術（Electronic Speckle Pattern Interferometry , ESPI）皆有很好的對應性。以下將說明本研究各章節的主要內容：

第一章介紹本研究的研究動機及文獻回顧，借鏡黃至偉[2]利用 3D 列印機改造成之 LDV 自動量測系統的經驗，並回顧振動及聲學量測技術之相關文獻，最後簡單說明各章節內容及重點。

第二章介紹本研究的實驗系統架設，說明各量測儀器的基本原理。首先介紹用於振動量測的雷射都卜勒測振儀（LDV），主要用來測量單點面外振動情形，並能以掃頻方式量測動態訊號獲取待測物之速度頻譜；電子斑點干涉術（ESPI），透過光學鏡頭和光路架設拍攝物體之模態振形；阻抗分析儀（Impedance Analyzer）通過相敏檢測，同時測量器件在掃頻測試過程中的電流和電壓，以獲得待測物複數電阻抗隨頻率變化的關係；接著介紹聲學量測，選擇在無響室且有障板的環境條件下量測揚聲器之聲壓曲線，評估元件在自由音場的聲學特性；最後則詳細介紹本研究結合使用的全域量測儀器：龍門位移平台及微動振鏡組。

第三章介紹本研究量測系統的原理與架設，首先就實驗室現有之雷射都卜勒測振儀（Polytec OFV-505）進行介紹，原理為利用都卜勒效應以頻率的變化量反推出物體表面的振動速度，可用來測量單點面外振動情形，並能以掃頻方式量測動態訊號獲取待測物之速度頻譜。而後分別以 LDV 搭配龍門位移平台及微動振鏡系統作介紹。兩套系統所用到的實驗儀器類似，包含 LDV、訊號產生器、示波器（或



NI-DAQ 資料擷取系統)。龍門平台式 LDV 量測系統可使用 MATLAB 或 LabVIEW 為程式語言操控，以先掃頻後移動平台至下一個量測點的方式進行量測；而微動振鏡系統則使用 LabVIEW 為程式語言操控，與前套系統相反，以先掃完所有布點後再進行下一頻率的量測，此系統稱為「掃描型雷射都卜勒振動儀 Scanning Laser Doppler Vibrometry, SLDV」。

第四章介紹如何對第三章開發的 SLDV 量測資料進行後處理，其中包含正負相位的判斷。並提出頻率判斷和相位差判斷的兩種方式，自動化判別量測不佳的點進行修正。處理並優化量測資料後繪出實際的模態振型，並與 AF-ESPI 方法進行驗證，證明本研究開發的 SLDV 系統量測資料的準確性，並凸顯 SLDV 具有數值化顯示振動情形，振動量測範圍較廣的優勢。

第五章介紹如何將量測到的振動情形推估到聲壓響應上，首先，先進行試片單點振動速度對聲壓的理論推導，並依照自由聲場的假設將 SLDV 量測的所有離散點以雷利積分 (Rayleigh Integral) 的方式，計算試片全域對某特定距離點的聲壓響應結果，並設定此特定點距離需與無響室麥克風量測的距離一致，此方法稱為「分布參數法 Distributed Parameter Method, DPM」。接著分別就高阻抗及低阻抗的聲學元件進行量測，並以 DPM 方法與無響室量測之聲壓曲線進行結果比較。

第六章就 SLDV 方式改良，提出兩種加快量測效率的方式，其一為 Chirp 訊號結合 SLDV 量測法，其二為「連續掃描型雷射都卜勒振動儀, Continuous Scanning Laser Doppler Vibrometry, CSLDV」。兩種方法皆能有效提升 SLDV 的量測效率，並與 SLDV 方法的量測結果有很好的對應性。

最後第七章為結論及未來展望，總結我所開發的兩套全域式雷射都卜勒自動化聲振量測系統的優勢，並且列出未來可以透過這兩套量測系統加以延伸的方向，包含不同的量測對象及實際應用領域。

第二章 實驗原理與架設



本章介紹本研究所使用到的實驗儀器及架設方式。雷射都卜勒測振儀 (Laser Doppler Vibrometry, LDV)，利用都卜勒效應，由入射光及反射光間的都卜勒頻移現象，推得單點的振動速度，隨後搭配龍門位移平台及微動振鏡系統達到多點式的面外振動量測系統；電子斑點干涉術 (Electronic Speckle Pattern Interferometry, ESPI)，係利用光學的原理量測全域模態振形的非接觸式光學技術，本研究主要應用於量測試片面外方向的振動特性；阻抗分析儀 (Impedance Analyzer) 是以量測頻率與電壓的連續變化及掃描量測待測物的電性阻抗 (Electrical Impedance)；無響室量測 (Anechoic Room)，模擬無限遠空間的音場 (自由音場)，並在有無限大障板的條件下，使用麥克風測量待測物之聲壓曲線；最後介紹 LDV 搭配的兩種全域量測儀器，龍門位移平台以及微動振鏡組，並詳細列出其相關規格及使用方式。

2.1 雷射都卜勒振動儀

雷射都卜勒振動儀 (Laser Doppler Vibrometry, LDV) 利用都卜勒效應 (Doppler effect)，當雷射光的波接觸到處於運動狀態下的物體表面時，反射後的頻率會與入射波的頻率有所差異，而物體移動的速度與頻率的變化成正比，因此 LDV 測量技術可以精確量測出單點之振動速度，是一種非接觸式的光學量測系統。

本研究使用 Polytec 公司所生產之 LDV，型號為 OFV-505，如圖 2-1 所示，量測能力與精度如圖 2-2 所示，量測距離由 0.1 m 至 300 m，主要使用聲光調製器 (Acousto-Optic Modulator, AOM) 系統或稱為布拉格盒 (Bragg Cell) 進行量測，其原理為聲波在晶體材料內傳遞，晶體材料之折射率受到聲波傳遞的影響產生變化，進一步的影響到光的行為，此稱為聲光效應，如圖 2-3 所示，在晶體材料的兩端連接一個轉換器與減振器，由轉換器產生聲波，在晶體材料內傳遞，最後傳遞至減振器吸收聲波，當雷射光穿透此晶體材料時，便可調整聲波之頻率來調整光波的



繞射角度，以這樣的幾何形狀傳遞聲波可以調製數兆赫茲的頻寬。

假設轉換器所產生之聲波的頻率為 f_a ，而聲波在材料中的傳遞速率為 V_a ，則晶體材料中折射率改變的週期為：

$$T = \frac{V_a}{f_a} \quad (2-1)$$

假設入射光的波長為 λ_0 ，晶體材料折射率為 n ，則入射光在晶體材料裡傳遞時其波長變為：

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} \quad (2-2)$$

一般而言繞射角之角度都很小，便可以假設 $\sin \theta_B = \theta_B$ ，再使用 Bragg 繞射公式求得繞射角：

$$\theta_B = \frac{\lambda}{2T} = \lambda \frac{f_a}{2V_a} \quad (2-3)$$

光路圖如圖 2-4 所示，雷射光藉由分光鏡分為兩道光，其中一道入射光經由 Bragg Cell 調整出適當之頻率，最後傳導至檢測器 (Detector)，另一道光傳至待測試片 (Sample)，當物體在振動時，其反射光頻率會與入射光頻率不同，並且反射光透過分光鏡傳導至檢測器，便可獲得兩道光的頻率差異進而量測出速度。LDV 規格整理如下表 2-1。



圖 2-1 LDV-OFV505

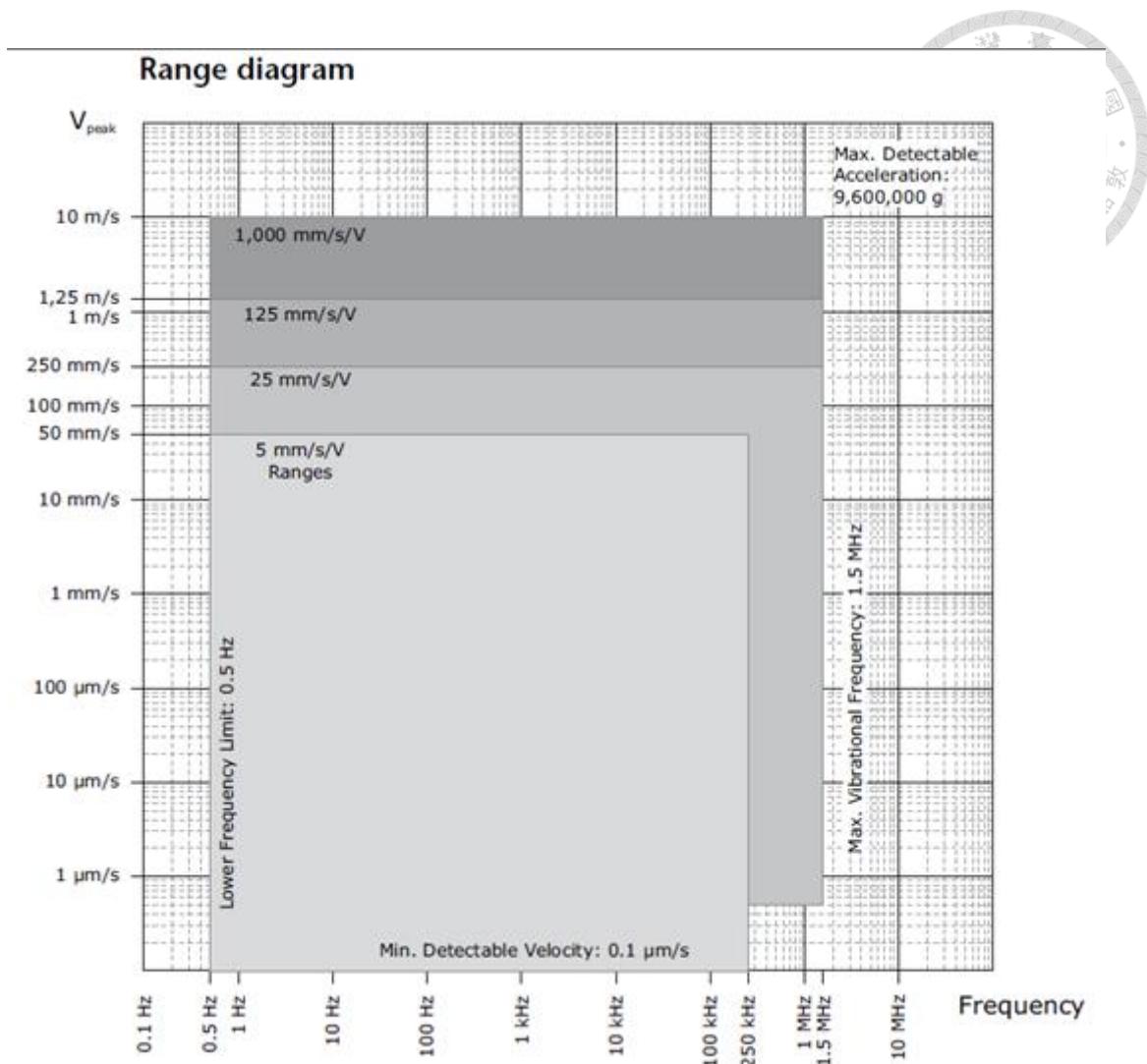


圖 2-2 LDV-OFV505 量測規格圖

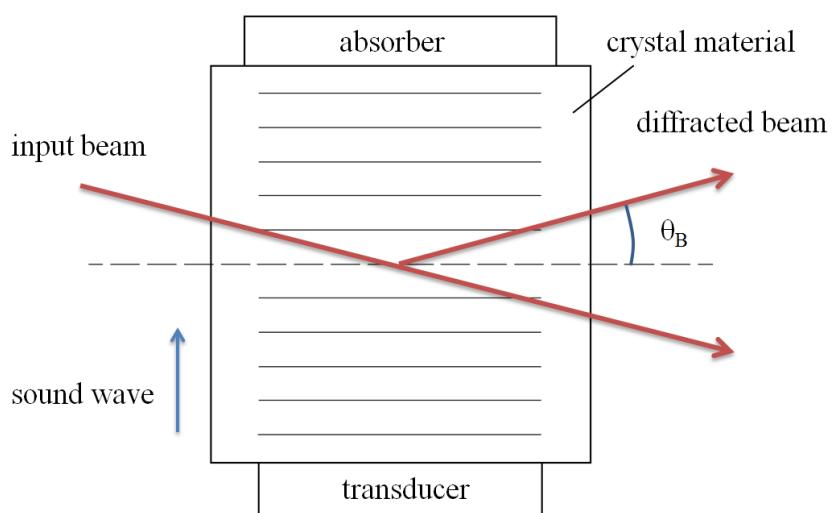


圖 2-3 聲光調製器基本構造

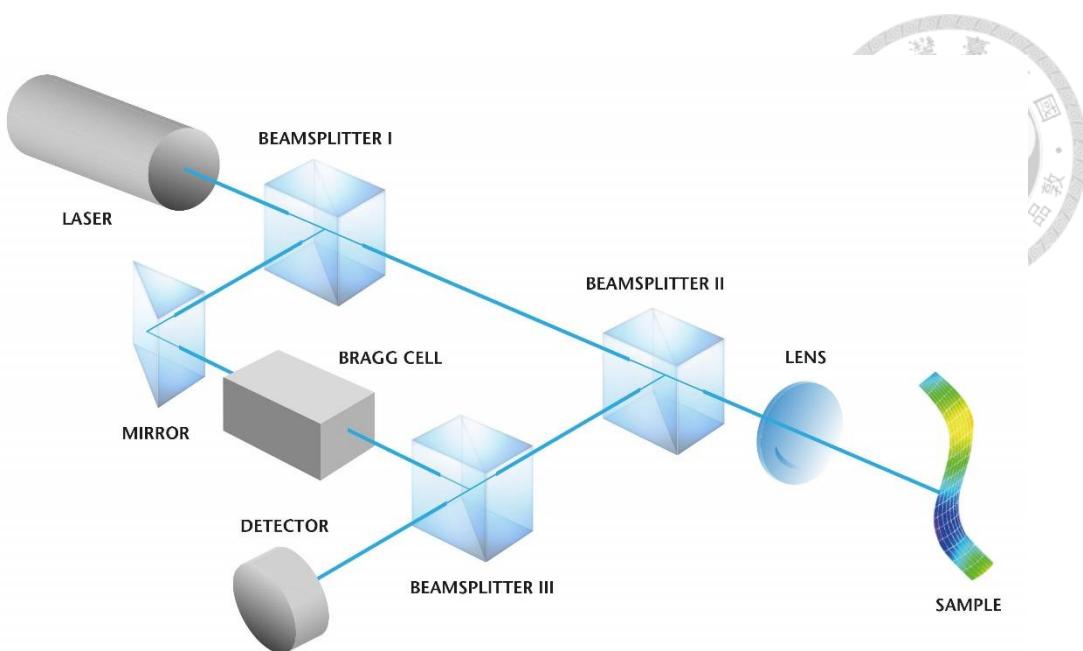


圖 2-4 LDV 內部光路圖

表 2-1 LDV OFV-505 規格表

| | |
|-------------------------|-----------------------------|
| Laser type | HeNe Laser |
| Laser class | Class 2, <1mW, eye-safe |
| Laser wavelength | 633 nm |
| Resolution | 0.02 $\mu\text{m}/\text{s}$ |
| Min. stand-off distance | 0.1 m (With OFV-SR) |
| Max. stand-off distance | 300 m (With OFV-SLR) |
| Weight | 3.4 kg |



2.2 電子斑點干涉術

電子斑點干涉術 (Electronic Speckle Pattern Interferometry, ESPI) 由全相術 (Holography) 演變而來，該技術是利用影像感測元件 (Charge-Coupled Device, CCD) 與電子處理技術記錄低空間頻率 (Low Spatial Frequency) 全場成像圖形，可用來量測物體表面靜態及動態變形。原理是利用兩道同調的光源射向待測物及參考平面，當待測物表面變形時，待測物表面上的光點會產生微小的位移變化，使其與參考面之光點有光程差進而產生干涉條紋，並藉由兩道光之光程差的變化得到待測物的變形資料，達到即時的位移成像，大幅降低了全像術照片沖洗與重建的繁瑣步驟與時間。干涉後影像強度的調制項就能將因待測物表面變形而產生的相變化包含在內，由於調制項中是以光波長作為量測基準，因此精度可達到光波長的等級約為次微米，由於 ESPI 要求光源的同調性，故本論文採用同調性較佳的氦氖雷射。ESPI 有著非接觸式、全域式以及即時性等優點，僅需簡單的架設及校正即可進行實驗量測。

ESPI 量測振動時常用的方法為均時法 (Time-Averaging Method)，特點是在 CCD 的曝光時間內擷取振動中物體在不同時間的影像，以數學關係式表示所得到的干涉條紋皆是以零階貝索函數 (zero-order Bessel Function) 所組成，在圖形中干涉影像最亮的部分為節線區 (nodal line) 表示位移為零，而亮暗相間的條紋為等位移線的分布，故可由全場干涉圖形直接獲得振動位移的分布情形。ESPI 量測三維變形，根據光學架設不同可以量測到兩個方向的位移：待測物與待測物表面垂直位移的面外架設；以及待測物與待測物表面平行位移的面內架設。將面外及面內所得的實驗量測資訊結合即為待測物完整的三維變形。

本研究主要探討振動與聲學的關係，而聲學理論中面外的振動尤其重要，因此以面外振動量測為主，以下針對面外振動量測系統進行詳細的理論介紹及系統架設與量測方法，面外振動可分為水平式架設、垂直式架設，如圖 2-5、圖 2-6 所示，紅線為雷射所產生的光路徑，雷射光束首先經過空間濾波器 (Spatial Filter) 再經



由擴束鏡擴大光束，再利用了分光元件（Beam Splitter）分出兩道光束，其中一道光束投射向待測物表面，這道光束為物體表面上的物光；另一道光束則擴散至參考平面（Reference plane），而參考平面上的漫射造成一種光斑式的參考光（Speckled Reference Beam），此道光束接著會反射在與 CCD 相機同軸的分光元件，這種漫射至平面再投射於分光元件的方式可避免鏡面光產生光暈現象以增強干涉影像的品質。這道參考光會與投影在待測物體的物光同軸入射並聚焦於 CCD 相機的感光平面上，產生干涉影像資訊，訊號進入電腦後經過即時影像相減的軟體進行處理，即可快速的在電腦螢幕上顯示出干涉條紋的圖形。主要用於薄膜受揚聲器激振的面外振動量測，如圖 2-7 所示，複合聲學元件的面外振動量測，如圖 2-8 所示，及壓電片的面外振動量測。

接著說明 ESPI 量測的基本理論，假設待測物振動前在成像平面（Image Plane）上的某點之光強度為：

$$I_1 = I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos \phi_0 \quad (2-4)$$

其中 I_O 是物體光之光強度， I_R 是參考光之光強度， ϕ_0 為物體光與參考光的相位差。待測物開始振動後，該點散射的物光假設有一相位角差 $\Delta\phi$ 變化量，若物體此時振幅為 A ，且 θ_0 為物體光與觀測方向（垂直於物體表面之方向）之夾角，振動的角頻率為 ω ，則此相位差可表示為：

$$\phi_0 = \frac{2\pi}{\lambda} (1 + \cos \theta_0) A \cos \omega t = \Gamma A \cos \omega t \quad (2-5)$$

令 $\Gamma = \frac{2\pi}{\lambda} (1 + \cos \theta_0)$ 為靈敏度向量的值，其大小與系統架設相關，架設的角度 θ_0 愈接近 0° 時靈敏度愈大，其中 λ 為雷射光的光波波長。

由於 CCD 在取像時間內，會不斷累積該物體在不同時刻的振動影像，而均時法的概念可視為直接對影像累加後，對時間平均，因此當物體處於振動狀態時，CCD 影像所擷取之光強度 I_2 為取像時間週期的平均值：



$$I_2 = I_O + I_R + \frac{2}{\tau} \sqrt{I_O I_R} \int_0^\tau \cos(\phi_0 + \Gamma A \cos \omega t) dt \quad (2-6)$$

對(2-6)式進行簡化可得到：

$$\begin{aligned} \int_0^\tau \cos(\phi_0 + \Gamma A \cos \omega t) dt &= \operatorname{Re} \left[\int_0^\tau \exp(i\phi_0 + i\Gamma A \cos \omega t) dt \right] \\ &= \operatorname{Re} \left[e^{i\phi_0} \int_0^\tau \exp(i\Gamma A \cos \omega t) dt \right] \\ &= \operatorname{Re} \left[e^{i\phi_0} \int_0^\tau \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\Gamma A) e^{in(\frac{\pi}{2} - \omega t)} dt \right] \\ &= \operatorname{Re} \left[e^{i\phi_0} \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\Gamma A) e^{in(\frac{\pi}{2} - \omega t)} \frac{e^{-in\omega\tau} - 1}{-in\omega} \right] \end{aligned} \quad (2-7)$$

其中 τ 為CCD擷取影像時間，若 $\tau = \frac{2k\pi}{\omega}$ 或 $\tau \gg \frac{2k\pi}{\omega}$ ，除非 $n=0$ ，否則其值為

0，故可將簡化式子改寫：

$$\int_0^\tau \cos(\phi_0 + \Gamma A \cos \omega t) dt = \tau J_0(\Gamma A) \cos \phi_0 \quad (2-8)$$

因此，光強度 I_2 為：

$$I_2 = I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} (\cos \phi_0) J_0(\Gamma A) \quad (2-9)$$

其中 $J_0(\Gamma A)$ 為零階貝索函數 (Bessel Function)，由(2-8)可知貝索函數中包含了振幅 A ，但因前面兩項為直流項：物光光強 I_O 與參考光強 I_R 相對較大，使調節項貝索函數所包含的振幅在量測結果中較不明顯，為了解決直流項之影響，電子斑點干涉術的量測採用微動裝置，來變更參考光的光行程，可使(2-8)式中的 $\cos \phi_0$ 變成 $\cos(\phi_0 + \pi)$ ，再利用影像加減法將兩張振動影像光場 I_1 、 I_2 進行相減，即能消除直流項並使調節項 $J_0(\Gamma A)$ 較易呈現其特徵，但必須在光程控制上非常精準，控制光程的微動裝置也相對昂貴。因此 1996 年，清華大學王偉中教授[8]提出振動變動電子斑點干涉術(Amplitude-Fluctuation Electronic Speckle Pattern Interferometry, AF-ESPI)，利用兩張具有適當變化之振動影像相減，即可得到穩態之全場位移干涉圖形，改良了設備成本與實驗的複雜性。

AF-ESPI 的面外光學架設方式與 ESPI 的差別在於是將具有適當變化之影像



進行影像相減處理。假設試片振動時第一張已有振動振幅影像光強為：

$$I_1 = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \left\{ I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos \left[\phi_O + \frac{2\pi}{\lambda} (1 + \cos \theta_0) A \cos \omega t \right] \right\} dt \quad (2-10)$$

令靈敏度 $\Gamma = \frac{2\pi}{\lambda} (1 + \cos \theta_0)$ ，參照影像相減法推導，則(2-10)式的光強度 I_1 ：

$$I_1 = I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} (\cos \phi_O) J_0(\Gamma A) \quad (2-11)$$

在待側物振動中取第二張影像，與之前擷取的 I_1 影像相比，振幅產生微量的變化，

將第二張影像的光強度表示為：

$$I_2 = \frac{1}{\tau} \left\{ \int_0^\tau I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos [\phi_O + \Gamma(A + \Delta A) \cos \omega t] dt \right\} \quad (2-12)$$

其中

$$\begin{aligned} & \int_0^\tau \cos [\phi_O + \Gamma(A + \Delta A) \cos \omega t] dt \\ &= \operatorname{Re} \left\{ e^{i\phi_O} \int_0^\tau \exp[i\Gamma(A + \Delta A) \cos \omega t] dt \right\} \\ &= \operatorname{Re} \left\{ e^{i\phi_O} \int_0^\tau \exp(i\Gamma A \cos \omega t) \exp(i\Gamma \Delta A \cos \omega t) dt \right\} \end{aligned} \quad (2-13)$$

對 $\exp[i\Gamma \Delta A \cos \omega t]$ 進行泰勒展開，忽略三次以上之高次項，並將其代入後積分可得：

$$\int_0^\tau \cos [\phi_O + \Gamma(A + \Delta A) \cos \omega t] dt = \tau [1 - \frac{1}{4} \Gamma^2 (\Delta A)^2] J_0(\Gamma A) \quad (2-14)$$

而(2-12)式中的第二張影像光強度則可改寫為：

$$I_2 = I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} (\cos \phi_O) [1 - \frac{1}{4} \Gamma^2 (\Delta A)^2] J_0(\Gamma A) \quad (2-15)$$

將第二張影像與第一張影像相減消去直流項，即(2-15)減去(2-10)式，並經整流後顯示在螢幕上，相減後的影像光強度為：

$$I = 2\sqrt{I_O I_R} \left| \frac{1}{4} \Gamma^2 (\Delta A)^2 J_0(\Gamma A) \cos \phi_O \right| = \frac{\sqrt{I_O I_R}}{2} \left| \Gamma^2 (\Delta A)^2 J_0(\Gamma A) \cos \phi_O \right| \quad (2-16)$$

由(2-16)得知振動振幅為 $|J_0(\Gamma A)|$ 所控制，並利用零階貝索函數的特性，當振幅

$A = 0$ 時， $|J_0(\Gamma A)|$ 有最大值，實驗上可對應量測物體振動時位移為零的節線即為影像最亮的區域。

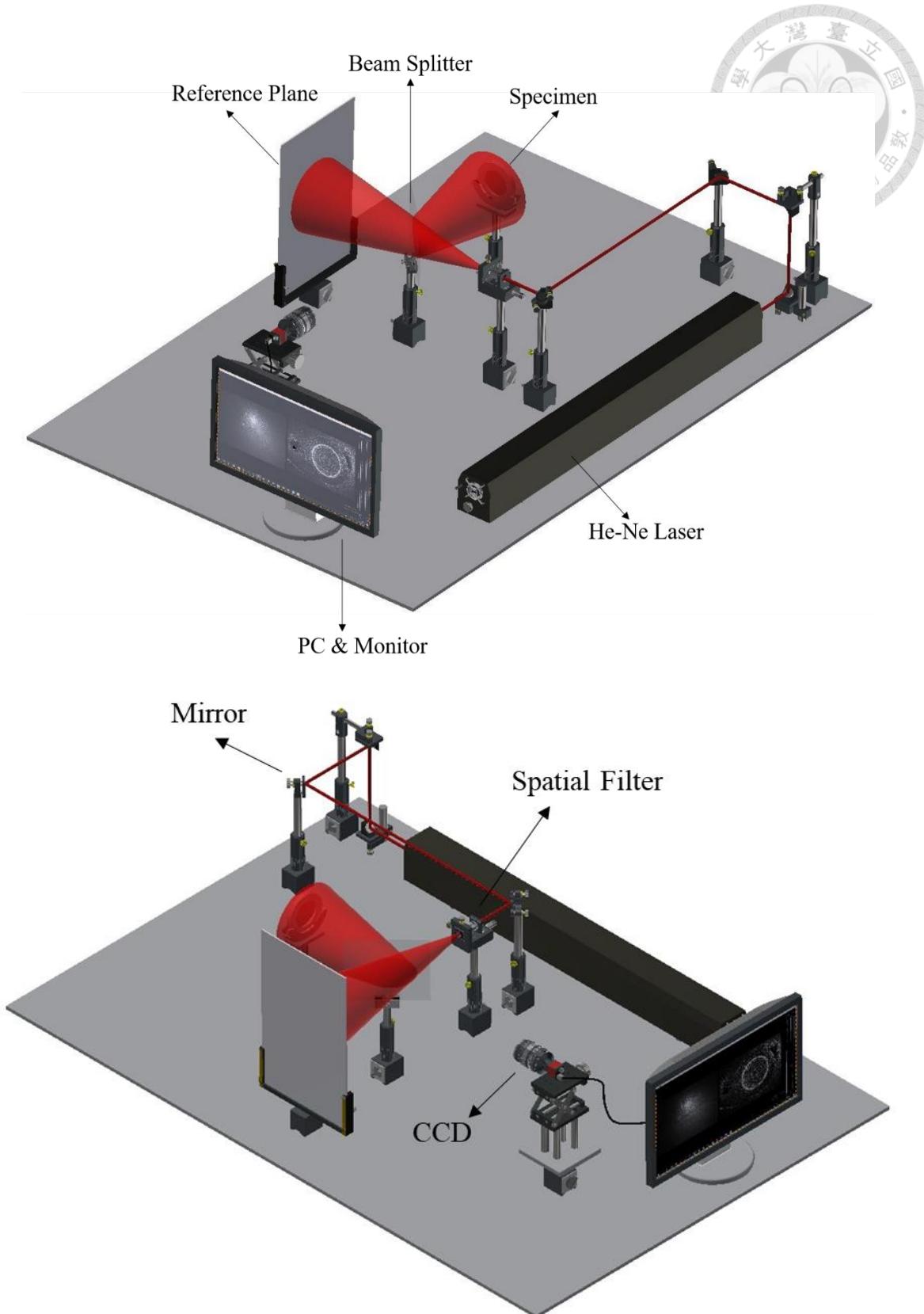


圖 2-5 ESPI 水平面外架設圖

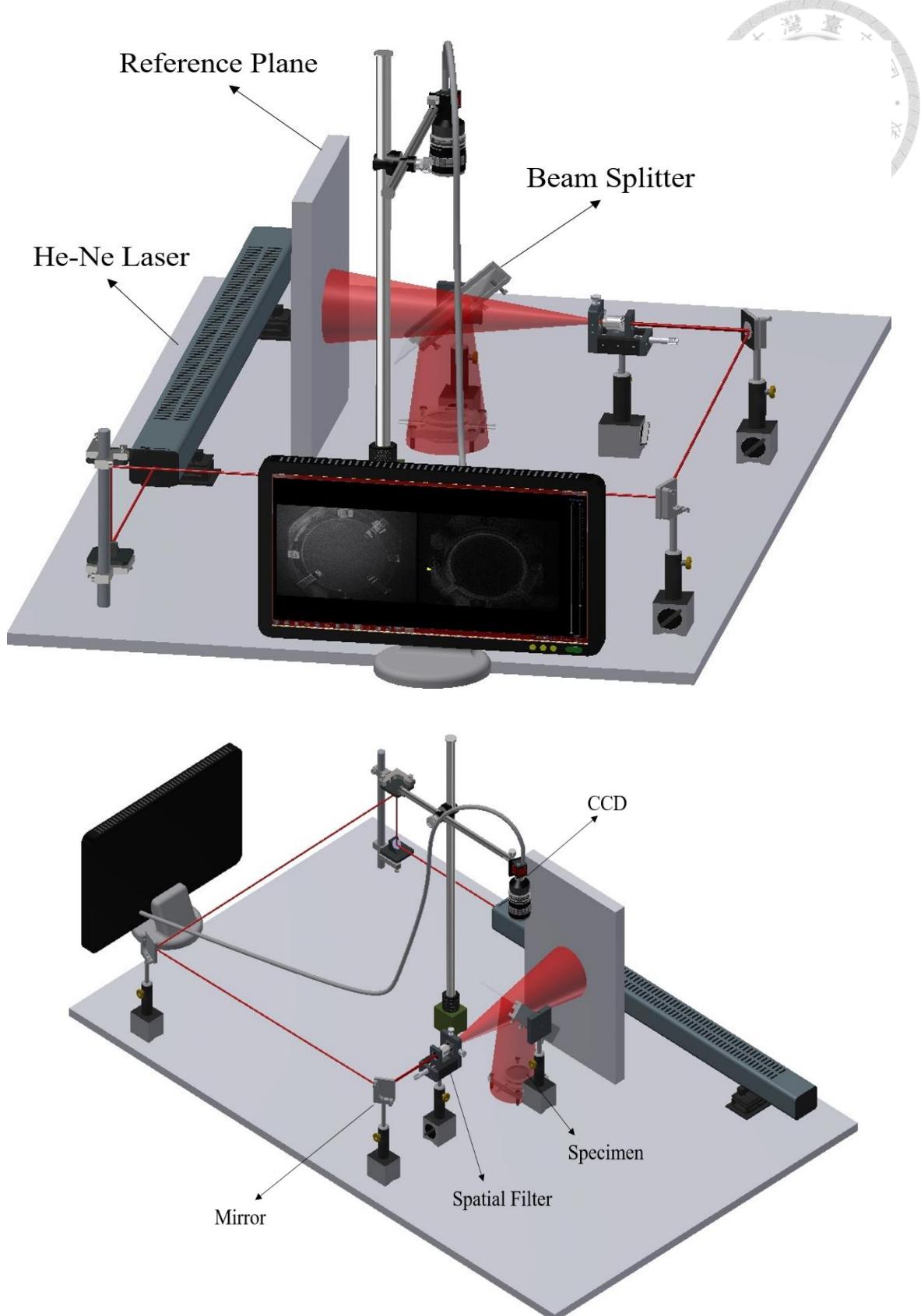


圖 2-6 ESPI 垂直面外架設圖

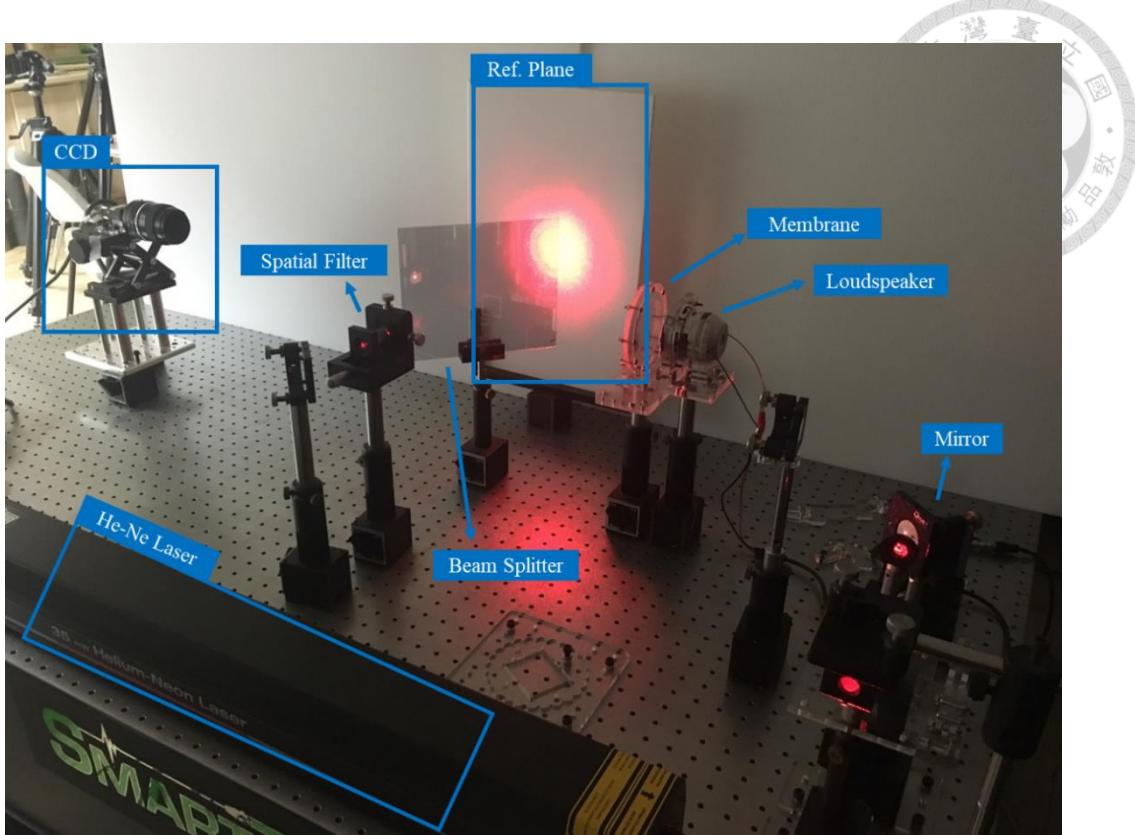


圖 2-7 電子斑點干涉術水平面外架設-薄膜受揚聲器激振

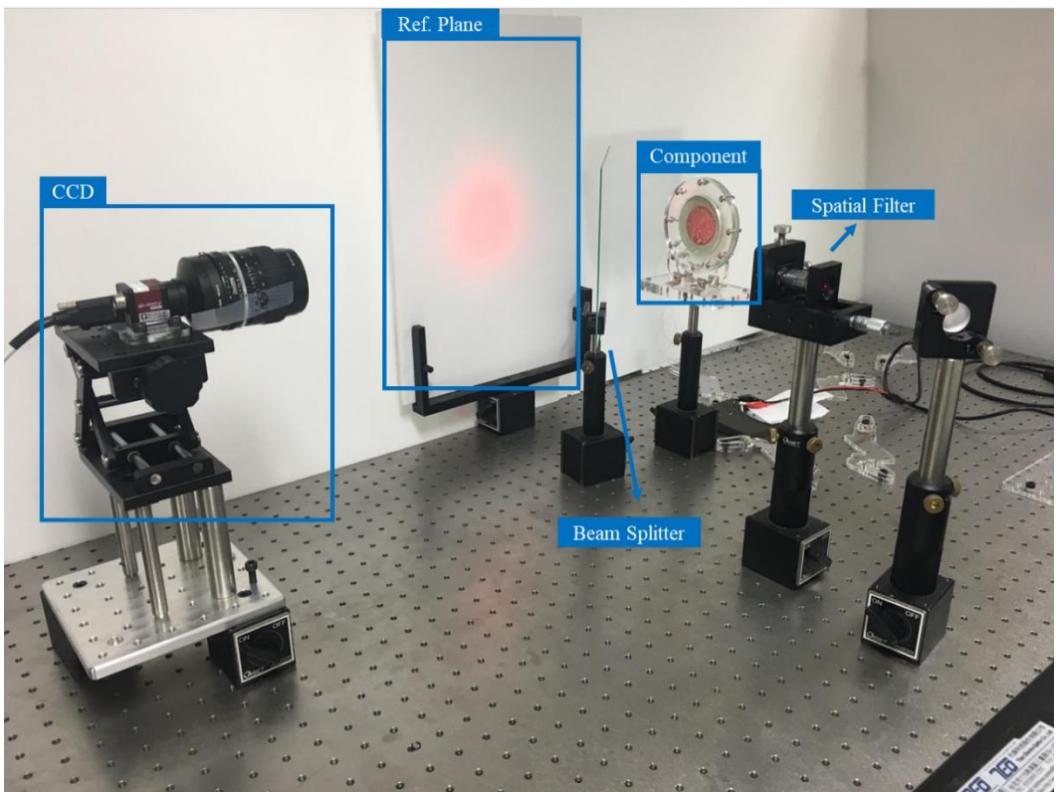


圖 2-8 電子斑點干涉術水平面外架設-壓電式聲學元件



2.3 阻抗分析儀

阻抗分析儀（Impedance Analyzer）是以量測頻率與電壓的連續變化及掃描量測待測物的電性阻抗（Electrical Impedance），如圖 2-9 所示。電性阻抗可視為待測物元件中電阻、電感及電容對於交流電流所產生之總抗力；阻抗通常以複數形式表示，其在複數平面上產生實部與虛部的電性阻抗。對於壓電材料的特性中，電能與機械能相互轉換之間有耦合的特性，因此壓電材料的電性阻抗與其他不具壓電特性的元件有所不同，通常結果會表現在頻率—阻抗的特徵曲線關係圖中，在特定共振頻率下產生共振點或反共振點。

壓電陶瓷材料的阻抗特性與面內運動相關，壓電材料樑（ d_{31} 型或 d_{32} 型），厚度為 h 、長度為 l 與寬度為 b ，如圖 2-10 所示，可忽略縱向與剪力效應。因此，該致動器方程式可簡化成

$$\begin{cases} \frac{\partial T_1}{\partial x} = \rho \ddot{u} + f_1 \\ \frac{\partial T_2}{\partial y} = \rho \ddot{v} + f_2 \end{cases} \quad (2-17)$$

其中， \ddot{u} 、 \ddot{v} 代表個不同方向之加速度， ρ 代表結構密度， f_i 代表作用在結構上之外力。由(2-9)式的交互關係式進行推導，即可得到該應力函數為

$$T_1(S, E) = \frac{S_1}{S_{11}^E} - e_{31} E_3 = \frac{S_1}{S_{11}^E} + \frac{d_{31}}{S_{11}^E} \frac{\partial \psi_3}{\partial z} \quad (2-18)$$

$$T_2(S, E) = \frac{S_2}{S_{22}^E} - e_{32} E_3 = \frac{S_2}{S_{22}^E} + \frac{d_{32}}{S_{22}^E} \frac{\partial \psi_3}{\partial z} \quad (2-19)$$

應變位移關係式為

$$S_1 = \frac{\partial u}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (2-20)$$

$$S_2 = \frac{\partial v}{\partial y} - z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \quad (2-21)$$

將(2-18)式～(2-21)式代入(2-17)式，可以得到



$$\frac{1}{s_{11}^E} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{d_{31}}{s_{11}^E} \frac{\partial^2 \psi_3(z)}{\partial x \partial z} = \frac{1}{s_{11}^E} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \rho \ddot{u} + f_1 \quad (2-22)$$

$$\frac{1}{s_{22}^E} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{d_{32}}{s_{22}^E} \frac{\partial^2 \psi_3(z)}{\partial y \partial z} = \frac{1}{s_{22}^E} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = \rho \ddot{v} + f_2 \quad (2-23)$$

d_{31} 型與 d_{32} 型推導過程相似，故針對 d_{31} 型進行理論分析。其中電位 $\psi_3(z)$ 是 z 之

函數，故該電位導數 $\frac{\partial \psi_3(z)}{\partial z}$ 對 x 微分， $\frac{\partial^2 \psi_3(z)}{\partial x \partial z} = 0$ 。

將壓電元件的上下表面批覆電極作為一自由的諧振器 (Resonator)，假設無功率耗損、無機械外力負載、且電極厚度極薄且可忽略的情況下

$$f_3 = 0$$

且

$$\psi_3(z) \Big|_{z=\pm\frac{h}{2}} = \frac{2V_3}{h} z \quad (2-24)$$

電位邊界條件為

$$\psi_3(z) \Big|_{z=\pm\frac{h}{2}} = \pm V_3 \quad (2-25)$$

其中 V_i 為電壓。

機械邊界條件為

$$T_1 \Big|_{x=\pm\frac{l}{2}} = 0 \quad (2-26)$$

故

$$\left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x=\pm\frac{l}{2}} = d_{31} E_3 = - \left. \frac{\partial \psi_3}{\partial z} \right|_{z=\pm\frac{h}{2}} d_{31} = - \frac{2V_3}{h} d_{31} \quad (2-27)$$

根據(2-17)式與(2-18)式可以知道運動方程式為

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \rho s_{11}^E \ddot{u} \quad (2-28)$$

假設該位移解為空間與時間之函數



$$u(x,t) = \bar{u}(x)e^{j\omega t}$$

(2-29)

其中設 ω 為角頻率 ($\omega = 2\pi f$, f 為頻率值); $j = \sqrt{-1}$ 。

將(2-29)式代入(2-28)式，可以得到

$$\frac{d^2\bar{u}}{dx^2} + (\omega\sqrt{\rho s_{11}^E})^2 \bar{u} = 0 \quad (2-30)$$

故該空間區域位移之通解為

$$\bar{u}(x) = C_1 \cos(\omega\sqrt{\rho s_{11}^E} x) + C_2 \sin(\omega\sqrt{\rho s_{11}^E} x) \quad (2-31)$$

令上式 x 微分

$$\bar{u}'(x) = -C_1 \omega(\sqrt{\rho s_{11}^E}) \sin(\omega\sqrt{\rho s_{11}^E} x) + C_2 \omega(\sqrt{\rho s_{11}^E}) \cos(\omega\sqrt{\rho s_{11}^E} x) \quad (2-32)$$

將(2-27)式代入(2-32)式，可以得到

$$\begin{cases} \bar{u}'\left(-\frac{1}{2}\right) = C_1 \omega(\sqrt{\rho s_{11}^E}) \sin\left(\omega\sqrt{\rho s_{11}^E} \frac{1}{2}\right) + C_2 \omega(\sqrt{\rho s_{11}^E}) \cos\left(\omega\sqrt{\rho s_{11}^E} \frac{1}{2}\right) \\ \quad = d_{31} E_3 \\ \bar{u}'\left(\frac{1}{2}\right) = -C_1 \omega(\sqrt{\rho s_{11}^E}) \sin\left(\omega\sqrt{\rho s_{11}^E} \frac{1}{2}\right) + C_2 \omega(\sqrt{\rho s_{11}^E}) \cos\left(\omega\sqrt{\rho s_{11}^E} \frac{1}{2}\right) \\ \quad = d_{31} E_3 \end{cases} \quad (2-33)$$

從上式，可解

$$\begin{cases} C_1 = 0 \\ C_2 = \frac{d_{31} E_3}{\omega\sqrt{\rho s_{11}^E} \cos\left(\omega\sqrt{\rho s_{11}^E} \frac{l}{2}\right)} \end{cases} \quad (2-34)$$

故空間位移解為

$$\bar{u}(x) = \frac{d_{31} E_3}{\omega\sqrt{\rho s_{11}^E} \cos\left(\omega\sqrt{\rho s_{11}^E} \frac{l}{2}\right)} \sin(\omega\sqrt{\rho s_{11}^E} x) \quad (2-35)$$

外加電場之位移解



$$u(x,t) = \frac{d_{31} \left(-\frac{2V_3}{h} \right)}{\omega \sqrt{\rho S_{11}^E} \cos \left(\omega \sqrt{\rho S_{11}^E} \frac{l}{2} \right)} \sin \left(\omega \sqrt{\rho S_{11}^E} x \right) e^{j\omega t} \quad (2-36)$$

外加電場之電位移解

$$D_3(x,t) = d_{31} T_1 + \varepsilon_{33}^T E_3 = -\frac{2V_3}{h} \varepsilon_{33}^T \left[1 - k_{31}^2 \left(1 - \frac{\cos(\omega \sqrt{\rho S_{11}^E} x)}{\cos(\omega \sqrt{\rho S_{11}^E} \frac{l}{2})} \right) \right] e^{j\omega t} \quad (2-37)$$

其中 $k_{31}^2 = \frac{d_{31}^2}{S_{11}^E \varepsilon_{33}^T}$ ，其為機電耦合係數 (Coupling Coefficient)。

電流簡化方程式為

$$i_k(t) = b \int_{S^{(12)}} \dot{D}_3(x,t) dx \quad (2-38)$$

將(2-37)式對時間微分，即可得到電位移變化率為

$$\begin{aligned} \dot{D}_3(x,t) &= j\omega D_3(x,t) \\ &= j\omega \frac{2V_3 \varepsilon_{33}^T}{h} \left[k_{31}^2 \left(1 - \frac{\cos(\omega \lambda x)}{\cos(\omega \ell \lambda / 2)} \right) - 1 \right] e^{j\omega t} \end{aligned} \quad (2-39)$$

其中 $\lambda = \frac{1}{\sqrt{\rho S_{11}^E}}$ 。

將(2-39)式代入(2-38)式，可以得到

$$i_k(t) = -2j\omega V_3 C_o \left[1 + \frac{k_{31}^2}{1 - k_{31}^2} \frac{\tan a}{a} \right] \quad (2-40)$$

其中 $C_o = \frac{b\ell \varepsilon_{33}^S}{h}$ ，其為靜態電容 (Static Capacitance)； $\varepsilon_{33}^S = \varepsilon_{33}^T (1 - k_{31}^2)$ ； $a = \frac{\omega \ell}{2\lambda}$ ，

其為壓電材料的波速。

接著定義 d_{31} 型之導納 Y (Admittance)

$$Y = Y_o + Y_p \quad (2-41)$$



其中 Y_o 為制動導納， Y_p 為動導納。設定 $Y = \frac{i_k(t)}{V_3(t)} = \frac{i_k(t)}{-2V_3 e^{j\omega t}}$ ，可以得到

$$Y_p = j\omega C_o \left[1 + \frac{k_{31}^2}{1 - k_{31}^2} \frac{\tan a}{a} \right] \quad (2-42)$$

設定阻抗為 $Z = \frac{1}{Y_p}$ ，可以得到

$$Z_e = \frac{1}{j\omega C_o \left[1 + \frac{k_{31}^2}{1 - k_{31}^2} \frac{\tan a}{a} \right]} \quad (2-43)$$

根據(2-43)式，以頻率 f 為橫座標， $|Z_e|$ 為縱座標，繪製出頻率-阻抗的關係圖，如圖 2-11 所示，在某一諧振頻率會有相對最高與最低阻抗值出現，當阻抗值最低時，在固定電壓的某特定頻率下通過的電流若為最大，可視為此時是系統能量表現最劇烈的時候，機械位移為最大，也就是產生共振頻率 ($f_{resonance}$ ，即 f_r) 的量值。反之，固定電壓的某特定頻率若電流最小、阻抗值達到局部最大值時，即為系統能量最小的狀態，也就是反共振頻率 ($f_{anti-resonance}$ ，即 f_a) 發生之量值。

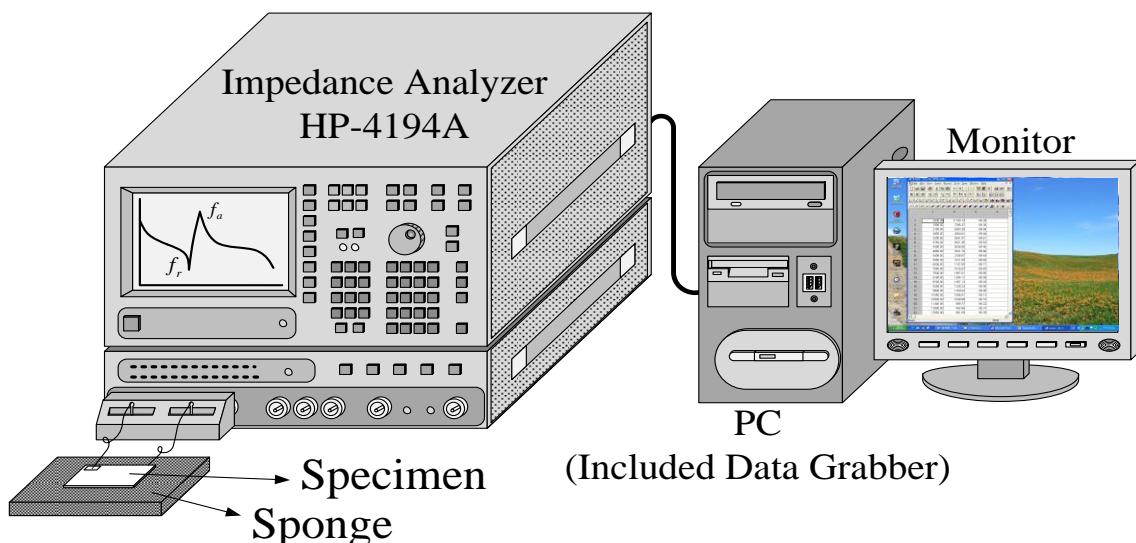


圖 2-9 阻抗分析儀量測示意圖

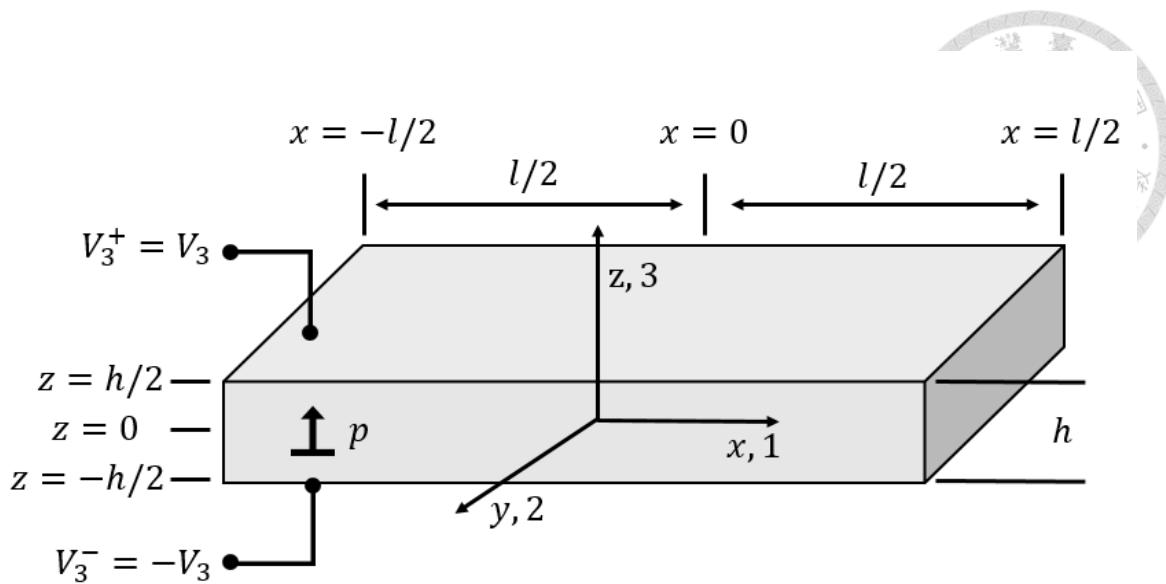


圖 2-10 棒形壓電材料 (d_{31} 型或 d_{32} 型) 示意圖

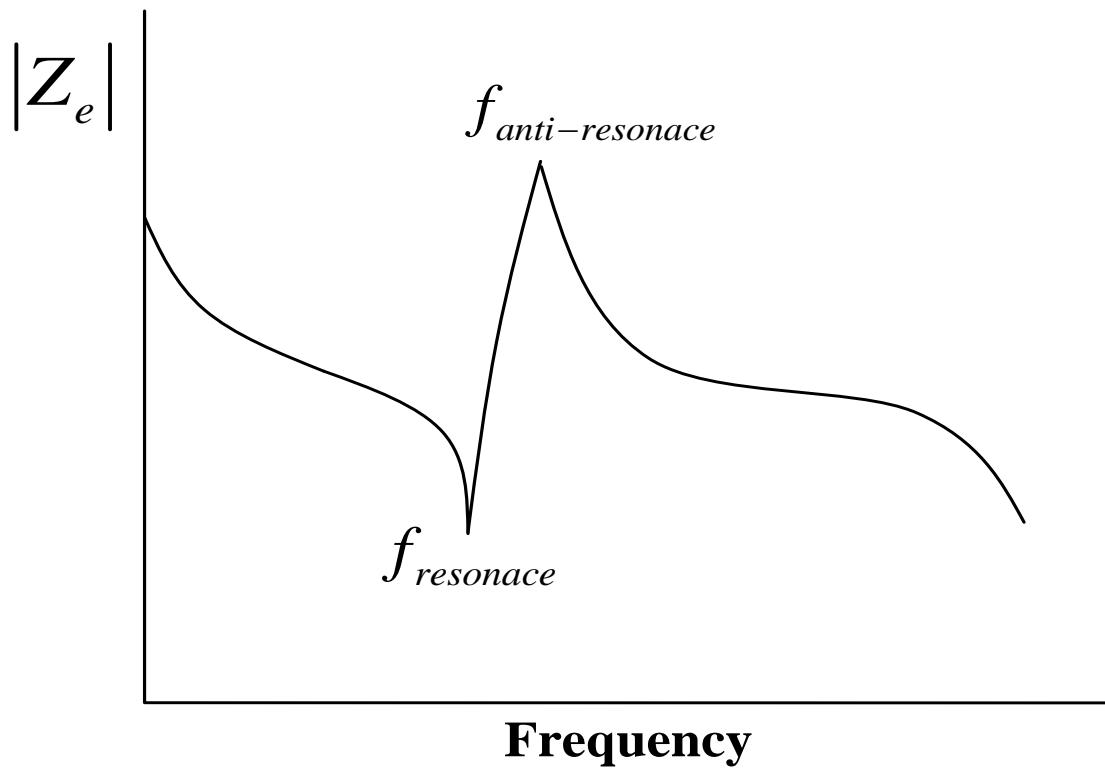


圖 2-11 壓電材料在特定共振頻率範圍內的頻率阻抗曲線



2.4 無響室量測

無響室量測 (Anechoic Room)，為模擬理想無窮遠的聲場環境，在環境內周圍設有吸音結構材料，使無響室達到接近完全無反射的自由音場，並利用麥克風測量聲壓，如圖 2-12 所示，無響室也稱為 Anechoic Chamber，本研究後續會以 Chamber 作為無響室量測結果的簡稱。規範採用音響工程協會(Audio Engineering Society, Inc.) 發行 AES2-1984 (r2003)標準方法，使用障板規格是 1650×1350 [mm]，如圖 2-13 所示；麥克風規格為 4191 1/2-inch (12.7-mm) free-field microphone (200 V polarization with Type 2669-C preamplifier), 3-40k (Hz)動態頻率範圍，製造商為 Brüel & Kjaer Sound & Vibration Measurement A/S., Naerum, Denmark。無響室的最低截止頻率是 80Hz (根據 ISO 3745 和 ANSI 12.35 測試標準)，測試環境室溫是 15 至 35 °C，相對溼度在 30% 至 70% 之間。

本研究量測方式是將聲學元件固定於障板上，障板規格如下圖 2-13 所示，並使其與麥克風水平量測距離為 10 cm，給定 1/12 八音帶的 20 至 20000Hz 掃頻訊號後，經由快速傅立葉轉換可以獲得對應之聲壓頻率響應曲線，實際架設如圖 2-14 所示。

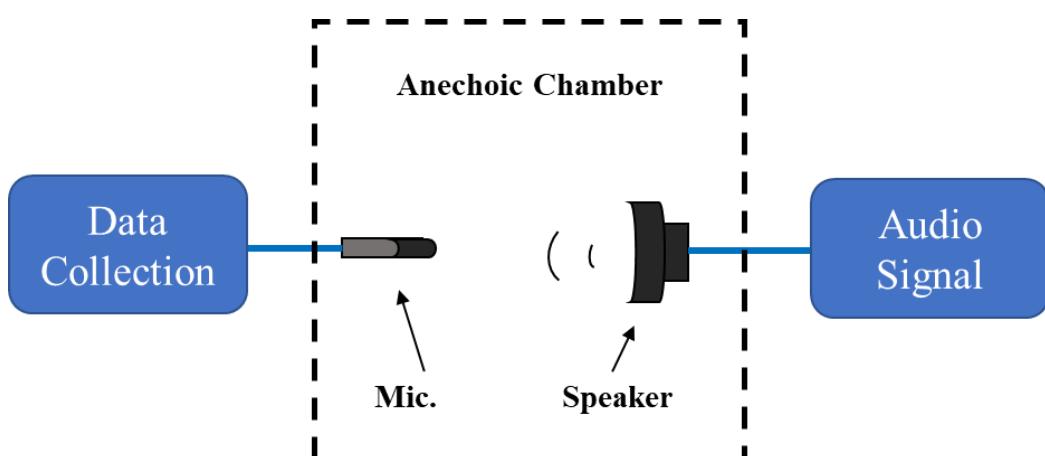


圖 2-12 無響室測量示意圖(虛線部分為無響室區域)

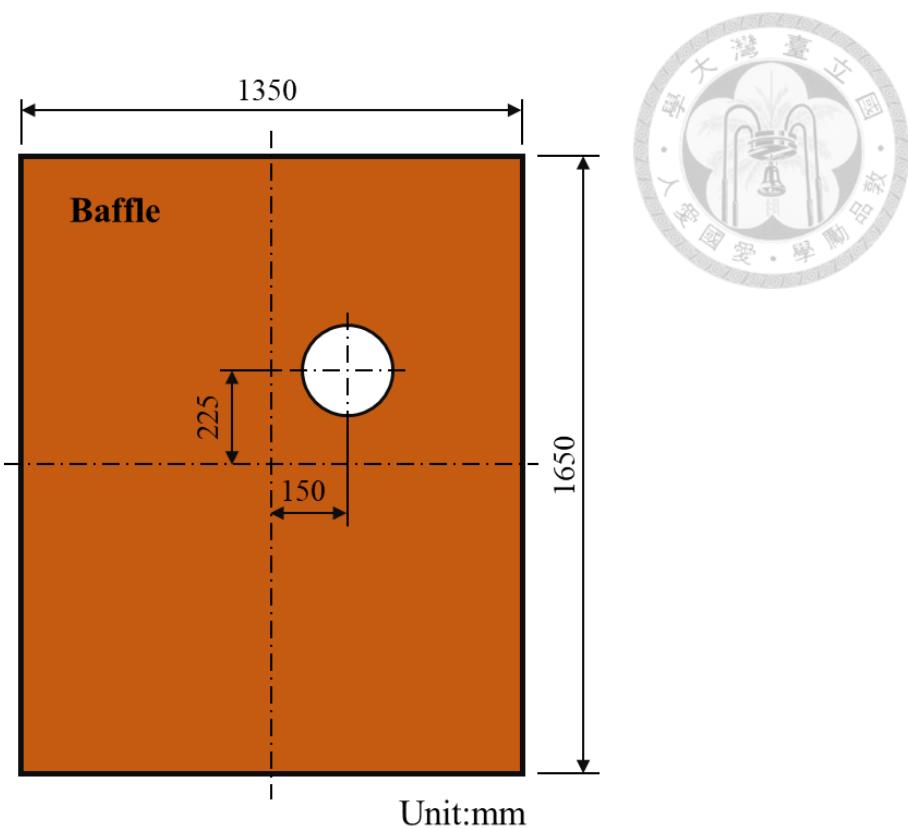


圖 2-13 障板規格示意圖(AES2-1984 r2003 標準規範)



圖 2-14 無響室實際量測圖



2.5 全域量測儀器介紹

全域式振動量測可以幫助我們瞭解待測物表面的振動情形，透過振動的模態驗證其面外方向的共振頻率，也能避免單點量測時容易受節線影響導致共振頻率誤判的情形發生。此外，全域式振動量測技術搭配聲學理論解析，也能進一步由待測物表面的振動情形，推估出其聲壓大小，將振動量測擴展至聲學領域，因此全域的振動量測技術很有發展的必要性。

為了將 2.1 節所介紹的單點式雷射都卜勒振動儀擴展至全域式，本研究分別透過兩種不同方式來達成目的，其一是龍門位移平台，其二是微動振鏡組。

2.5.1 龍門位移平台

龍門位移平台如圖 2-15 所示，為一個類似 3D 列印機結構的機器，將 LDV 透過雷射頭底下鎖孔固定於平台上，X 方向透過一組 42 步進馬達由皮帶驅動，Y 方向由兩組 57 步進馬達由螺桿傳動，Y 方向裝設兩組馬達的原因為 LDV 本身重量高達 3.4 公斤，Y 軸兩邊各裝設一個馬達可以避免單邊受力不均，增加平台的使用年限及使用時的穩定性。其量測範圍及規格如下表 2-2 所示。在量測時，會將待測物固定於平台前方，控制龍門平台帶著 LDV 進行 X、Y 方向的移動，達成全域量測的目的。

相關規格如下表 2-2 所示，包含 X、Y 行程、馬達種類、驅動方式、控制韌體、移動速度等。值得一提的是，由於 LDV 較重，為了量測時移動的穩定性及本身馬達的扭力限制，龍門平台設計的移動速度並不快，因此所需要的量測時間會較長，其中 X 方向移動速度為 Y 方向的十倍，因此後續實際量測時會利用類似旅行商問題的概念，示意圖如圖 2-16，要求為找到經過所有散布點的最短距離，實際做法會先計算離平台當下最近的一個量測布點，其中 Y 方向距離的權重為 X 方向的十倍，並設定以該點為下一個量測目標點，利用這種方式得以最大限度地降低量測所需的移動時間；此外，龍門平台控制板(Arduino Mega 2560)裝載的韌體與一般市售之 3D 列印機相同，為 Marlin_Taiwan，控制方法於 3.1.1 節中會詳細介紹。



表 2-2 龍門平台規格

| | |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| X-axis limit | 450 mm |
| X-Motor | One step motor (belt drive) (42BYGHW609) |
| X-Speed | 10 mm/sec |
| Y-axis limit | 300 mm |
| Y-Motor | Two step motors (screw drive) (57BYGH56) |
| Y-Speed | 1 mm/sec |
| Accuracy | 0.1 mm |
| Load | 10 kg |
| Control panel | 1. Arduino Mega 2560 2. Ramps 1.4 3. Motor drive A4988 (Same as 3D Print) |
| Firmware | Marlin_Taiwan |

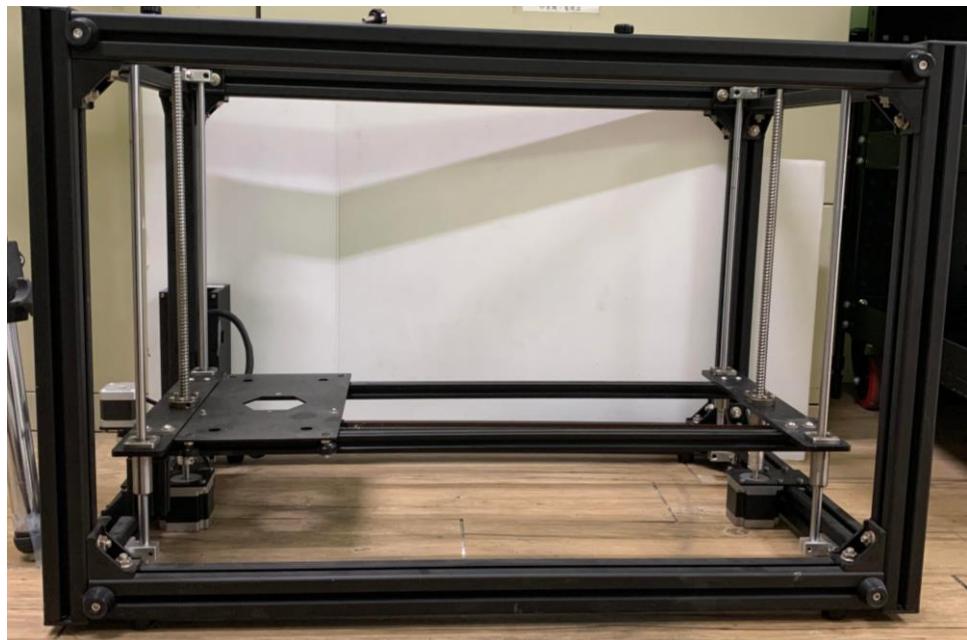
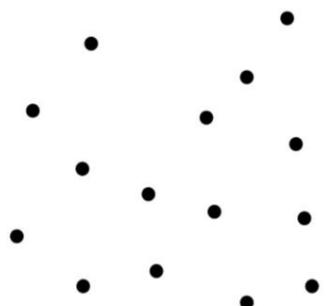
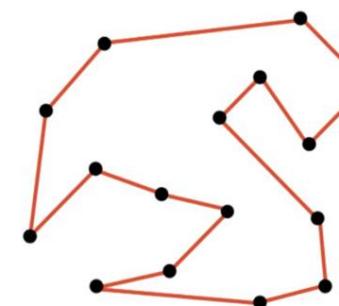


圖 2-15 龍門平台照片



Scatter X, Y Points



Optimal Route

圖 2-16 旅行商問題

2.5.2 微動振鏡組

微動振鏡組如圖 2-17 所示，由 Raylase 公司出產，型號為: Miniscan III，為兩面反射面鏡並分別以步進馬達傳動的系統，在業界上常用於雷射雕刻領域，反射雷射光以加工工件表面。在本研究中將微動振鏡固定於 LDV 雷射頭正前方，以 LabVIEW 控制馬達轉動的角度，一面反射鏡使得反射後的雷射朝 X 方向移動，另一面則朝 Y 方向，如此可以自由地將雷射移動至待測物上任一點。



圖 2-17 微動振鏡系統



在實際使用中，LDV 會透過漫反射的方式接收到反射回來的雷射光，若鏡組轉動的角度越大，所接收到的反射光強度就會越低，因而影響 LDV 的量測能力，因此在使用上會盡可能地將 LDV 雷射頭置放於鏡組正前方，並且與鏡組的雷射入射孔盡可能地貼近，以縮短雷射的行程，增加 LDV 接收到的反射訊號強度，其轉動範圍及相關規格列於下表 2-3。鏡片反射率最佳的區域為光波長為 1064 nm 時，與業界上用來進行雷射雕刻的雷射波長相符，雖然與 LDV 本身的雷射波長 633 nm 有所出入，但在實際與 LDV 結合使用上仍能保持不錯的反射率，未來研究可以選擇將反射面鏡表面鍍銀，提升鏡組於 633 nm 處的反射率。

鏡組最大的優勢是轉動速度很快，高達 85 rad/sec，相當於一秒可以轉約十四圈，利用此優勢可以改善龍門平台移動速度較慢的缺點，增加系統的量測效率。

表 2-3 微動振鏡系統規格表

| | |
|-------------------|--------------------------------------------|
| Max rotate angle | ±22.53° |
| Resolution | 0.000687° |
| Rotate Speed | 85 rad/sec |
| Mirror Wavelength | 1064 nm |
| Firmware | MarkingMate_2.7A ActiveX Control (.ocx) |

第三章 雷射都卜勒之全域振動量測系統

本章節透過 2.4 節中介紹的兩種全域量測儀器，結合 LDV、訊號產生器、訊號擷取儀器於同一控制系統中，實現全自動化的振動量測系統。首先介紹龍門平台系統，此系統透過 MATLAB 或 LabVIEW 兩種程式語言擇一，控制上述儀器完成自動化量測的目的。接著介紹微動振鏡系統，此系統使用 LabVIEW 為程式語言整合上述儀器於同一系統中。本章的最後會比較這兩個系統，並分析其優缺點。

本研究主要所用到的儀器通訊方式為以下兩種，串行通訊方式: RS-232 及並行通訊方式: GPIB。

RS-232 (Recommended Standard 232)：是一種串行通信的標準，它定義了串行通信接口的電氣和功能特性。它於 1962 年由電子工業協會 (EIA) 首次引入，並成為連接各種設備和計算機系統的廣泛使用的標準。RS-232 通常用於計算機和外部設備之間的通信，例如數據機、打印機、條碼掃描儀和串行控制儀器。它提供了一種在相對短距離上以串行方式傳輸數據的簡單可靠的方法。RS-232 標準規定了串行通信接口的電壓水平、信號定時和連接器。本研究選用 RS-232 接腳是 9 pin 的形式，示意圖如下圖 3-1，定義了使用具有一條傳輸線(TXD)、一條接收線(RXD)和一個共同地線(GND)連接的串行電纜。該標準還規定了各種控制信號，例如用於流量控制的握手線 (RTS)，以及用於設備狀態的數據終端就緒 (DTR) 和數據集就緒 (DSR) 線。RS-232 通信通常以相對較低的數據速率運行，支持異步通信，其中數據以單個字節傳輸，並使用起始位和停止位來劃分數據。該標準定義了各種數據格式，例如數據位數、奇偶校驗和停止位，以實現數據傳輸的靈活性。本研究將 RS-232 通訊方式用於龍門平台移動、示波器接收訊號及 LDV 雷射端，控制 LDV 雷射端的聚焦情形。



RS232 Pinout

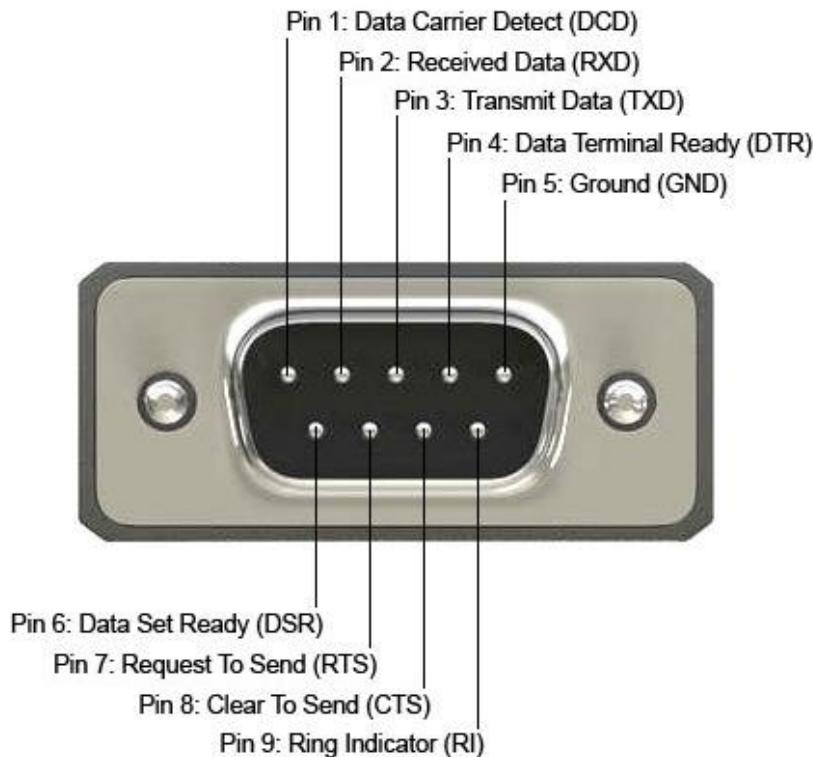


圖 3-1 RS-232 腳位

GPIB (General Purpose Interface Bus)，也被稱為 IEEE-488，是一種常用的數據總線標準，用於連接測量和控制儀器，它是一種並行通信介面，一次可以傳輸多筆資料。在 GPIB 系統中，使用的電壓水平是差分信號，即信號是基於兩個相對電位的差值來表示的。這種差分信號傳輸方式可以提供更好的抗干擾性能和信號完整性。GPIB 最初於 1965 年開發，並由 IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) 標準化。GPIB 提供了一種可靠且高速的數據傳輸方式，使測量和控制儀器之間可以進行快速溝通。它通常用於實驗室、測試系統和工業自動化等應用中。GPIB 的接口示意圖如下圖 3-2，基本組成包括一個主機（通常是控制計算機）和多個從屬儀器（例如示波器、信號產生器、數位多用表等）。它們通過 GPIB 電纜連接，並使用標準化的連接器進行物理連接。本研究中將 GPIB 通訊方式用在與訊號產生器的通訊上，控制訊號產生器輸出訊號的情形。

綜合上述，將兩者通訊方式的優缺點比較整理後如下表 3-1 所示。

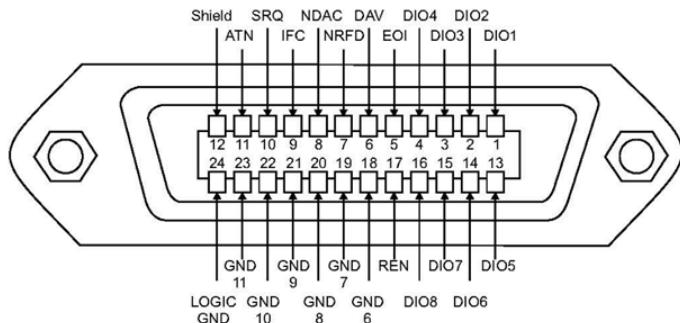


圖 3-2 GPIB 腳位

表 3-1 通訊方式比較表

| | RS-232 | GPIB Interface |
|------|-----------------|----------------|
| 傳輸距離 | 約 3 公尺 | 約 20 公尺 |
| 傳輸方式 | 串行通訊(Serial) | 並行通訊(Parallel) |
| 傳輸速度 | 700 samples/sec | 1M samples/sec |
| 儀器數量 | 1 per cable | 31 per cable |
| 價格 | 低 | 高 |

3.1 龍門平台系統

龍門平台系統整合了包含 LDV、龍門位移平台、示波器 InfiniiVision DSOX2004A(圖 3-3)、訊號產生器 Agilent 33210A(圖 3-4)、網路攝影機 WebCam 於同一系統中。

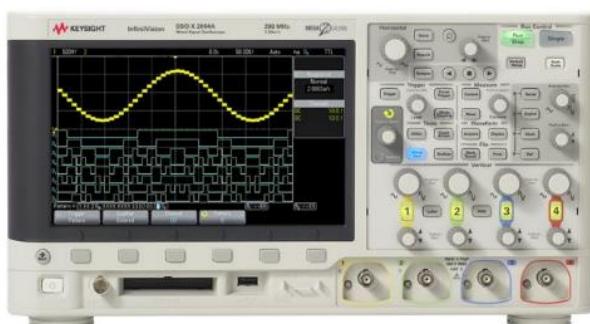


圖 3-3 InfiniiVision DSOX2004A 示波器



圖 3-4 Agilent-33210A 訊號產生器

3.1.1 控制方式

以下分別介紹各儀器的控制方式：龍門平台內建韌體為 Marlin_Taiwan，與市售 3D 列印機相同，本研究透過 RS-232 通訊協定，由 PC 端透過程式介面發送 G-Code 指令控制平台移動至特定點；訊號產生器透過 GPIB 通訊協定，於 PC 端下載 GPIB 驅動及函式庫，透過程式介面發送指令使訊號產生器輸出特定頻率及電壓之訊號以激振待測物；示波器透過 RS-232 通訊協定，利用程式介面發送指令至示波器，記錄此時 LDV 量測到的速度訊號，後發送電壓值及頻率值回 PC 端。

3.1.2 量測流程

根據上述控制方式，可以成功地將所有實驗儀器整合於同一 PC 端。以下設計了一套龍門平台系統的量測流程圖如下圖 3-5。

首先，會先透過 RS-232 通訊協定由 MATLAB (or LabVIEW) 端發送 G-Code 指令：「G1X 座標 Y 座標」，讓平台移動至特定座標點；再由 GPIB 傳輸方式發送指令使訊號產生器輸出特定頻率及電壓的交流訊號以激振試片；後再將量測到的速度訊號由示波器進行記錄，若訊號的頻率或電壓超過示波器顯示範圍，或過小使得示波器視窗無法準確判斷，便會透過程式自動化判斷的方式，隨著量測訊號自動調整示波器時間軸及電壓軸範圍，重新記錄，直到符合量測訊號大小；最後會將訊號整理後發送回 MATLAB (or LabVIEW) 端，以此流程完成一個點的量測，藉由重複這個循環完成所有點及頻率的量測。

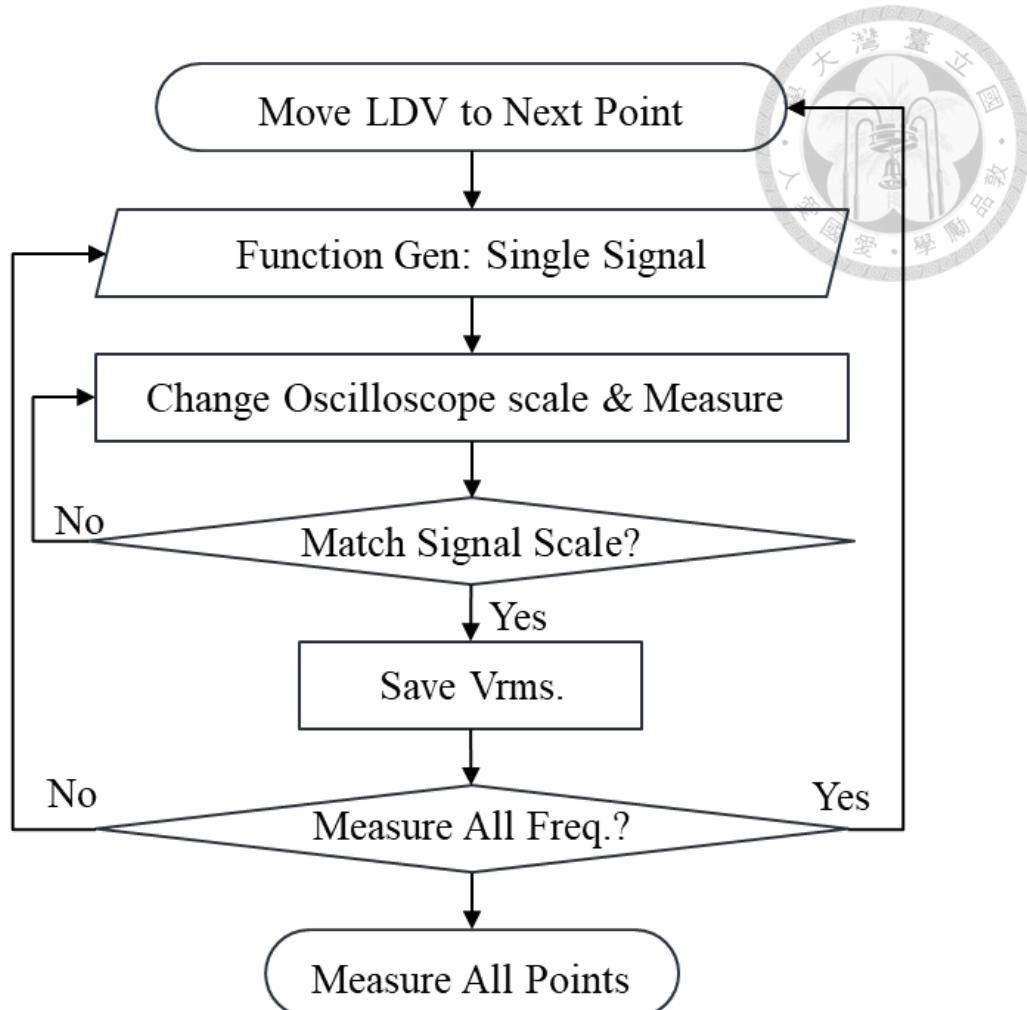


圖 3-5 龍門平台系統量測流程圖

3.1.3 量測 GUI 介面

為了方便量測參數控制及即時監控，我利用 MATLAB 及 LabVIEW 分別撰寫了一套圖形使用者介面(Graphical User Interface, GUI)，如下圖 3-6 為 MATLAB GUI 、下圖 3-7 為 LabVIEW GUI，兩種控制語言最大的差別為 LabVIEW 在控制領域及數據採集上效率較高，並與資料擷取系統(NI-DAQ)結合性較佳，而 MATLAB 則在科學計算和數據分析上較有優勢。

程式介面中包含了網路攝影機(Webcam)的即時影像，龍門平台移動及連線控制功能、布點選擇功能、及各種量測模式，後續會就布點方式(3.3.1 節)及量測模式(3.3.2 節)詳細介紹。

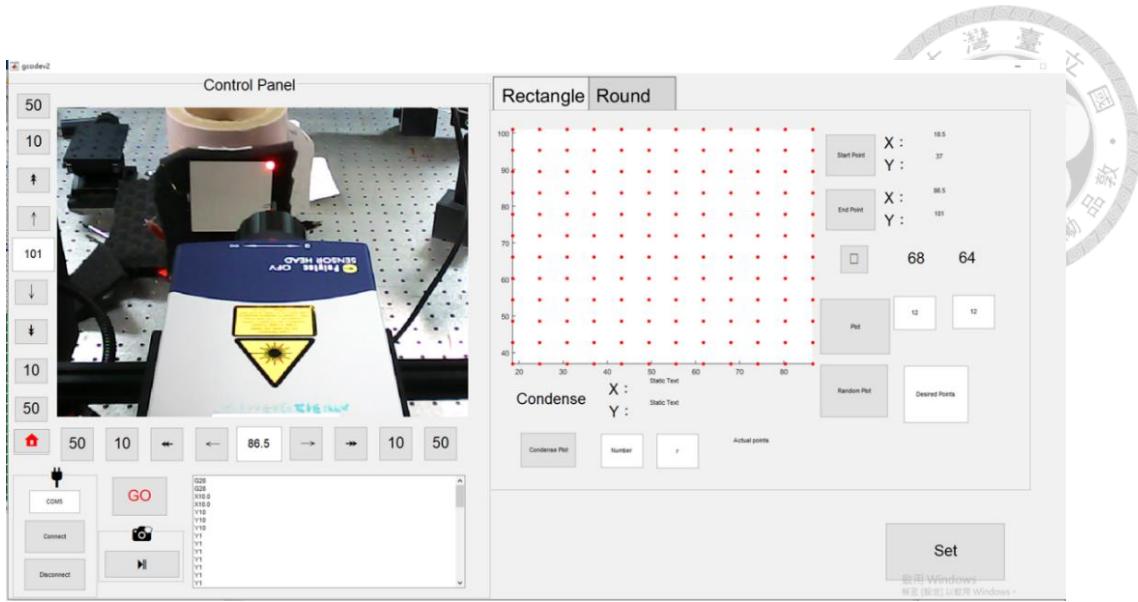


圖 3-6 MATLAB 龍門平台系統 GUI 介面

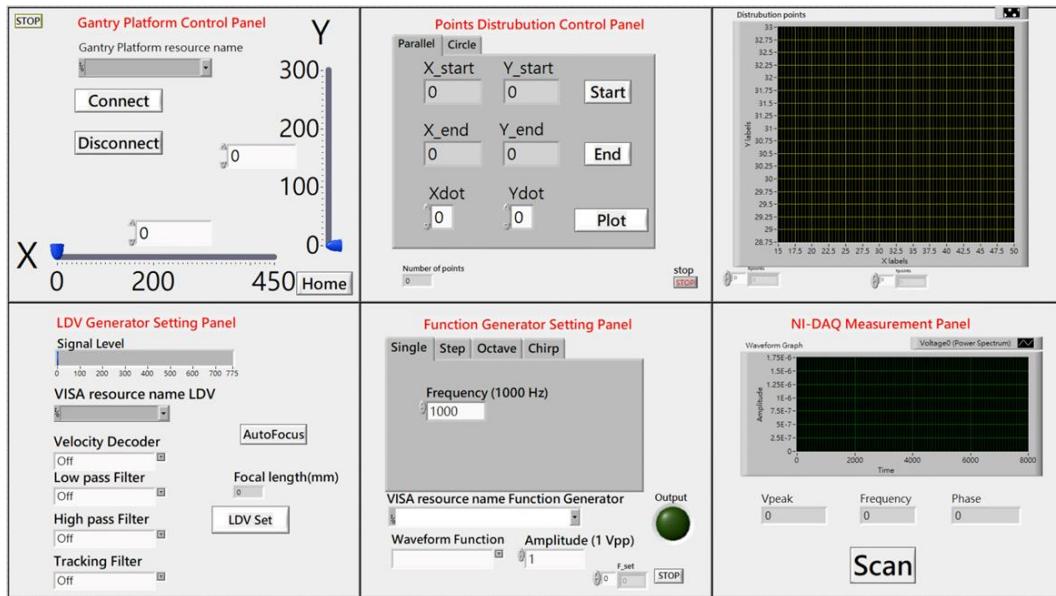


圖 3-7 LabVIEW 龍門平台系統 GUI 介面

3.1.4 龍門平台系統量測照片

如前述所介紹，拍攝實際量測中的龍門平台系統照片如圖 3-8，可以看出實際使用龍門平台量測時，雷射始終垂直入射於試片，因此反射光的強度會較高，得到的量測結果會較佳。運作中的儀器照片如圖 3-9，包含 LDV、龍門平台、壓電試片、示波器及訊號產生器。

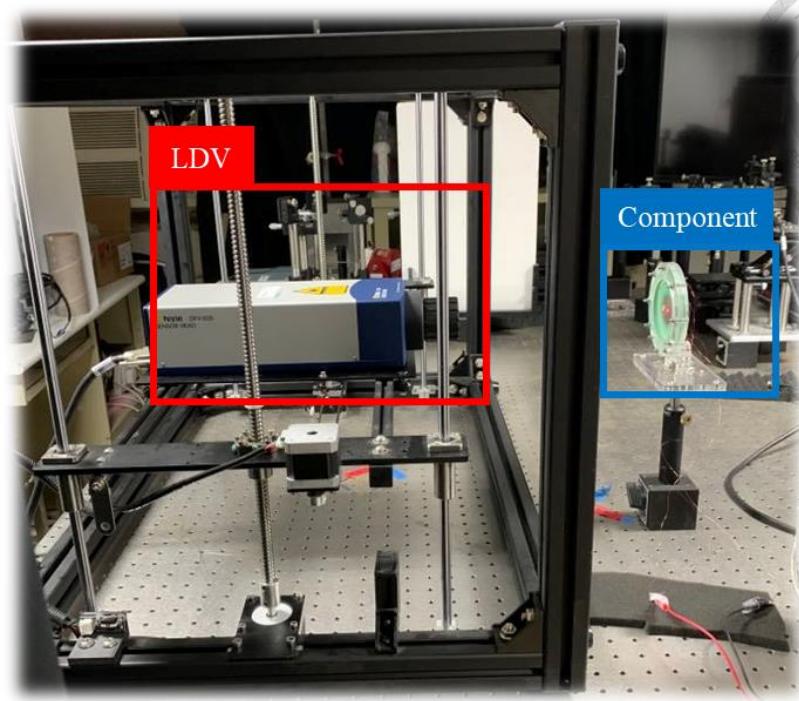


圖 3-8 龍門式量測系統照片-LDV 龍門平台

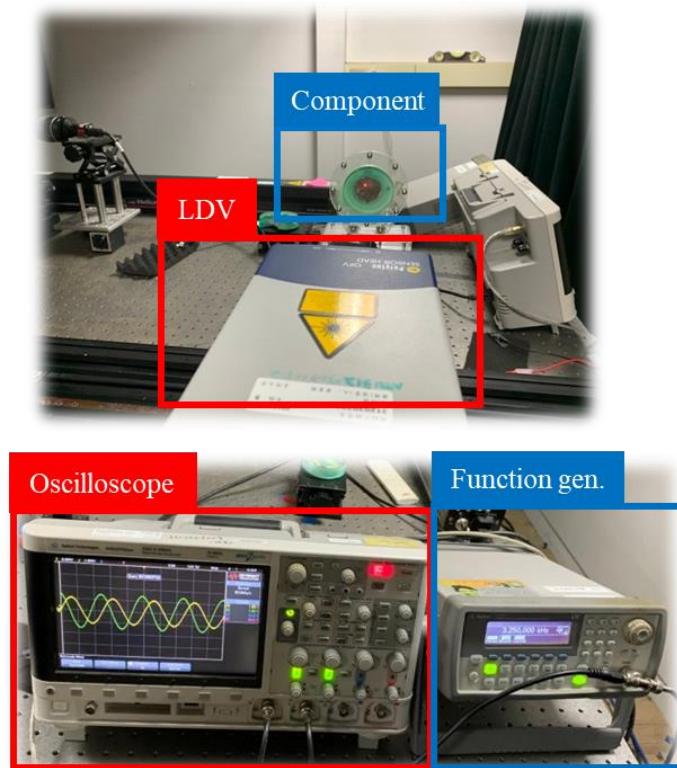


圖 3-9 龍門式量測系統照片-示波器、訊號產生器



3.2 微動振鏡系統

微動振鏡系統整合了包含 LDV、微動振鏡組、資料擷取系統、訊號產生器於同一系統。所選用的資料擷取系統為: NI-9234(圖 3-10) 或 NI-9775(圖 3-11)，也可由 3.1 節中示波器替代，兩款 NI-DAQ 規格的比較表如下表 3-2，與示波器的比較會詳述於 4.5 節中。NI-9234 有解析度較高的優勢，而 NI-9775 則有與 LDV 輸出訊號相符合的電壓量測範圍(± 10 V)，並且有較高的取樣頻率(Sampling Frequency)，可以記錄較高頻的振動訊號，一次能記錄的取樣點數(Number of Sampling)較多。

所選用的訊號產生器: Agilent 33210A(圖 3-4)或 Agilent 33512B(圖 3-12)，兩者最主要的差異為訊號產生器 Agilent 33210A 只有一個輸出通道(Output Channel)，需要通過分壓頭轉接，而 Agilent 33512B 有兩個輸出通道，一個通道負責輸出電壓激振試片，另一個直接輸出至訊號擷取系統當參考訊號，如此則不會受到輸出兩端的分壓阻抗匹配狀況而影響輸出電壓的量值大小。



圖 3-10 NI-9234 資料擷取系統



圖 3-11 NI-9775 資料擷取系統



圖 3-12 Agilent-33512B 訊號產生器

表 3-2 資料擷取系統(NI-DAQ)規格比較表

| | NI-9234 | NI-9775 |
|------------------------------------|------------------|-------------------|
| 電壓(Voltage) | $\pm 5\text{ V}$ | $\pm 10\text{ V}$ |
| 最大擷取頻率 (Max Sampling Frequency) | 51200 Hz | 20 M Hz |
| 最大取樣點數 (Max Sampling Frequency) | 65536 points | 4194304 points |
| 解析度(Resolution) | 24 bits | 14 bits |
| 頻道數量(Channels) | 4 | 4 |

3.2.1 控制方式

控制方式與 3.1.1 節中介紹相似，微動振鏡組透過 ActiveX Control 的方式控制鏡組的轉動情形，示意圖如圖 3-13 所示，由 PC 端透過程式介面發送指令至 ActiveX Container: 鏡組控制器，型號為 UMC-4，內建韌體為興誠公司提供的 MarkingMate OCX 控制元件，用以控制鏡組反射面鏡的角度，轉至特定量測點；訊號產生器透過 GPIB 通訊協定，PC 端需下載 GPIB 驅動程式及其函式庫，由 PC 端透過程式介面發送指令使訊號產生器輸出特定頻率及電壓之訊號以激振待測物；NI-9234(或 NI-9775)負責接收 LDV 所量測到的速度訊號，透過 LabVIEW 中 DAQmx 的功能，設定其量測通道、擷取頻率及取樣點數，記錄後回傳量測數據至 LabVIEW。

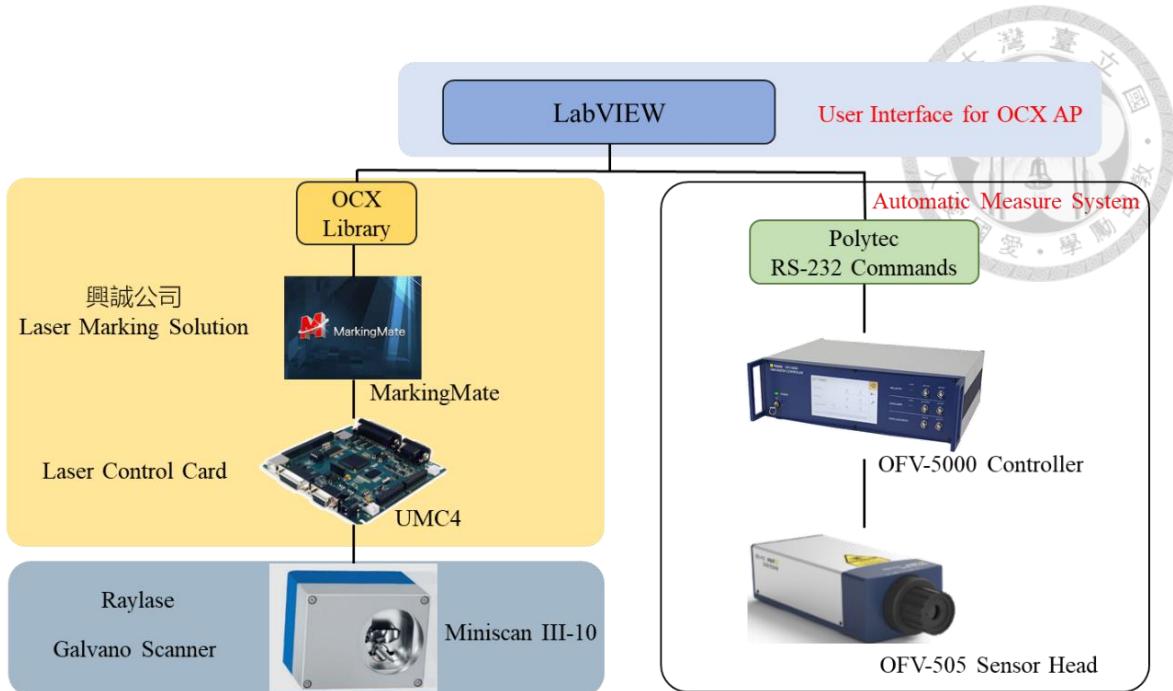


圖 3-13 ActiveX 控制示意圖

3.2.2 量測流程

根據 3.2.1 節的控制方式，可以成功地將上述儀器整合於同一 PC 端，而後根據功能需求分別發送所需的命令至儀器端。以下為本研究所設計之微動振鏡系統的量測流程圖如下圖 3-14。

首先，會利用 ActiveX Control 的方式由 LabVIEW 發送振鏡轉動函式：「*JumpTo(dx, dy)*」，讓鏡組反射雷射至待測點(*dx, dy*)；再利用 RS-232 通訊協定發送「*Start Autofocus*」指令至 OFV-5000 控制箱使 LDV 進行聚焦；隨後發送 GPIB 指令使訊號產生器產生特定頻率及電壓的交流訊號以激振待測物，本研究大多使用壓電試片；再將量測到的速度訊號由資料擷取系統 NI-9234 (or NI-9775)進行記錄整理後回傳至 LabVIEW 端，由 LabVIEW 記錄。以此方式完成一個點的速度量測，藉由重複此循環完成所有布點的速度量測。

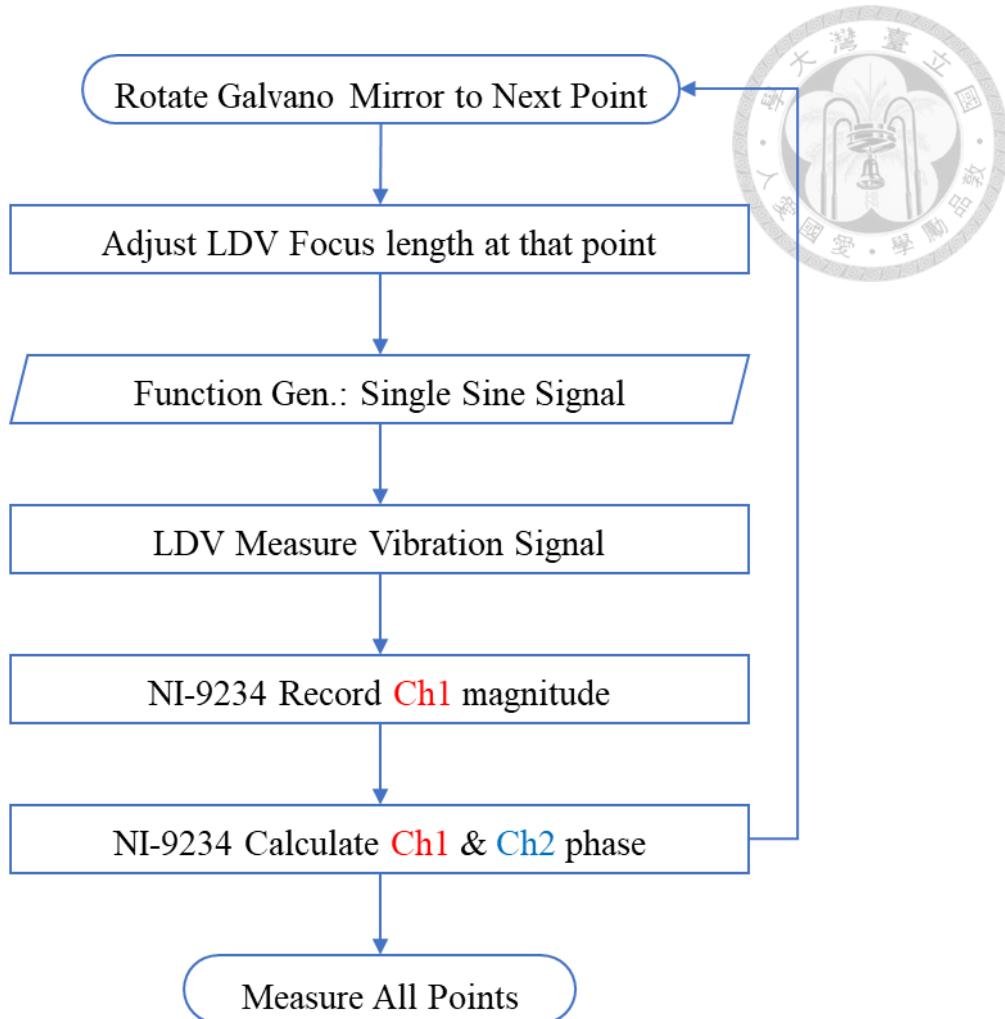


圖 3-14 微動振鏡系統量測流程圖

與前述 3.1.2 龍門平台量測系統的流程所不同的是，由於經過鏡組反射後的每個量測點，雷射光的路徑長會不同，因此每個點的最佳焦距會不同，需要在量測前對每一個點進行聚焦，運用的是 LDV 控制箱 OFV-5000 內建的 RS-232 指令：「*Start Autofocus*」，逐點進行對焦後記錄焦距，隨後在量測到該點時會選擇使用此焦距進行聚焦，如此可以確保量測到的反射訊號強度最高，量測資料會是最為準確的，示意圖如下圖 3-15 所示。

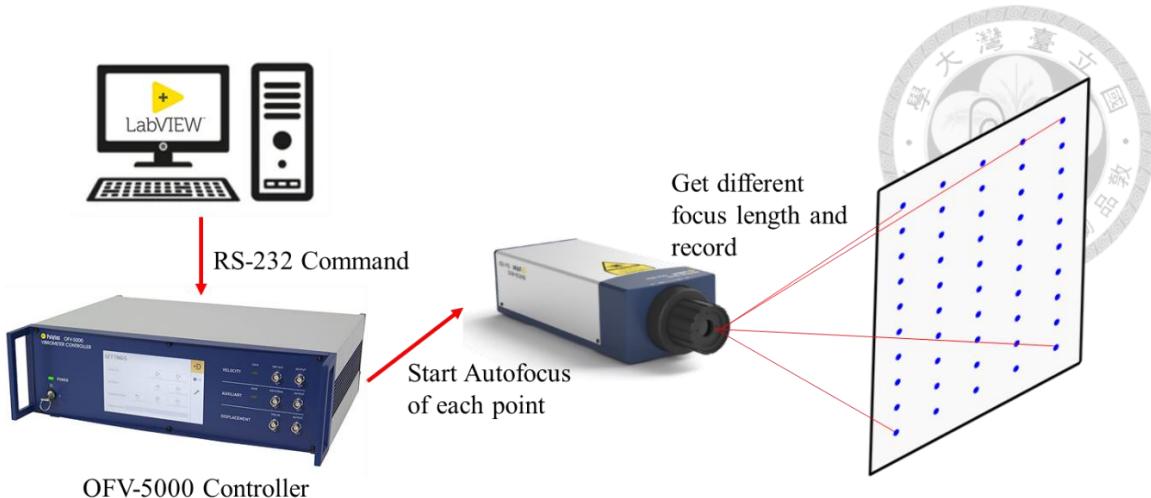


圖 3-15 微動振鏡量測系統聚焦示意圖

3.2.3 量測 GUI 介面

為了方便使用者操作此系統，本研究利用 LabVIEW 撰寫了一套圖形使用者介面，如下圖 3-16 為 LabVIEW GUI。本論文選擇使用 LabVIEW 的原因為：MarkingMate OCX 模組支援的程式語言有 LabVIEW、Visual Studio 2005-2015(Basic/C++/C#)、C++ builder，其中 LabVIEW 與資料擷取系統(NI-DAQ)的結合性最佳，因此選擇 LabVIEW 為控制程式語言。

GUI 介面中包含了微動振鏡組連線及轉動功能、布點選擇功能、及各種量測模式調整功能及 LDV 連線控制功能，後續會就布點方式(3.3.1 節)及量測模式(3.3.2 節)進行詳細介紹。

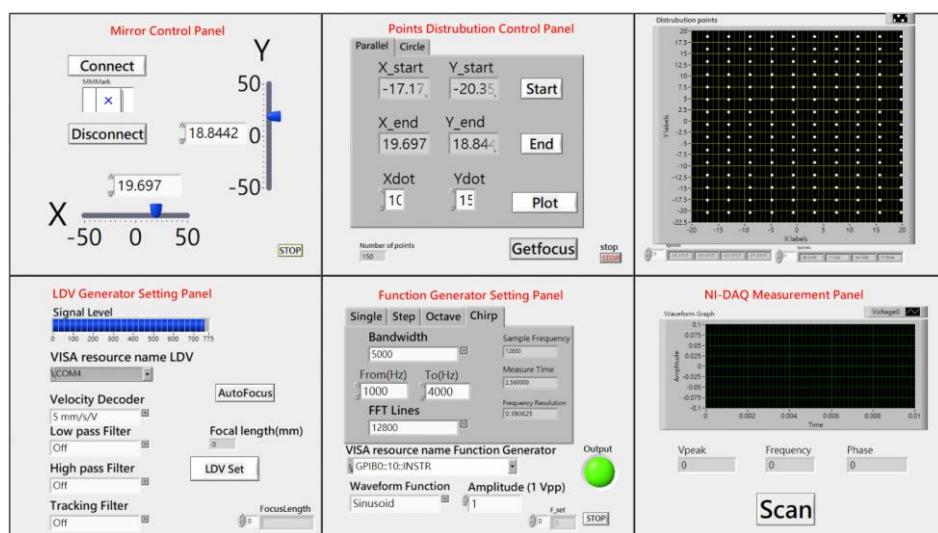


圖 3-16 微動振鏡量測系統 LabVIEW GUI



3.2.4 微動振鏡系統量測照片

由於微動振鏡組本身反射面鏡的光路設計關係，入射光與反射光會有 90° 的夾角，鏡組擺放的方式不同，掃描的方向也不一樣。因此可以分為向下方量測型式如圖 3-17、向側方量測型式如圖 3-18。

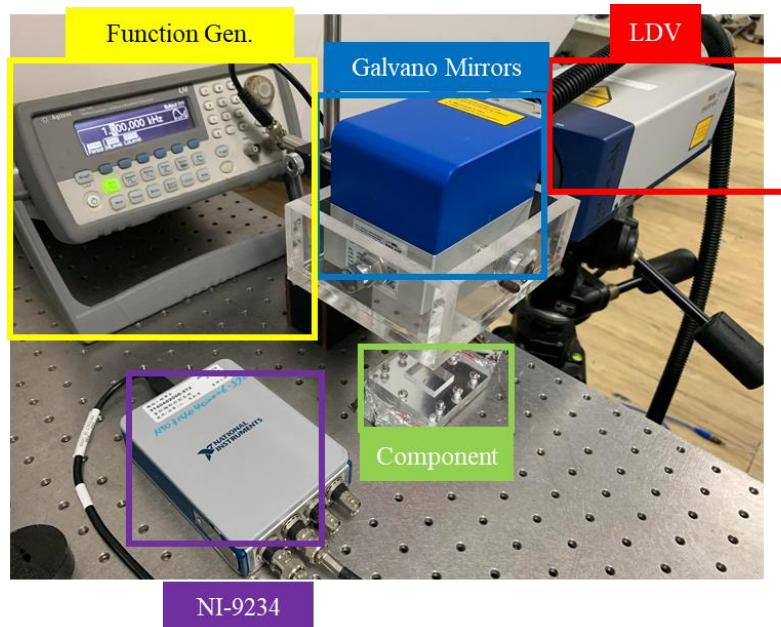


圖 3-17 微動振鏡系統向下方量測照片

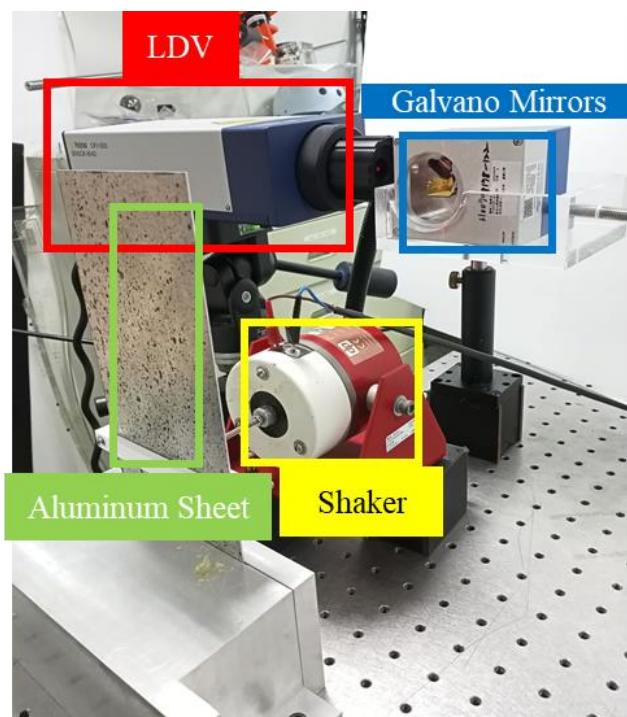


圖 3-18 微動振鏡系統向側方量測照片



3.3 量測參數選定

本節將詳細介紹如何使用該系統。在龍門平台連線上，會先選擇龍門平台實際連線的序列通信埠(COM)進行連線；之後再利用 Home 按鈕將平台進行歸零；根據試片形狀選擇合適邊界位置及布點模式；而微動振鏡組連線方法也類似，需要選擇相對應的 ActiveX Container 進行連線，後根據試片形狀選擇合適的邊界座標及布點模式。布點完成後選擇所想要進行的量測模式，選擇完畢後便可按下 Scan 按鈕進行量測。

3.3.1 布點模式

決定完起始、終止或是邊界位置後，便可以選擇布點模式，分為以下三種：矩形規律布點、圓形規律布點、及全隨機布點。分別情況如下表 3-3 所示，除此之外，也可以根據試片情況選擇局部加密的功能，在特定區域上進行更精確的量測。

表 3-3 SLDV 布點類型

| | Symmetry Distributed | Local Condense Distributed | Random Distributed |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Rectangle | A 5x5 grid of blue dots representing symmetry distributed points on a rectangular area. | A 5x5 grid of blue dots with a dense cluster in the center, representing local condense distributed points. | A 5x5 grid of blue dots scattered randomly across the area, representing random distributed points. |
| Circle | A circular grid of blue dots representing symmetry distributed points on a circular area. | A circular grid of blue dots with a dense cluster in the center, representing local condense distributed points. | A circular grid of blue dots scattered randomly across the area, representing random distributed points. |



3.3.2 量測模式

決定完布點情形後，接著進入量測模式設定的頁面，量測模式可以區分為以下四種，分別為單頻量測、掃頻量測、聲學八音帶量測及 Chirp 訊號量測。

單頻量測可以選擇想要的波型，通常會使用 Single Sine 訊號，並選擇合適的電壓及頻率後量測。

掃頻量測可以選擇電壓、起始頻率、步進頻率、及終止頻率，在每量測完前一頻率的訊號後，便會自動產生相隔步進頻率的訊號以激振試片，直到頻率達到終止頻率的範圍。

聲學掃頻方式與掃頻量測方法類似，透過選擇八音帶的模式及起始、終止頻率，在前一頻率訊號量測結束後，會自動進行下一頻率的量測，後續於 5.1.2 節中會詳細介紹。

最後介紹 Chirp 訊號量測，透過在短時間內線性或指數型增加輸出訊號的頻率，達成在短時間內掃頻量測的目的，後續於 6.1 節中會詳細介紹。

第四章 量測資料後處理與振動特性分析



介紹完前述 SLDV 量測系統後，本章節將介紹量測資料後處理的方式。其中會就相位處理、量測資料優化及繪圖方面逐一介紹。

完成一次 SLDV 量測後，會得到一筆量測資料，如下表 4-1 所示，共有十個欄位。一至二欄為訊號產生器的設定資料，三至五欄為 LDV 速度訊號(Ch1)的量測資料，六至七欄為訊號產生器(Ch2)的輸入資料，八至九欄為量測點的 X、Y 座標，第十欄為相位差。後續利用第八、九欄量測點的 X、Y 座標及第五欄的速度訊號 V_{rms} 值，搭配第十欄相位差，便可以成功繪出該頻率下的振動模態圖。

表 4-1 SLDV 系統量測資料

| Function Gen. Setting | | Channel 1 Output | | Channel 2 Output | | X、Y Labels | | Ch1, Ch2 Phase | |
|--------------------------|--------------------|---------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-----------------|-------------------|-------------------|
| Volt(V) FunGen | Freq(Hz) FunGen | Freq(Hz) Scope | V _{mean} (V) Scope | V _{rms} (V) Scope | V _{mean} (V) Scope | V _{rms} (V) Scope | Xpoint. (mm) | Ypoint. (mm) | Phase (degree) |
| 0.5 | 2070 | 2069.17 | -0.00771 | 0.0461 | -0.04 | 0.337 | 52 | 40 | -69.54 |
| 0.5 | 2070 | 2069.99 | -0.00554 | 0.0418 | -0.0384 | 0.335 | 55.4 | 45.8 | -69.03 |
| 0.5 | 2070 | 2067.97 | -0.00603 | 0.0411 | -0.0399 | 0.337 | 48.6 | 45.8 | -70.27 |
| 0.5 | 2070 | 2071.33 | -0.00612 | 0.0407 | -0.0397 | 0.336 | 45.2 | 40 | -70.59 |
| 0.5 | 2070 | 2072.25 | -0.0073 | 0.0412 | -0.0388 | 0.336 | 48.6 | 34.1 | -70.5 |
| 0.5 | 2070 | 2074.75 | -0.00654 | 0.0417 | -0.0407 | 0.337 | 55.4 | 34.1 | -72.08 |
| 0.5 | 2070 | 2071.35 | -0.00545 | 0.0422 | -0.0406 | 0.337 | 58.8 | 40 | -72.24 |
| 0.5 | 2070 | 2068.53 | -0.00659 | 0.0303 | -0.0388 | 0.335 | 63.8 | 46.8 | -71.56 |
| 0.5 | 2070 | 2071.24 | -0.00484 | 0.0295 | -0.0403 | 0.337 | 58.8 | 51.8 | -72.47 |
| 0.5 | 2070 | 2071.51 | -0.00462 | 0.0289 | -0.0405 | 0.336 | 52 | 53.6 | -72.57 |
| 0.5 | 2070 | 2070.15 | -0.00514 | 0.0284 | -0.0394 | 0.336 | 45.2 | 51.8 | -73.25 |
| 0.5 | 2070 | 2070.51 | -0.00571 | 0.0282 | -0.0404 | 0.337 | 40.2 | 46.8 | -74.2 |
| 0.5 | 2070 | 2070.02 | -0.00571 | 0.0276 | -0.0413 | 0.336 | 38.4 | 40 | -71.71 |
| 0.5 | 2070 | 2068.11 | -0.00501 | 0.0274 | -0.0394 | 0.335 | 40.2 | 33.2 | -69.45 |
| 0.5 | 2070 | 2073.52 | -0.0051 | 0.0277 | -0.0417 | 0.337 | 45.2 | 28.2 | -72.86 |



4.1 量測資料後處理

LDV 輸出的訊號為交流訊號(AC Signal)，橫軸單位為電壓，需要乘以解析度參數(Sensitivity)後才能換算為速度，換算公式如(4-1)。Polytec OFV-5000 控制箱提供的解析度參數選擇有: 5、20、100、200、500、1000 mm/sec/V，本研究由於大多應用於壓電振動量測上，本身振動量值較小，因此大多選擇 5 mm/sec/V 為解析度。

$$Velocity = Voltage \times Sensitivity \quad (4-1)$$

在量測時，會希望 LDV 雷射為垂直入射至量測點，如此會有最佳的反射訊號強度，所得到的結果會最為精準，本研究開發的 SLDV 龍門平台系統便是依照垂直量測方式而設計。而在 SLDV 微動振鏡系統量測時，會透過控制鏡組轉動角度以改變雷射的量測位置，雷射經過鏡組反射後，便不會以垂直方式入射試片，示意圖如下圖 4-1，如此量測到的速度訊號，會與實際訊號有個夾角 θ 的關係，在後處理時需要根據(4-2)式進行修正，式中的 dx, dy 為鏡組的內建座標，175 mm 為此內建座標與實際座標的對應距離，若是鏡組與待測物的垂直距離不等於 175 mm，則需要等比例縮放 dx, dy ，以得到實驗狀況下的實際座標。

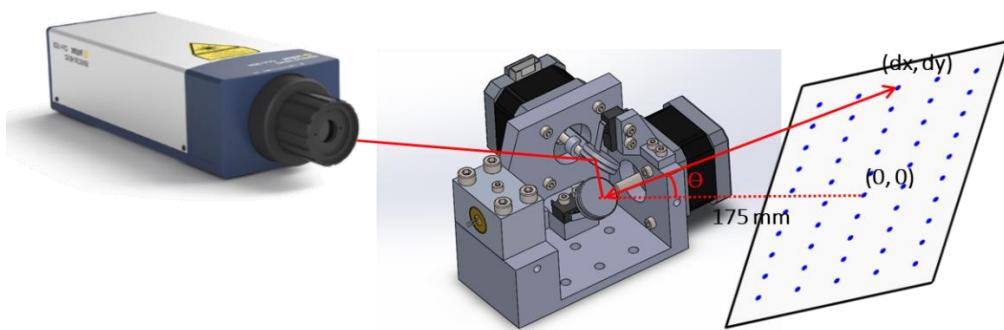


圖 4-1 鏡組量測之角度補償

$$\begin{aligned} V_{actual} &= V_{measure} \times \cos(\theta) \\ \cos(\theta) &= \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{dx^2 + dy^2}}{175^2}\right) \end{aligned} \quad (4-2)$$



4.2 相位處理

LDV 輸出的訊號為交流訊號(AC Signal)，週期性震盪的訊號本身並無正向及負向的分別，若直接以電壓值作圖會無法繪出量測點的正負振動情況，因此本節將導入相位判斷的方式，載入訊號產生器輸入的原始訊號，比較 LDV 量測訊號(Ch1)及原始激振訊號(Ch2)的相位差(Phase)，用以判斷試片的正負振動情形。

若試片頻率響應明顯，且 LDV 量測狀況良好，得到的速度資料將會是完整並連續的波形，訊號頻率會和訊號產生器的輸入訊號頻率相同。如此，示波器或是資料擷取系統(NI-DAQ)會有兩筆訊號輸入，且兩訊號皆是完整且相同頻率的波型。

隨後將就兩者訊號的相位差進行判斷，若兩個交流訊號為波峰對波峰、波谷對波谷的形式，則代表兩者相位差接近 0 度，此時的振動方向定義為正向，如下圖 4-2 所示。反之若為波峰對波谷的形式，則代表兩者相位差接近 180 度，此時的振動方向定義為負向，如下圖 4-3 所示。

如前述，在理想的量測情況下，輸入訊號(Ch1)及輸出訊號(Ch2)皆為完整的 SINE 波，兩者間的相位差能夠清楚地判斷，但當空間中有雜訊，或者量測點反射訊號不佳，會導致該點量測到的資料不佳，例如圖 4-4 所示，使得相位差(Phase)及電壓值(V_{rms})有所誤判，後續會就量測資料的優化方式進行介紹。

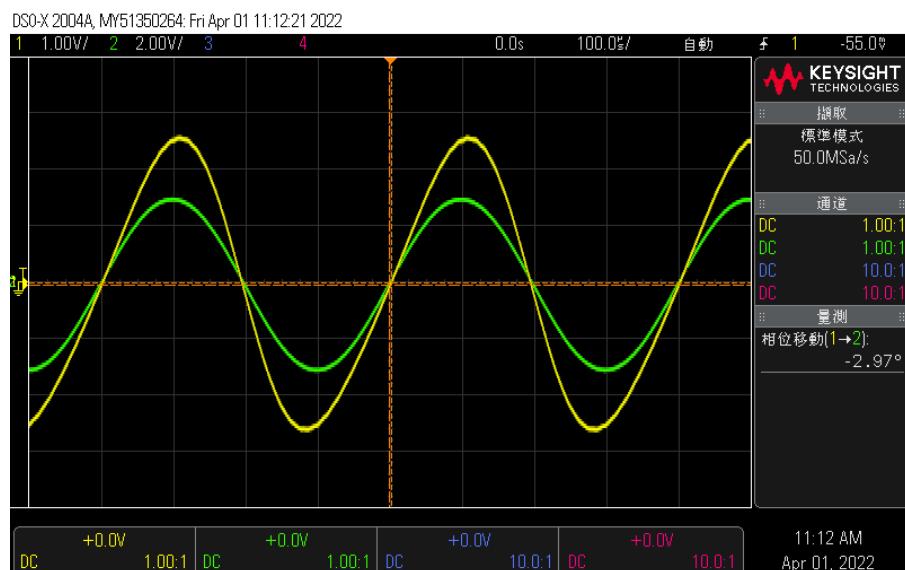


圖 4-2 正向振動方向之相位差

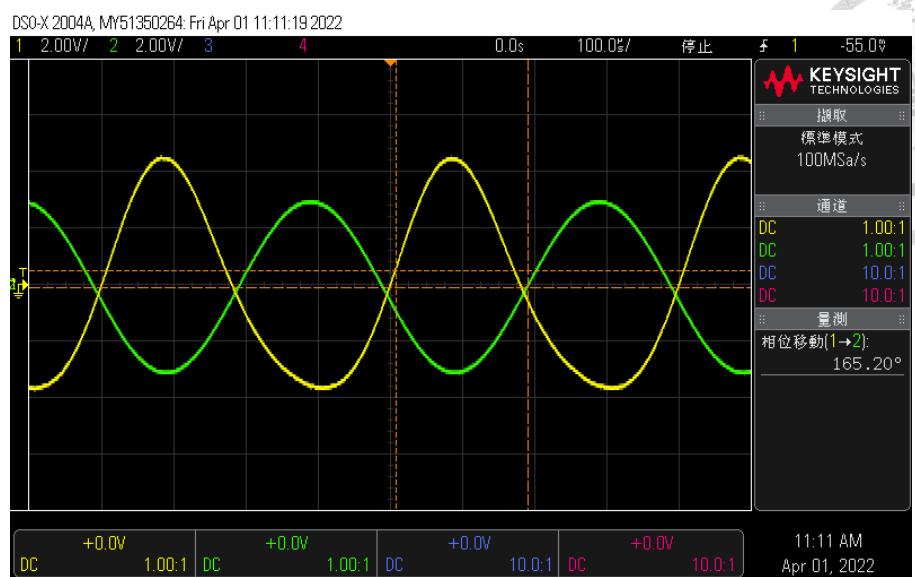


圖 4-3 反向振動方向之相位差

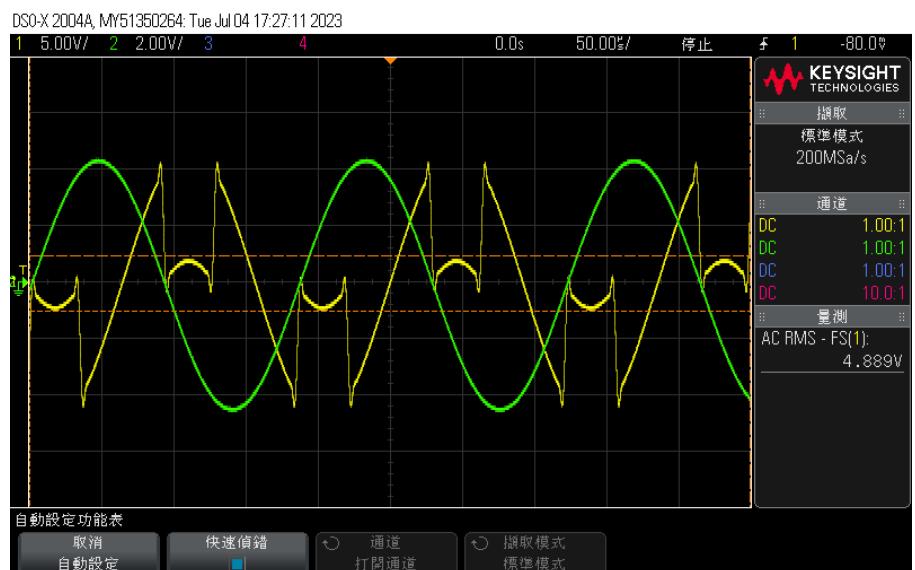


圖 4-4 不佳的量測訊號結果

4.3 量測資料優化及繪圖

優化量測資料的流程為全自動式的，將量測資料載入 MATLAB 繪圖時，會自動判斷量測不佳的點，優化後繪圖。補償不佳量測結果的方式有兩種，第一種可由頻率判斷，第二種由相位差判斷，若該點結果中兩個判斷法有一個不符合，則會由鄰近幾個符合判斷要求的量測點平均後代替該點的結果，藉由這個方式來優化全域量測結果。



4.3.1 頻率判斷

訊號產生器輸入的激振訊號及量測到振動訊號，兩者的頻率在理想量測狀態下是相近的，但若是 LDV 量測訊號不佳，如上圖 4-4 所示，可能會使得交流訊號之頻率產生誤判，影響量測值的電壓大小及相位差。補償時會先計算同一頻率下所有點的輸入頻率及量測頻率間的誤差，若大於 5% 則代表此點量測值有問題，後續會透過數個符合誤差範圍之鄰近點的相位及頻率取平均後繪圖，實際案例如下圖 4-5 為修正前的量測結果、下圖 4-6 為修正後的量測結果。

4.3.2 相位差判斷

當量測波型不穩定時，會使得輸入訊號及輸出訊號間相位差判斷有誤，此處會先計算同一頻率下的所有相位差，兩者間應落在正負 360° 之間，超出此範圍，則代表這點的量測波型有問題，隨後會透過鄰近數個符合誤差範圍點的相位及頻率進行平均後繪圖，實際案例如圖 4-5 修正前、及圖 4-6 修正後所示，試片為單邊(右側)固定的懸壁板以壓電纖維激振的第七共振模態，後續於 4.4.3 節中會詳細介紹此試片並列出所有模態量測結果，由此可見透過此方法可以自動消除量測不佳的點(圖 4-5 中黑色圓圈處)。

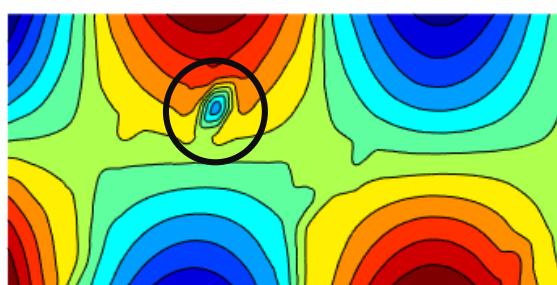


圖 4-5 量測數據優化前之模態圖

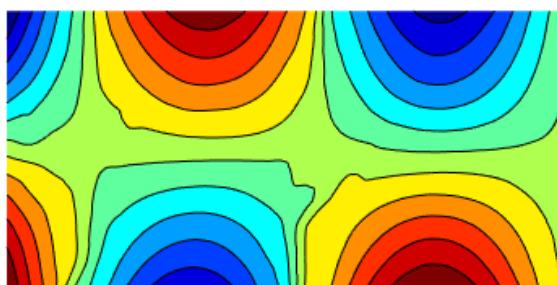


圖 4-6 量測數據優化後之模態圖



4.4 實際量測案例分析

介紹完 SLDV 量測後處理及繪圖流程後，本節將會展示多個實際量測結果，並與電子斑點干涉術(AF-ESPI)對應，驗證此方法的準確性，並進行結果比較及優缺點探討。

4.4.1 串聯型壓電雙晶片以串聯電極連接方式於雙邊固定之模態量測

試片規格使用美國 Piezo System Inc. 公司出產的鈦鋯酸鉛 (PZT)，商品型號為 PSI-5A4E，這邊採用的是三層的結構，上下層為矩形壓電陶瓷元間，極化方向相反，稱之為串聯型壓電陶瓷雙晶片 (Series-type)；中間層為金屬材料，尺寸長度是 62.7mm，寬度是 31.8mm，上下壓電陶瓷的厚度各為 0.18mm，中間金屬層的厚度是 0.12mm，其壓電陶瓷雙晶片總厚度為 0.48mm，但經由單邊固定夾持後長度僅留 57.5 mm，壓電相關係數如表 4-2 所示，金屬相關常數如表 4-3 所示。

壓電陶瓷雙晶片其上下層的壓電陶瓷材料上下表面皆塗佈上電極以供逆壓電實驗所需電壓的輸入，其中間金屬層以可以導通電流，這邊選擇以串聯型壓電雙晶片以串聯電極連接方式(SBS)進行量測，極化方向堆疊與電極連接方式之示意圖，如圖 4-7 所示，量測結果如表 4-4 所示，分別量測前六個模態並與 ESPI 的結果做比較。

由表 4-4 量測結果可以看出，無論是由 AF-ESPI 或是 SLDV 量測法所得到的頻率及振動模態皆有很好的對應性，此外，SLDV 量測得到的模態圖可以更直觀的由紅、藍顏色變化趨勢看出振動的正負情況，並且能數值化地得知該點實際的振動速度量值大小，這點是 ESPI 方法所做不到的，也是本研究開發的 SLDV 系統最大的優勢。

表 4-2 壓電陶瓷材料(PSI-5A4E)參數

| Material Property | Values |
|--------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Mechanical | |
| Density (kg/ m ³) | ρ 7800 |
| Elastic Modulus (N/ m ²) | s_{11}^E 1.515×10^{-11} |
| | s_{33}^E 1.923×10^{-11} |
| Poisson's ratio | ν 0.31 |
| Dielectric | |
| Relative Dielectric Constants(@1kHz) | $\varepsilon_{33}^T / \varepsilon_0$ 1800 |
| | $\varepsilon_{11}^T / \varepsilon_0$ 1800 |
| Dielectric Constant in Vacuum(F/ m) | ε_0 8.854×10^{-12} |
| Piezoelectric | |
| Piezoelectric strain coefficient (m/ volt) | d_{33} 3.9×10^{-10} |
| | d_{31} -1.9×10^{-10} |
| | d_{15} $\sim 5.5 \times 10^{-10}$ |
| Coupling Coefficients | k_{33} 0.72 |
| | k_{31} 0.32 |
| | k_{15} ~0.55 |

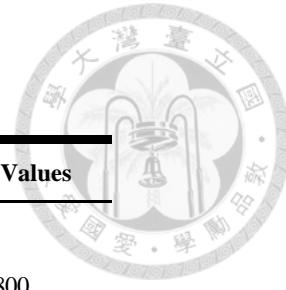


表 4-3 壓電陶瓷雙晶片中間層銅金屬材料常數

| Material Property | Brass (Bronze C86100) | |
|-------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Density (Kg/m ³) | ρ | 8830 |
| Young's modulus (N/m ²) | Y | 1.03×10^{11} |
| Poisson's ratio | ν | 0.34 |

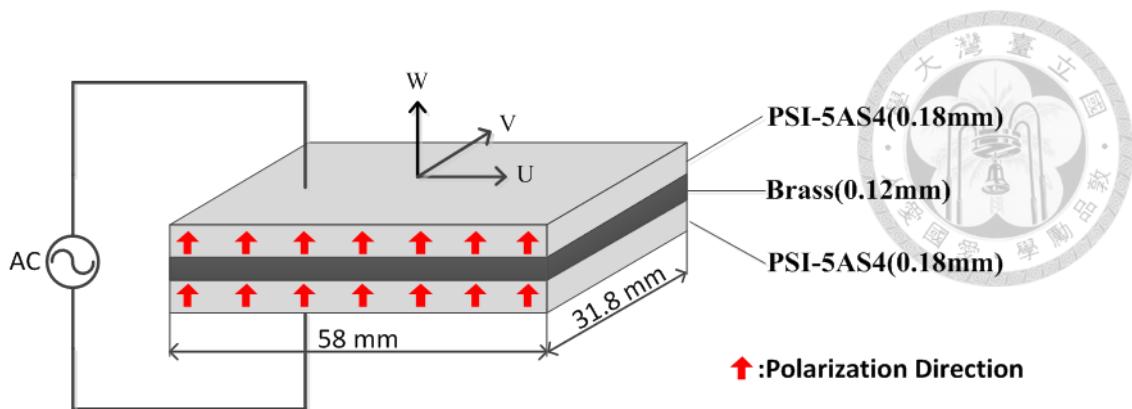


圖 4-7 串聯型雙晶片以串聯電極連接型式(SBS)



表 4-4 SBS 試片模態量測結果

| | 1 | 2 | 3 |
|------|-------------------|-------------------|--------------------|
| ESPI | | | |
| | | | |
| 頻率 | 610Hz (1.4Vp) | 2250Hz (2.6Vp) | 3300Hz (3Vp) |
| SLDV | | | |
| | | | |
| 頻率 | 590Hz (1.4Vp) | 2250Hz (1.4Vp) | 3300Hz (1.4Vp) |
| 誤差 | -3.28% | 0% | 0% |
| | 4 | 5 | 6 |
| ESPI | | | |
| | | | |
| 頻率 | 5155Hz (3.4Vp) | 9650Hz (6Vp) | 12245Hz (5.6Vp) |
| SLDV | | | |
| | | | |
| 頻率 | 5275Hz (1.4Vp) | 9638Hz (1.4Vp) | 12245Hz (2Vp) |
| 誤差 | 2.27% | 0% | 0% |



4.4.2 單層壓電圓盤薄板於自由邊界之模態量測

以下壓電材料採用 PI 公司的 PIC-181，和參考文獻[11]中試片一致，幾何尺寸有三種規格，形狀皆為圓盤，採用的是單層的結構。以下分別量測試片前八個自然共振模態並與 ESPI 結果做比較，一共量測三種不同規格的試片，分別為 (1)直徑 =70 mm、厚度=1.5 mm (2)直徑=84 mm、厚度=1 mm (3)直徑=45 mm、厚度=1.5 mm，量測結果如表 4-5、表 4-6、表 4-7 所示。

由以下三表可以看出，兩種量測方式皆有很好的對應性，此外，由於 SLDV 的速度量測範圍較廣，因此在量測時所需要激振試片的電壓小於 ESPI 量測法，如此可以避免機振電壓過大使得試片過熱或損毀的風險。

在 PIC-181 實際量測中，由於試片本身是單層壓電陶瓷圓盤的結構，當試片直徑越小，共振頻率會越高，外部電壓所能激發出的振動速度越小，低於次微米等級，因此在某些頻率響應情形較差的自然共振模態中，會難以利用 ESPI 方法得到較佳的量測結果，如表 4-6 的第四模態及表 4-7 的第三至第八模態，皆無法使用 ESPI 方法拍攝到相對應的模態振型，若是持續增加機振電壓，會超過試片的承受極限而破損。相較之下，SLDV 方法系統量測精度高、速度量測範圍較廣，且量測結果亦能顯示模態中的正負相位，因此得以在這些模態中成功測到不錯的量測結果，這也是本研究開發的 SLDV 量測系統的優勢之一。

表 4-5 PIC-181 圓盤直徑=70mm、厚度=1.5mm 試片模態量測結果

| | 1 | 2 | 3 | 4 |
|------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| ESPI | | | | |
| 頻率 | 1067Hz (11Vp) | 2060Hz (60Vp) | 2482Hz (44Vp) | 4382Hz (50Vp) |
| SLDV | | | | |
| 頻率 | 1067Hz (10Vp) | 2070Hz (10Vp) | 2489Hz (10Vp) | 4387Hz (10Vp) |
| 誤差 | 0 | 0.49% | 0.28% | 0.11% |
| | 5 | 6 | 7 | 8 |
| ESPI | | | | |
| 頻率 | 2093Hz (160Vp) | 3152Hz (151Vp) | 3600Hz (175Vp) | 3919Hz (56Vp) |
| SLDV | | | | |
| 頻率 | 2082Hz (40Vp) | 3152Hz (40Vp) | 3576Hz (10Vp) | 3890Hz (20Vp) |
| 誤差 | -0.52% | 0% | -0.67% | -0.73% |

表 4-6 PIC-181 圓盤直徑=84mm、厚度=1.0mm 試片模態量測結果

| | 1 | 2 | 3 | 4 |
|------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| ESPI | | | | |
| 頻率 | 522Hz (72Vp) | 950Hz (18.3Vp) | 1159Hz (76Vp) | 2039Hz (158Vp) |
| SLDV | | | | |
| 頻率 | 493Hz (10Vp) | 945Hz (40Vp) | 1159Hz (40Vp) | 2039Hz (40Vp) |
| 誤差 | -5.5% | -0.52% | 0% | 0% |
| | 5 | 6 | 7 | 8 |
| ESPI | | | | |
| 頻率 | 2093Hz (160Vp) | 3152Hz (151Vp) | 3600Hz (175Vp) | 3919Hz (56Vp) |
| SLDV | | | | |
| 頻率 | 2082Hz (40Vp) | 3152Hz (40Vp) | 3576Hz (10Vp) | 3890Hz (20Vp) |
| 誤差 | -0.52% | 0% | -0.67% | -0.73% |

表 4-7 PIC-181 圓盤直徑=45mm、厚度=1.0mm 試片模態量測結果

| | 1 | 2 | 3 | 4 |
|------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| ESPI | | | X | X |
| 頻率 | 3575Hz (170Vp) | 6985Hz (90Vp) | - | - |
| SLDV | | | | |
| 頻率 | 3575Hz (10Vp) | 6945Hz (30Vp) | 8560Hz (10Vp) | 14371Hz (40Vp) |
| 誤差 | 0 | 0.49% | - | - |
| | 5 | 6 | 7 | 8 |
| ESPI | X | X | X | X |
| 頻率 | - | - | - | - |
| SLDV | | | | |
| 頻率 | 15121Hz (10Vp) | 21808Hz (70Vp) | 25136Hz (10Vp) | 27664Hz (60Vp) |
| 誤差 | - | - | - | - |



4.4.3 單邊固定之 PLA 懸臂板以壓電纖維激振之模態量測

以下試片選用常見之 3D 列印材料 Poly Lactic Acid(PLA)，為單邊固定的懸臂板，試片的列印尺寸為 $180 \times 100 \times 2\text{ mm}^3$ ，於試片的一側貼上 4 片 P2 型式(d_{31} 效應)的壓電纖維，為 SMART MATERIAL 公司所生產，型號為 M2807-P2，給予電壓將造成拉伸方向的變形，其規格如表 4-8 所示，透過訊號產生器輸入不同頻率的電訊號以及改變正負極方向即可激發出各種模態形狀，壓電纖維黏貼位置如圖 4-8，透過前述 SLDV 的量測方法進行模態形狀的量測，給定壓電纖維 10V 的電壓，量測布點為長邊 25、短邊 10 個點，總共 250 個點，以矩形規律布點的方式排列。

下表 4-9 為試片前十個自然共振模態的量測結果，可以看出 SLDV 與 ESPI 量測結果皆有很好的對應性，此試片尺寸較前述量測試片大了約 10 倍，因此在量測時前述開發的全域對焦功能(3.2.2 節)及數據優化功能(4.3 節)功能格外重要，其中第六模態由於壓電纖維黏貼在該模態的節線處，因而無法成功激發出此模態。

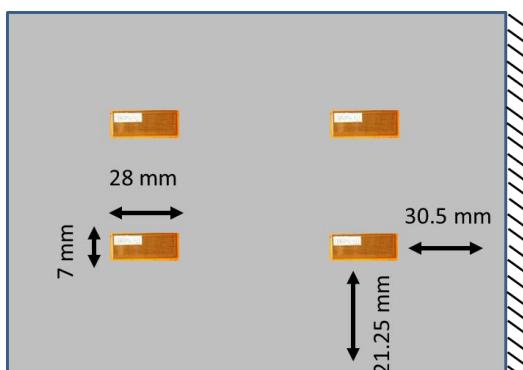
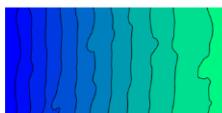
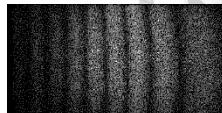
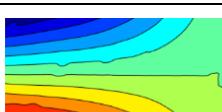
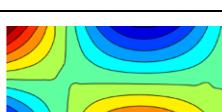
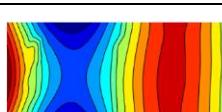
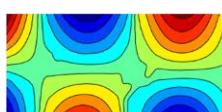
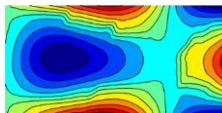
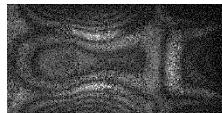
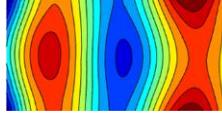
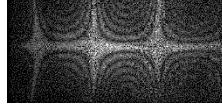


圖 4-8 壓電纖維黏貼示意圖

表 4-8 壓電纖維規格

| Specifications(M2807-P2) | | | |
|--------------------------|--------------|--------------------------------|------|
| Operating voltage | -60V to 360V | Overall width (mm) | 10 |
| Active length (mm) | 28 | Capacitance in nF $\pm 20\%$ | 21.5 |
| Active width (mm) | 7 | free strain in ppm $\pm 10\%$ | -600 |
| Overall length (mm) | 37 | blocking force in N $\pm 10\%$ | -35 |

表 4-9 PLA 懸臂板以四片壓電纖維激振模態量測結果

| Mode | SLDV | ESPI |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 |  |  |
| 頻率 | 15 Hz | 15.2 Hz |
| 2 |  |  |
| 頻率 | 62 Hz | 62.1 Hz |
| 3 |  |  |
| 頻率 | 101 Hz | 100.9 Hz |
| 4 |  |  |
| 頻率 | 209 Hz | 209 Hz |
| 5 |  |  |
| 頻率 | 284 Hz | 283.5 Hz |
| 7 |  |  |
| 頻率 | 411 Hz | 410.3 Hz |
| 8 |  |  |
| 頻率 | 511 Hz | 511.8 Hz |
| 9 |  |  |
| 頻率 | 586 Hz | 586.4 Hz |
| 10 |  |  |
| 頻率 | 706 Hz | 707 Hz |



4.5 SLDV 量測系統比較結果

本節將就前述開發的兩種 SLDV 量測系統進行比較，分別為龍門平台系統及微動振鏡系統，量測系統為相同的架設，搭配訊號產生器(Agilent-33210A)、示波器(Keysight DSO-X-2004A)。

量測試片為 PE-68 試片，同參考文獻[12]，於 5.2.1 節會詳細介紹此試片。量測設定為相同的激振頻率: 586 Hz (Mode 2)、電壓: 1 V、布點情形為 127 個圓形規律布點，如聲學量測章節中圖 5-7 所示。

由於兩系統本質上的差異，龍門平台為實際的帶動 LDV 雷射頭(OFV-505)移動，因此點與點間移動時需要較長的時間，量測時雷射始終保持垂直入射試片，因此量測訊號強度較佳。另一方面，龍門平台本身是較為大型的結構，因而會需要比較大的實驗架設空間；微動振鏡系統為將雷射光透過兩次反射達到全域量測的架構，因此點與點移動所需的時間很短，而透過反射後的訊號強度會降低，影響量測精度。此外，雖然微動振鏡組本身的設計可以達到的最大偏轉角度為 22.53° ，但由於偏轉角度較大時，LDV 能收到的反射光強度會降低，導致量測結果不佳，因此此系統的量測範圍有所限制。

兩者優缺點可整理如下表 4-10，在相同的條件下，微動振鏡系統(Galvano Scanning System)與龍門平台系統(Gantry Platform System)相比可以節省高達 86% (240 秒)的時間，並且兩量測系統所得到的量測結果有很不錯的對應性。

表 4-10 SLDV 量測系統比較表

| | Gantry Platform System | Galvano Scanning System |
|------------------|------------------------|-------------------------|
| Measuring Time | 278.4 sec | 37.83 sec (-86%) |
| Scan Region | Wide | Small |
| LDV Signal Level | Higher | Lower |
| Space Required | Big | Small |
| Result | | |



接著探討不同的訊號接收儀器，分別為示波器(Keysight DSO-X-2004A)及資料擷取系統(NI-9234)。如 3.1.2 節中所述，示波器在每次紀錄訊號時需要根據量測訊號的大小，控制電壓軸及時間軸的範圍以符合量測訊號的大小，若範圍不符合則需重新調整後量測，在此一過程中會耗費較多的訊號紀錄時間，另一方面，示波器因為有較高擷取頻率(Sampling Frequency)，因此在高頻量測能力較佳。

資料擷取系統(NI-9234)則會根據訊號的時間及電壓軸自動調整接收視窗大小，並能自動選取最適當的擷取頻率及取樣點數(Number of Sampling)，因此受環境中的高、低頻雜訊干擾程度較低，此外，資料擷取系統(NI-9234)與控制程式 LabVIEW 結合性非常好，有許多相對應的功能函數做使用，系統整合上非常方便。

綜合上述可以將訊號產生器(Oscilloscope(DSO-X-2004A))及資料擷取系統(NI-9234)的優缺點整理如下表 4-11，在使用 NI-9234 時，可以提升約 25% (9.7 秒)的量測效率，並有更高的訊噪比(Signal-to-Noise ratio)。實際進行比較的試片及量測參數與前面所述相同。

表 4-11 示波器與 NI-9234 比較表

| | Oscilloscope(DSO-X-2004A) | NI-9234 |
|-----------------------|---------------------------|--------------------|
| Measuring Time | 37.83 sec | 28.136 sec (-25%) |
| Frequency Range | Wider (Max 35MHz) | Narrower (25.6kHz) |
| Signal-to-noise ratio | Lower (Need LDV Filter) | Higher |
| Result | | |



第五章 聲學元件之振動解析與實驗量測

對於聲學而言，聲壓的貢獻主要來自面外振動速度，因此本章節將就第四章所量測得到的全場振動情形，搭配聲學理論公式，推估出聲學元件於不同頻率下的聲壓響應情形，並將本研究推得的聲壓曲線結果，與無響室中使用麥克風量測，及商用光學式聲壓量測工具: KLIPPEL 方法，三種方式所量測得到的聲壓響應結果進行優劣分析及比較。

本章節會先介紹四種常用之聲學振動量測方法，而後進行聲學理論的推導，最後則是實驗量測結果的探討，所使用到的聲學元件可以分成以下兩類，分別為高阻抗的聲學元件：壓電式耳機(PE-68)、及低阻抗的聲學元件：動圈式揚聲器(FG60-H6)，分別進行量測及聲壓響應結果的比較。

5.1 聲學元件於無限大障板下自由音場之振動特性分析

對於測量揚聲器的聲音表現普遍都會在自由音場的環境進行評估，透過沒有反射的空間，貼近理想無干擾的狀況。參考江信遠[3]的研究方法，評估的方式大約可分為四種：「集中參數測量法 Lumped Parameter Method, LPM」、「分布參數測量法 Distributed Parameter Method, DPM」、「全像式電子斑點干涉 Electronic Speckle Pattern Interferometry, ESPI」、「無響室聲學測量 Anechoic Measure, AM」，如圖 5-1 所示。因此本節會先從基本聲學理論出發，推導振動速度與聲壓的關係式，搭配雷射都卜勒振動儀得到實際振動速度，用於後續分布參數測量法(DPM)中，反推出其聲壓響應結果；電子斑點干涉術用於觀察頻率振型及振動特性；無響室聲學測量是直接利用麥克風量測實際聲壓值得到聲壓響應曲線。

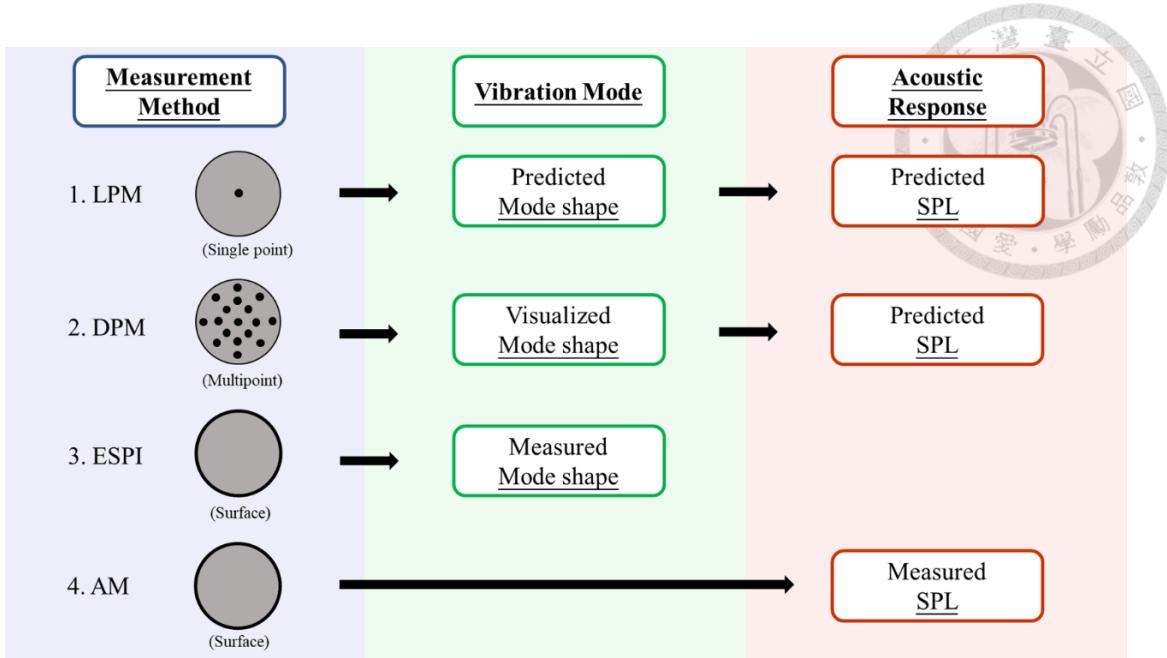


圖 5-1 自由音場振動、聲學量測方法示意圖[3]

5.1.1 聲學試片於自由音場下聲學特性分析

在聲學的評估上，通常會假設一個振膜固定在平坦且剛性無限大的障板上，振膜表面每一個元素，以 v 的速度做簡諧運動，運動方向垂直於障板，如圖 5-2 所示，首先討論脈動球源的輻射，脈動球源是進行著均勻收縮膨脹的球面聲源，並沿著徑向做同振幅、同相位的振動，如圖 5-3 所示，可以將其應用為點聲源的組合來處理任何複雜的面聲源。

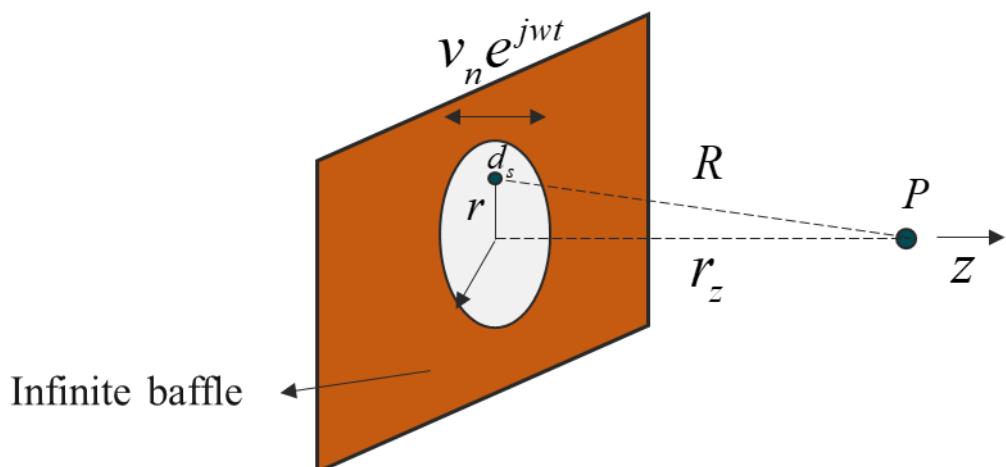


圖 5-2 振膜固定於無限大障板示意圖

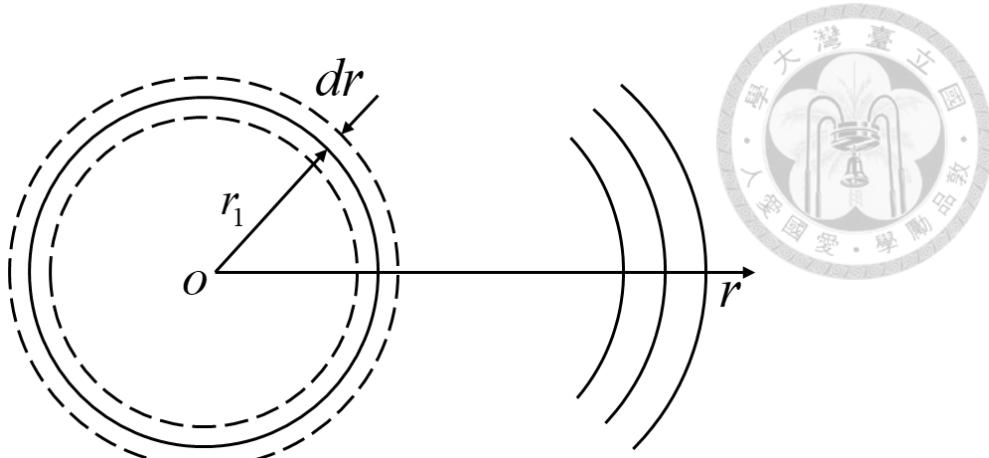


圖 5-3 脈動球源輻射示意圖

由聲學基本理論出發利用分離變數可以得到聲學的波動方程式

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dp}{dr} \right) + k^2 p = 0 \quad (5-1)$$

求解(5-1)可以得到 $+r$ 方向的解

$$p(r) = K \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (5-2)$$

其中 K 是待定係數。同樣利用分離變數法可以整理出四條聲學的基本關係式

$$j\omega p = -\gamma P_0 \nabla \cdot \vec{u} \quad (5-3)$$

$$\nabla p = -j\omega \rho_0 \vec{u} \quad (5-4)$$

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \quad (5-5)$$

$$\nabla^2 \vec{u} + k^2 \vec{u} = 0 \quad (5-6)$$

其中 \vec{u} 表示粒子速度。將(5-2)代入關係式(5-4)可以得到

$$u(r) = \frac{1}{j\omega \rho_0} \left(\frac{1}{r} + jk \right) K \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (5-7)$$

由聲學特性阻抗 Z_s 等於壓力 $p(r)$ 除以速度 $u(r)$ 可以求得

$$Z_s = \frac{p(r)}{u(r)} = \frac{j\omega \rho_0}{\frac{1}{r} + jk} = \frac{\rho_0 c}{1 + \frac{c}{j2\pi f r}} \quad (5-8)$$



在此定義脈動球源推動的空氣體積隨時間的變化為體積速度 U 。將(5-7)代入(5-9)，

可得脈動球源在 $r = r_1$ 時的體積速度為

$$U = 4\pi r_1^2 u(r_1) = \frac{4\pi K}{j\omega\rho_0} \left[1 + j\frac{\omega r_1}{c} \right] e^{-jk r_1} \quad (5-9)$$

解得未知常數 K 後將(5-9)整理後代回(5-2)可得壓力與體積速度關係式

$$p(r) = \frac{j\omega\rho_0 U}{1 + j\omega r_1 / c} \frac{e^{-jk(r-r_1)}}{4\pi r} \quad (5-10)$$

接著假設脈動球的半徑非常小 ($\omega r_1 / c \ll 1$)，也就是將脈動球縮小至單極值的點聲源問題，因此可以簡化(5-10)為

$$p(r) \approx j\omega\rho_0 U \frac{e^{-jk r}}{4\pi r} \quad (5-11)$$

由於是考慮無限大障板的問題，因此視為音源放置牆邊，如圖 5-4 所示，聲壓會被障板所反射，因此可以假設有一虛擬的點聲源在原來的另一側，聲壓會變為原來的兩倍，可表示為

$$p(r) = j\omega\rho_0 U \frac{e^{-jk r}}{2\pi r} \quad (5-12)$$

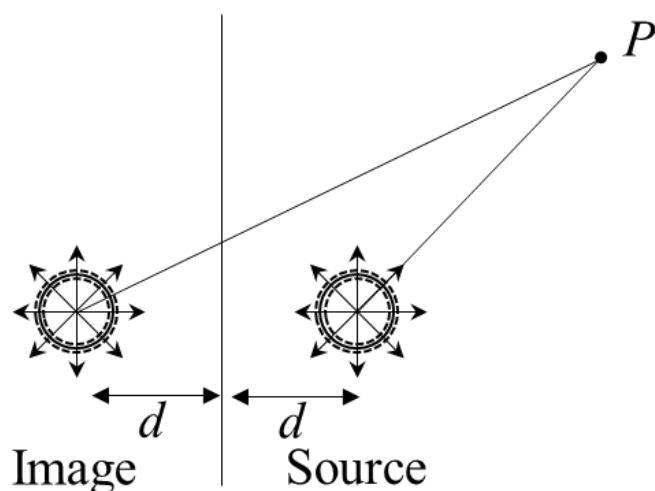


圖 5-4 點聲源於牆邊示意圖



接著考慮試片上有許多散布點，利用雷利積分(Rayleigh Integral)的方式將每個點對聲壓的貢獻積分起來，於實際量測情況下，會分別計算每個離散量測點的聲壓貢獻。後加總起來，可將(5-12)改寫得到聲壓及體積速度關係式

$$p(r) = \sum j\omega\rho_0 U \frac{e^{-jkr}}{2\pi r} \quad (5-13)$$

代入圖 5-2 的標號可以寫成

$$p = \sum j\omega\rho_0 U \frac{e^{-jKR}}{2\pi R} \quad (5-14)$$

得到聲壓及體積速度關係式後，便能透過聲學元件的振動速度快速預估其聲音表現。

通常聲壓的量測是使用有效聲壓(effective sound pressure)，計算方式如下

$$p_e = \frac{|p(r)|}{\sqrt{2}} \quad (5-15)$$

由於聲音的動態範圍非常大，為方便判讀大小，習慣使用「分貝」來表示，單位為 dB，為對數刻度(log scale)，因此「聲壓位準 Sound Pressure Level, SPL」可表示為

$$SPL = 20 \log\left(\frac{p_e}{p_{ref}}\right) \quad (5-16)$$

其中 $p_{ref} = 2 \times 10^{-5}$ Pa 是空氣的參考聲壓(Reference Sound Pressure)。利用上述公式，可以利用待測物表面的振動速度估算出對應的聲壓位準，並透過八音帶掃頻後得到聲壓頻率響應圖。

5.1.2 八音帶 Octave Band

八音帶也可稱為倍頻程(Octave)，這一名詞是由音樂中借用而來，為音程的一種，它的組成是由兩個相同音名但來自不同音域所組成，例如鋼琴的中音 C 到下一個音節(高八度)的 C，其頻率比正好是兩倍，也因此稱為一個八音帶。若將音度分為 N 份，則每一份稱為 $1/N$ 八音帶，其中八音帶分析中每個頻帶的上限頻率 f_2 和下限頻率 f_1 之比為常數，關係滿足為(5-17)，常用的 N 為 1、3、6、12、24。

$$f_2 = 2^{\frac{1}{N}} f_1$$

(5-17)

頻帶的中心頻率 f_c 為上、下限頻率的幾何平均值，關係為下式(5-18)。

$$f_c = \sqrt{f_1 f_2} \quad (5-18)$$

而 I/N 八音帶則會由下限頻率、中心頻率、及上限頻率所組成，工程上常用的中心頻率為 31.5、63、125、250、500、1000、2000、4000、8000、16000 Hz。

人耳可以聽到的聲音頻率範圍為 20 至 20000 Hz，越低頻的聲音人耳的分辨率越好，在實際量測情況上，就 20 至 20000 Hz 的訊號一一進行測試需花費大量的時間，因此會引入本節介紹之八音帶概念，改為測試不同八音帶情況下的所有頻率。

由上述介紹可知，八音帶中，頻率越低分布的頻帶越多，而 N 越大則代表帶寬越細，量測的頻率精度越高，相對的量測所需時間則越長，後續研究會使用 1/12 八音帶進行測試，並與無響室量測中以 1/12 八音帶的頻譜分析的結果進行對照及驗證。

5.2 實際量測結果分析

本節就實際 DPM 得到的量測結果，套入前述介紹的聲學公式，進行聲壓的分析與比較。在 DPM 的量測系統中，所使用的激振儀器是訊號產生器，下圖 5-5 為訊號產生器激振試片的電路圖， $v(t)$ 為訊號產生器供應電壓， $v_{ab}(t)$ 為試片實際消耗電壓， r 為訊號產生器內電阻，訊號產生器常用的內電阻為 50Ω 。

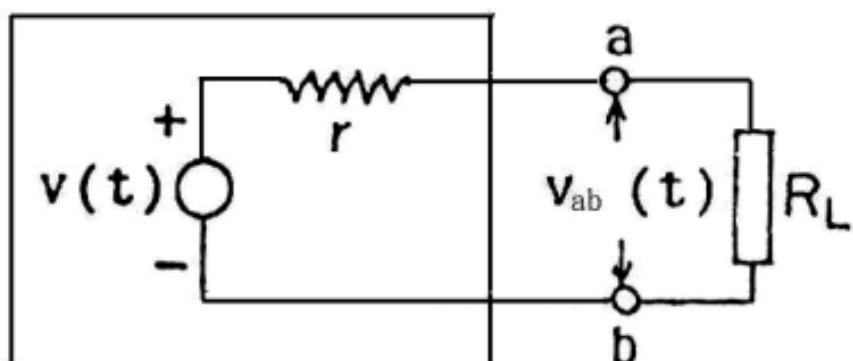


圖 5-5 訊號產生器電路圖



高阻抗聲學元件上如壓電試片，電阻約略為數百 Ω ，根據阻抗匹配公式(5-19)，可以得知訊號產生器之輸出電壓多半會由試片消耗，不用透過音頻放大器(Audio Power Amplifier)進行功率補償；而低阻抗的聲學元件如動圈式揚聲器(Moving-Coil Loudspeaker)，其阻抗約在 10Ω 以下，根據阻抗匹配公式(5-19)，大部分的輸出電壓會由訊號產生器內電阻所消耗，因此在業界上量測時多半會加裝音頻放大器確保所消耗的電壓及功率能達到實際要求。以下將分別就高阻抗的壓電式聲學元件：PE-68[12]及低阻抗的動圈式揚聲器：FG-60H6，以本研究開發的分布參數法(DPM)進行量測，並與無響室的聲壓量測結果相互對照。

$$v_{ab} = v(t) \times \frac{R_L}{r + R_L} \quad (5-19)$$

5.2.1 高阻抗聲學元件：PE-68

本節依據 DPM 系統的量測結果，以試片全場振動的體積速度量反推其聲壓響應結果。在無響室量測上，多半會規範用以激振元件的電功率以及電壓，而在高阻抗的情況下，訊號產生器輸入的電壓會完全由試片所消耗，其消耗功率會和無響室量測的輸入測試功率相同，以下會直接就高阻抗元件的量測結果圖 5-8 進行討論。

量測試片和參考文獻[12]相同，為壓電式聲學元件(PE-68)，其實際照片如下圖 5-6 所示，相關尺寸及參數如下表 5-1 所示。

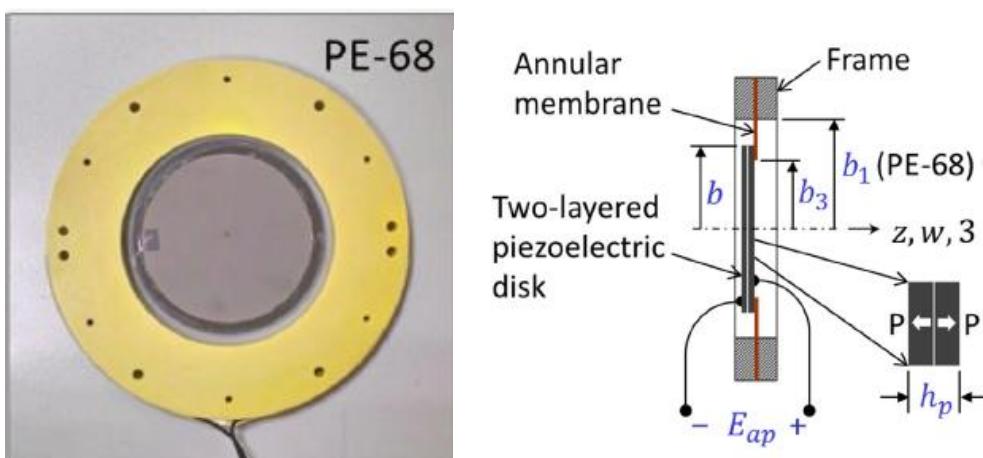


圖 5-6 PE-68 壓電式聲學元件

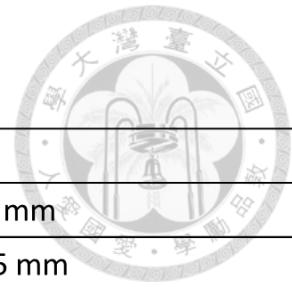


表 5-1 PE-68 規格

| Annular membranes | |
|--------------------------------|--------------------------------|
| b_1 | 34 mm |
| b_3 | 27.5 mm |
| <i>Thickness</i> | 0.011 mm |
| <i>Density</i> | 1230(kg/m^3) |
| Two-layered piezoelectric disk | |
| b | 31.75 mm |
| h_p | 0.41 mm |
| <i>Density</i> | 7800(kg/m^3) |

量測參數為：電壓 3.0 Vpp；頻率範圍 20 至 20000 Hz、以 1/12 八音帶量測，布點情形為圓形對稱式分布 127 個點，如下圖 5-7 所示。

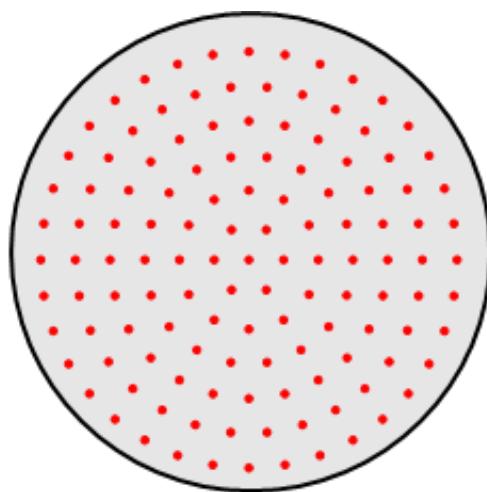


圖 5-7 DPM 量測布點情形(PE-68 試片)



PE-68 壓電耳機於自由音場聲壓量測結果如圖 5-8 所示，X 軸為頻率，單位 Hz，以對數方式呈現，Y 軸為聲壓級(Sound Pressure Level, SPL)，單位為分貝(dB)。紅線為本研究開發的 DPM 量測系統的量測結果，黑線為無響室量測結果，無響室麥克風量測距離為 10 公分。藍線為商用光學量測系統 KLIPPEL 的量測結果，其中六個峰值為壓電片的自然共振模態，其振動模態響應結果如下表 5-2 所示，由表中可以看出 DPM 以及 KLIPPEL 系統量測的模態結果皆有很好的對應性，其中第六模態(0,5)中，由於超出 KLIPPEL 雷射位移計頻率量測上限，無法成功量測。

由下圖 5-8 可以看出，三種方式量測得到的結果皆有很好的對應性，其中在 3000 Hz 以上的高頻區域，KLIPPEL 量測結果(藍線)會有較為不連續的量測結果，尤其是在曲線的低谷處更為明顯。推測原因為 KLIPPEL 使用的量測儀器是雷射位移計，利用全場位移結果推估待測物聲壓，而由(5-12)式中可得知，聲壓和加速度成正比，在相同的聲壓下，聲學試片表面的加速度相同，頻率越高位移則越小，越容易低於雷射位移計的量測下限值，使得 KLIPPEL 在高頻振動時的量測結果較為不準確，而這點是本研究所開發的雷射都卜勒振動儀系統(DPM)可以成功克服的問題，也是本研究的貢獻之一。

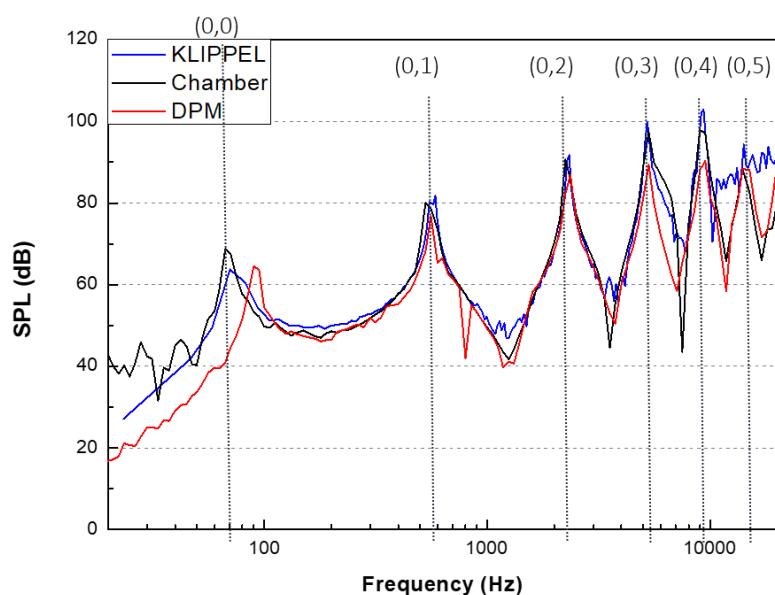


圖 5-8 PE-68 壓電耳機自由音場實驗量測結果

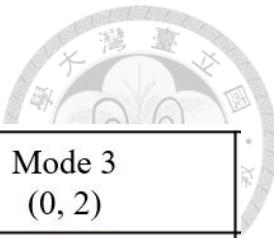


表 5-2 PE-68 模態振型圖

| | Mode 1 (0, 0) | Mode 2 (0, 1) | Mode 3 (0, 2) |
|---------|------------------|------------------|------------------|
| DPM | | | |
| Freq. | 71 Hz | 560 Hz | 2240 Hz |
| KLIPPEL | | | |
| Freq. | 75 Hz | 563 Hz | 2270 Hz |
| | Mode 4 (0, 3) | Mode 5 (0, 4) | Mode 6 (0, 5) |
| DPM | | | |
| Freq. | 5300 Hz | 9000 Hz | 14000 Hz |
| KLIPPEL | | | |
| Freq. | 5250 Hz | 9333 Hz | - |



5.2.2 低阻抗聲學元件：動圈式揚聲器

本節將就低阻抗之聲學元件量測結果進行討論。由於試片電阻較低，約略落在 10 歐姆以下，因此所激振的電壓並不會完全消耗在元件上，根據阻抗匹配公式(5-19)，低阻抗元件實際消耗電壓約為輸入的六分之一，因此業界上多半會加裝音頻放大器確保試片所消耗的功率能達到實際要求。

由於本研究中並無結合音頻放大器的儀器，因此以下將透過聲壓補償公式，將量測到的結果加上聲壓補償後，與無響室量測結果進行比較。

量測試片為富祐鴻公司生產的動圈式揚聲器單體(FG-60H6)，其實際照片如圖 5-10 所示，試片半徑為 20 mm。在實際量測前，會先使用 2.3 節中介紹的阻抗分析儀得到動圈式揚聲器的實際阻抗如下圖 5-9。

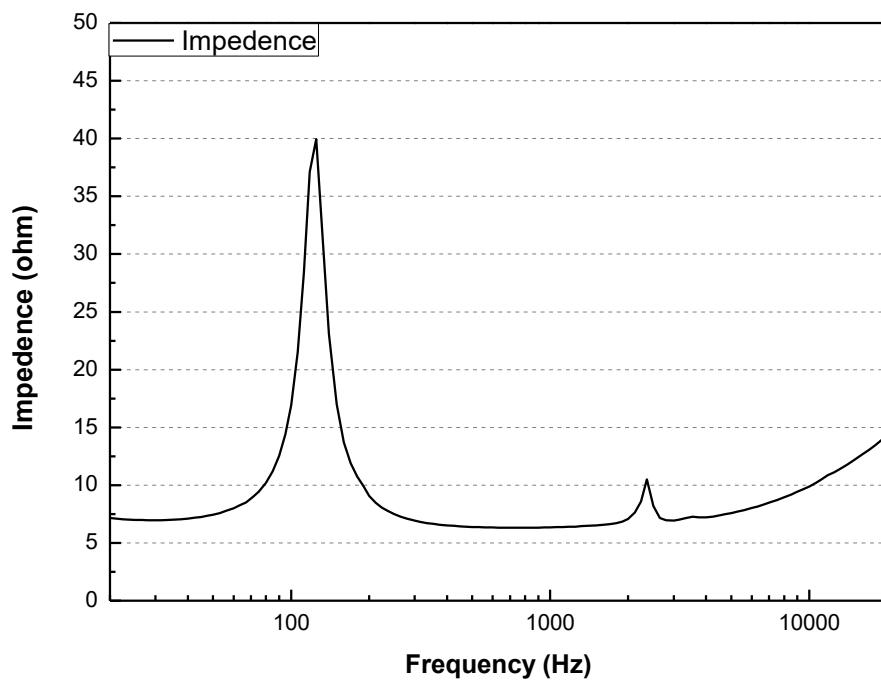


圖 5-9 動圈式揚聲器阻抗分析儀結果

後帶入阻抗匹配公式(5-19)，得到實際消耗電壓。

$$V_{Act} = V_{ab} = V \times \frac{R_L}{R_L + r} \quad (5-20)$$

其中， r 為訊號產生器內電阻，常見的設定為 50Ω 。由功率公式帶入實際消耗電壓



後可得到實際消耗功率如式(5-21)。

$$W = \frac{V_{Act}^2}{R} \quad (5-21)$$

根據聲壓位準(Sound Pressure Level, SPL)如式(5-16)，可以將此式拆分為兩項，其中 $A = 4\pi D^2$ 為點聲源表面積、 $W_{ref} = 10^{-12}$ 是空氣的基準功率、 $\rho c = 400 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}$ 是空氣的特性阻抗，

$$SPL = 20\log\left(\frac{P_e}{P_{ref}}\right) = 10\log\left(\frac{P_e^2}{W_{ref}\rho c} A\right) + 10\log\left(\frac{\rho c W_{ref}}{P_{ref}^2 A}\right) \quad (5-22)$$

將以上數值帶入(5-22)化簡整理後可得(5-23)，其中， I 為聲強(Sound Intensity)。

$$SPL = 10\log\left(\frac{I \times A}{W_{ref}}\right) + 10\log\left(\frac{400 \times 1 \times 10^{-12}}{(2 \times 10^{-5})^2 A}\right) = 10\log\left(\frac{W}{W_{ref}}\right) - 10\log(\pi D^2) \quad (5-23)$$

接著由測試的聲壓級減去預估的聲壓級，化簡後可得(5-24)式，其中 D_t 為測試試距離、 W_t 為測試功率， D_c 為預估距離， W_c 為預估功率。

$$SPL_c = SPL_t + 20\log\frac{D_t}{D_c} - 10\log\frac{W_t}{W_c} \quad (5-24)$$

實際運用上會根據(5-21)得到的實際消耗功率 W_t ，和無響室量測中測試功率 W_c ，帶入(5-24)後便可彌補訊號產生器於低阻抗聲學元件阻抗匹配的問題。

本研究量測的低阻抗聲學元件為動圈式揚聲器，實際照片如下圖 5-10 所示，其阻抗量測結果如上圖 5-9 所示，聲壓量測結果如圖 5-11 所示。

量測參數為：電壓 2.4 Vpp；頻率範圍 20-20000 Hz、以 1/12 八音帶量測，布點情形和 PE-68 量測時相同，為圓形對稱式分布 127 個點，如上圖 5-7。



圖 5-10 動圈式揚聲器



圖 5-11 紅線及黑線分別繪出 DPM 經過聲壓補償至功率為 0.5W 後，及無響室以功率 0.5W 激振時，量測到的聲壓曲線圖，無響室麥克風量測距離為 10 公分。由於此試片並無進行 KLIPPEL 的量測，因此以下只單就 DPM 及無響室量測結果進行比較。

由圖 5-11 可以看出，兩種量測法在聲壓響應上有良好的對應性，而 DPM 方法於 2000 Hz 及 2240 Hz 的量測結果(圖中紅圈處)與無響室相比有略為提前的現象產生，推測是因為振動現象及聲壓響應情形並不是完全同步；此外，DPM 在這兩個頻率量測上得到的起伏現象也較無響室量測明顯，推測是由於聲壓公式(5-14)中，積分多點體積速度對於聲壓的貢獻上，公式於無限遠聲場也就是自由音場的情況下才能完全適用。遠聲場的定義為麥克風量測距離 $z > 50\lambda$ ，也就是量測距離大於 50 倍聲波波長時才適用，此時正負振動情況會完全抵銷。但實際上於量測距離為 10 公分時，在激振頻率為 2000 Hz 附近， $z \approx 20\lambda < 50\lambda$ ，正負振動會相互干涉，並不會完全抵消，因此 DPM 方法所得到的起伏會大於無響室所量測。為了驗證前述推論的合理性，以下分別透過 KLIPPEL 的同款雷射位移計(Keyence LK-H055)於試片中心點的位移量測結果及 LDV 透過位移及速度關係式 $w = u / j\omega$ 換算後的結果作圖，如下圖 5-12 所示。

由位移量測結果圖 5-12 可見，紅線 LDV 及藍線雷射位移計於試片中心點的位移量測結果有很好的對應性，由圖可見在高頻處振動位移量較小的地方，雷射位移計所得到的結果有明顯不連續的情形產生，推測原因與前述相同，是因為聲學元件的振動位移量小於雷射位移計的量測下限，而 DPM 量測中則不會有這個問題。此外，由圖中可以看出在 2240 Hz 處，兩種方法皆有量測到位移量的高峰出現，這也和聲壓響應的結果有相同的趨勢。因此可以推論，DPM 量測結果雖然相較於無響室有頻率提前的現象產生，但推估聲壓的結果是符合聲學元件本身的振動表現。

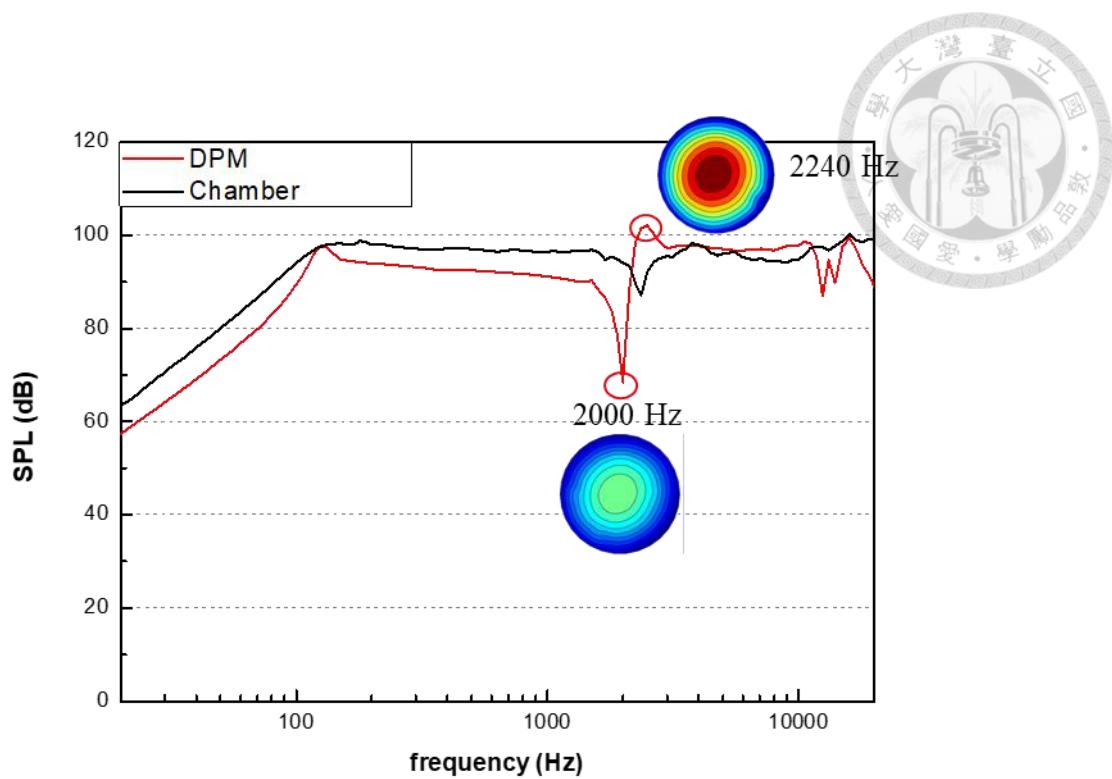


圖 5-11 動圈式揚聲器於自由音場聲壓量測結果

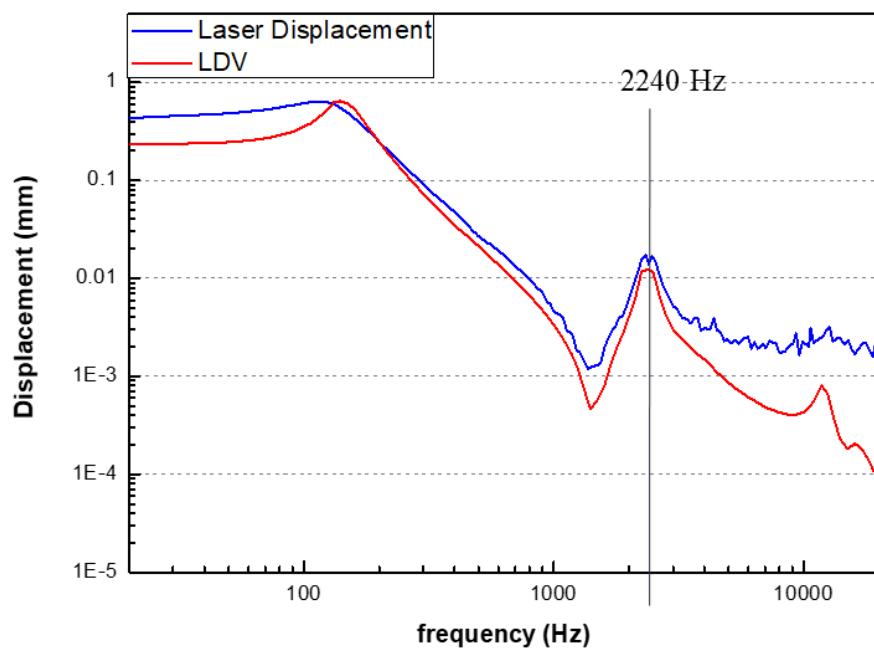


圖 5-12 動圈式揚聲器中心位移量測結果



5.2.3 聲學量測結果分析及比較

參考 KLIPPEL 多功能掃描平台的相關規格，與本研究開發的 DPM 微動振鏡量測系統，可得到以下比較表 5-3。DPM 微動振鏡系統(Galvano System)，在兩者架設成本相近的前提下，於量測距離、量測範圍、量測頻率的極限上皆有很大的優勢，也因此可以量測較大的聲學元件單體，相較於 KLIPPEL 大多用在低頻(3000 Hz)以下的動圈式聲學單體的聲壓及模態量測上，DPM 微動振鏡系統可用於量測較高共振模態(3000 Hz)以上的聲學元件，例如壓電式聲學單體，而這也是本研究開發之量測系統的最大優勢。

此外，本研究開發之 DPM 量測系統，可以節省打造無響室所需要的空間及測試要求，在任何環境下皆可利用 LDV 光學方法量測出聲學元件的聲壓響應情形，並同時得到聲學元件振膜的模態振型，在評估聲壓響應的同時，檢測元件表面的振動情形，驗證其振動模態是否符合聲學評估要求。

Polytec 公司也有將此 LDV OFV-505 結合類似的微動振鏡組出售，但本研究花費大約四分之一的建造成本，便可達成相同的功能，並搭配聲學理論解析成功的將振動訊號直接推估到聲學領域上，這也是本研究的貢獻之一。

表 5-3 KLIPPEL 及 DPM 微動振鏡量測系統比較表

| | KLIPPEL | | | DPM (Galvano System) | | |
|-------------------|---------|--------------|------------|----------------------|--------------|---------------|
| | Min | Typical | Max | Min | Typical | Max |
| Specimen Diameter | - | - | 76 cm | - | - | ±167 m |
| Measure Distance | - | - | 33 cm | 10 cm | - | 300 m |
| Scanning Speed | - | 0.3 points/s | 1 points/s | - | 4.2 points/s | - |
| Frequency limit | 0 Hz | 10000 Hz | 25000 Hz | 0.5Hz | - | 1 MHz |
| Resolution | 0.05 μm | 5 μm | - | - | 0.02 μm/s | - |



第六章 改良型雷射都普勒振動儀

前面介紹的 SLDV 方法，逐點皆需要停留一段時間，並且每次只能量測單一頻率的激振訊號，若是布點較多或是量測的頻率較多，便得耗費許多量測時間。為了提高量測速度，本章節將介紹兩種改良型雷射都卜勒振動儀量測模式，其一是搭配 Chirp 訊號進行掃頻量測，其二是「連續掃描型雷射都卜勒振動儀 Continuous Scanning Laser Doppler Vibrometry, CSLDV」，以下會分別就這兩種方法詳細介紹，最後與原先開發的 SLDV 方法進行比較，分析優缺點。

6.1 掃頻量測(Chirp Signal)

掃頻訊號可以分為兩種形式：其一是「線性掃頻訊號 Linear Sweep Sine Signal」，也稱為啁啾(Chirp)訊號，其產生方程式為(6-1)，實際波型如下圖 6-1，訊號的頻率隨時間進行線性改變；其二是「對數掃頻訊號 Logarithmic Sweep Sine Signal」，其產生方程式為(6-2)，實際波型如下圖 6-2，頻率隨時間而對數型改變。以下研究將選擇使用線性掃頻訊號(Chirp)進行研究，由於線性變化的頻率在時域分析上會較為簡潔。

$$Y(t) = \sin\{2\pi[(f_2 - f_1)(\frac{t}{T}) + f_1]\} \quad (6-1)$$

$$Y(t) = \sin\{2\pi[f_1 \times \beta^t]\} \quad (6-2)$$

其中 f_1 、 f_2 為起始及終止頻率、 T 為掃頻時間、 $\beta = (\frac{f_1}{f_0})^{\frac{1}{T}}$ 。

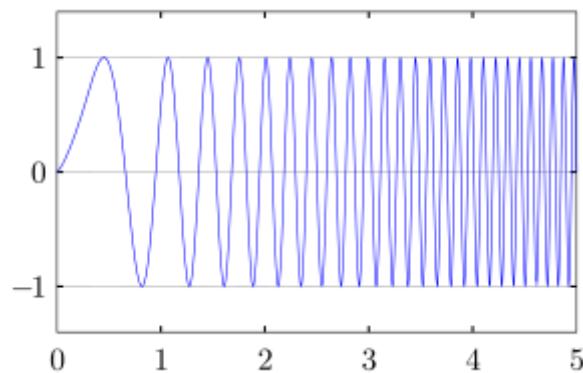


圖 6-1 Linear Sweep Sine 時域訊號圖

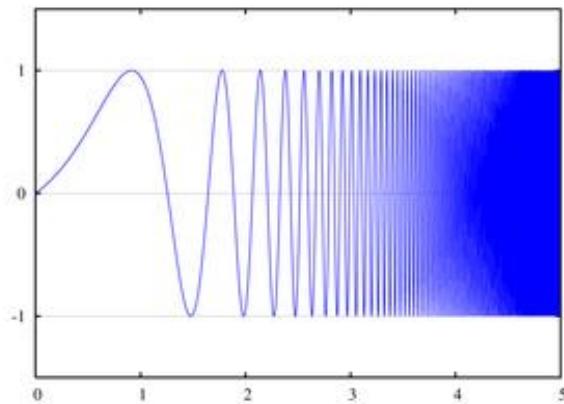


圖 6-2 Logarithmic Sweep Sine 時域訊號圖

6.1.1 掃頻量測流程

本節將介紹如何使用 Chirp 訊號進行 SLDV 系統的量測，所選用的是微動振鏡系統，儀器控制方法如 3.2.1 節相似，量測流程與 3.2.2 節相似，與前述最大的不同為掃頻量測中，會控制訊號產生器產生 Chirp 形式的激振訊號，於短時間內以線性方式改變的頻率激振試片，接著再使用資料擷取系統(NI-DAQ)選擇合適的取樣頻率(Sampling Frequency)及取樣點數(Sample Data)，記錄試片於一次完整激振時間內振動的時域訊號，後經由 FFT 後得到該點所有頻率及速度響應的關係，常用的量測參數如表 6-1。以此方式得以一次完成一個點所有頻率的量測，之後再控制鏡組轉動至下一個點進行量測，依前述架構設計了 Chirp 訊號的量測流程圖如圖 6-3 所示。

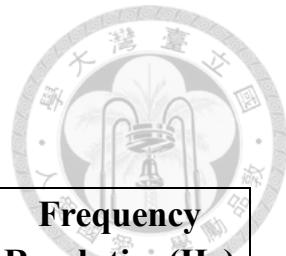


表 6-1 掃頻量測參數表

| Bandwidth(Hz) | Sampling Frequency(Hz) | Measure Time(s) | FFT Lines | Frequency Resolution(Hz) |
|---------------|------------------------|-----------------|-----------|--------------------------|
| 1000 | 2560 | 12.8 | 12800 | 0.078 |
| 2000 | 5120 | 6.4 | 12800 | 0.156 |
| 5000 | 12800 | 2.56 | 12800 | 0.39 |
| 10000 | 25600 | 1.28 | 12800 | 0.78 |
| 20000 | 51200 | 0.64 | 12800 | 1.56 |
| 50000 | 128000 | 0.256 | 12800 | 3.9 |
| 100000 | 256000 | 0.128 | 12800 | 7.8 |
| 200000 | 512000 | 0.064 | 12800 | 15.6 |

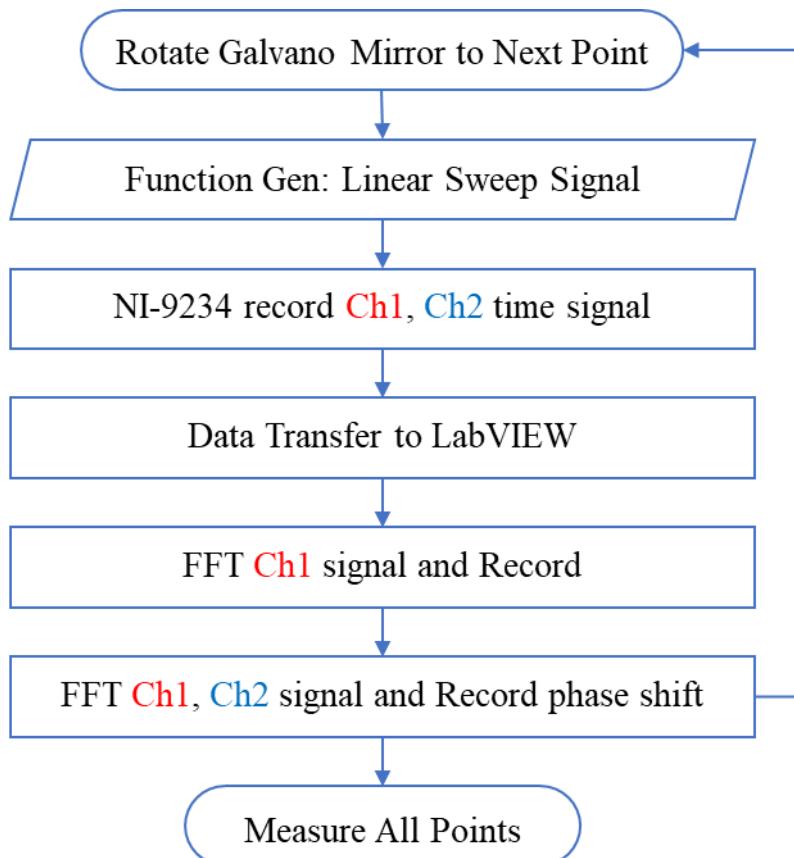


圖 6-3 掃頻量測流程圖



其中，Ch1 及 Ch2 分別代表 LDV 的量測資料及訊號產生器輸入訊號，由表 6-1 可以看出，在一次量測 1 Hz 至 20000 Hz 的頻率段下，一個量測點只需要耗費 0.64 秒，在量測效率比起 SLVD 單頻量測上有顯著的提升，兩者比較結果會於 6.1.4 節中呈現。

6.1.2 後處理與量測結果

完成一次量測後，會得到數筆 Ch1、Ch2 的時域訊號，取決於布點數量，藉由後處理這些時域訊號，可以得到試片於各頻率下的頻率響應結果及其振型，流程與 4.1 節中相似。首先，對 Ch1 的時域振動結果作快速傅立葉轉換，可得該點的頻率響應結果如下圖 6-4，隨後根據該點的 X、Y 座標，並搭配 Ch1、Ch2 的相位差判斷正負振動情況如圖 6-5，便可以繪出在該 Chirp 頻段中，所有頻率的模態響應結果，接著對每一點的頻率響應結果平均後，得到全域式的模態響應情況。

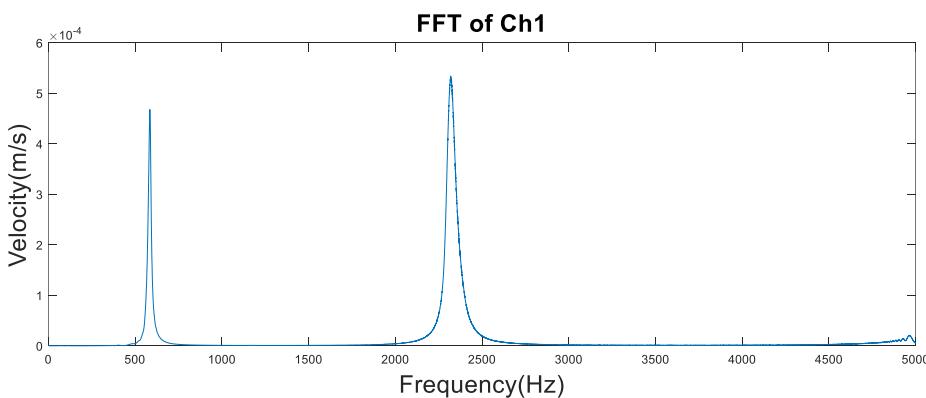


圖 6-4 Chirp 量測模式 Ch1 頻率響應圖

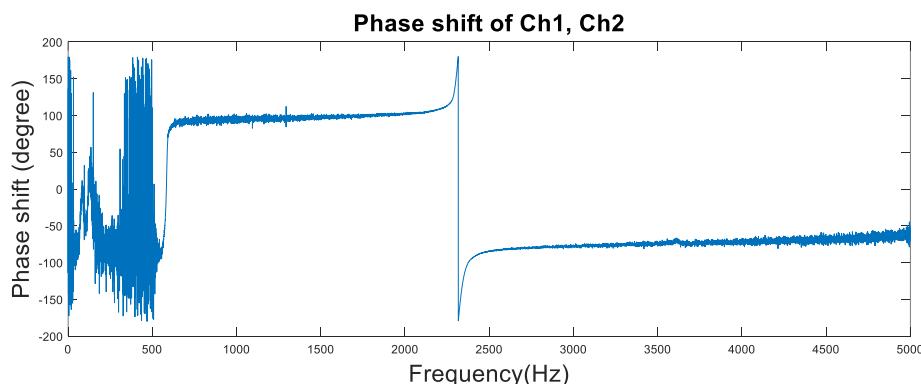


圖 6-5 Chirp 量測模式 Ch1、Ch2 相位差圖

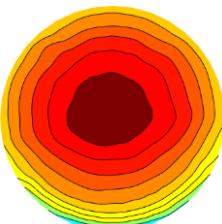
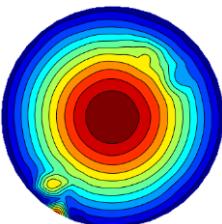
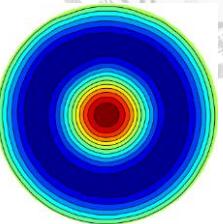
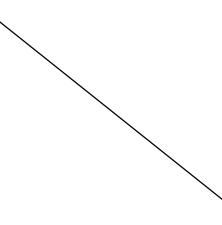
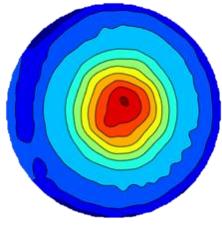
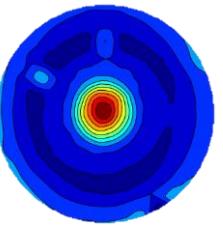


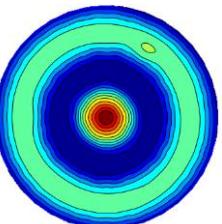
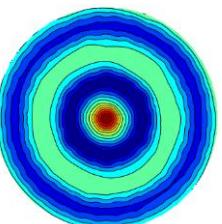
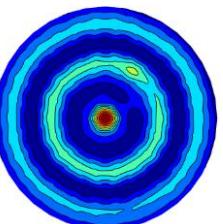
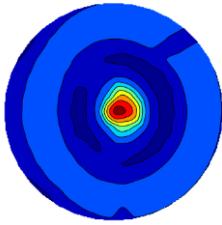
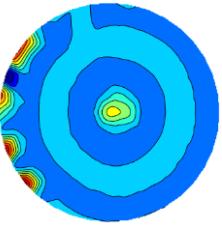
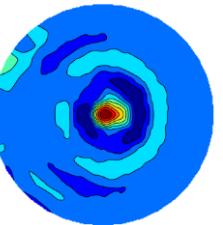
6.1.3 Chirp 訊號量測結果

本節將展示實際使用 Chirp 訊號的量測結果，選用的量測試片為圓形壓電試片 PE-68，試片相關參數如 5.2.1 節中相同，量測參數選用表 6-1 中第五列，頻寬為 20000 Hz、取樣頻率 51200 Hz、量測時間 0.64 秒、FFT Lines 為 12800，也就是在此頻率段中能繪出 12800 張有效振型圖，頻率解析度為 $20000 \div 12800 = 1.56$ Hz。實際模態圖結果如表 6-2 所示，表中繪出試片的前六個自然共振模態，並放上 SLDV 單頻量測結果作為參考比較。

完成一次 Chirp 量測後，可以得到很多張模態圖，為了方便檢視量測結果，本研究利用 MATLAB GUI 設計了後處理操作介面如圖 6-6。使用者得以利用底下的 Slider Bar 來挑選頻率並繪出相對應的 2D 及 3D 模態圖於上方，底下區域則繪出經過全域平均後的掃頻結果，更清楚地顯示出試片的自然共振頻率響應情形。

表 6-2 PE-68 於單頻及 Chirp 訊號之模態響應表

| | Mode 1 (0, 0) | Mode 2 (0, 1) | Mode 3 (0, 2) |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Swept Sine Signal |  |  |  |
| Freq. | 71 Hz | 560 Hz | 2240 Hz |
| Chirp Signal |  |  |  |
| Freq. | | 582 Hz | 2321 Hz |

| | Mode 4 (0, 3) | Mode 5 (0, 4) | Mode 6 (0, 5) |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Swept Sine Signal |  |  |  |
| Freq. | 5300 Hz | 9000 Hz | 14000 Hz |
| Chirp Signal |  |  |  |
| Freq. | 5215 Hz | 9249 Hz | 14392 Hz |

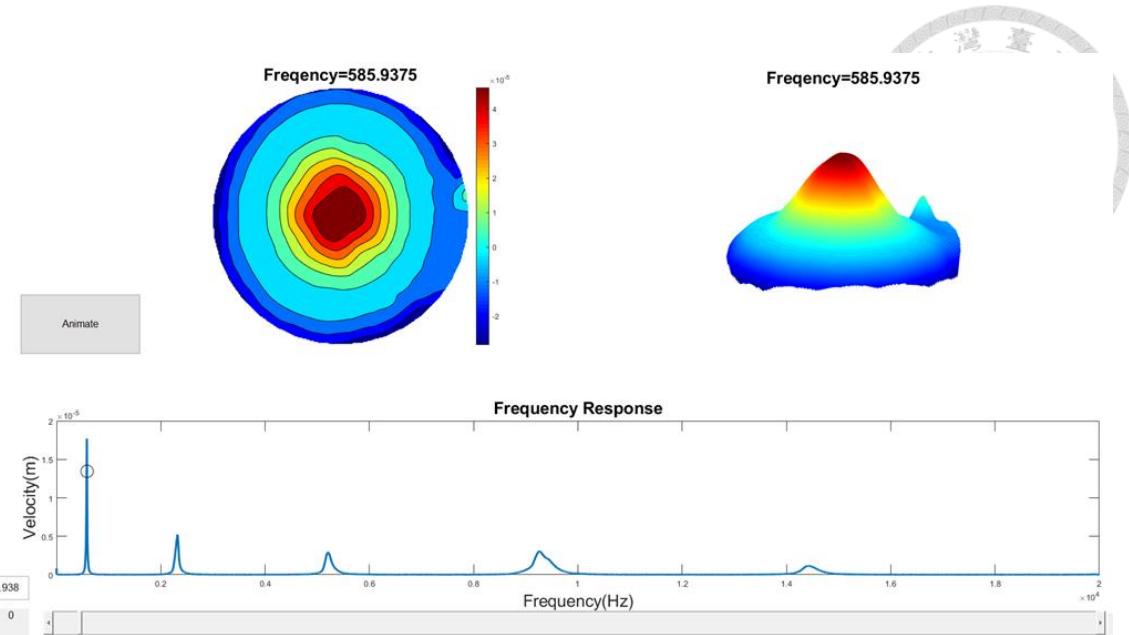


圖 6-6 Chirp 訊號後處理 GUI

6.1.4 Chirp 量測比較及優勢

由表 6-2 可以看出，利用 Chirp 訊號搭配 SLDV 量測可以得到大部分的共振模態響應結果，準確性雖然較原先單頻訊號的 SLDV 方法差，但在速度響應程度較佳的區域仍能得到不錯的模態量測結果，並且能有效地提升量測效率。

在響應程度較差的共振頻率上，SLDV 搭配 Chirp 訊號會難以成功繪出模態振型，例如表中的第一、第五及第六個自然共振模態，因為所有頻率結果皆是由同一筆時域數據中經過快速傅立葉轉換後產生，同筆資料會由響應程度高的共振頻率所主導，而響應較差處由於資料擷取系統(NI-DAQ)電壓軸較大的關係，使得低電壓處量測的精度降低。接著將 Chirp 訊號中所有量測點做快速傅立葉轉換(FFT)，將時域訊號轉換為頻域後，取所有點的平均作圖如圖 6-7 所示；而圖 6-8 則展示出其中一點的 Chirp 訊號量測結果。

由圖 6-7、圖 6-8 可以看出，由多點 Chirp 訊號 FFT 取平均後，得到的模態響應會較單點的量測結果共振頻率的分辨率更佳，曲線的起伏會區別的更加明顯，而試片的(0, 0)模態，於 Chirp 訊號表現得較不明顯，因而無法成功量測；同理，(0, 4)模態由於振動響應程度較(0, 1)模態小很多，繪出的模態振型辨識度會較差。



此外，單點量測可能會受到節線(nodal line)影響，使得共振頻率表現得不明顯，如圖 6-8 中(0, 5)模態(14570Hz)共振頻率響應情形便較差，可能導致在判斷時遺漏此共振頻率。因此多點 Chirp 訊號可以成功避免受到節線的影響，更準確地判斷出試片的共振頻率。

SLDV 的單頻量測模式有量測精度高的優勢，並且得以用準確的振動數據推估至聲壓響應上；而 SLDV 搭配 Chirp 掃頻訊號雖然在速度響應程度較低處量測結果不佳，但於共振頻處的量測結果與單頻 Sine 訊號量測模式相比仍有很好的對應性，並得以更準確且快速地判斷出試片的共振頻率。與單頻模式相比，Chirp 系統可以提升近十倍的量測效率，這取決於布點情形及量測頻段設定的情形。

將前述優劣整理比較後可得下表 6-3。

表 6-3 SLDV 於 Swept Sine 及 Chirp 訊號之比較表

| | Swept Sine Signal | Chirp Signal |
|---------------|--------------------------|---------------------------|
| Measure Speed | Slower | Faster |
| Accuracy | Higher | Lower |
| Application | Predicted Acoustic Field | Judge Resonance Frequency |

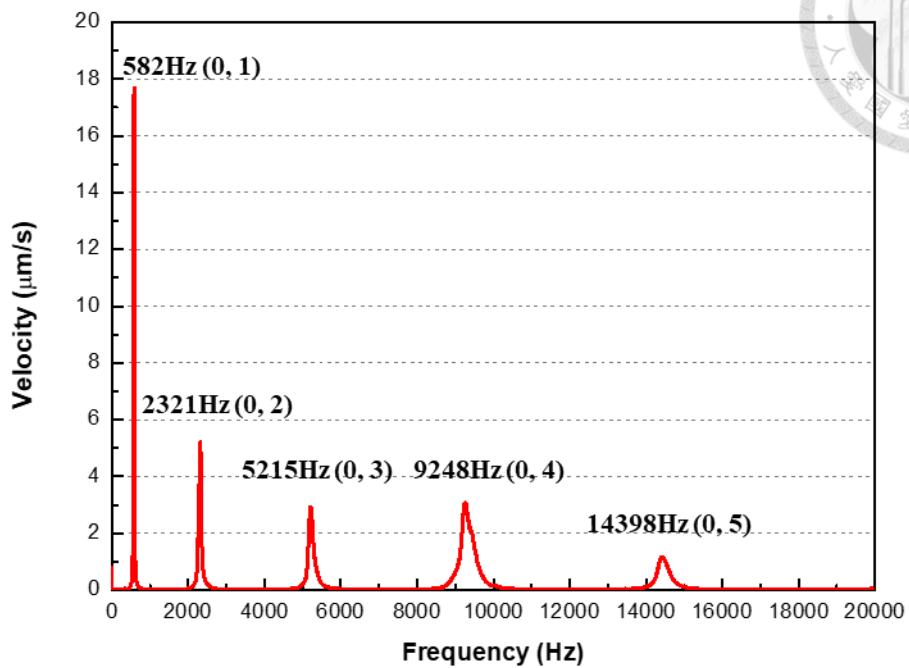


圖 6-7 Chirp 頻率響應結果-多點平均

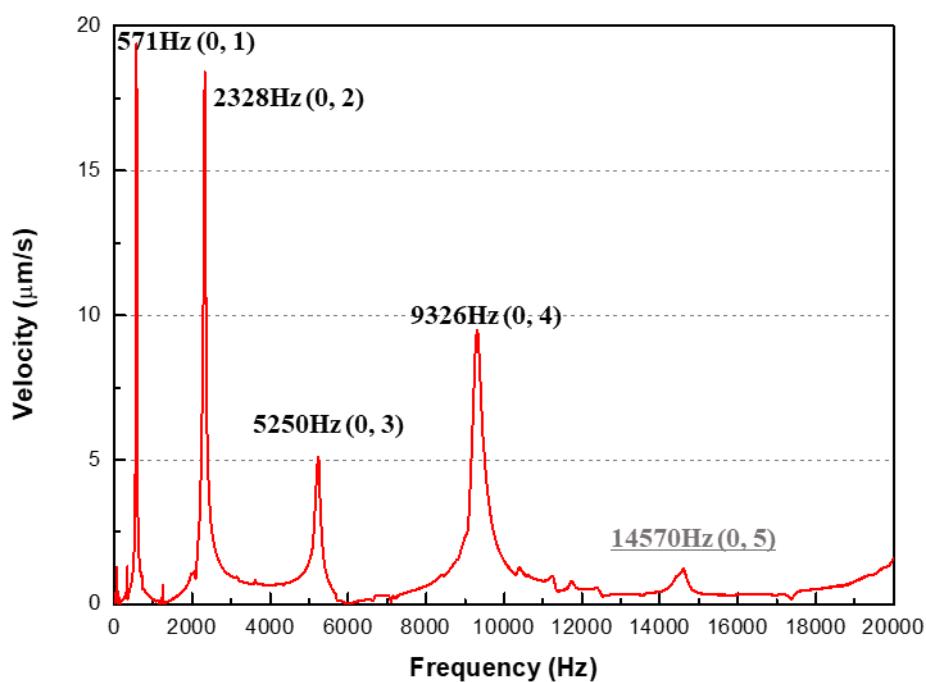


圖 6-8 Chirp 頻率響應結果-單點



6.2 連續掃描型都卜勒振動儀(CSLDV)

除了改變激振方式外，本節提出另一種改變量測型態的方式，將原先逐點量測的模式改為逐線量測，在等速率改變量測點的同時進行量測並記錄量測資料，而這個方法稱為「連續掃描型都卜勒振動儀 Continuous Scanning Laser Doppler Vibrometry, CSLDV」，示意圖如下圖 6-9 所示。

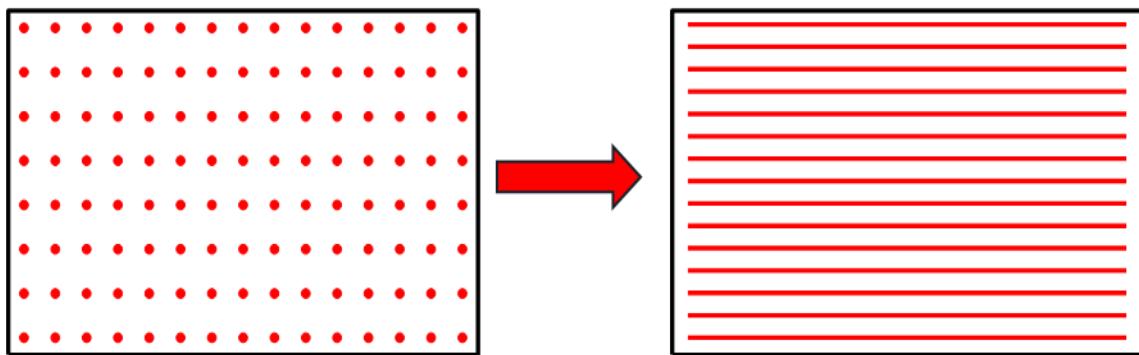


圖 6-9 CSLDV 量測方式示意圖

在前述章節提出的 SLDV 方式中，每點都需停留一段時間以記錄穩態的量測資料，因此在量測上不可避免地需要耗費許多時間。而本節介紹的 CSLDV 量測法，藉由保持雷射點不停的移動，逐線段地量測試片表面的振動情形，於此同時利用資料擷取系統(NI-DAQ)記錄量測訊號，如此得以顯著地提升量測效率。

CSLDV 量測法常用於需要很長量測時間的待測物，比如體積很龐大的物體或是低共振頻率的待測物，如下圖 6-10[14]為實際使用 CSLDV 方法量測風車葉片共振頻率的實驗照片。

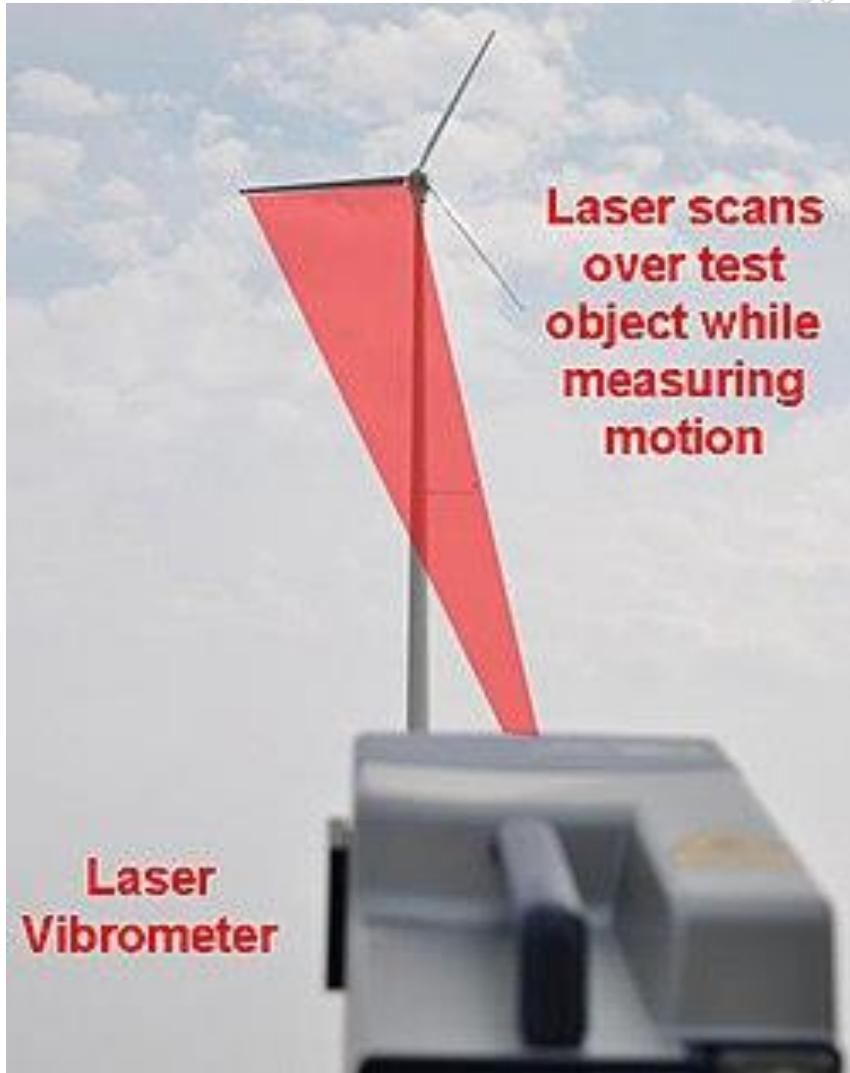


圖 6-10 CSLDV Application[14]

在 CSLDV 量測中，最重要的參數是決定鏡組移動的速度快慢，移動速度快可以節省較多的量測時間，但相對而言會犧牲量測精度，反之亦然。鏡組本身掃描的速度也可能會影響 LDV 量測到的速度資料。常見的方式是引入「掃描頻率 Scan Frequency(ω_A)」的概念，定義 x 為走的路徑點， T_A 為量測一條線的時間，定義出掃描頻率 ω_A 如下式 6-3，掃描頻率越高則代表鏡組每次量測所需的時間越短。

$$x(t) = x(t + T_A)$$
$$\omega_A = \frac{2\pi}{T_A} \quad (6-3)$$



6.2.1 CSLDV 量測流程

CSLDV 採用的是微動振鏡系統的實驗架構，與 3.2.2 節中的實驗架構相同。根據量測需求，本研究設計的 CSLDV 量測流程圖如下圖 6-11 所示。首先，會先操控微動振鏡組使其轉動到特定起始點，隨後決定布線方向(X 或 Y 方向)、數量及掃瞄頻率後，控制訊號產生器輸出特定頻率及電壓的訊號激振試片，操控微動振鏡沿著線段移動並同時以 NI-9234(or NI-9775)記錄 LDV 量測的所有時域速度訊號，以此方式完成一條線段的量測，重複這個流程直到完成所有線段的量測。

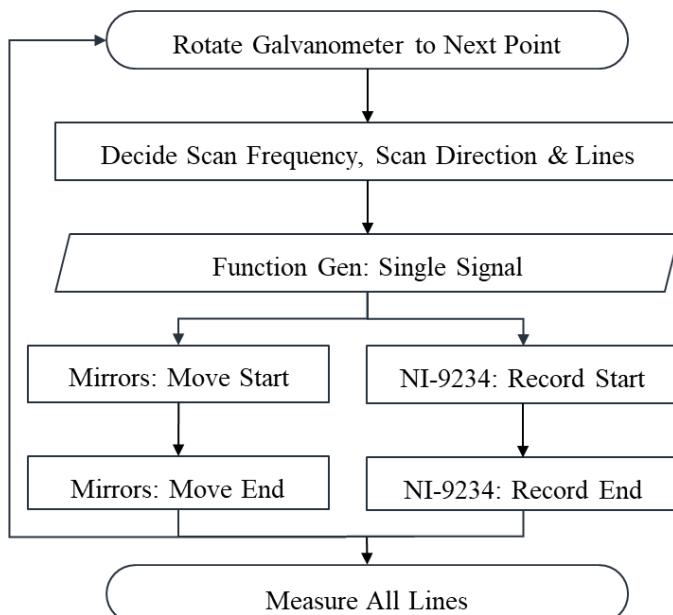


圖 6-11 CSLDV 量測流程圖

為了節省最多的量測時間，因此需要確定鏡組線段的掃描時間與 NI-DAQ 量測記錄時間是相同的，在鏡組開始移動的同時開始記錄量測訊號，移動停止的同時停止紀錄量測訊號。本研究採用 LabVIEW Synchronize 功能達成同步化功能，程式方塊圖如圖 6-12 所示。首先，使用「Create Rendezvous.vi」函數，創立兩個等待執行的方塊圖，接著在鏡組移動前及 NI-DAQ 開始擷取量測資料前，加入「Wait at Rendezvous.vi」函數，在 LabVIEW 同時執行到這兩個方塊圖時，才會執行下一步的流程，如此得以確保鏡組及資料擷取是同步運行的，節省最多的量測時間。

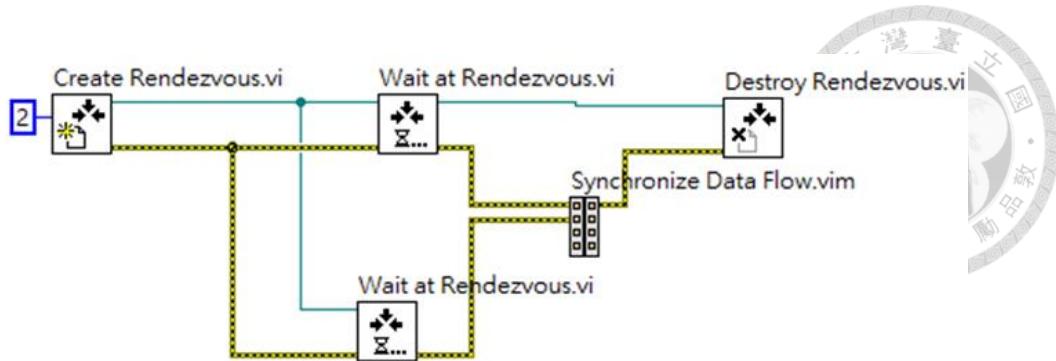


圖 6-12 LabVIEW Block Diagram(同步化)

6.2.2 CSLDV 後處理

CSLDV 量測結果為數筆不同線段的速度時域訊號，每筆資料包含當下的速度量測資料 Ch1 及訊號產生器輸入資料 Ch2。本研究開發了 CSLDV 後處理的流程圖如圖 6-13 所示，所使用到的原理類似「振幅調變 Amplitude modulation, AM」，利用時域訊號隨時間的電壓變化情形，推估至模態振型上。

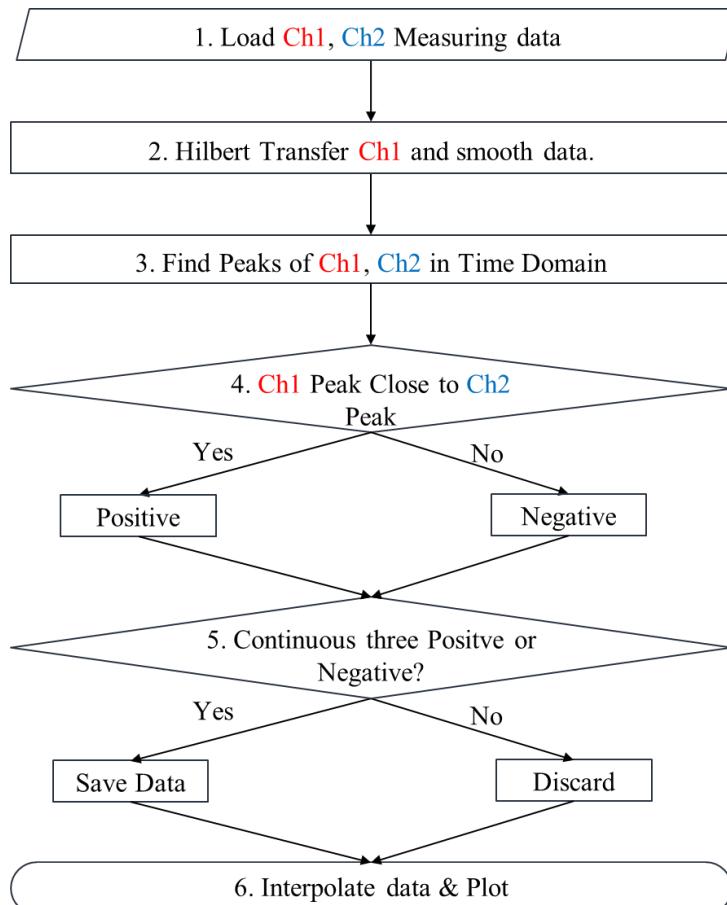


圖 6-13 CSLDV 後處理流程圖



實際量測試片同 4.4.1 節中，為 PSI-5A4E 雙邊固定的 SBS 試片，量測參數為 X 方向，15 條線，掃描頻率設定為 20 Hz，換算至實際移動速度為 120.6 mm/sec，激振頻率為 12246 Hz，試片的第六個自然共振頻率。

首先會將所有 Ch1, Ch2 的時域訊號載入 MATLAB 中，同 4.1 節中所介紹，Ch1 為 LDV 量測振動速度、Ch2 為訊號產生器的輸入訊號。繪出 Ch1 後可以得到如圖 6-14 所示，共有 15 筆時域訊號，其中可以看出有些地方由於鏡組本身進行移動受到空間雜訊干擾，使得量測結果有點不連續且毛躁的情形。

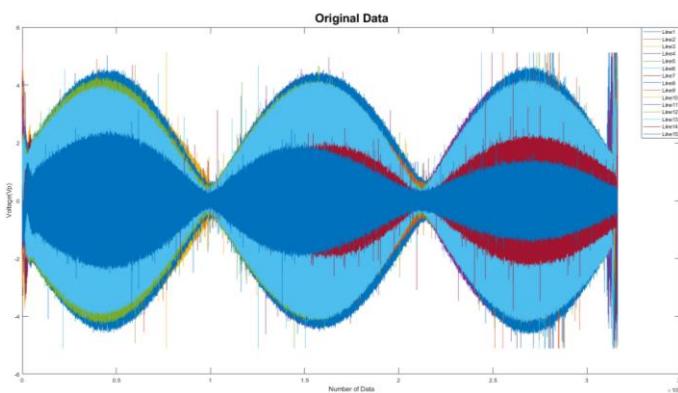


圖 6-14 CSLDV 原始量測資料

接著對 Ch1 速度量測資料取包絡線(Hilbert Transform)，進一步消除毛躁且不連續的量測點，對全數據取絕對值後繪出電壓結果如圖 6-15。由圖可以看出量測結果是規律且連續的，驗證此量測頻率設定及流程是可以進行準確量測的。

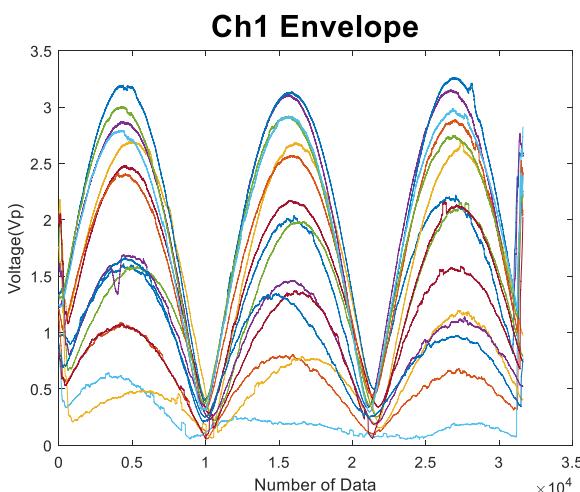


圖 6-15 CSLDV 取包絡線後結果



接著比較量測訊號 Ch1 及激振訊號 Ch2 的相位差，如下圖 6-16 所示，分別為 In-phase 及 Out-of-phase，藉由判斷兩者的峰谷對應情形則可以知道當下點的為正向或反向振動。

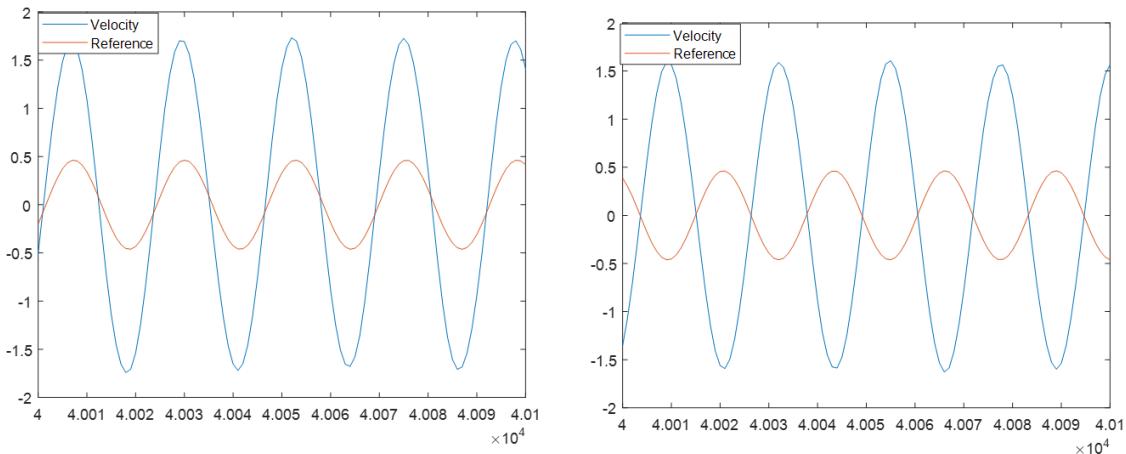


圖 6-16 正向振動相位差(峰對峰)及反向振動相位差(峰對谷)

最終步驟是檢查所有訊號中是否有雜訊或量測不佳的點，方式為判斷量測波型是否為連續的五個同相位或反相位，若有量測不佳的情形發生，則代表會有正負相位在短時間內交錯的情形產生，在這一步驟中就會刪除這些量測資料，用前後量測結果較佳的資料內插後取代。

依照上述流程，處理完畢後作圖可以得到下圖 6-17 的結果，並同時放上圖 6-18 為 SLDV 於 120 個布點數量時的量測結果作為對照。由兩者結果可以看出，透過本節介紹的 CSLDV 量測後處理流程，得以成功利用振幅調變的方式將時域訊號轉換後，繪出正確的模態圖，兩者量測方法於模態振型上皆有很好的對應性，量測效率及精度會於 6.2.4 節中做進一步的比較。

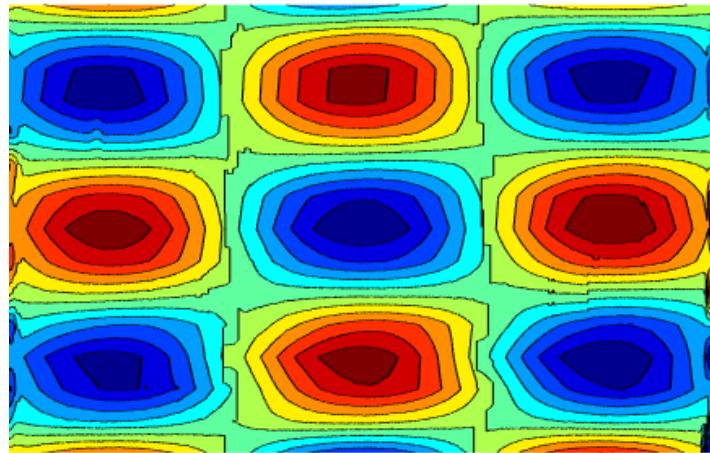
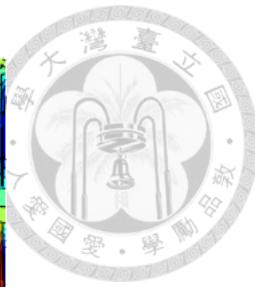


圖 6-17 CSLDV 量測結果(SBS Mode 6)

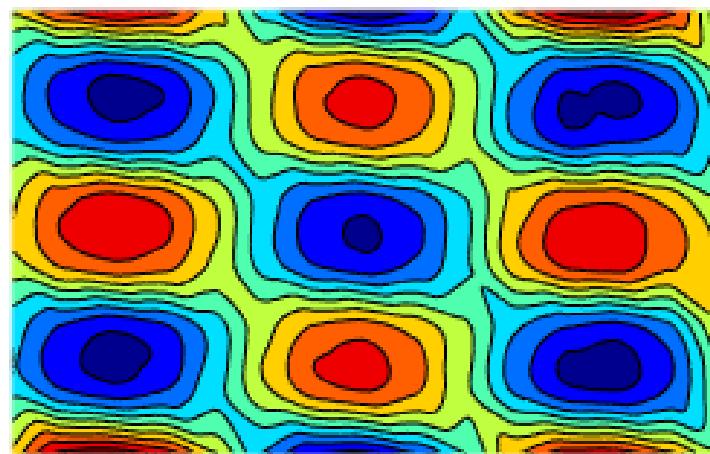


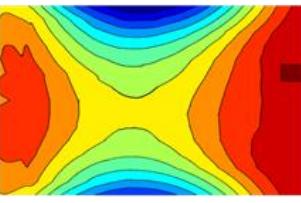
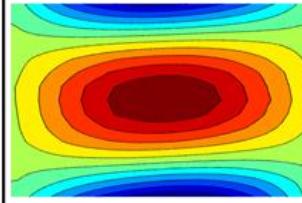
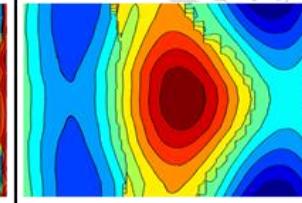
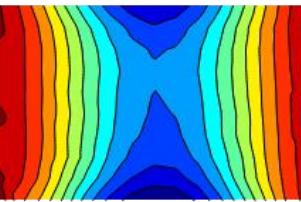
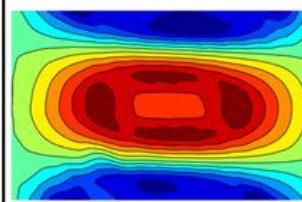
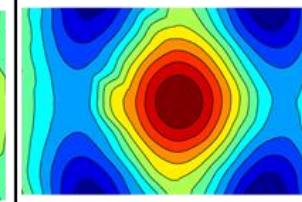
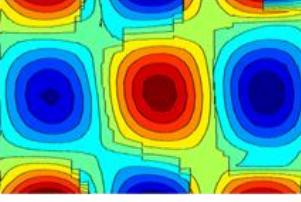
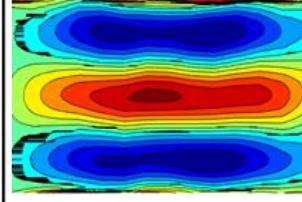
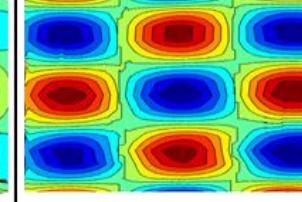
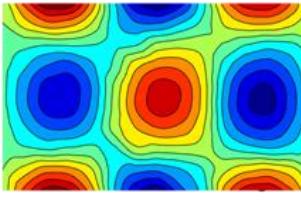
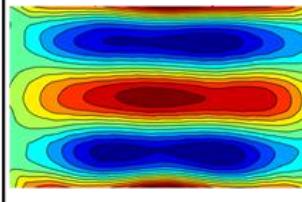
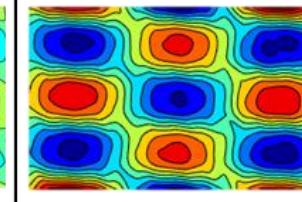
圖 6-18 SLDV 量測結果(SBS Mode 6)

6.2.3 CSLDV 量測結果

本節依照前述 CSLDV 的介紹，實際進行所有模態的量測，待測物同 4.3.1 節所介紹，為 PSI-5A4E 雙邊固定的 SBS 試片，量測參數為 X 方向，15 條線，掃描頻率同上設定為 20 Hz，換算至實際移動速度為 120.6 mm/sec，量測試片的前六個自然共振頻，並與 SLDV 於 120 個量測點的結果進行對照，結果如下表 6-4 所示。

由表 6-4 可以看出，CSLDV 及 SLDV 方法在各頻率下量測的模態振型及頻率皆有很好的對應性，而 CSLDV 由於是逐線段量測的方式，因此在掃描移動方向上(X 方向)，會容易受到雷射點移動時，環境中的雜訊所干擾，在模態表現上偶爾會有不連續的現象產生。

表 6-4 CSLDV 量測 SBS 試片前六共振模態結果

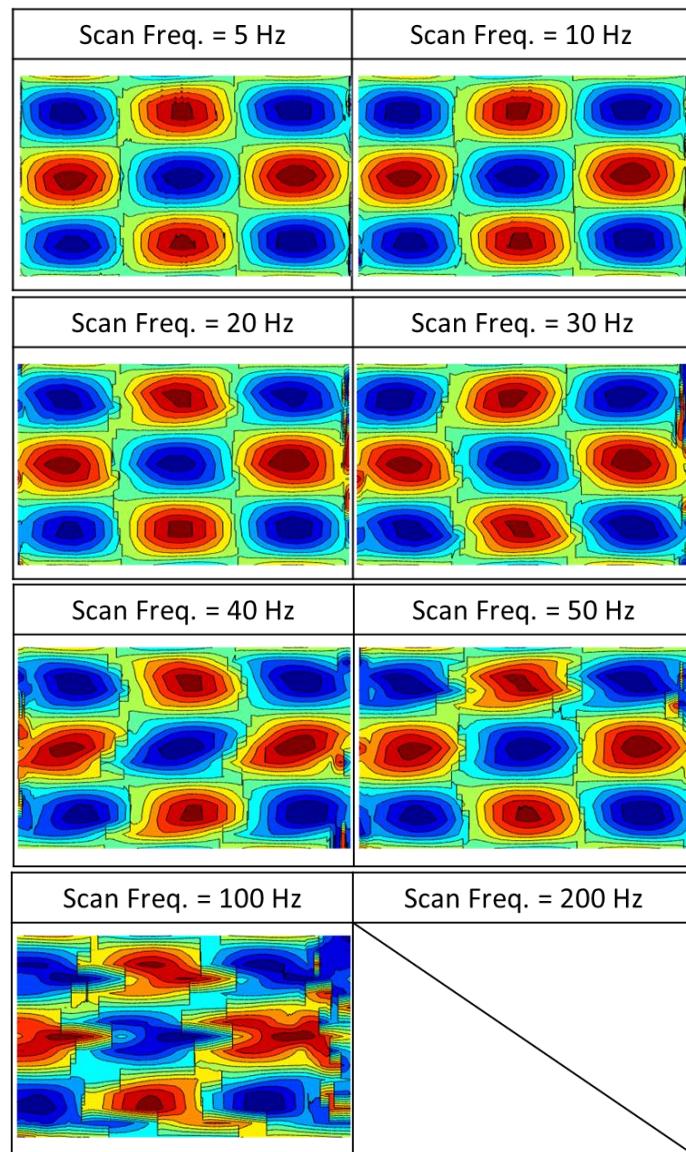
| | 1 | 2 | 3 |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| CSLDV |  |  |  |
| SLDV |  |  |  |
| 頻率 | 590Hz | 2250Hz | 3300Hz |
| | 4 | 5 | 6 |
| CSLDV |  |  |  |
| SLDV |  |  |  |
| 頻率 | 5275Hz | 9638Hz | 12245Hz |



接著探討是否能透過增減掃描頻率(Scan frequency)，達到更理想的量測結果或量測效率，以下將就同一試片(SBS 雙邊固定試片)，於 12246 Hz 第六共振模態進行量測，掃描頻率分別由 5 Hz 逐步提升至 200 Hz，量測結果如下表 6-5 所示。

由表 6-5 可以看出，隨著量測頻率增加，量測精度會隨之下降，提升量測速度的同時會犧牲量測的準確性。由上表可見，此試片最佳的掃描頻率約落於 20 至 30 Hz 之間，在保持一定量測精度的前提下，有最佳的量測效率。而不同大小及激振頻率的試片，會有不同的最佳量測頻率，需要在不同實驗條件下進一步設定。

表 6-5 CSLDV 不同掃描頻率對量測結果的影響





6.2.4 CSLDV 與 SLDV 優劣比較

CSLDV 及 SLDV 兩種方法皆可以繪出正確的模態振型圖，以下整理出兩者的優劣比較如下表 6-6，量測參數及試片皆與 6.2.3 節中所設定相同，比較的模態振型圖為 SBS 試片的第六共振頻。

CSLDV 於掃描頻率 50 Hz 時，與 SLDV 相比可以節省約 86% (24.36 秒)的量測時間，5 Hz 時則節省約 22% (6.28 秒)的量測時間，由此可以看出 CSLDV 於量測效率上與 SLDV 相比有很大的優勢，在某些會因為振動發熱而無法穩定表現模態振型的試片上，CSLDV 方法可以利用時量測時間短的優勢成功量測。但相對的，掃描頻率高會使得訊噪比(Signal-to-noise ratio)較低，因而須搭配高、低通濾波(High or Low pass Filter)或 LDV 內的追蹤濾波器(Tracking Filter)功能過濾雜訊，提升訊噪比，以得到較佳的量測結果。未來於 CSLDV 的使用上，可以根據量測精度及時間成本的要求，設定合適的量測方式及掃描頻率以完成量測。

表 6-6 CSLDV 及 SLDV 優劣比較

| | CSLDV (Speed = 302 mm/s, 15 Lines) Scan Rate = 50 Hz | CSLDV (Speed = 30.2 mm/s, 15 Lines) Scan Rate = 5 Hz | SLDV (Galvano System) (120 Scattered Points) |
|-----------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Time Cost | 4.14 sec(-86%) | 22.22 sec (-22%) | 28.5 sec |
| Accuracy | Low | Medium | High |
| Signal-to-noise ratio | Low (Need LDV Filter) | Medium(Need LDV Filter) | High |
| Result | | | |



第七章 結論與未來展望

7.1 結論

本研究基於單點式的 LDV，分別開發出兩種不同的掃描型雷射都卜勒量測系統(SLDV)，分別為龍門平台量測系統及微動振鏡量測系統，兩者皆可做到自動化的全域速度量測，後經由量測資料的後處理可得到準確的振型圖，與實驗室先前開發的電子斑點干涉術(ESPI)方法有很好的對應性，本研究開發的 SLDV 方法除了有更廣的速度量測範圍，同時可以數值化的顯示振動情形，並能明顯地判斷出振動的正負方向。

隨後搭配 DPM 的聲學理論，可以將聲學元件的振動情形推估到聲學場上，與業界公認的無響室聲壓量測情形有不錯的對應性，並得以在任何環境中進行聲學量測。此外，本系統也能改善研究動機中 KLIPPEL 公司開發的多機能量測平台，於高頻(3000Hz 以上)振動量測精度較差的問題，這也是這份研究最大的貢獻。最後透過改良 SLDV 系統，開發出 Chirp 量測法以及 CSLDV 量測法，透過改變量測方式，顯著的提升量測效率。以下將本研究的成果及結論整理如下：

1. 成功開發出兩種自動化全域振動量測系統(SLDV)，分別使用 MATLAB 以及 LabVIEW 為控制程式，兩者系統皆可完成任意外型及任意布點方式的全域振動量測。
2. 以掃描型雷射都卜勒量測系統(SLDV)成功繪出模態振型圖，與另一種全域振動量測技術：電子斑點干涉術(ESPI)相比，可得到數值化的振動量測結果且能得到試片的正負振動情形，能量測的振動速度範圍也較 ESPI 方法更廣。
3. 成功開發分布參數量測法(DPM)，概念是以雷射都卜勒振動儀取代 KLIPPEL 公司開發的雷射位移計，並搭配不同全域量測儀器達到全場聲振量測的目的，如此可以改善雷射位移計於高頻量測精度較差的缺點，並提升振動頻率、振動速度範圍以及量測區域大小。



4. 透過 DPM 得到的聲壓量測結果與無響室量測有很好的對應性，無論試片阻抗高低皆能精準測得聲響曲線結果，並且 DPM 方法對於測試環境要求低，得以在吵雜環境中利用光學量測方法得到聲學元件的聲壓響應結果。
5. 與 Polytec 原廠相似的產品相比，同樣以單點式 LDV 結合微動振鏡系統，本研究開發的 SLDV 系統可以使用大約四分之一的架設成本，並且得以將此系統應用於聲壓量測上，由於得以自由進行鏡組控制，因此得以延伸拓展至開發 CSLDV 量測系統。
6. 開發 SLDV 搭配 Chirp 訊號的量測系統，除了可以大幅提升量測效率外，也能避免單點 Chirp 的振動量測時，可能量測到試片節線(nodal line)導致共振頻率誤判的情形發生。
7. 成功將逐點量測的 SLDV 系統改寫為逐線段量測的 CSLDV 系統，在大幅增加量測速度的同時，也可以更細節地看出量測線段的振動響應情形。
8. 本研究所開發的兩種全域量測系統，除了可以與本文中使用的雷射都卜勒振動儀 Polytec OFV-505 量測以外，也能搭配其他任何型號的雷射都卜勒振動儀，如 Polytec PDV-100；此外，龍門平台系統也能與雷射位移計(Laser Displacement)搭配使用，實際結合儀器為雷射位移計 Keyence LK-H055。



7.2 未來展望

本研究開發的掃描型雷射都卜勒量測系統(SLDV)，目前大部分仍應用於量測壓電片及聲學元件的振動模態，未來可以在量測物及量測目標進行延伸，並提升系統使用的方便性。

1. 量測阻尼比(Damping ratio): 利用多點的方式來量測試片全域的時域振動訊號，再由各點振動情形的衰減程度來求得試片全域的阻尼比。
2. 非破壞檢測(Defect detect): 振動在試片上傳遞時，若遇到障礙物或試片表面有破損時，會有不連續的振動特徵產生。未來可以利用 SLDV 或 CSLDV 的量測方式，開發出自動化非接觸式的缺陷偵測系統。
3. 增加振動量測應用：將本論文開發的實驗裝置實際應用在量測運作機臺的外殼或大型機器如風車，判斷振動噪音的來源並對機台做振動評估及共振模態解析。
4. 提升使用方便性：將 SLDV 量測系統搭配即時影像處理的技術，自動判定待測物的邊界並自動進行布點設定後量測。

參考文獻



- [1] Yeh Y, Cummins H Z, Localized flow measurements with a He-Ne laser spectrometer[J]. Appl Phys Letters, 1964, 4, 176.
- [2] 黃至偉,「壓電陶瓷雙晶片於雙邊固定邊界之能量擷取及雷射都卜勒自動化陣列式量測模組」國立臺灣科技大學機械工程所碩士論文，2014。
- [3] Y. H. Huang, H. Y. Chiang, “Vibrational mode and sound radiation of electrostatic speakers using circular and annular diaphragms.”, Journal of Sound and Vibration, vol.371, pp. 210-226, 2016.
- [4] E. N. Leith, J. Upatnieks, “Reconstructed wavefronts and communication theory.”, JOSA, vol. 52(10), pp. 1123-1130, 1962.
- [5] J. Butters, J. Leendertz, “Speckle pattern and holographic techniques in engineering metrology.”, Optics Laser Technology, vol. 3(1), pp. 26-30, 1971.
- [6] O. Lokberg, K. Hogmoen, “Use of modulated reference wave in electronic speckle pattern interferometry.”, Journal of Physics E: Scientific Instruments, vol. 9(10) pp. 847, 1976.
- [7] C. Wykes, “Use of electronic speckle pattern interferometry (ESPI) in the measurement of static and dynamic surface displacements.”, Optical Engineering, 21(3), pp. 213400, 1982.
- [8] W. C. Wang, C. H. Hwang, S. Y. Lin, “Vibration measurement by the time-averaged electronic speckle pattern interferometry methods.”, Applied optics, vol. 35(22), pp. 4502-4509. 1996.
- [9] 黃吉宏,「應用電子斑點干涉術探討三維壓電材料」, 國立台灣大學機械工程研究所博士論文, 1998。
- [10] 黃育熙,「壓電石英晶體之平板結構的動態特性研究」, 國立台灣大學機械工程研究所博士論文, 2009。



- [11] 張秀宜,「遺傳演算法搭配振動理論解析與機器學習結合共振頻率獲取壓電陶瓷材料常數」國立台灣大學機械工程研究所碩士論文，2022。
- [12] 江信遠,「靜電和壓電揚聲器之圓形振膜振動與聲壓研究」，國立台灣科技大學機械工程研究所博士論文，2017。
- [13] M. Allen, M. Sracic A new method for processing impact excited continuous-scan laser Doppler vibrometer measurements, *Mech. Syst. Signal Process.* 24 (3) (2010) 721–735.
- [14] Shifei Yang, Matthew S. Allen, Output-only Modal Analysis using Continuous-Scan Laser Doppler Vibrometry and application to a 20 kW wind turbine, *Mechanical Systems and Signal Processing* 31 (2012) 228–2

附錄

A.MINISCAN III-10 微動振鏡組規格書



RL-III-10

2-AXIS DEFLECTION UNITS FOR COST SAVING INDUSTRIAL DESIGNS

■ Robust, compact and lightweight
■ Low noise and drift based on latest Servo-Electronic
■ Very high writing speed
■ Excellent price-performance ratio
■ Input aperture: 10 mm

BEST PRICE-PERFORMANCE RATIO

YOUR BENEFITS
The new RL-III offers you a very high writing and positioning speed at an outstanding price-performance ratio. Nevertheless, due to its low noise and drift values and its robustness, the system is ideally suited for use in an industrial production environment.

CONFIGURABLE THROUGH AND THROUGH
Lenses and protective glass are available for many standard laser types, the wavelengths 1,064 nm and 10,600 nm, power densities, focal lengths and processing areas. This allows to handle a wide range of tasks with high quality and optimized throughput. We would also be happy to help you put together the perfect configuration for your application.

TYPICAL APPLICATIONS
Dynamic marking tasks, especially on the fly, are predestined applications. Speed and dynamic responses are guaranteed, thanks to the new developed control with powerful PWM output stages.

INNOVATION AND QUALITY
Innovation and maintaining high product quality standards are our priorities at RAYLASE. All our products are developed, built and tested in our own laboratories and production facilities. Through our world-wide support network we can offer best maintenance and rapid service for our customers.

www.raylase.com

RL-III-10



2-Axis Deflection Units

For Cost Saving Industrial Designs

General Specifications

| | | |
|---------------------|------------------|--------------------------------------|
| Power supply | Voltage | +/-15 V to +/-18 V |
| | Current | 2 A, RMS, max. 10 A |
| | Ripple/ Noise | Max. 200 mVpp, @ 20 MHz bandwidth |
| Ambient temperature | | +15°C to +35°C |
| Storage temperature | | -10°C to +60°C |
| Humidity | | <80 % non-condensing |
| IP-Code | | IP 54 |
| Interface signals | Digital | XY2-100 protocol |

| | |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Typical deflection (optical) | $\pm 0.393 \text{ rad}$ |
| Resolution XY2-100 16-Bit | 12 μrad |
| Repeatability (RMS) | <2.0 μrad |
| Temperature drift | Max. Gain drift ¹ Max. Offset drift ¹ |
| Long-term drift 8 h ¹ | 15 ppm/K 10 $\mu\text{rad}/\text{K}$ <150 μrad |

¹ Angles optical. Drift per axis, after 30 min warm-up, at constant ambient temperature and process stress.

Aperture Dependent Specifications – Mechanical Data

| | |
|---------------------------------|-------------------|
| Deflection unit | RL-III-10 |
| Input aperture [mm] | 10 |
| Beam displacement [mm] | 12.4 |
| Weight (without objective) [kg] | approx. 0.9 |
| Dimension (L x W x H) [mm] | 100.0 x 77.0 x 83 |

Mirror Variations

| Wavelengths | Substrate |
|-------------|-----------|
| 1,064 [nm] | Si |
| 10,600 [nm] | Si |

Si = silicon

Type Dependent Specifications – Tuning

| Tuning | Description |
|---------------------|-------------------------------------------|
| Marking-Tuning (MA) | Optimized tuning for marking applications |

Type Dependent Specifications – Dynamic Data

| | |
|-------------------------------------------------------------------|-----------|
| Deflection unit | RL-III-10 |
| Tuning | MA |
| Writing speed with high/good writing quality [cps] ^{1,2} | 650 / 850 |
| Processing speed [rad/s] | 30 |
| Positioning speed [rad/s] ³ | 85 |
| Tracking error [ms] ⁴ | 0.14 |
| Step response time at 1% of full scale [ms] ⁵ | 0.40 |

¹ With F-Theta lens f = 163 mm / field size 120 mm x 120 mm² Single-stroke font with 1 mm height³ See "Calculation of speed"⁴ Calculation acceleration time approx. 1.9 x tracking error.⁵ Setting to 1/1,000 of full scale.

Calculation of speed

Speed in working field = Focal length F-Theta lens x Positioning speed:

Example: RL-III-10 with F-Theta lens f = 163 mm, Positioning speed 85 rad/s
 $v = 163/1000 \times 85 = 13.8 \text{ m/s}$

All trademarks are registered trademarks of their owner.

Headquarters:
RAYLASE GmbH
Wessling, Germany
+49 8153 9999 699
info@raylase.de**Subsidiary China:**
RAYLASE Laser Technology (Shenzhen) Co.
Shenzhen, China
+86 755 28 24 8533
Info@raylase.cn**Subsidiary USA:**
RAYLASE Laser Technology Inc.
Newburyport, MA, USA
+1 978 255 1672
info@raylase.com

April 2020. Information is subject to change without prior notice.

v1.2