



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's Thesis

壓電薄膜製程開發及其聲振特性分析

Development of Piezoelectric Thin Film Manufacturing Process
and Analysis of their Acoustic Vibration Characteristics

許景順

Ching-Shun Hsu

指導教授：黃育熙 博士

Advisor: Yu-Hsi Huang, Ph.D.

中華民國113年7月

July, 2024

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

壓電薄膜製程開發及其聲振特性分析

Development of Piezoelectric Thin Film Manufacturing Process
and Analysis of their Acoustic Vibration Characteristics

本論文係許景順 (R11522506) 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 113 年 7 月 8 日承下列考試委員審查通過及口
試及格，特此證明。

The undersigned, appointed by the Department of Mechanical Engineering on 8th, July, 2024 have
examined a Master's thesis entitled above presented by Ching-Shun Hsu (R11522506) candidate and
hereby certify that it is worthy of acceptance.

口試委員 Oral examination committee:

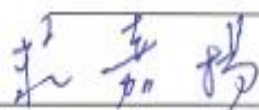


(指導教授 Advisor)





系主任/所長 Director:



誌謝



在結束了兩年的碩士生活，一路上有許多需要感謝的人，在此對於所遇到的人事物來表達我最真誠的想法和祝福。首先要感謝我的指導教授育熙老師，一開始在大四剛找老師做專題時，其實想法並沒有太多，因緣際會下剛好直屬學長揚開有在實驗室中，因此大概了解老師是個很不錯的教授，才有了後續找老師您做專題的契機，那在題目選擇上首先要感謝老師在一開始就提供了我許多的方向作為建議，過程中不論是一開始跟著芸齊學姊做實驗再到後面正式進入碩班的研究上，老師在對於即使製程是實驗室中相對不熟悉的領域，但還是為我提供了許多可供尋找的資源，包含外系或者是剛好在業界工作的學長，這些對於我在整個研究中是非常有幫助的，其中也感謝芸齊學姊導入製程這個相關題目，讓我當初在進行選擇上有更多的方向。此外，也感謝老師願意投資那麼多錢在我的研究上，在一開始很擔心買了之後可能會處於閒置的狀態，因而很猶豫，但記得老師說了一句你們願意做實驗我就樂意投資，這句話對於我來說，讓我更加踏實地進入製程的這個領域並與聲學做結合，有時在個人會議的時候，總會擔心是否做的這些新研究其實沒啥用，但老師總會在當我有新發現的時候給予我鼓勵，並提供可能方向，這部分也是非常的感謝老師，在未來的日子裡祝福老師與您的家人可以身體健康、平安喜樂。

感謝劉建豪教授和湯耀期教授在時間相對緊迫的情況下，特地撥空前來擔任本論文的口試委員，並給予很多專業的建議，讓本論文能更加完善。感謝劉建豪教授對論文製程部分提供了許多後續可發展的方向；感謝湯耀期教授對論文的聲學部分提供了許多建議，讓我可以補足許多聲學上未完善的部分。

接著先感謝實驗室中的同伴忍受我每天的話癆，有些會擔心是不是太吵到你們，但..我還是會繼續說的哈哈。感謝建佑學長不管是實驗架設、採購還是實驗室的各種大小事都非常照顧我們並提供許多幫忙，尤其是製程實驗中也提供了許多看法給我參考，還有在繃膜治具上也提供了很大的幫助，真的會想說，沒有建佑該怎麼辦哈哈，同時實驗間的空檔聊天也是很多話題都可以聊可以討論，紓解了煩



悶的等待時間，祝福學長跟雅竹學姊未來工作順利、平安喜樂。揚開學長，我好像也只有這時候會叫你學長 XD，畢竟大一就認識了，感謝這幾年間給予我許多不論課業或者人生上探討的討論，很幸運能夠遇到你這麼好的一個學長和朋友，祝福你未來一切順利。家雋學長，跟揚開一樣也是跟你討論了蠻多的事情，很多時候都很懂我這種心理想很多的人的想法，也提供了許多的意見，然後還有平常嘴砲的屁話，不管聽你嘴砲或一起嘴砲都是很歡樂的氣氛，即使在工作了也很樂意提供一些工作上的想法，也祝福你和你女友未來工作順利、平安喜樂。明杰學長，中午跟晚上一起吃飯的班底哈哈，感覺南部人的共鳴所以話題比較多，一起討論許多遊戲和動漫還有逛漫博，並且也是一個非常熱心且能力很好的學長，雖然外表看起來溫溫的，但總是感覺在默默觀察的樣子，在未來不論工作還是其他面向都祝福你順利，我去南科的時候再一起約個吃飯哈哈。振原學長，失眠界的前輩哈哈，在我碩一剛失眠的時候提供了我許多的偏方來治療 XD，兩人一起同病相憐的講屁話也有一搬風味，感謝學長在實驗量測上幫了我許多，並且在數據的處理也給了我一些建議，祝福學長工作順利、順眠無礙。也感謝奕安學長在對於聲學的模擬上給了我許多的幫助，讓我對於模擬的部分能有一些思路，祝福學長未來工作一切順利。紘廷從大一實驗課和國文課都是同班同學，居然還不記得我，看來不放在眼裡哈哈，沒有啦熟了之後發現你有蠻多事都會忽略或不認真聽的，到也習慣了哈哈，我們蠻多興趣都一樣的，所以很多話聊，祝福你跟你女友未來一切順利並且能夠實現你的夢想，那雖然你應該是不會看我們的論文，但還是想給你個建議是，有時候多留心一些周遭的人事物的細微變化我覺得會對於你的人生上有幫助，過於不在乎的話可能容易有一些誤解或是誤會產生。淳期是大一就同班的同學，但幾乎零交集，印象一直是感覺兩個不同想法世界的人，但多次的溝通交流之後，發現想法的激盪對於我來說幫助很大，很高興能夠遇到生活環境完全不同且樂於交流的人，對於我的啟發幫助非常巨大，祝福你在交換的過程中一切順利，未來在工作上也可以找到屬於自己的天地，至於建議的話目前可能因我們倆思維環境較不同，可能有些事情上沒有絕對怎樣



會比較好的情況，加上目前我覺得沒有明顯哪裡怪怪的地方，但也有可能因為我們還沒有到真的很熟吧 XD。柏宇是碩班新認識的同學，一直以來都覺得你很認真努力，真的非常的厲害，與淳期相反的是，這種類型模式，是我在大學前所預期的一個型態，那可能源自於我本身在以前對於未來就是認真讀書找個好工作這件事被灌輸的想法比較多，但我自己卻又無法做到如此極致，因此看到你與淳期時總會覺得果然人是有多種不同面向的，也讓我反思我未來的路是想要什麼。正諺其實在一開始不太熟，但漸漸聊天後發現是個好人，可能家中經濟情況有點類似（？，有時總會有些共感產生，那未來不論是要繼續念書還是去工作，都祝你一切順利，另外我私人建議是對於與人際的交流上可以有信心一點，當然基本的例如準時這件事可以做得好一些哈哈，不論是遭遇各個情況還是要有積極向上的精神。育廷是今年中午吃飯的固定班底，感謝願意陪著老人家吃飯哈哈，很高興看到你從期初到期末越來越願意開話題分享聊天，你很認真且有想法，相信未來的一切會順利的，祝你好運。嘉恩是實驗室中稀有的女生，聊天後發現很多對於未來工作的想法是很接近的，並且也非常的認真，然後看到你慢慢的願意花時間讓自己休息我覺得很棒，祝福你跟班哥在未來能夠一切順利，要內推的話還是可以找我哈哈。德原是實驗室吉祥物，各種駝語錄都十分經典，並且都會分享許多好笑的影片，祝你未來一切順利，那建議說話的部分有時候還是要經過大腦思考一下，否則會冒犯到別人哈哈。以信跟哲廷兩位也都是非常好的學弟，雖交流未到最深，但相信以你們的做事態度未來會有好的發展，祝福你們。也感謝衍安和沅泰，雖不在同一實驗室，但都會分享近況或一起打球，有以前大學時的革命情感，祝福你們工作順利。

最後要感謝我的家人和女友的陪伴與支持，可能過程中有經歷了許多的爭吵與討論，但有你們的存在讓我能夠堅持下去的完成這兩年的學業，十分的感謝你們，祝福你們都身體健康、萬事如意。因篇幅擔心會有所遺漏，最後特感謝所有在研究所階段任何部分幫助過我的人。

中文摘要

本研究從壓電薄膜製程出發，首先建構一套生產壓電薄膜的流程，製程步驟包含溶液調配、塗佈溶液、退火、極化和電極濺鍍等流程，以這些流程製作所需的壓電薄膜，接著測量相關的材料參數性質後，將其製作成薄膜形式的聲學元件以供振動和聲學上的實驗檢測。

製作出實驗所需的試片後，對於其振動和聲學特性進行分析，分析以理論解析、有限元素模擬和實驗量測進行比較，理論研究方法包含了分別以薄膜振動理論和壓電圓盤振動理論這兩種，同時在搭配雷射都卜勒振動儀(Laser Doppler Vibrometer, LDV)實驗量測結果反算得到的張力，帶入理論和有限元素模擬中，以此得出共振頻率與模態振形的結果，其中模擬如同理論，同樣分別採用薄膜與壓電圓盤的力學模型進行分析，先與理論相互比較結果觀察誤差後，接著利用 LDV 進行聲學元件的全域模態量測，觀察不同力學模型於實際壓電薄膜的振動分析適用性。

選定與實際壓電薄膜振動較為接近的分析模型後，應用於後續的自由聲場模擬，並與無響室 (Anechoic Room) 的量測結果做比較，將各種不同類型的自製薄膜試片和市售薄膜試片在無響室量測的頻響曲線進行比較，評估不同試片間的聲音特性以及振動的關係。

最後會將自由音場所量測的不同類型試片，以人工耳(Artificial Ear)進行封閉音場的量測，同樣比較不同試片量測的頻響曲線結果，觀察不同製程條件的試片之聲音特性的優劣，評估未來做為耳機發聲元件的可行性。

關鍵字：壓電薄膜製程、聚偏二氟乙烯-三氟乙烯 P(VDF-TrFE) 、聲學元件、薄膜、壓電圓盤、共振頻率、音壓曲線

ABSTRACT

This study begins with the process of manufacturing piezoelectric thin films. Initially, a production process for piezoelectric thin films is constructed, which includes solution preparation, solution coating, annealing, polarization, and electrode sputtering. These steps are used to produce the required piezoelectric thin films. After measuring the relevant material parameters, simple acoustic components are made from these films for vibration and acoustic testing.

After producing the necessary test samples, their vibration and acoustic characteristics are analyzed. The analysis primarily involves theoretical, finite element simulation, and experimental measurement comparisons. The theoretical research methods include analyzing the piezoelectric thin film samples using thin-film vibration theory and piezoelectric disk vibration theory. Coupled with the tension obtained from the experimental measurements using a Laser Doppler Vibrometer (LDV), the resonance frequencies are calculated by incorporating these values into the theories and finite element simulations. The simulation, using the corresponding theoretical analysis, is conducted with both thin-film and piezoelectric disk models. The results are first compared with theoretical predictions to observe discrepancies, followed by a comparison of the resonance frequencies between the two different models to study their respective vibration characteristics. Subsequently, LDV is used to conduct global modal measurements of the acoustic components to determine which model best fits the actual vibration behavior of the piezoelectric thin films.

After selecting the model that closely corresponds with the actual vibration of the piezoelectric thin films, this model is used for the free-field simulations. These simulations are then compared with measurements taken in an anechoic room to analyze and discuss the differences between the results. Additionally, the frequency response

curves of various self-made film samples and commercial film samples measured in the anechoic room are compared to evaluate the sound characteristics of different samples.

Finally, the various types of samples measured in the free sound field are tested in a pressure field using an Artificial Ear. The measured frequency response curves are compared to observe the sound and vibrating characteristics of different samples and to evaluate their feasibility as headphone sound components in the future.

Keywords: Piezoelectric Thin Film Process, Polyvinylidene Fluoride-Trifluoroethylene P(VDF-TrFE), Acoustic Components, Thin Film, Piezoelectric Disk, Resonance Frequency, Sound Pressure Level (SPL)

目次



論文口試委員審定書	i
誌謝	ii
中文摘要	v
ABSTRACT	vi
目次	viii
圖次	xi
表次	xviii
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	7
第二章 薄膜製程、相關儀器與聲學元件製作	9
2.1 壓電薄膜簡介與實驗原料	9
2.1.1 聚偏二氟乙烯(Polyvinylidene fluoride，簡稱 PVDF)性質簡介	10
2.1.2 聚偏二氟乙烯-三氟乙烯 P(VDF-TrFE)性質簡介	13
2.1.3 P(VDF-TrFE)與 PVDF 差異	13
2.2 製程實驗儀器、原理與架設	14
2.2.1 磁石加熱攪拌器	14
2.2.2 旋轉塗佈機	15
2.2.3 電汽烘箱	17
2.2.4 雙功能膜厚計	19
2.2.5 d_{33} 量測儀	22
2.3 薄膜製程實驗	26
2.3.1 實驗流程	26
2.3.2 溶液調配	26

2.3.3 塗布溶液與基材選擇、前處理.....	35
2.3.4 退火.....	40
2.3.5 膜厚測量與脫膜問題.....	41
2.3.6 極化與 d_{33} 量測.....	50
2.3.7 電極濺鍍.....	69
2.4 薄膜材料常數量測.....	73
2.5 聲學元件設計與製作.....	81
2.5.1 聲學元件設計.....	81
2.5.2 聲學元件製作流程.....	85
2.6 小結.....	89
第三章 實驗量測儀器、原理、架設與壓電基本理論.....	90
3.1 雷射都卜勒測振儀.....	90
3.2 全域振動量測系統.....	93
3.3 無響室量測.....	97
3.4 人工耳量測.....	99
3.5 壓電基本理論.....	101
第四章 薄膜振動特性分析與實驗量測.....	105
4.1 薄膜振動特性理論分析.....	105
4.1.1 圓形薄膜統御方程式.....	105
4.1.2 圓形薄膜之自由振動理論分析.....	107
4.2 薄膜有限元素數值分析.....	109
4.3 圓形薄膜振動理論解析與數值分析之比較.....	114
4.4 薄膜振動實驗量測與張力分析.....	126
4.5 小結.....	130
第五章 壓電圓盤振動特性分析與實驗量測.....	132
5.1 壓電圓盤振動分析理論推導.....	133

5.2 單層壓電圓盤振動特性理論分析	137
5.3 壓電圓盤有限元素數值分析	141
5.4 壓電圓盤振動理論解析與數值分析之比較(無張力)	145
5.5 壓電圓盤理論與薄膜理論分析差異	157
5.6 數值分析結果與實驗量測之比較	172
5.7 小結	179
第六章 聲學元件之聲學特性分析與實驗量測	180
6.1 無限大障板下自由音場之聲學特性分析	180
6.1.1 無限大障板下自由音場之有限元素分析	180
6.1.2 無限大障板下自由音場實驗量測與數值分析比較	183
6.1.3 各不同試片聲學特性比較	192
6.1.4 驅動電壓對於 SPL 影響	196
6.2 封閉音場之聲學特性分析	202
6.2.1 封閉音場之實驗量測	202
6.2.2 類音箱效果量測	206
6.3 小結	210
第七章 結論與未來展望	212
7.1 結論	212
7.2 未來展望	215
參考文獻	217
附錄	223

圖次



圖 2-1	PVDF 結構.....	11
圖 2-2	PVDF 粉末外觀[40].....	11
圖 2-3	PVDF 主要組成之晶相[42].....	13
圖 2-4	PVDF 主要組成之晶相.....	13
圖 2-5	磁石加熱攪拌器.....	15
圖 2-6	塗佈原理流程圖[43].....	16
圖 2-7	旋轉塗佈機.....	16
圖 2-8	電汽烘箱外觀.....	18
圖 2-9	電汽烘箱內部.....	18
圖 2-10	雙功能膜厚計.....	20
圖 2-11	電磁式原理[44].....	20
圖 2-12	渦電流式原理[44].....	20
圖 2-13	螺旋測微儀.....	21
圖 2-14	d_{33} 量測儀.....	24
圖 2-15	準靜態法測試原理圖.....	25
圖 2-16	實驗流程圖.....	26
圖 2-17	Arkema 公司粉末參數表[45].....	28
圖 2-18	Arkema 公司適配溶劑表[45].....	29
圖 2-19	Arkema 公司販售之調配溶液[45].....	29
圖 2-20	溶液調配實驗器材.....	32
圖 2-21	步驟 II 實驗圖.....	33
圖 2-22	步驟 IV 粉末秤重圖.....	33
圖 2-23	步驟 IV 磁鐵沿瓶身繞圈.....	34
圖 2-24	步驟 V 架設圖.....	34

圖 2-25	混合完畢溶液圖	35
圖 2-26	砂紙+電鑽拋光器	36
圖 2-27	海綿+電鑽拋光器	36
圖 2-28	ITO 基材	37
圖 2-29	塗佈流程圖	39
圖 2-30	定位治具	39
圖 2-31	幫浦啟動	40
圖 2-32	轉速設定	40
圖 2-33	去除殘留溶劑	41
圖 2-34	膜厚量測點	42
圖 2-35	膜厚量測實體圖	42
圖 2-36	box chart 統計圖	43
圖 2-37	拋光號數與膜厚均勻度關係圖	44
圖 2-38	拋光號數與膜厚均勻度關係圖[47]	45
圖 2-39	膜厚與轉速關係圖	45
圖 2-40	脫膜破損圖	46
圖 2-41	銅基材四角落貼膠帶	47
圖 2-42	螺旋測微儀實際量測圖	48
圖 2-43	ITO 基材膜厚結果圖	48
圖 2-44	ITO 基材貼膠帶處理圖	49
圖 2-45	薄膜捲曲圖	50
圖 2-46	鐵電材料極化示意圖[48]	51
圖 2-47	接觸式極化示意圖	52
圖 2-48	非接觸式極化示意圖	52
圖 2-49	高壓直流電源供應器儀器圖	53

圖 2-50	直接探針接觸系統[45]	54
圖 2-51	Ink H、FC25 極化電壓[47]	54
圖 2-52	接觸極化實驗架設 1	55
圖 2-53	接觸極化實驗架設 2	56
圖 2-54	架設 1 薄膜端接線	56
圖 2-55	極化架設 1-擊穿現象	57
圖 2-56	架設 2 夾具示意圖	57
圖 2-57	架設 2 薄膜端	57
圖 2-58	極化架設 2-擊穿現象	58
圖 2-59	d_{33} 量測	59
圖 2-60	d_{33} 量測點	59
圖 2-61	流程 1、有退火之 d_{33} 值 (AVG : 27.15、SD : 1.95)	60
圖 2-62	流程 1、無退火之 d_{33} 值 (AVG : 4.15、SD : 1.46)	61
圖 2-63	流程 2、有退火之 d_{33} 值 (AVG : 27.45、SD : 2.24)	62
圖 2-64	塗佈轉速 1000rpm 之 d_{33} 值 (AVG : 27.15、SD : 1.95)	63
圖 2-65	塗佈轉速 1500rpm 之 d_{33} 值 (AVG : 26.75、SD : 2.22)	63
圖 2-66	塗佈轉速 2000rpm 之 d_{33} 值 (AVG : 28.15、SD : 1.26)	64
圖 2-67	塗佈轉速 2500rpm 之 d_{33} 值 (AVG : 26.75、SD : 1.48)	64
圖 2-68	ITO 基材極化之 d_{33} 值(10min-1) (AVG : 21.70、SD : 0.98)	65
圖 2-69	ITO 基材極化之 d_{33} 值(10min-2) (AVG : 21.60、SD : 0.88)	66
圖 2-70	ITO 基材極化之 d_{33} 值(10min-3) (AVG : 20.95、SD : 1.96)	66



圖 2-71	ITO 基材極化之 d_{33} 值(20min-1) (AVG : 21.65、SD : 0.49)	67
圖 2-72	ITO 基材極化之 d_{33} 值(20min-2) (AVG : 21.70、SD : 0.92)	67
圖 2-73	ITO 基材極化之 d_{33} 值(20min-2) (AVG : 21.75、SD : 0.72)	68
圖 2-74	基材選擇不同之實驗流程順序	68
圖 2-75	濺鍍示意圖[51]	70
圖 2-76	順電材料極化示意圖[52]	71
圖 2-77	濺鍍完成薄膜	71
圖 2-78	薄膜環型遮鍍	72
圖 2-79	濺鍍後 d_{33} 量測圖	72
圖 2-80	濺鍍後 d_{33} 量測圖(未完全去除殘留溶劑)	73
圖 2-81	FC20 原廠參考特性表[53]	74
圖 2-82	拉伸試驗機組件	76
圖 2-83	拉伸試片圖	76
圖 2-84	拉伸試片夾持與相機架設圖	77
圖 2-85	$E=2.06\text{GPa}$ 、Poisson ratio: 0.55	78
圖 2-86	$E=2.18\text{GPa}$ 、Poisson ratio: 0.65	79
圖 2-87	$E=2.12\text{GPa}$ 、Poisson ratio: 0.6	79
圖 2-88	薄膜重量量測圖	80
圖 2-89	自製薄膜聲學元件實體圖	81
圖 2-90	市售薄膜聲學元件實體圖	83
圖 2-91	繃膜不平整元件實體圖	84
圖 2-92	聲學元件製作流程圖	85
圖 2-93	上下蓋組合併	86
圖 2-94	底座、墊片、頂件組合併	87

圖 2-95	整體組合件	87
圖 2-96	上蓋黏貼雙面膠	88
圖 2-97	上、下蓋組合和附載重物四層結構	88
圖 2-98	AB 型導電銀膠	89
圖 3-1	LDV-OFV505	91
圖 3-2	聲光調製器基本構造	91
圖 3-3	LDV 內部光路圖	92
圖 3-4	NI-9234 資料擷取系統	94
圖 3-5	Keysight 33621A 訊號產生器	94
圖 3-6	微動振鏡系統 Raylase Miniscan III-10	94
圖 3-7	全域振動量測系統實驗流程圖	95
圖 3-8	全域振動量測系統實驗架設圖	95
圖 3-9	無響室測量示意圖(虛線部分為無響室區域)	97
圖 3-10	障板規格示意圖(AES2-1984 r2003 標準規範)	98
圖 3-11	無響室實際量測圖	98
圖 3-12	人工耳(GRAS 43AG-9 Hi-Res Ear Simulator)	99
圖 3-13	多功能聲音校準器(G.R.A.S. 42AG)	100
圖 3-14	人工耳實際量測圖	100
圖 4-1	單位面積薄膜之受力分析	106
圖 4-2	第二類 n 階貝索函數圖	108
圖 4-3	圓形薄膜示意圖	109
圖 4-4	Membrane 設定	111
圖 4-5	薄膜張力邊界	111
圖 4-6	張力設定	112
圖 4-7	圓周固定邊界設定	112

圖 4-8	兩步驟邊界條件	113
圖 4-9	應力結果圖	114
圖 4-10	應變結果圖	115
圖 4-11	LDV 單點共振頻量測架設	126
圖 4-12	試片 B(膜厚 $12.85\ \mu\text{m}$)單點共振頻量測結果	127
圖 4-13	試片 G(市售 $28\ \mu\text{m}$ 、高低差 5mm)單點共振頻量測結果	129
圖 4-14	試片 H(市售 $28\ \mu\text{m}$ 、高低差 7mm)單點共振頻量測結果	130
圖 5-1	單層壓電圓盤	137
圖 5-2	第二類 n 階貝索函數與第二類 n 階修正貝索函數圖	141
圖 5-3	所需設定材料參數	143
圖 5-4	極化方向設定	143
圖 5-5	張力設定	144
圖 5-6	邊界條件設定	144
圖 6-1	聲學元件與聲場配置示意圖	181
圖 6-2	空氣需設定參數	182
圖 6-3	Steady-state dynamics 設定	182
圖 6-4	邊界條件設定	183
圖 6-5	電位設定	183
圖 6-6	試片 B，自由音場實驗量測與數值分析圖	186
圖 6-7	試片 F，自由音場實驗量測與數值分析圖	187
圖 6-8	試片 G，自由音場實驗量測與數值分析圖	188
圖 6-9	試片 H，自由音場實驗量測與數值分析圖	189
圖 6-10	試片 B，失真率 (THD)	190
圖 6-11	試片 F，失真率 (THD)	190
圖 6-12	試片 G，失真率 (THD)	191

圖 6-13	試片 H，失真率 (THD)	191
圖 6-14	不同膜厚 Chamber 量測比較圖	192
圖 6-15	不同 d_{33} Chamber 量測比較圖	193
圖 6-16	不同繃膜平整度 Chamber 量測比較圖	194
圖 6-17	試片 E，失真率 (THD)	195
圖 6-18	自製與市售薄膜試片 Chamber 量測比較圖	196
圖 6-19	試片 A(上)、試片 C(下)，實驗改變電壓之 SPL 結果圖	198
圖 6-20	試片 B，模擬(上)與實驗(下)改變電壓之 SPL 結果圖	199
圖 6-21	試片 F，模擬(上)與實驗(下)改變電壓之 SPL 結果圖	200
圖 6-22	試片 G，模擬(上)與實驗(下)改變電壓之 SPL 結果圖	201
圖 6-23	試片 E，實驗量測改變電壓之 SPL 結果圖	202
圖 6-24	不同膜厚人工耳量測比較圖	203
圖 6-25	不同 d_{33} 人工耳量測比較圖	204
圖 6-26	不同繃膜平整度人工耳量測比較圖	205
圖 6-27	自製與市售薄膜試片人工耳量測比較圖	206
圖 6-28	人工耳量測(手掌輕壓)	207
圖 6-29	試片 A，不同人工耳量測方式比較	208
圖 6-30	試片 F，不同人工耳量測方式比較	208
圖 6-31	試片 G，不同人工耳量測方式比較	209

表次



表 2-1	PVDF 特性表.....	11
表 2-2	磁石加熱攪拌器規格表.....	15
表 2-3	旋轉塗佈機規格表.....	17
表 2-4	電汽烘箱規格表.....	19
表 2-5	雙功能膜厚計規格表.....	21
表 2-6	螺旋測微儀規格表.....	22
表 2-7	d_{33} 測量儀規格表.....	24
表 2-8	塗佈基材規格表.....	38
表 2-9	高壓直流電源供應器規格表.....	53
表 2-10	拉伸試驗機設定規格.....	75
表 2-11	自製薄膜相關參數.....	82
表 2-12	各試片相關資訊.....	83
表 2-13	PVDF 市售薄膜相關參數（有些參數參考[55]）.....	84
表 3-1	LDV 規格.....	92
表 3-2	NI-DAQ 規格.....	96
表 3-3	微動振鏡規格.....	96
表 3-4	人工耳麥克風規格表.....	100
表 4-1	試片 A，固定邊界下的理論解析與 FEM 比較.....	116
表 4-2	試片 B，固定邊界下的理論解析與 FEM 比較.....	118
表 4-3	試片 C，固定邊界下的理論解析與 FEM 比較.....	120
表 4-4	試片 F，固定邊界下的理論解析與 FEM 比較.....	122
表 4-5	試片 G，固定邊界下的理論解析與 FEM 比較.....	124
表 4-6	試片 B，不同共振頻反算張力值.....	129

表 5-1	試片 B，模擬與實驗結果比較	133
表 5-2	試片 G，模擬與實驗結果比較	133
表 5-3	試片 A，固定邊界、無張力之理論解析與 FEM 比較	147
表 5-4	試片 B，固定邊界、無張力之理論解析與 FEM 比較	149
表 5-5	試片 C，固定邊界、無張力之理論解析與 FEM 比較	151
表 5-6	試片 F，固定邊界、無張力之理論解析與 FEM 比較	153
表 5-7	試片 G，固定邊界、無張力之理論解析與 FEM 比較	155
表 5-8	試片 B，壓電圓盤模型與薄膜模型模擬比較	159
表 5-9	試片 F，壓電圓盤模型與薄膜模型模擬比較	161
表 5-10	試片 G，壓電圓盤模型與薄膜模型模擬比較	163
表 5-11	試片張力調整	165
表 5-12	試片 B，張力調整後壓電圓盤模型與薄膜模型模擬比較	166
表 5-13	試片 F，張力調整後壓電圓盤模型與薄膜模型模擬比較	168
表 5-14	試片 G，張力調整後壓電圓盤模型與薄膜模型模擬比較	170
表 5-15	試片 B，FEM 模擬與 DPM 比較	173
表 5-16	試片 F，FEM 模擬與 DPM 比較	175
表 5-17	試片 G，FEM 模擬與 DPM 比較	177



第一章 緒論

1.1 研究動機

近年來，小型揚聲器的需求顯著增加，許多領域紛紛投入輕薄型揚聲器的研發，特別是在 3C 產品中的廣泛應用，如電腦、智慧型手機和藍芽耳機等。隨著網際網路的迅速發展和相關技術的不斷進步，音樂、影片等娛樂已成為人們生活中不可或缺的一部分。由於揚聲器製造技術的進步，如今幾乎人人都擁有耳機，顯示出其重要性。

耳機的工作原理是將電信號轉換為聲壓，其聲學元件的結構對音質表現至關重要。根據不同的發聲原理，市售耳機主要分為兩大類：動圈式耳機和靜電式耳機。動圈式耳機是使用最廣泛的一種類型，其原理是使處於永磁場中的線圈與振膜相連，音圈在信號電流的驅動下帶動振膜發聲。這種類型的耳機具有更深沉、更飽滿的低頻表現，但由於需要磁鐵，其體積較大是一個難以克服的問題。靜電式耳機則是在振膜上鍍上導電層，並夾在兩片電極板之間，兩片導電板分為正負極，音樂信號的正負極變化使薄膜隨之振動發聲。這種類型的耳機具有高靈敏度和低失真的優點，但需要配備專用放大器，導致耳機價格昂貴且不便攜帶，降低了消費者的使用欲望。

以上兩種類型的耳機各有其優缺點，因此壓電致動器的音頻技術應運而生。2013 年，京瓷公司開發了應用於平板電視的壓電致動器與薄膜結合而成的壓電複合薄膜揚聲器，這也是本研究的主要應用方向，即使用壓電材料作為驅動的發聲單元。

不論使用哪種發聲原理的耳機，振膜部分都是一個關鍵結構，通過推動空氣產生聲音，使聲學元件能夠正常工作。因此，本研究旨在開發一款自製的壓電薄膜，利用其致振特性推動空氣發聲。結合實驗室以往研究成果，希望通過改變薄膜進一步提升發聲元件在各個音頻段的表現。



本研究將從壓電薄膜製程開始，製作自製的壓電薄膜作為新的驅動和發聲元件。通過理論分析、有限元素模擬和實驗測量對薄膜的振動特性進行分析，並在獲得振動分析結果後進一步對聲學特性進行分析。聲學分析則採用有限元素模擬和實驗測量的方法進行。希望通過以上分析總結出自製薄膜的特點及優勢，並評估其未來的應用和發展。

1.2 文獻回顧

在我們的日常生活中，聲音和振動無處不在。當物體振動時，它會帶動周圍介質的運動，而介質中的粒子相互碰撞，從而產生聲波，這些聲波通過介質傳遞到我們的耳膜或感測元件，我們才能感知到聲音。因此，聲音和振動的特性對於耳機、音響等產品至關重要，它們之間緊密相連。只有從振動的角度出發，我們才能更全面地理解並從根本上改善聲學問題。

Kim[1]等人在 2011 年進行了壓電薄膜型揚聲器與聲學相關的研究。為了讓揚聲器在低頻範圍內表現出色，他們除了考量幾何效應對揚聲器效能的影響外，還著重於改變壓電薄膜揚聲器的尺寸，藉此評估其聲學效能。此外，Yu[2]在 2006 也利用了壓電薄膜進行了薄膜揚聲器和感測器的應用。基於這些研究背景，本研究選擇了壓電薄膜作為開發的聲學元件。薄膜(membrane)和薄板(thin plate)雖然都是二維系統，但振動特性不同。薄膜的振動特性是二階偏微分系統，可以從一維的弦(string)推廣而來；而薄板則是四階偏微分系統，由一維的樑(beam)推廣而來，兩者的振動特性存在顯著差異。1948 年，Morse[3]在其著作中使用振動學分析了薄板及薄膜的振動特性：薄板振動時的恢復力來自於其自身較高的剛性，而薄膜則需要外加張力才能達到振動平衡。本文將透過理論解析、有限元素數值方法以及實驗量測，探討壓電薄膜的結構振動特性與聲學特性之間的關係，並驗證這些方法的可行性和準確性。

近年來，隨著相關軟硬體의進步，人們對壓電材料的掌握越來越高，許多不同的壓電元件也被開發出來。壓電材料的起源可以追溯到 1880 年，當時 Pierre 和



Jacques[4]兄弟從天然水晶中發現了壓電效應。壓電材料因其優秀的機電轉換效率和機電轉換的諧振特性，廣泛應用於精密工業和檢測儀器設備中，包括超音波雷達感測器、壓力傳感器、位移傳感器、加速計及超音波馬達等常見產品。Cady[5]在 1946 年將壓電晶體應用於振盪器並發表了相關書籍，是這個領域的先驅之一。Mason[6]在 1950 年通過模擬將壓電晶體的振動特性等效成電路。Tiersten[7]於 1969 年透過電彈方程式和變分法推導了壓電平板振動特性的本構方程式，並提出了完整的線性壓電理論。Jaffe[8]在 1972 年發表了對壓電陶瓷的綜合性著作，介紹了壓電陶瓷的製備、物理性質、機械特性和應用。Mindlin[9]同樣在 1972 年以變分法推導了石英壓電平板的二維本構方程式。1987 年的 IEEE Standard[10]詳細規範了壓電材料常數的共振法量測方法，並完整歸納了壓電材料的四種本構方程式(d-form、e-form、g-form 和 h-form)。Rogacheva[11]在 1994 年提出了平面應力和應變相關問題的假設，並探討了不同極化方向的壓電平板與薄殼的振動問題。

除板塊類的壓電元件外，壓電薄膜也是常見的應用元件，其常見製成材料包括有纖鋅礦型結構的氧化鋅(ZnO)、鈣鈦礦結構的銦鈦酸鉛(PZT)和高分子聚合物的聚偏二氟乙烯(PVDF)。前兩者通常具有較優異的壓電性能，但製備過程複雜，儘管薄膜具有可撓性，但本質上較易碎，因此應用有限。而高分子聚合物雖壓電性能低於前兩者，但其高柔軟性和可撓性使其極具發展潛力。PVDF 高分子聚合物最初由 Kawai 於 1969 年[12]發現，在特定溫度下施加拉伸力並以高電場極化，可使其具有壓電特性，優於其他聚合物。隨後，Cui[13]等人發現並整理出 PVDF 具有五種晶相特性，並得出 β 相具有最大的極性。1989 年，LEGRAND[14]測量了 PVDF 共聚物 P(VDF-TrFE)的結構和鐵電性質，證明其具有壓電性。然而，MAO[15]的研究發現此共聚物形態會使分子內部存在化學缺陷，導致整體結晶度降低，因此在應用上需考量此情況。

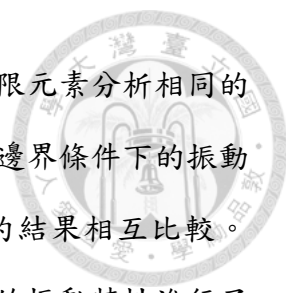
關於薄膜的研究，自 1998 年 Laura、Rossit 和 Malfa [22]提出具有不連續變化厚度的複合雙連接膜在橫向振動中的解析解後，相關研究逐步深入。2001 年，

Jabareen 和 Eisenberger [23]進一步探討了圓形和圓環薄膜的對稱和非對稱模態的確切解，並使用分段多項式表示材料密度的變動，利用動態剛性矩陣方法計算了薄膜的振動頻率，呈現了該研究的模態圖形結果。2007 年，Rao [24]在其著作中整理推導了圓形和矩形薄膜在自由振動系統下的波動方程式。

接下來，將介紹一些薄膜結構在聲學元件中的相關研究文獻。1987 年，Streng [25]描述了計算自由空間中圓形拉伸薄膜振動的方法，並探討了薄膜的振動特性及其對聲壓曲線的影響。2006 年，Mellow 和 Kärkkäinen [26]探討了在自由空間和無限障板中圓形薄膜的聲場特性，並進行了數值模擬分析，驗證了理論解析結果，並消除了數值積分和最小平方方法的誤差，提高了計算速度和準確性。2016 年，Huang 和 Chiang[27]製作了兩組具有導電層的推拉式靜電揚聲器，進行了雷射光學系統和傳統聲學測量方法的比較研究，並顯示了在振動模態和聲輻射特性兩方面的高度一致性。

而壓電薄膜在聲學中的應用部分，Shehzad [28]於 2021 年利用 P(VDF-TrFE)製作了壓電薄膜，並將其應用於揚聲器上，顯示此壓電材料在聲學應用上的可行性。此外，Keller [29]於 2023 年將 P(VDF-TrFE)壓電薄膜應用於超聲波換能器，展示了其在醫療檢測上的未來發展潛力。這些文獻為理解薄膜揚聲器的振動特性、頻率響應和聲輻射特性提供了重要的洞察和解析，有助於改進薄膜揚聲器的設計和性能。

在本論文中，由於是分析壓電薄膜，若只以薄膜來進行分析會無法考慮壓電性質帶來的影響，進而無法呈現壓電薄膜的實際振動情況，故在本論文中也會以壓電圓盤來進行壓電薄膜分析。圓盤及圓環的平板振動問題，由於形狀簡單且對稱，在理論及實驗中相當常見且處理難度較低。Chang[16]在 2000 年對壓電陶瓷圓環進行了振動分析，其中包含了靜態位移、共振頻率和反共振頻率以及動態機電耦合係數，並以此歸納出了電彈理論，同時他也透過數值計算對幾何變數會如何影響壓電圓環的振動產生影響。於 2003 年，林育志[17]研究了壓電陶瓷複合層板和壓電雙晶片之振動特性，值得一提的是，其在研究中使用 AF-ESPI（全場電子繪影法）結合



LDV (激光多點振動測速儀) 量測技術和阻抗分析，並得到和有限元素分析相同的結果。何祥瑋[18]在 2004 年則是對單層壓電圓盤和圓環在不同邊界條件下的振動特性進行分析，其中主要使用了薄板理論，並與有限元素法的結果相互比較。Huang[19]在 2005 年針對對稱形式的壓電雙晶複合等向性材料的振動特性進行了解析。在這項研究中，同樣採用了薄板理論，並將其結果與有限元素法的分析結果和實驗量測進行了比較。黃育熙[20]在 2009 年分析了壓電陶瓷雙晶片在不同電極連接配置下的振動行為，並探討了其在三維空間中的振動模式和頻率響應，其中使用到了 ESPI、LDV 和阻抗分析結合有限元素法，並與理論解析和有限元素法進行相互驗證。許松逸[21]也在 2017 年於文獻中探討了壓電陶瓷圓盤和圓環在不同結構和邊界條件下的振動特性，並對單層、雙層堆疊和雙層堆疊複合等向性材料的壓電陶瓷圓盤和圓環進行了分析，並研究了它們的振動行為，同時使用實驗和理論方法相互驗證，設計了並聯型雙層壓電圓環複合等向性材料的尺寸參數，以研究其在自由邊界條件下的三維耦合特性。

雷射都卜勒振動儀 (Laser Doppler Vibrometer, LDV) 是一種用於測量物體振動的儀器，它利用光的都卜勒效應進行測量。LDV 使用一束激光照射到目標物體表面，並檢測由目標物表面反射回來的光的頻率變化，當目標物體發生振動時，反射光的頻率也會因都卜勒效應而改變。透過分析頻率變化，LDV 可以計算出目標物體的振動速度和位移，其優點包括非接觸測量、高精度、快速測量速度、對微小振動的敏感性等。在 2006 年，Ma et al.[30]在單層壓電陶瓷薄板和交錯層壓電複合材料薄板的共振特性進行的實驗和數值研究。使用了共振頻率分析和振動測試來測量薄板的共振頻率，並基於有限元素法對薄板的振動特性進行了模擬和分析，同時以 LDV 技術驗證結果。

本論文主要討論壓電薄膜之聲學元件，為了達到良好的聽覺感受，對其振動性質和頻率響應進行分析。而在過往大多都以壓電薄板複合薄膜的形式做為聲學元件，考量未來有機會應用此形式，且也與本研究高度相關，故在此對其相關研究進



程進行說明；首先因為薄板和薄膜兩者的剛性相差極大，故壓電薄板相對於薄膜可以視為不產生形變的剛體。Wang[31]在 2003 年研究了複合在自由剛性圓盤上的環狀薄膜的振動特性，假設薄膜會因本身有足夠的張力而讓圓盤的重量引起薄膜產生微小變形，讓兩者之間產生非耦合的特性，並通過分析薄膜的振動問題，推導出了其共振頻率和振動模式。在 2006 年，Pinto[32]對複合在中央自由剛性圓盤上的環狀薄膜進行了分析和實驗研究，透過假設圓盤之質量相對於薄膜非常大，假設了圓環的內、外固定的邊界條件，通過並透過和實驗的驗證，評估了薄膜的振動特性和固有頻率。2013 年，Kim 等人[33]研究了彈性質量對超薄壓電微聲學致動器頻率響應特性的影響。通過理論分析、數值計算以及實驗量測，探討了彈性質量參數對致動器的共振頻率和頻率響應的影響。2016 年，林揚中、莊沅隴和黃育熙[34]研究了雙層串聯型壓電圓盤複合薄膜在近場聲學元件中的應用，其中設定壓電圓盤為類自由邊界。通過理論模型建立和數值模擬，分析了薄膜的耦合聲場特性。陳冠宇[35]於 2019 年研究了雙層壓電圓盤複合 PVC 薄膜及雙層壓電圓環複合靜電薄膜於在近場聲學元件中的開發，也假設樹種複合元件的邊界條件並進行討論。研究中進行了理論解析、數值計算和實驗量測，並使用有限元素法及實驗量測技術進行薄膜張力反算以及進行聲學元件的聲場分析。2021 年，張哲睿[36]探討了壓電圓環複合薄膜在聲學元件中的設計和開發。研究中通過有限元素數值模擬和實驗分析，評估了薄膜的聲學性能和振動特性。並透過 LDV 單點量測元件之位移並用雷利積分公式分析共振模態對頻率響應的貢獻。2022 年，黃御宸[37]引入了無網格法來進行固定邊界薄膜的振動分析，將其結果和有限元素法進行相互對應，同時使用田口法將發聲單體進行尺寸的最佳化，研發出在人耳聽感上表現相當優良的耳機。2023 年，陳奕安[38]同樣利用無網格法來進行固定邊界薄膜的振動分析，其將薄膜形狀改為跑道型，並利用有限元素法進行尺寸的最佳化設計，同年，江信遠和黃育熙[39]使用光學量測方法發現橢圓形薄膜揚聲器之只需非常小的長短軸比，就能夠比正圓形振膜有更加平滑的聲壓級曲線，長短軸比介於 1~1.5 之間都是未來值得研究的範

圍。而本研究建立在以上研究之進程上，透過改變薄膜單體為壓電薄膜，希望可為新型揚聲器的聲音品質和聲場增益特性帶來突破，以開發具有優質聲音的產品。



1.3 論文內容簡介

本論文主要探討了自製壓電薄膜其作為聲學元件上的振動與聲學特性，在振動分析部分以理論解析、有限元素模擬和實驗量測相互驗證結果，理論解析和有限元素模擬部分，有以薄膜理論為基底和以壓電圓盤理論為基底來做分析，觀察何者較接近實際壓電薄膜情況，並將其做進一步的聲學分析。而在聲學分析中主要以有限元素模擬和實驗量測兩者進行分析相互驗證結果，過程中會以不同類型自製薄膜做比較，嘗試解析出哪種類型在聲學上效果最好，同時也會與市售薄膜比較，觀察本研究自製薄膜之特點與優勢。

以下將說明本論文各章節的主要內容：

第一章

首先會敘述本研究的研究動機，接著對於壓電陶瓷、壓電薄膜、薄膜理論、壓電圓盤理論以及壓電複合薄膜結構之揚聲器發展進行文獻回顧說明，並簡介各章節內容架構。

第二章

對於所自製的壓電薄膜進行全方位的介紹，從壓電粉末原料開始進行介紹，並說明其粉末特性，接著對薄膜製程實驗中會使用到的各個實驗儀器做說明後，進入薄膜製程各個實驗步驟的詳細說明包含溶液調配、塗佈溶液、退火、膜厚量測、極化與 d_{33} 量測和電極濺鍍。製作出薄膜後對其進行材料常數的量測，接著製作成聲學元件以供後續的振動、聲學分析使用

第三章

介紹後續在振動、聲學量測上會使用到的相關儀器，包含測量共振頻率的雷射都卜勒測振儀、模態形狀的全域振動量測系統、量測自由音場的無響室和量測封閉

音場的人工耳。最後也會對於後續在壓電圓盤分析上所使用的壓電基本理論進行說明。



第四章

以薄膜理論解析和薄膜有限元素模擬兩者結合雷射都卜勒測振儀量測共振頻率反算得出的張力結果，以此張力帶入理論和模擬中來進行振動分析並相互驗證。同時也會對於張力大小對共振頻率的影響進行分析，觀察其影響。

第五章

由於第四章的薄膜分析並未考量壓電薄膜本身因壓電性所形成的驅動力的緣故，因此以壓電圓盤在試著有考量壓電性的情況下，希望接近實際壓電薄膜的振動情形，過程中會先以無張力情況下之理論和模擬對比，得出兩者對應性後將其推廣至有張力情況下之模擬，並與薄膜模擬所得到的結果比較，分析兩者差異與所呈現的特點後，後續第六章將會以壓電圓盤的力學模型用於模擬壓電薄膜以進行後續的聲學分析，而也會將振動分析的結果與全域振動量測的實驗結果進行比較，兩者相互驗證和探討。

第六章

基於第五章的模擬所採用的模型，在本章先進行自由音場模擬與無響室實驗量測，比較兩者結果並進行探討，觀察自製薄膜於自由音場的表現結果，並與市售薄膜進行比較，觀察兩者特點，同時也會對驅動試片的電壓大小分析比較，觀察對頻響曲線的影響。接著以人工耳量測封閉音場下的頻響曲線，同樣與市售薄膜進行比較以分析兩者特點，透過不同的量測方法，觀察壓電薄膜在未來耳機設計上可能的發展。

第七章

總結本論文的研究成果，並提出未來在內容上可精進之處以及可以繼續探討之相關題目與方向。

第二章 薄膜製程、相關儀器與聲學元件製作

本章會先對於壓電薄膜製程做詳細的介紹，內容涵蓋薄膜製程的各個步驟，包括：溶液調配、塗佈溶液、退火、膜厚量測、極化與 d_{33} 量測和電極濺鍍，同時說明製程中所使用到的各個實驗儀器，包括：磁石加熱攪拌器，用以混合壓電粉末原料和所選溶劑；旋轉塗佈機（Spin Coater），利用加速旋轉產生離心力，使落下之溶液可以從基材中心擴展至整個表面；電汽烘箱，用以塗佈完成後之退火用途；雙功能膜厚計，利用渦電流原理量測薄膜之厚度； d_{33} 量測儀，利用正壓電效應，透過產生特定力量和頻率於測量試片上，藉以量測其壓電係數 d_{33} 值和極化方向。透過以上的儀器和製程，可以得到自製之壓電薄膜，接著將其製作成聲學元件，應用於後續章節之振動和聲學分析。

2.1 壓電薄膜簡介與實驗原料

本節會對於壓電薄膜做介紹，說明其常見之應用範圍，接著介紹聚偏二氟乙烯（PVDF）與聚偏二氟乙烯-三氟乙烯（P(VDF-TrFE)），並比較兩者的差異，同時說明最終選擇的實驗原料。

壓電薄膜是一種特殊類型的薄膜材料，具有壓電效應，即當受到機械應力或變形時，能夠產生電荷分離，從而產生電壓。相反地，當施加電壓時，它們也能夠產生機械變形。同時又因其薄膜性質，具有輕薄跟可撓的優勢。綜合以上，使得壓電薄膜在傳感、驅動和能量轉換等方面具有重要的應用。

以下為壓電薄膜常見的應用方面：

1. 傳感器：壓電薄膜可用作傳感器，用於測量壓力、力量、應變、加速度等物理量。它們的壓電效應使得它們對外部環境的變化非常敏感，因此在各種傳感器中得到廣泛應用，常見的應用如壓力傳感器、加速度傳感器、應變傳感器等。

- 
2. 驅動器：由於壓電薄膜具有正、逆壓電效應，透過逆壓電效應可以用作驅動器，用於產生聲音、振動或運動。常見的應用如振動器、壓電陶瓷馬達或壓電噴墨頭等應用。
 3. 能量轉換：壓電薄膜可以將機械能轉換為電能，或將電能轉換為機械能，因此可以用於能量轉換和能量收集應用。常見用於製造壓電發電機，用於收集環境中的振動能量或壓力能量。
 4. 聲學應用：透過正壓電效應，當聲波撞擊壓電薄膜時，薄膜會振動，這種振動引起壓電薄膜產生電荷，將其收集並轉換為電信號，訊號經處理後轉換為可聽的聲音，如麥克風。反之在逆壓電效應上，透過通電後的薄膜振動以此來推動空氣產生聲波，如揚聲器、超聲波探頭等。

總的來說，壓電薄膜具有多功能性和靈活性，廣泛應用於傳感、驅動、能量轉換和聲學等領域，為各種應用提供了新的解決方案和可能性。

而常見製成壓電薄膜之材料有纖鋅礦型結構的氧化鋅(ZnO)、鈣鈦礦結構的鈦酸鉛(PZT)和高分子聚合物的聚偏二氟乙烯(PVDF)。前兩者通常具有較優異的壓電性能表現，但製備過程複雜，同時雖薄膜有可撓性，但其本質上較易碎，故在應用上會較有限制；而高分子聚合物雖壓電性能會低於前兩者，但在其高柔軟性和可撓性的特性下，可說是極具發展性，例如在本論文所應用的聲學部分即是一大嘗試。

2.1.1 聚偏二氟乙烯(Polyvinylidene fluoride，簡稱 PVDF)性質簡介

聚偏二氟乙烯，簡稱 PVDF，是一種高分子聚合物，其重複單元如圖 2-1 所示為 CH_2CF_2 ，在外觀上通常為白色粉末或半透明顆粒，如圖 2-2 所示，其具有以下三個優點：加工性高，由於它的玻璃轉化溫度介於-40 度到-38 度之間，在加熱溫度高於玻璃轉化溫度時，材料性質會從硬脆的玻璃態轉換成具有柔軟和延展性的橡膠態，也因此使材料變得易於加工；良好的機械性質，相較於其他工程塑料，像是 PVC、PP 等等的這類聚合物來說，它具有更高的拉伸強度、剛度以及耐磨損性；壓電特性佳，從日本學者河和平司的研究中[12]所得知，在特定的溫度下施予拉伸

力並以高電場將 PVDF 極化，可使其具有壓電特性並優於其他聚合物。化學特性如表 2-1 所示。

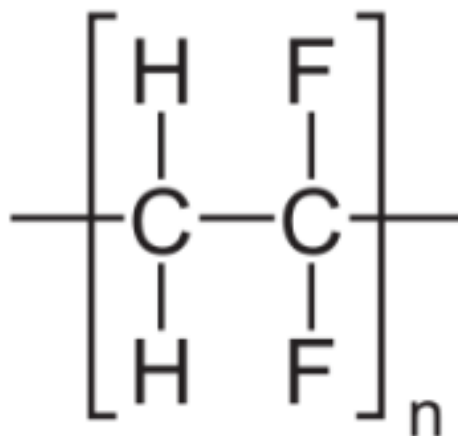


圖 2-1 PVDF 結構



圖 2-2 PVDF 粉末外觀[40]

表 2-1 PVDF 特性表

Property	Units	Value
Refractive index	--	1.42
Density	g/cm ³	1.78
T _g	°C	-40~-38
Melting temperature	°C	162~172
Thermal decomposition temperature	°C	375

PVDF 為半結晶高分子，因此可誘導出不同結晶型態之排列，總共包含五種結晶相[13]： α 、 β 、 γ 、 δ 、 ε ，以下將介紹各個結晶相的差異。

1. α 相：分子結構排列為 trans-gauche(TGTG)，偶極矩相互的抵銷，不具有極性，為所有結晶型態當中最普遍且熱力學上最為穩定的一種
2. β 相：分子結構排列皆為 trans(TTTT)，呈現規則排列，偶極距不相互抵消，具極性
3. γ 相：其分子結構排列為 TTTGTTTG，也具有極性，但小於 β 相
4. δ 相：結構與 α 相同，為其極化形態，只不過在分子結構間所產生出的偶極矩方向不同。
5. ε 相：跟 γ 有著相同的架構，為 γ 的非極化狀態，因此不具有極性

而其中又以 α 、 β 、 γ 三種為 PVDF 的主要組成晶相，也因此接下來會討論這三者對於材料性質上的影響。PVDF 主要組成之晶相如圖 2-3 所示。

首先討論極性強度，強度由大到小依序為 β 、 γ 、 α [41]，這說明 β 相能夠產生最大的自發性極化，表現出最佳的壓電、鐵電、熱電性質，因此在應用上最具研究價值；然後在能量高低[41]的部分由大到小依序也是 β 、 γ 、 α ，這部份則影響著後續在退火時的重要性。綜合以上各個優點，因此在製程上會致力於得到 β 相，以此獲得良好壓電性質的薄膜。

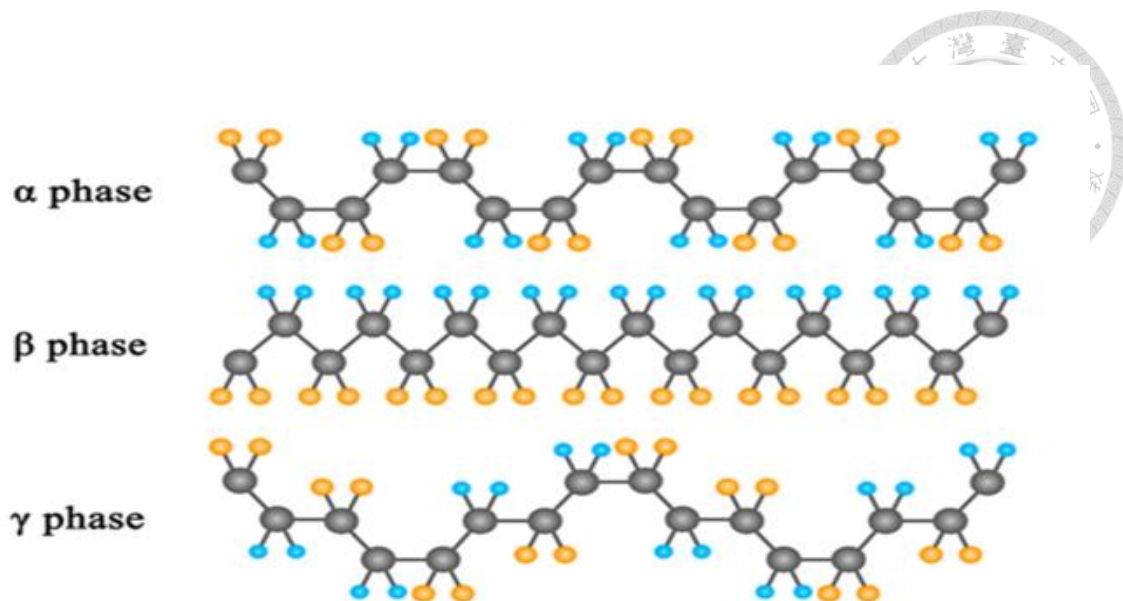


圖 2-3 PVDF 主要組成之晶相[42]

2.1.2 聚偏二氟乙烯-三氟乙烯 P(VDF-TrFE)性質簡介

聚偏二氟乙烯-三氟乙烯，簡稱 P(VDF-TrFE)，為 PVDF 之共聚物型態，由 PVDF 和 PTrFE 所組成，PTrFE 的重複單元為在原本的 PVDF 之 CH_2CF_2 結構中將氫原子以氟原子取代，形成 CHFCF_2 結構，如圖 2-4 所示， m 、 n 代表 PVDF 和 PTrFE 的莫耳百分比，常見比例為 80:20、75:25、70:30、55:45。

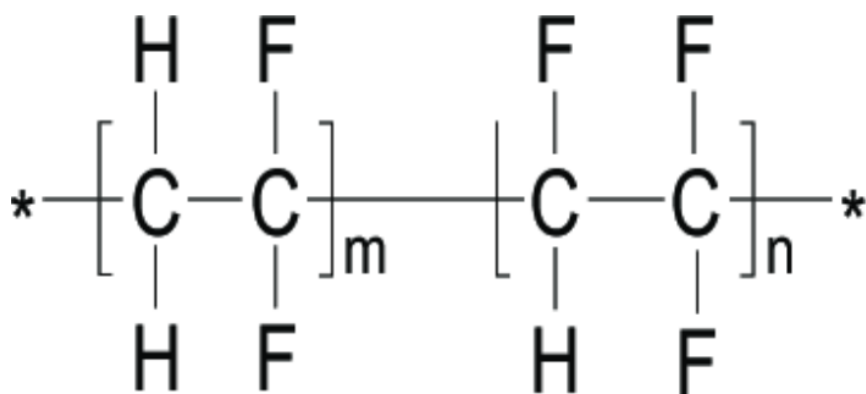


圖 2-4 PVDF 主要組成之晶相

2.1.3 P(VDF-TrFE)與 PVDF 差異

在製程上使用共聚物得到所需結晶型態是薄膜製備的常見方式之一，於同樣的條件下，正常的 PVDF 膜得到的是常見且穩定的 α 相，但使用 PVDF 的共聚物

膜時卻能得到 β 相或 γ 相，原因為聚物的效應使得 PVDF 的高分子鏈段更容易產生特殊方向的排列，雖然會使分子內部存在化學缺陷[4]，也就是 TrFE 高分子隨機分布於 PVDF 的鏈段中，進而造成整體結晶度降低，韌性也跟著下降，但其優勢在於能夠使 PVDF 結晶時形成較多的 β 相結晶型態，同時在製程的步驟上也會減少，可不用像純 PVDF 需要進行拉伸的步驟才能得到高比例的 β 相，使得在同樣結晶度下的壓電性能提升。

綜合以上，本論文研究考量製成的薄膜厚度可能對聲學元件的表現有影響，但 PVDF 的拉伸也許易導致較薄的元件損壞，故使用 P(VDF-TrFE)為原料來製作壓電薄膜，同時考量壓電性能上限和工作的耐受溫度，選擇 PVDF 和 PTrFE 比例為 80:20，簡稱 FC20，作為實驗原料。

2.2 製程實驗儀器、原理與架設

本節將介紹在製程實驗中所會用到的各個關鍵實驗儀器及其原理與架設。

2.2.1 磁石加熱攪拌器

首先介紹磁石加熱攪拌器，此儀器通常由兩部分組成：電加熱底座和磁力攪拌器。電加熱底座透過通電來加熱盤面，以此達到將熱傳遞給混合溶液的效果；磁力攪拌器則是在底座上有一個電磁鐵，通電之後會產生磁場，此時搭配在混合的溶液中放入的攪拌子，攪拌子會受到電磁鐵的磁場作用而產生旋轉，進而使溶液中的溶質、溶劑藉由旋轉的方式達到混合效果，此儀器為本研究製程實驗中的核心儀器，透過此儀器來混合壓電粉末原料和所選溶劑，並嘗試不同溫度和轉速組合，調配出符合需求之薄膜溶液。

本研究使用磁石加熱攪拌器如圖 2-5 所示，為雷伯斯儀器公司所生產，型號為 MS-H380-PRO，詳細的規格如表 2-2 所示



圖 2-5 磁石加熱攪拌器

表 2-2 磁石加熱攪拌器規格表

MS-H380-PRO	
溫度/增量	RT+5~380 / 1°C
轉速/增量	200~1500 / 10rpm
溫度誤差	±1°C(<100°C), 其他 1%
盤面材質	鋁合金披覆陶瓷
盤面尺寸	140x140mm

2.2.2 旋轉塗佈機

旋轉塗佈機 (Spin Coater)，透過真空幫浦抽氣，使得塗佈基材能夠吸附在吸盤(旋轉體)上，接著將欲塗佈溶液以基材為中心落下，設定轉速使吸盤高速旋轉，利用加速旋轉產生的離心力，使落下之溶液可以從基材中心擴展至整個表面並成膜，塗佈原理流程圖如圖 2-6 所示。圖 2-7 為本研究所使用旋轉塗佈機，為詠欣公司所生產，其詳細規格如表 2-3 所示。

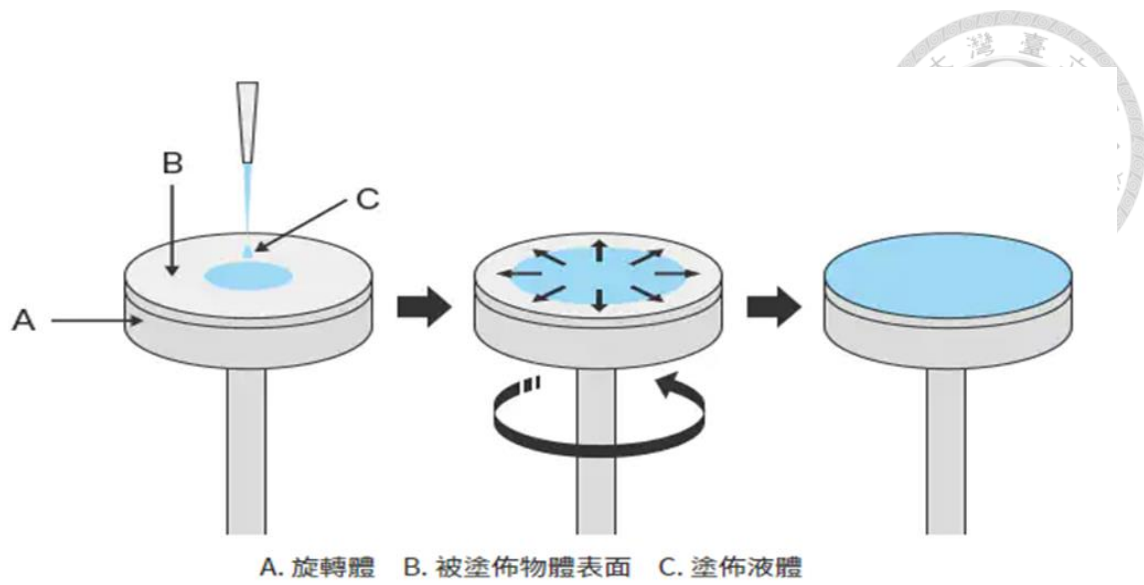


圖 2-6 塗佈原理流程圖[43]



圖 2-7 旋轉塗佈機

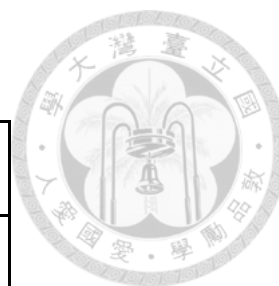


表 2-3 旋轉塗佈機規格表

型號	SC-80R+L
吸盤大小	4 吋
塗佈基材尺寸限制	4-8 吋
轉速/增量	300~8000 / 100rpm
轉速可設定段數	三段

2.2.3 電汽烘箱

電汽烘箱（Oven）的運作原理在於熱傳導和溫度控制技術。當烘箱開始運作時，加熱器會生成熱能，使內部溫度逐漸上升。溫度感應器持續監測內部溫度，並將數據傳送給溫度控制器。根據設定的目標溫度，控制器會調節加熱器的功率，以保持穩定的溫度。

同一時間，熱風循環系統會將熱空氣均勻地分佈在烘箱內部，確保各個區域處於相同的溫度環境中。這樣的均勻加熱和空氣循環有助於使加熱樣品達到均勻的溫度，並保證實驗的準確性和可重複性。圖 2-8 和圖 2-9 為本研究所使用的電汽烘箱之外觀和內部，詳細規格如表 2-4 所示。



圖 2-8 電汽烘箱外觀



圖 2-9 電汽烘箱內部



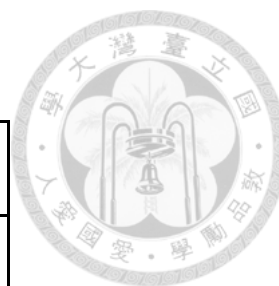


表 2-4 電汽烘箱規格表

型號	RUD-452
內容量	72L
溫度範圍	RT+5~200°C
溫度控制穩定度	±0.5°C
分佈溫度	±5°C

2.2.4 雙功能膜厚計

雙功能膜厚計，同時擁有電磁式膜厚計與渦電流膜厚計雙重功能，並且自動判別基材是否具導磁性功能。適合用來測量磁性物質（鐵、鋼）上的非磁性被膜，例如：電鍍、塗裝、鐵氟龍、各種非金屬表面處理等等。同時，也適合用來測量非磁性金屬（銅、鋁）上的絕緣被膜，例如：陽極處理、烤漆等等。圖 2-10 為本研究所使用膜厚計。

以下介紹電磁式與渦電流式的量測原理：

1. 電磁式（用於磁性基材，鐵、鋼）

交流電磁鐵接近磁性金屬時，依接近距離之不同，線圈的磁束數會產生變化，因此在線圈兩端的電壓亦產生變化，這個電壓變化從電流值來讀取然後換算成膜厚。原理圖如圖 2-11 所示。

2. 渦電流式（用於非磁性基材，銅、鋁）

具固定渦電流流動在上面的誘導線圈，接近金屬表面時，金屬表面上亦產生渦電流，此種渦電流隨著誘導線圈中與金屬的距離不同而變化，因此在誘導線圈兩端的電壓亦產生變化，這個電壓變化從電流值來讀取然後換算成膜厚。原理圖如圖 2-12 所示。



圖 2-10 雙功能膜厚計

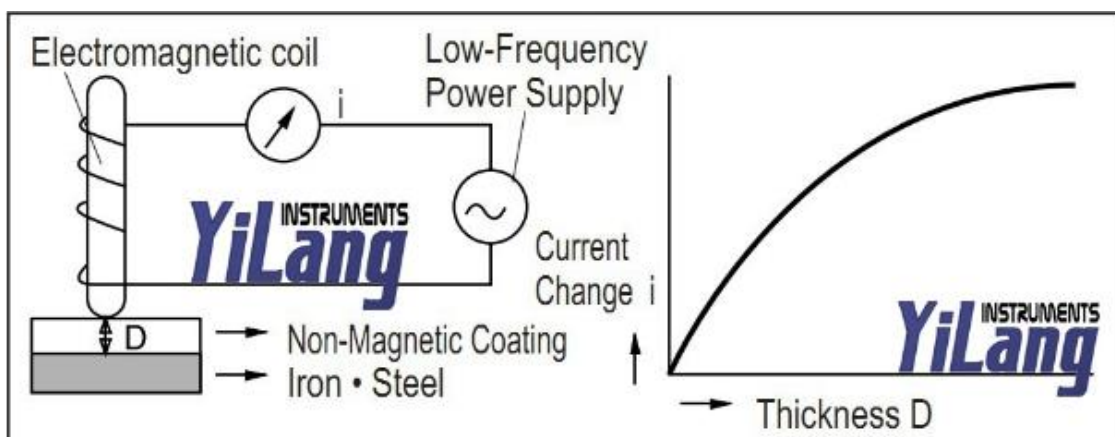


圖 2-11 電磁式原理[44]

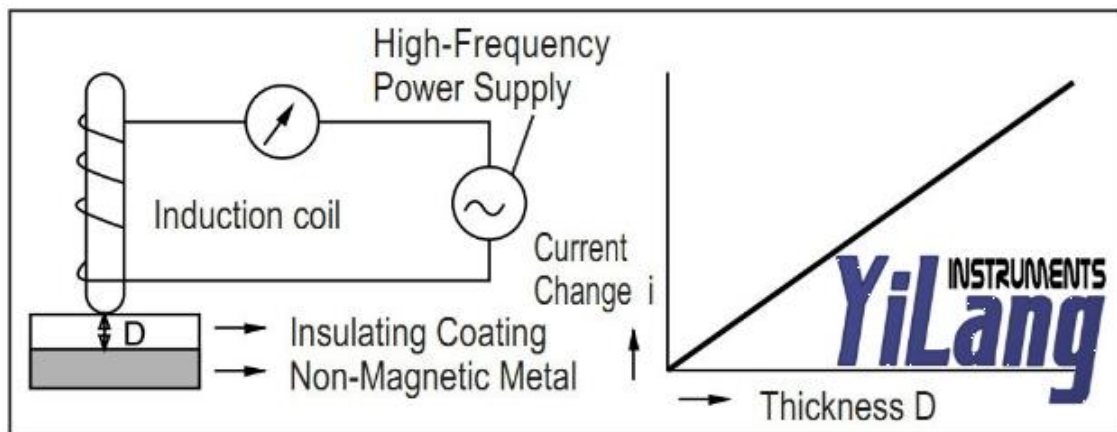


圖 2-12 渦電流式原理[44]

在本研究中選用的金屬基材為紅銅，因此使用渦電流式的量測原理來量測膜厚，加上塗佈出的薄膜膜厚在微米等級，此款膜厚計解析度如表 2-5 的規格表所示，可達 $0.1\mu\text{m}$ ，同時本研究也使用圖 2-13 的螺旋測微儀來做量測，透過夾持的方式量測厚度，雖其解析度如表 2-6 所示，僅至 $1\mu\text{m}$ ，相比雙功能膜厚計較差，但仍可對於膜厚可作大概的預測，故在銅基材塗佈之薄膜兩個儀器都會量測，並初步觀察測微儀其所量測出的精度誤差範圍能否接受，以此評斷玻璃基材塗佈之薄膜在利用測微儀進行膜厚度量測是否可靠。

表 2-5 雙功能膜厚計規格表

型號	LZ-990
測定方法	電磁、渦電流式
測定對象	磁性金屬上的非磁性被膜 / 非磁性金屬上的絕緣被膜
測定範圍	0-2000 μm
測定精度	50 μm 以內 $\pm 1\mu\text{m}$ 、50-1000 $\mu\text{m}\pm 2\%$ 、1000-2000 $\mu\text{m}\pm 3\%$
解析度	100 μm 以內 $0.1\mu\text{m}$ 、100 μm 以上 $1\mu\text{m}$



圖 2-13 螺旋測微儀

表 2-6 螺旋測微儀規格表

型號	KAPU-IP64
測定範圍	0-200mm
測定精度	0-25mm $\pm 0.002\text{mm}$ 、25-150mm $\pm 0.003\text{mm}$ 、150-200mm $\pm 0.003\text{mm}$
解析度	0.001mm ($1\mu\text{m}$)

2.2.5 d_{33} 量測儀

d_{33} 測量儀，為專門測量各種壓電材料，諸如壓電陶瓷，壓電單晶和壓電高分子材料的 d_{33} 壓電常數而設計的儀器，它的測量範圍寬，分辨率細，可靠性高，操作簡便，對各種形狀及材料的試樣，如片狀、圓管、半球型、矩形等均可進行測量。在本研究中，使用 YE2730 型 d_{33} 測量儀，如圖 2-14 所示。設備由測量探頭及電子裝備兩部份所組成。兩者用兩條多芯同軸電纜相連接。測量探頭內包括一電磁力驅動器，其產生的低頻力量加諸於內部比較樣本及待測試片上。兩試片在力學上串聯，以使二者所受交流變換力量相等。儀器本體一方面提供測量探頭上的力驅動器的電驅動信號，同時對測量探頭的輸出信號進行放大處理，最後把得到的 d_{33} 值及極性顯示在儀器數字顯示面板上。其規格表如表 2-7 所示。

該儀器的工作原理為利用準靜態法 (Quasi Static Method)，依據正壓電效應，在壓電振盪子上施加一個頻率，其頻率遠低於振盪子諧振頻率的低頻力量，因而產生交流電荷。

當振盪子在沒有外電場作用，依循電學短路邊界條件，只沿平行於極化方向受力時，壓電方程可簡化為：

$$D_3 = d_{33}T_3$$

$$\text{即 } d_{33} = \frac{D_3}{T_3} = \frac{Q}{F} \quad (2-1)$$

其中 D_3 為電位移分量 ($\frac{C}{m^2}$)、 T_3 為縱向應力 (平行探頭之方向) ($\frac{N}{m^2}$)、 d_{33} 為縱向壓電應變常數 ($\frac{C}{N}$ or $\frac{m}{V}$)、 Q 為振盪子釋放的壓電電荷 (C)、 F 為縱向低頻交變力 (N)

如果將一待測振盪子與一比較振盪子在力學上串聯，通過一施力裝置內的電磁驅動器產生低頻力量並施加到上述振盪子(見圖 2-15)，則待測振盪子所釋放的壓電電荷 Q_1 在其並聯電容器 C_1 上建立起電壓 V_1 ；而比較振盪子所釋放的壓電電荷 Q_2 在 C_2 上建立起電壓 V_2 。

則由式(2-1)可得到：

$$d_{33}(1) = \frac{C_1 V_1}{F} \quad (2-2)$$

$$d_{33}(2) = \frac{C_2 V_2}{F} \quad (2-3)$$

其中 $C_1 = C_2 > 100C$ (振盪子自由電容)

由式(2-2)、(2-3)兩式相除可得：

$$d_{33}(1) = \frac{V_1}{V_2} d_{33}(2) \quad (2-4)$$

式(2-4)中比較振盪子的 $d_{33}(2)$ 值是固定的， V_1 和 V_2 可由測定得知，即可求得被測振盪子的 $d_{33}(1)$ 值。如果將 V_1 和 V_2 經過電子線路處理後，就可直接得到被測振盪子的縱向壓電應變常數 d_{33} 的準靜態值和極性。



圖 2-14 d_{33} 量測儀

表 2-7 d_{33} 測量儀規格表

型號	YE2730A
測定範圍	x 1 range: 10 to 2000 pC/N ; x 0.1 range: 1 to 200 pC/N
測定精度	x 1 range: $\pm 2\%$ in 100 to 2000 pC/N ; $\pm 5\%$ in 10 to 200 pC/N x 0.1 range: $\pm 2\%$ in 10 to 200 pC/N ; $\pm 5\%$ in 1 to 20 pC/N
解析度	x 1 range: 1 pC/N ; x 0.1 range 0.1pC/N

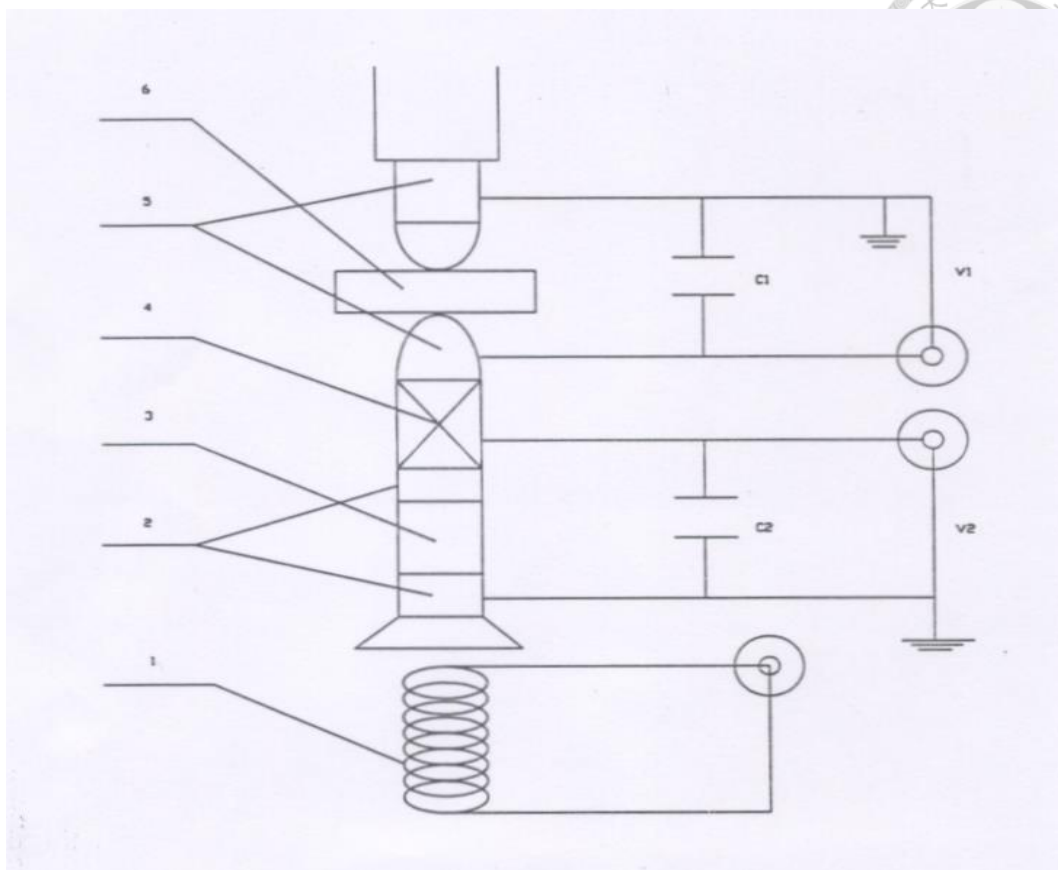


圖 2-15 準靜態法測試原理圖

(1—電磁驅動器；2—比較振盪子上、下電極；3—比較振盪子；4—絕緣柱；5—上、下測試探頭；6—被測振盪子； C_1 —被測振盪子並聯電容； C_2 —比較振盪子並聯電容； V_1 —被測輸出電壓； V_2 —比較輸出電壓)



2.3 薄膜製程實驗

本節會利用前一節的實驗儀器進行薄膜製程實驗的各個步驟，同時也對於製程各個階段進行詳細說明，此外也會描述在製程中所觀察到的現象以及所遇到的問題並提出解方。

2.3.1 實驗流程

首先會簡介整個製程實驗的實驗流程，流程圖如圖 2-16 所示，從一開始的薄膜溶液混合，接著將溶液旋轉塗佈至基材上，塗佈完後進行退火來增強它的機械與壓電性質，退火完後會將薄膜進行膜厚量測，量測後再進到下一步的極化製程，極化後將薄膜從基材脫膜，並對於壓電常數 d_{33} 進行量測，檢視其壓電性質，最後利用濺鍍的方式將電極鍍在薄膜上，濺鍍完成後便可作為壓電薄膜供後續研究中的聲學元件使用。

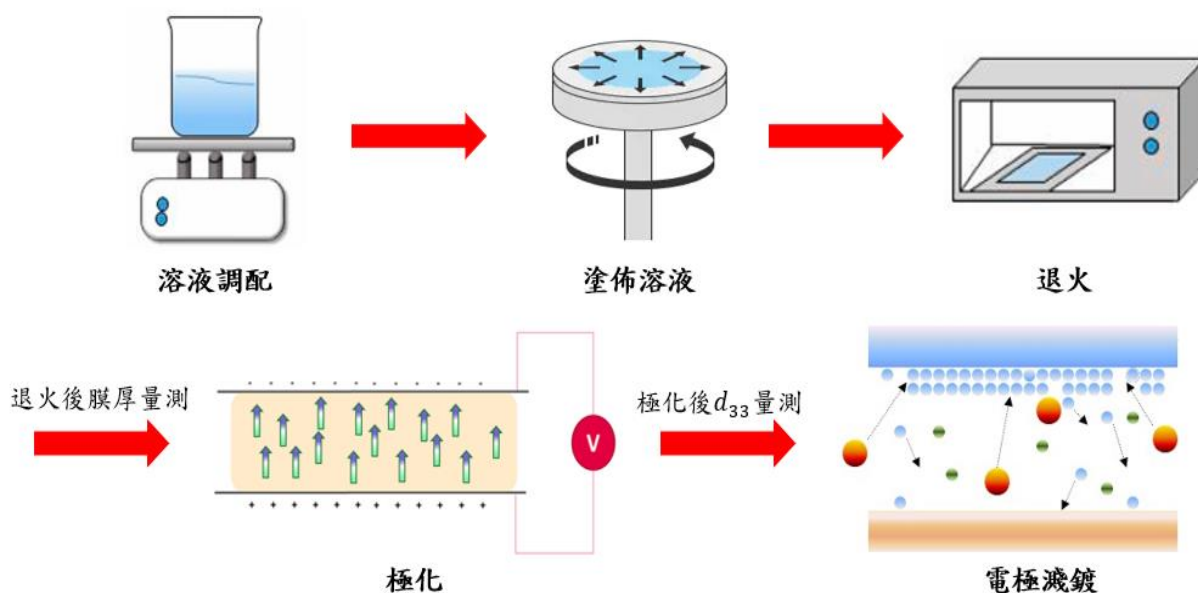


圖 2-16 實驗流程圖

2.3.2 溶液調配

製程實驗中的第一個步驟為溶液調配，透過選擇合適溶劑與壓電粉末混合，以此希望調配出預期壓電性質的薄膜，在預期的性質部分主要參考圖 2-17，屬本研



究購買粉末原料的原廠資訊，關鍵參數如紅色框選處，主要考量其居禮溫度和此預期材料可獲得的 d_{33} 量值。由於在一開始無法預期薄膜在各個製程以及後續應用聲學元件會達到的工作溫度，因此選擇以較高居禮溫度的原料為主，即表示製作完成後的薄膜可承受之工作環境耐受溫度較高，再以綜合壓電性質 d_{33} 的考量，本研究選擇 FC20 作為最終的實驗原料。

接著說明溶劑的選擇，首先由於溶劑會影響黏度、流變特性、薄膜乾燥速度、溶液溫度、膜的型態等等的性質，因此在壓電薄膜溶液的混合上需選擇合適的溶劑，合適的溶劑條件需具高純度（電子級、HPLC 級）、乾燥型溶劑（dry solvent）、非質子溶劑，因此可使用的溶劑類型為酮類、酯類、醋酸鹽類、碳酸鹽類，其中粉末原料提供公司 Arkema 列出調配上常使用的溶劑，如圖 2-18 所示，故在確認好所選粉末原料 FC20 後，從中選出適配溶劑；最終選擇為紅框框出的丁酮溶劑（Methyl Ethyl Ketone, MEK），選擇的原因是由於 FC20 的居禮溫度為 136°C 、熔點為 150°C ，因此首先須選擇沸點低於 FC20 熔點的溶劑，這是由於後續在旋轉塗佈完成後，需將未與粉末混合完全之溶劑去除，也就是去除殘留溶劑，如未去除，在後續濺鍍時會出現製程與品質上的問題，詳細會在 2.3.7 電極濺鍍中描述；而居禮溫度則是以退火溫度的考量為主，在此選擇溫度低於退火溫度之溶劑，可解決去除殘留溶劑時如還有些許殘留，由此步驟二次去除殘留溶劑，此外也考量實驗室通風環境的因素，因此刪去較有毒性的溶劑，同時參考圖 2-19 過往 Arkema 實際販售之溶液配方（Ink H）的製程條件，可知選用 MEK 為可行的做法。

		Piezoelectric				Electrostrictive and High-k	
Product name	Method	Piezotech® FC				Piezotech® RT	
Polymer base		P(VDF-TrFE) Copolymer				P(VDF-TrFE-CTFE/CFE) Terpolymer	
Grade		FC 20	FC 25	FC 30	FC 45	RT-TS	RT-FS
		Composition (mol%)					
		% TrFE				% CTFE	% CFE
	¹ H & ¹⁹ F NMR	20	25	30	45	Standard Composition	
		Indicative Thermal Properties					
Melting Point (°C)	Second heating by DSC	150	150	151	158	122	127
Curie Transition (°C)	ASTM D3418	136	115	100	60	-	-
		Indicative Molar Mass					
Mw (kg.mol ⁻¹)	SEC in DMSO PMMA eq	450				500	
MFI	ASTM D1238 230°C under 10 kg	1-6					
		Indicative Dielectric Properties					
ε _r	Capacity measurement at 1 kHz	9 - 12		10 - 14		40	55
Saturation Polarization (mC.m ⁻²)		-	-	-	-	55	60
Remnant Polarization (mC.m ⁻²)	At 150 V.μm ⁻¹	85	70	65	45	-	-
Coercive Field (V.μm ⁻¹)		45	50	50	55	-	-
		Indicative Piezoelectric / Pyroelectric Properties					
d ₃₃ (pC.N ⁻¹)	Piezotest PM300 1 N, 110 Hz	-24 to -30		-18 to -22		-	-
Typical P3 (μC/m ² /K)	Literature	-30		-50		-	-
		Indicative Mechanical Properties					
Storage Modulus E' (GPa)	ASTM D638	0.8 - 2.8				0.2 - 0.4	
		Indicative Optical Properties					
Transmittance (%)	ASTM D1003	>96%				>99%	

圖 2-17 Arkema 公司粉末參數表[45]



	Boiling Point (°C)	Flash Point (°C)
Acetone	56	-18
Tetrahydrofuran	65	-17
Methyl Ethyl Ketone	80	-6
Methyl Isobutyl Ketone	118	23
Glycol Ethers	118	40
Glycol Ether Esters	120	30
N-Butyl Acetate	135	24
Dimethyl formamide	153	67
Cyclohexanone	157	54
Dimethyl acetamide	166	70
Diaceton Alcohol	167	61
Diisobutyl Ketone	169	49
Tetramethyl urea	177	65
Ethyl Aceto Acetate	180	84
Dimethyl Sulfoxide	189	35
Trimethyl phosphate	195	107
N-Methyl-2-Pyrrolidone	202	95
Butyrolactone	204	98
Isophorone	215	96
Triethyl phosphate	215	116
Carbitol Acetate	217	110
Propylene Carbonate	242	132
Glyceryl triacetate	258	146
Dimethyl Phthalate	258	149

圖 2-18 Arkema 公司適配溶劑表[45]

Grade	Technology	Viscosity (mPa.s at 32°C)	Thickness Range (μm)	Dry Content (wt%)	Solvents
Ink I	Ink-jet	<20	0.05-2	0.6	MEK+DMSO
Ink L	Spin-coating Slot die	<1000	0.1-2	7	Cyclopentanone
Ink H	Spin-coating Solvent-casting	1500-3000	spin-coat: 0.5-2 Solvent-cast: 2-80	20	MEK
Ink P	Screen-printing	12000-24000	1-20	17.5	TEP

圖 2-19 Arkema 公司販售之調配溶液[45]

不論是在原廠資訊或者參考文獻中，可以發現較少對混合溶液的參數進行詳細的描述，即使有列出參數也會在比較後發現大相逕庭，也因此本研究在調配溶液上就以最終得到的薄膜，量測其壓電性質由效果評斷是否符合我們的需求，即代表溶液混合時選擇的參數是可行的，根據文獻[46]指出在 60-80°C 之間混合溶液的話，可以使其結晶行為達到最好的效果，也就是有利於 β 相結晶的生成，間接提升了壓電性質。因此以下調配流程溫度區間會在 60-80°C 之間做嘗試，輔以不同持續時間和轉速調整，最終嘗試出以下兩種調配流程 1 跟 2，以下記錄實驗形式並各別介紹呈現步驟。

● 實驗流程紀錄

調配目標：以丁酮(MEK)為溶劑與粉末製成 20%wt 濃度的溶液

實驗器材如下：

(1) 磁石加熱攪拌器

詳細資訊如 2.2.1 節所示。

(2) 電子秤

購自 HIRODA，型號 MT-300。最大載量/精密度為 300g/0.01g。

(3) 試樣瓶

購自科研市集，台製 透明玻璃樣本瓶 閃爍瓶，容量 30mL。

(4) 磁石攪拌子

購自 GIDI 儀器，長 25mm、直徑 6mm。

(5) 藥匙

購自 GIDI 儀器，不銹鋼藥匙（中）。

(6) 強力磁鐵

購自臺磁，長×寬×高為 30mm×20mm×10mm

(7) 封口膜

購自瀚薇企業，ParafilmM 封口膜。



實驗材料如下：

[1] 丁酮

購自帝一化工，MEK 甲乙酮 / 丁酮 500ml。

[2] FC20 壓電粉末

購自 Arkema，Piezotech FC，Grade FC20。

實驗中所使用的全部器材如圖 2-20 所示，以下介紹詳細實驗流程步驟：

➤ 調配流程 1 步驟

- I. 先利用 95%酒精清潔實驗器材，包含：燒杯、試樣瓶、磁石攪拌子、玻璃棒。
- II. 於電子秤上將丁酮沿玻璃棒倒入燒杯，倒入約 16g 即可，之後將燒杯之丁酮倒入試樣瓶中，放置於磁石加熱攪拌器上並加熱至 60°C，如圖 2-21 所示。
- III. 放入磁石攪拌子設定轉速 400rpm。
- IV. 於電子秤上放置秤量紙，將電子秤歸零後用藥匙取出壓電粉末，並秤量壓電粉末約 4g 後（如圖 2-22），粉末加入試樣瓶中，並利用強力磁鐵沿瓶身繞圈將粉末分散至四周（如圖 2-23），幫助溶劑和粉末均勻混合。
- V. 先以封口膜將瓶蓋間空隙封住防止水氣進入影響實驗，並在上方放置重物，防止其移動、晃動，如圖 2-24 所示，然後先以 60°C、400 rpm 攪拌 35 分鐘，接著升溫至 70°C攪拌 1 小時，最後升溫至 80°C同時轉速提升至 500rpm 攪拌 1 小時，總混合時長約 2 小時 35 分鐘。
- VI. 攪拌至光學透明即停止攪拌，放置陰涼處使溫度降至室溫。
- VII. 以強力磁鐵沿瓶身將攪拌子吸取出，之後便以封口膜再次密封，直至旋轉塗佈開始時，混合完畢溶液圖如圖 2-25 所示。

➤ 調配流程 2 步驟

由於大部分步驟相同，故在此僅列出不同步驟之處。



II. 改為加熱至 70°C

III. 改為設定轉速 500rpm

V. 改為以 70°C、500 rpm 持續攪拌約 24 小時

從步驟中可以看出兩者流程差異主要在於流程 1 為隨著時間改變溫度、轉速，而流程 2 則為固定溫度轉速，本研究中以流程 1 做為主要調配流程，後續會在 2.3.6 節中以 d_{33} 來看這兩者製程上的不同會對於壓電性質造成什麼影響，並說明選擇流程 1 原因。



圖 2-20 溶液調配實驗器材



圖 2-21 步驟 II 實驗圖



圖 2-22 步驟 IV 粉末秤重圖



圖 2-23 步驟 IV 磁鐵沿瓶身繞圈

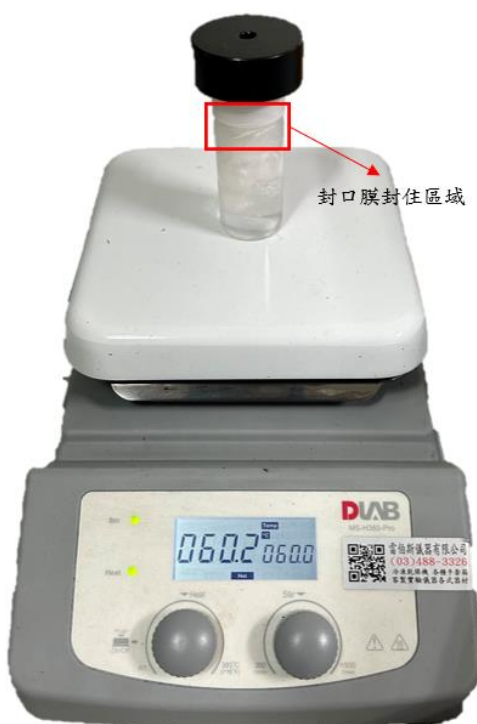


圖 2-24 步驟 V 架設圖



圖 2-25 混合完畢溶液圖

2.3.3 塗布溶液與基材選擇、前處理

溶液調配完成後將進行塗佈，使溶液塗佈至基材上成膜，因此一開始先介紹選擇的基材以及說明對它進行的前處理過程，再進入實際的塗佈流程介紹。

首先由於基材會影響溶液在擴散成膜時的性質，主要便是在薄膜塗佈完之後，各處的膜厚需要是均勻的，此部分會在 2.3.5 節中詳細討論，接著是基材表面也不能有嚴重刮痕或者是其他缺陷，會導致塗佈完的薄膜產生後續相對應的缺陷特徵，另外要配合後續極化時的要求，這部份會在 2.3.6 節詳細說明，最終需要選擇可導電的基材，在此選用了兩種基材，為紅銅基材與氧化銦錫 (Indium Tin Oxide, 簡稱 ITO) 透明導電玻璃基材，以下將分別說明兩種基材各自所需的前處理。

首先是銅基材，而此基材也是本研究中所主要用來塗佈薄膜的基材，後續的聲學元件，有很大比例為採用此基材所做的薄膜。銅基材的所需做的前處理主要是拋光的部分，一般來說，採購的銅基材都是表面會有刮痕或是油污、髒污的出現，不僅會使薄膜產生表面缺陷，更會造成膜厚不均，但在處理上由於選擇銅片較薄且質地較軟，無法使用砂輪機等大型器械來進行拋光，因此這裡主要會採用砂紙和研磨液的方式進行手動拋光，拋光器械的實際圖如圖 2-26、圖 2-27 所示，其中砂紙和研磨液會選擇多種不同號數的來進行不同程度的拋光，以此希望研磨出不同程度

表面的銅面，並從中選擇在膜厚均勻度和脫膜難易度都可以兼顧的表面，此在 2.3.5 節中會加以說明。

而在 ITO 玻璃基材（圖 2-28）的部分，為一種導電玻璃，導電原理是透過在玻璃的表面上鍍上一層導電膜，使其表面達到可導電的效果，而在此指的 ITO 就是可導電的氧化銦錫。選擇此基材的原因除了其表面為一個平滑、平整的狀態有助於後續脫膜外，同時導電的特性也可配合之後極化的步驟。在塗佈前的前處理由於其本身平整度高，也因此不必像銅基材一樣進行拋光，主要會以表面的清潔為主即可。



圖 2-26 砂紙+電鑽拋光器



圖 2-27 海綿+電鑽拋光器

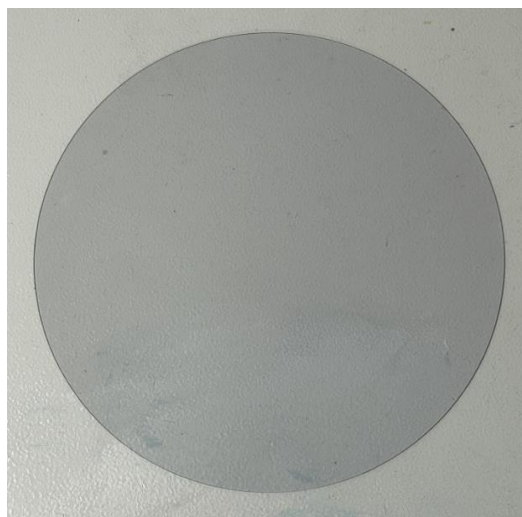


圖 2-28 ITO 基材

尺寸上的選擇皆採用直徑 18 公分的圓形基材，這是由於旋轉塗佈機可塗佈範圍為 4-8 吋，也就是大約 10-20 公分，因此在這範圍內盡量塗佈出較大的尺寸，以利後續在聲學元件更易製作，而不直接使用 8 吋的尺寸上限則是考慮該尺寸過於接近塗佈機的塗佈範圍上限，為避免造成儀器損壞和實驗準確度，故只選擇到 18 公分，而圓形的外型選擇則是因為是透過離心力塗佈的原理，因此使用圓形幾何形狀理論上可以達到最好的均勻塗佈效果。另外在基材厚度的部分，分別選擇銅 0.5mm 厚和 ITO 玻璃 0.7mm 厚，基材規格如表 2-8 所示。厚度上由於市售銅片厚度區間 0.5mm 後的下個區間為 1mm，而經測試後發現 1mm 跟之後的厚度對於塗佈機的吸盤來說較難以吸附，需調整吸盤抽氣氣壓標準值，又因運轉過程中離心力的作用可能發生吸附不住，基材飛出的安全性問題，因此最終決定 0.5mm 的厚度。而 ITO 基材則配合銅片的厚度，希望兩者厚度盡量一樣的狀態下去比較兩者塗佈後的薄膜性質差異，而市售常見最薄的厚度為 0.7mm，其餘厚度則需訂做，故在此考量成本下選擇 0.7mm 厚度作為實驗基材的選用條件。

表 2-8 塗佈基材規格表

基材種類	銅	ITO 玻璃
導電性(三用電表量測)	趨近 0 歐姆	電阻 7 歐姆
試片大小	直徑 18cm	直徑 18cm
試片厚度	0.5mm	0.7mm

以下說明實際塗佈流程，圖 2-29 為塗佈流程圖，以銅基材做為示意（其後改採 ITO 玻璃基材步驟相同），主要為三步驟，首先會利用自製 3D 列印治具進行定位，治具如圖 2-30 所示，需要此步驟主要是因為若基材中心無法定位於旋轉塗佈機中心，開始塗佈之後會因為偏心的關係，使其在旋轉時產生劇烈晃動，將使下方吸盤使用壽命降低，基材也可能因偏心的離心力甩出，更為重要的是，由於每次吸盤吸取基材的位置都有很大的差異的話，可以預期的在溶液的分布上容易出現膜厚差異大的情況，使得其難以統一條件會使得在後續膜厚數據難以分析；這也會導致後續製作成聲學元件時，因為膜厚在不同位置的差異大，使得可供加工的範圍減少，也因此有準確定位的必要性。

在定位完之後將幫浦開啟用以吸住基材，如圖 2-31 所示，這步驟需注意抽氣的氣壓，顯示的數值（綠色顯示）需低於預設的數值（小字、橘色顯示），然後便可開始設定轉速，本研究中設定兩段轉速，第一段為轉速 500rpm 持續 6 秒，此段的作用為進行預塗佈的動作，也就是先將倒入的溶液以較慢的轉速旋轉，讓溶液可以先初步覆蓋整個基材表面，經過測試後約 6 秒可以達成完全覆蓋，而第二段的轉速決定最終薄膜厚度的轉速，依循後續聲學元件的需求厚度，決定實驗時該使用怎樣的轉速範圍，這段持續時間統一為 60 秒，後續在第 2.3.5 節將詳細討論轉速與膜厚的關係，儀器的設定上如圖 2-32，時間可選擇分鐘（M）或秒（S），需注意的是在轉速的部分由於旋鈕上僅有刻度，無法在未啟動的當下看到確切的轉速，因

此需要在倒入溶液前先啟動儀器，讓其只附載著基材的情況下旋轉，此時 RPM 處會顯示當下轉速，透過這段試轉的期間，設定好所需要的時間和轉速。

設定完轉速後便可將溶液倒入於基材上，蓋上防塵蓋後開始塗佈，溶液將從中心向外開始擴散成膜。



治具定位



	第一段	第二段
轉速	500rpm	*1000rpm
持續時間	6sec	60sec

轉速設定 *為500-3000rpm範圍



倒入溶液並開始塗布

圖 2-29 塗佈流程圖



0 9(cm)

圖 2-30 定位治具



圖 2-31 幫浦啟動



圖 2-32 轉速設定

2.3.4 退火

塗佈完以後進入退火的步驟，首先會先進行去除殘留溶劑，如圖 2-33 所示，將塗佈完薄膜之試片放置於加熱攪拌器上加熱，銅基材為底的試片設定溫度 85°C 加熱 3 分鐘；ITO 玻璃基材為底的試片則因為玻璃的導熱性較銅片差，因此加熱時間提升至 12 分鐘。設定 85°C 的原因為丁酮沸點在 80°C，因而選擇高於它的溫度

使丁酮溶劑揮發，但在實際實驗中可發現到加熱攪拌器的盤面大小並不能完全涵蓋整個試片尺寸，但考量邊緣的部分在後續使用上多做為邊角捨棄，應用性不高，即使未充分去除殘留溶劑，對後續使用上影響也不大。



圖 2-33 去除殘留溶劑

去除殘留溶劑後便進入正式的退火，透過使用 2.2.2 節的烘箱，將試片放入箱內，銅基材試片以 140°C 加熱 15 分鐘；ITO 玻璃基材試片則同樣因玻璃的導熱性較銅片差，因此加熱時間提升至 60 分鐘。而溫度選擇上是由於 FC20 的居禮溫度為 136°C、熔點為 150°C，也因此溫度需高於居禮溫度才可促進晶相轉換，也就是轉換成 β 相，但又不能高於熔點，因為可能會破壞 FC20 的結構，故設定 140°C 為加熱溫度。

2.3.5 膜厚測量與脫膜問題

此部分主要利用 2.2.4 節的膜厚計來進行膜厚量測（銅基材），過程中會輔以螺旋測微儀對於 ITO 基材塗佈之薄膜進行量測，此部分也會在本節詳細說明。另外也將對於脫膜上做討論。

以下先就銅基材使用膜厚計討論膜厚量測，希望檢測薄膜整體厚度之均勻性和觀察膜厚與塗佈轉速之關係，為了達到上述兩個目標，需要先設定量測的位置點，後續才能進行分析討論，量測點如圖 2-34 所示，主要在兩直線上取點取平均，透過觀察兩條線的數值差異來分析結果，詳細的點為在兩直線上各取 9 個點，以中心線向兩邊 2、4、6、8 公分。實際量測圖如圖 2-35。

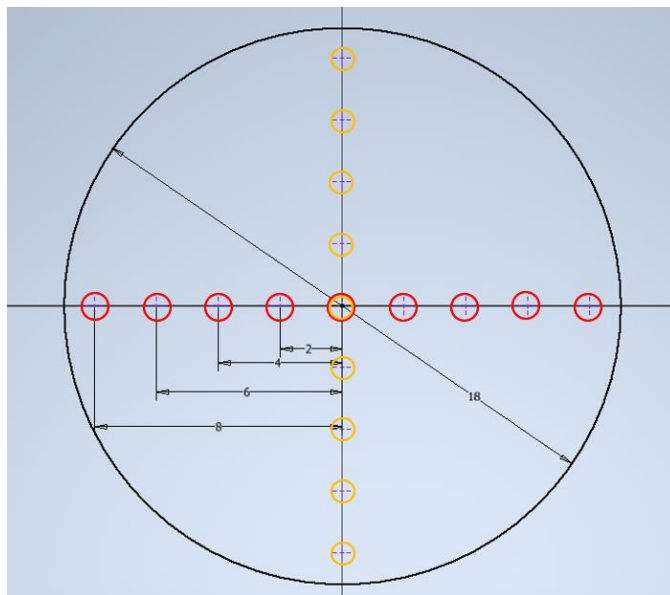


圖 2-34 膜厚量測點



圖 2-35 膜厚量測實體圖

量測點設定完之後，由於要對薄膜厚度之均勻性進行討論，故採用箱型圖 (box chart) 顯示統計結果，希望量測的點皆無離群值產生，也就是數值不大於 3 倍的四分位間距 (第 3 四分位數-第 1 四分位數)，箱型圖的圖標示意如圖 2-36 所示。

在 2.3.3 節中提到對於銅基材的部分先進行拋光的動作，此動作除了是去除表面缺陷、髒污外，更重要的是為了使整片銅片的表面呈現高平整度來使塗佈的薄膜厚度是均勻的，也因此這裡將開始對於拋光號數對膜厚均勻度的影響做討論，結果圖如圖 2-37 所示。其中砂紙號數為到 2000 號為止，3000 號與 6000 號為使用了研磨液。圖中的左右線和上下線代表所設定薄膜量測平面上的兩直線位置點，圖中標示全部則是將兩直線上的所有點取平均，在此所設定的轉速以 1000rpm 作為固定變因。

結果可以看出隨著拋光號數的增加，也就是理論上銅片表面會變得越平整，可以發現砂紙號數在增加到 2000 號以後，整體厚度均勻度有明顯的提升，顯示基材表面狀況越好時，確實整體均勻性會有所提升。

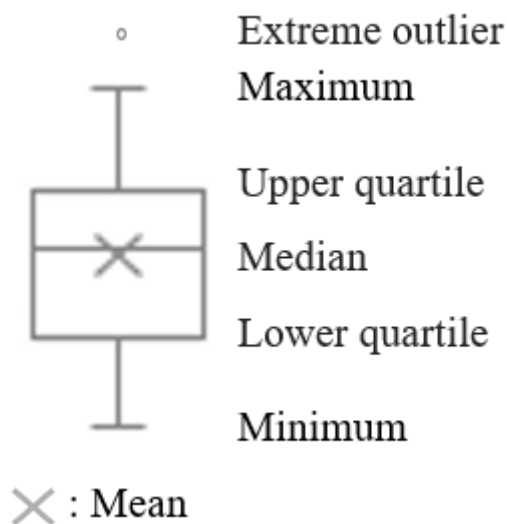


圖 2-36 box chart 統計圖

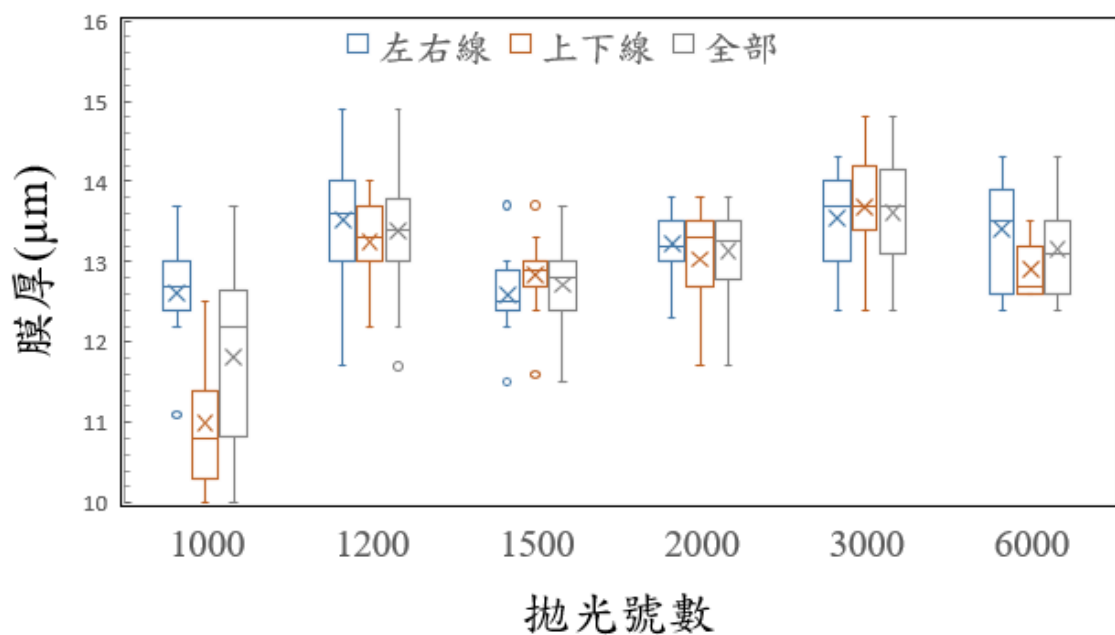


圖 2-37 拋光號數與膜厚均勻度關係圖

從以上拋光號數對均勻度的結論中，最終選擇以拋光號數 3000 號為後續主要拋光標準，原因會在後續脫膜中詳細說明；在拋光流程上會以 1500 號、2000 號砂紙拋光完後再進入 3000 號研磨液拋光，避免直接用高號數拋光導致其表面有些區域因手動拋光的緣故使得其拋光不均勻的問題被放大。

接著在 3000 號拋光的固定變因下，觀察膜厚與塗佈轉速的關係，在轉速區間選擇上參考 Arkema 公司曾對於 FC25 材料進行膜厚分析的轉速，如圖 2-38 所示，雖然 FC25 與本研究使用之 FC20 有成分上的差異，但在對於做膜厚與轉速分析上還是有一定參考價值，除參考圖 2-38 選取轉速點外，同時也搭配在後續聲學量測實驗中預期會用到的厚度區間來反預測出的轉速，綜合這兩者實驗所得到的結果圖如圖 2-39 所示。圖中每個轉速下的薄膜膜厚數值為將所量測的 18 個點取平均後的結果。

圖中呈現整體趨勢隨轉速增加使膜厚降低，但可以發現在 3000rpm 時有例外，推測原因有以下兩點，第一是由於銅片表面特性，也就是拋光後的表面平整度，導致其所吸附的溶液量有其下限，從結果來看推測最薄只能塗佈至 7μm，另一原因為 3000rpm 時厚度過薄已超過實際量測上限，膜與銅片可能視為一體，也就是實際量

測儀器上也只能量到 7 μm 。綜合以上兩種推論，因此目前本實驗製程中所可製作出的膜厚在考量量測誤差的情況下，約在 6-19 μm 的範圍內。

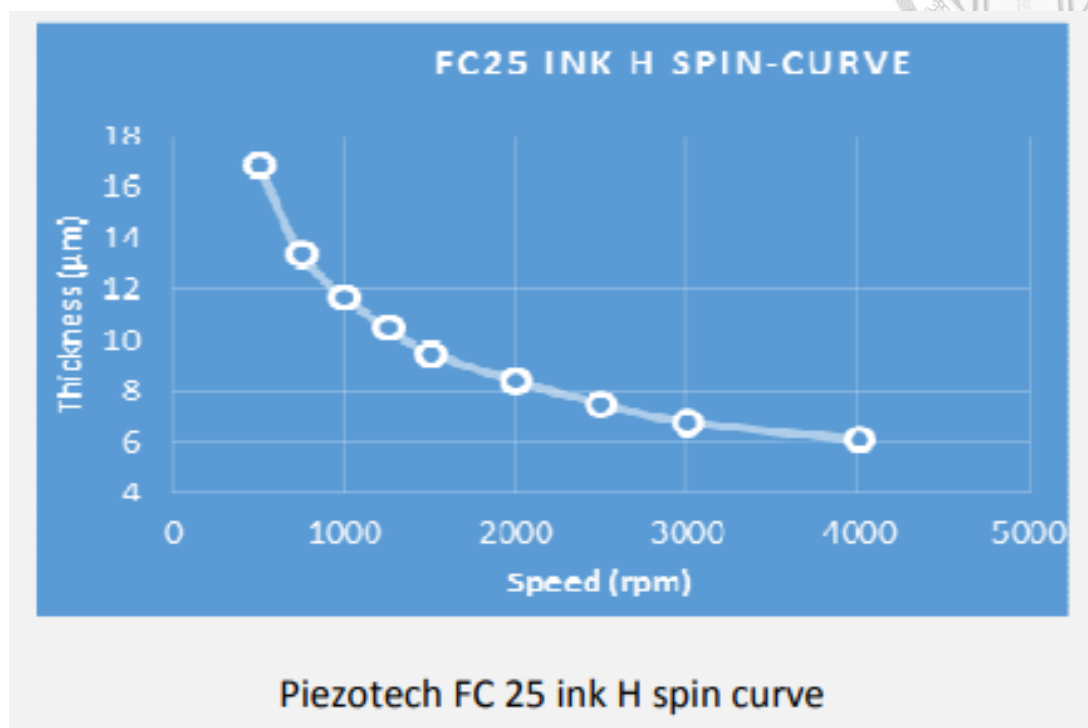


圖 2-38 拋光號數與膜厚均勻度關係圖[47]

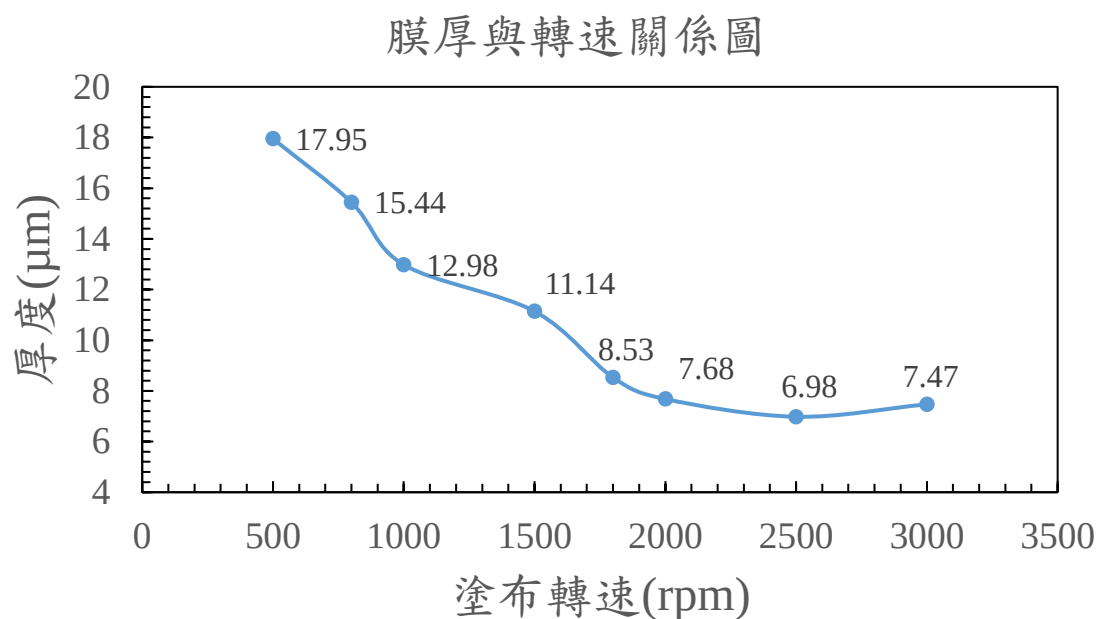


圖 2-39 膜厚與轉速關係圖

得出膜厚的範圍後，便可為後續聲學元件上提供厚度尺寸的選擇，但在後續脫膜的階段上會使得實際使用的範圍有所限縮，主要是在於 10um 以下有所限制，圖 2-40 為脫膜時的破損圖，實務操作上的情況為，薄膜在一些區域上仍緊緊吸附著銅基材的，發生此現象的原因可能因基材表面的平整性不一，這部分雖說以透過 2.3.3 節的前處理可以使此情況降低發生機率，但當基材拋光至過度平滑、平整時，基材吸附薄膜的吸附力會有所上升，實際操作時甚至出現連外圍都難以脫膜的情況，實驗過程中嘗試以在銅基材切分 90 度的四個點上貼膠帶後再進行旋轉塗佈來解決，如圖 2-41 所示，四個角落貼附膠帶的區域會使溶液塗佈時具有較弱的吸附力，故可由此將薄膜從四個角落緩慢脫膜，但此方法限制在接近中心處若還是一樣處於吸附過緊的情況下，對於脫膜幫助也是有限，這也是基材拋光時不選擇 6000 號的原因，因為會導致有吸附過緊密的問題，故最終選擇 3000 號拋光做為主要拋光標準。另外，薄膜厚度的部分在後續聲學元件選擇上多以 1000rpm 的製程，也就是約 13um 左右為考量，因在 10um 以上厚度脫膜較不易因人為操作而有所破損。



圖 2-40 脫膜破損圖



圖 2-41 銅基材四角落貼膠帶

以上是對於銅基材的膜厚度量測與脫膜上的討論，本實驗中使用的另一種基材，ITO 玻璃則也有相似的問題，以下一樣針對膜厚度量測和脫膜問題討論。

首先由於 ITO 玻璃其非金屬基材，也因此無法使用雙功能膜厚儀做量測，所以在這裡主要使用螺旋測微儀量測厚度，量測膜厚的時機點則不像銅基材試片在極化前進行，而是在極化、脫膜後進行。由於 ITO 基材在本研究中主要與銅基材對照，主要檢視更換基材後脫膜、膜厚均勻性和極化後的壓電性是否有差異，以此評估能否提供另一種基材選擇，抑或是後續能夠配合最終想得到的壓電薄膜類型，來做基材上的調整。因此在 ITO 玻璃基材部分就沒有像銅基材一樣對於轉速和膜厚的關係作分析，而是直接選擇 1000rpm 的轉速進行塗佈，觀察膜厚以及後續極化和濺鍍製程的狀況。而由於螺旋測微儀的精度較低且解析只到 1 μ m，故在此量測了 5 組試片的膜厚來觀察厚度範圍，希望藉此約略估計其實際厚度與其均勻度，實際量測圖如圖 2-42 所示，量測結果如圖 2-43。



圖 2-42 螺旋測微儀實際量測圖

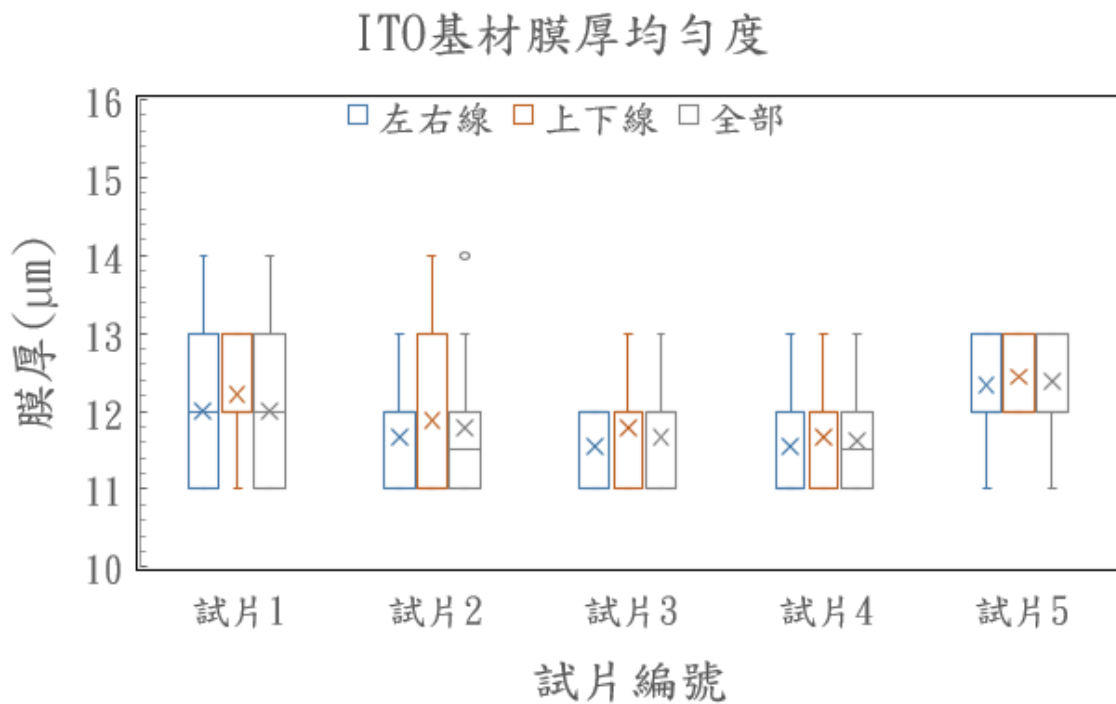


圖 2-43 ITO 基材膜厚結果圖

從結果來看實際膜厚約落在 11.5-12.5 μm 之間，跟同轉速之銅基材薄膜相比約少了 1 μm 左右，而均勻度來說大致都無離群值產生。

至於在脫膜部分，由於 ITO 玻璃相比銅片來說表面平整度高很多，也因此實際脫膜上並無特定區域吸附過緊的問題，同時脫膜也不像銅基材一樣容易受人為

影響大，對於脫膜失敗的容錯率來說較高。但與此同時，有時會出現在去除殘留溶劑階段時薄膜即自動從基材脫落，此時便無法使其充分透過基材導熱到薄膜上，完成去除殘留溶劑動作，甚至於後續的退火，因此這裡參照了銅基材的脫膜處理方式，將膠帶貼在 ITO 玻璃基材外圍後再進行旋轉塗佈，如圖 2-44 所示，此方法在銅基材時是用於方便脫膜，在此功用除了同樣方便脫膜時從外圍脫膜外，另一點為溶液與膠帶間是有些微的吸附作用，也就是相比 ITO 基材來說不容易脫膜一點，而從實務上來看其加熱到一半薄膜便自動從基材邊緣慢慢脫落，這是由於此薄膜容易自動捲曲起來，也因此當有地方開始捲曲之後，後續便會全部捲成一圈，如圖 2-45 所示。故貼膠帶的此方法為讓它不要有驅動捲曲的動力點，便能使其還是吸附在基材上，不因捲曲力而自動脫膜，以利後續加熱退火。

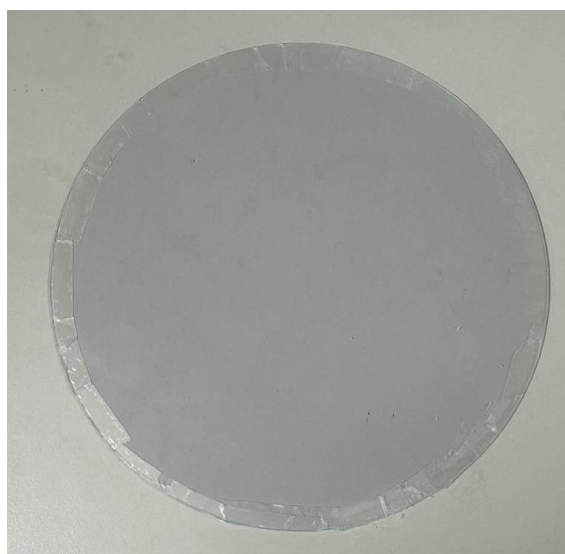


圖 2-44 ITO 基材貼膠帶處理圖



圖 2-45 薄膜捲曲圖

2.3.6 極化與 d_{33} 量測

極化的目的為激發薄膜最佳的壓電特性，原理為本研究中使用的壓電材料具有鐵電性，具有鐵電性的材料會產生自發性極化，呼應 2.1.1 節提到過的 β 相結晶特性；當利用施加超過矯頑電場 (E_c) 大小的電場，即可改變鐵電材料之電偶極方向，使各個分子的總偶極矩不為零，當外加電場移除後，鐵電材料內仍會有剩餘的極化量 (P_r) 存在，避免各分子間的偶極矩相互抵消，此時即會展現最好的壓電性，鐵電材料極化示意圖如圖 2-46 所示。

而在極化方式上，主要可分為兩大類，接觸式極化和非接觸式極化，以下說明兩種極化的原理和優缺點比較。

➤ 接觸式極化

將製備出的薄膜正反兩面鍍上一層電極後以外加的電壓供應器提供的電壓在樣品的上下層形成一內部電場，使偶極排列一致。此方法優點在於儀器操作上會較容易，使用電源供應器即可，但缺點是容易受表面鍍的電極均勻度影響，使得極化

不均，同時因過程中需直接接觸薄膜表面，也因此極化時易有電流流經，產生擊穿的現象，擊穿後薄膜便無法使用。極化示意圖如圖 2-47 所示。

➤ 非接觸式極化（電暈極化）

將一端連接至基材作為接地端，另一端則對於空氣施以高電壓使其離子化，產生電荷，最終形成一感應電場，使其偶極排列一致。此方法優點在於極化強度均勻且較無擊穿問題，這是由於將基材做為接地端，另一端則是空氣，也因此過程中薄膜上流經的電流極小，使得擊穿問題大幅降低，但缺點是需要特殊設備，也就是儀器價格上會昂貴許多。極化示意圖如圖 2-48 所示。

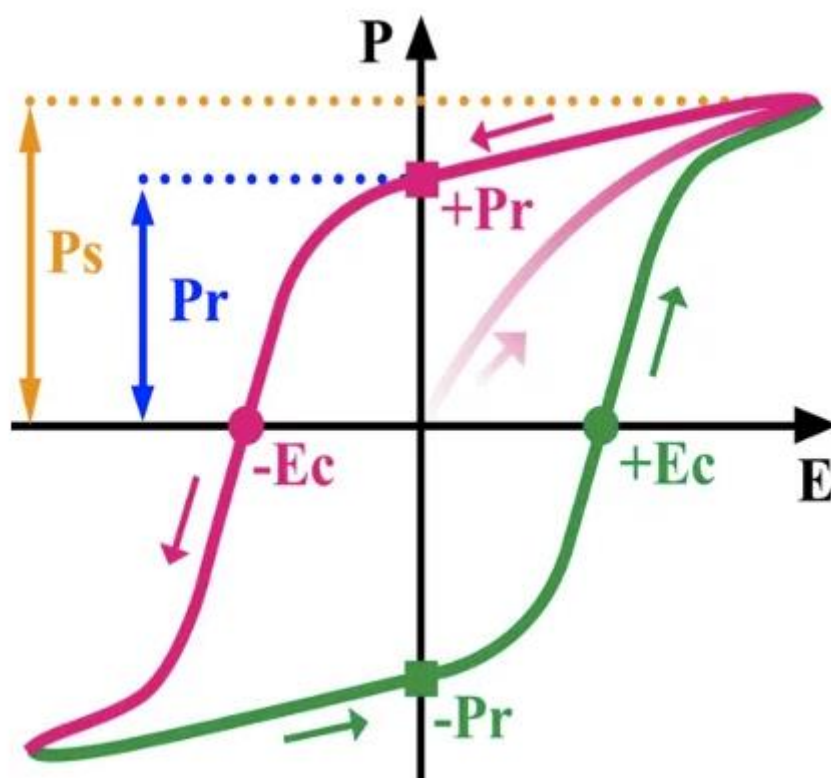


圖 2-46 鐵電材料極化示意圖[48]

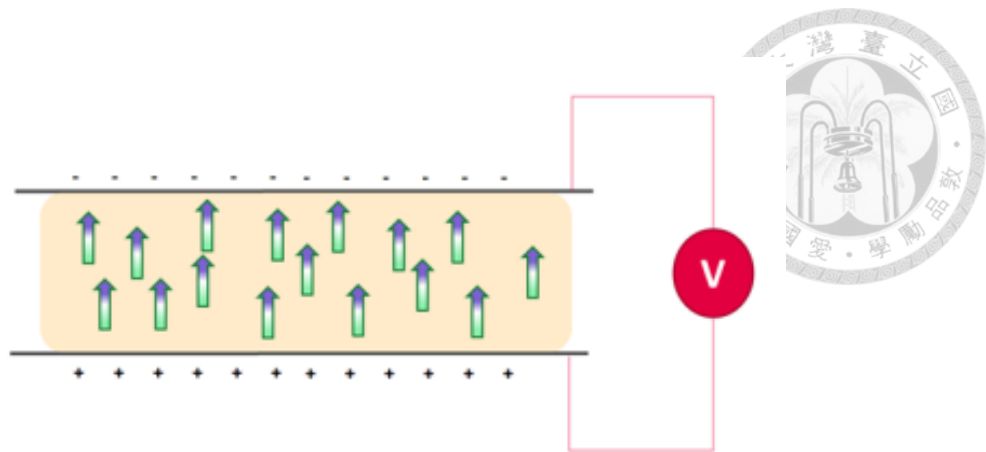


圖 2-47 接觸式極化示意圖

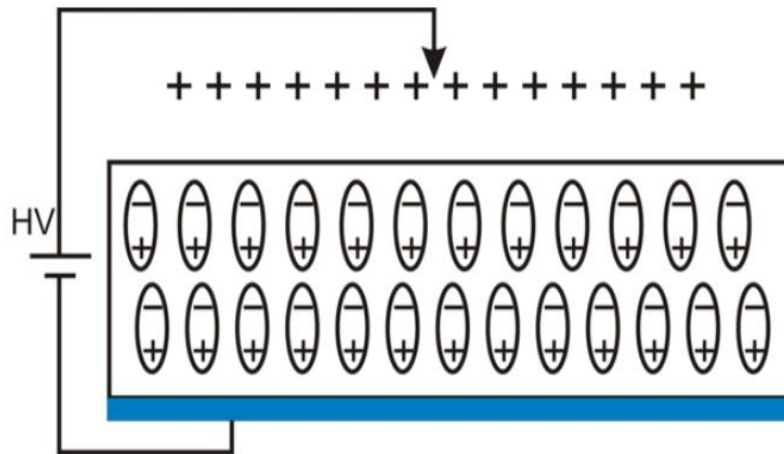


圖 2-48 非接觸式極化示意圖

在接觸式極化部分為透過實驗室中的高壓電供來進行極化實驗，而非接觸式極化的部分則是委外交由馮鼎奈米科技公司進行代工，最終是選擇非接觸式極化來進行試片極化步驟，但接觸式極化部分因也有做嘗試，故在此也會說明，以下將對兩者極化之情形與後續薄膜狀態進行說明。

首先說明接觸式極化實驗流程，實驗儀器為向友聲電子購買之 YSTC 高壓直流電源供應器，儀器圖、規格表如圖 2-49、表 2-9 所示。在一開始參考 Arkema 公司極化時所使用的方式，主要為使用圖 2-50 所示的直接探針接觸系統（Direct

probes poling process)，其為一種接觸性極化方式，而在 Ink H（圖 2-19）、FC25 的情況下，其參考的極化參數如圖 2-51 所示，上限為 100 (V/μm)；同時透過查閱混合 FC20 之參考文獻[49][50]，可得 FC20 實際應用極化電壓為 30-90 (V/μm)，本研究先以 100 (V/μm) 做嘗試，如遇擊穿情況則再降低電壓。



圖 2-49 高壓直流電源供應器儀器圖

表 2-9 高壓直流電源供應器規格表

最大輸出正極性電壓	40kV
最大輸出瓦特數	30W
電壓、電流設定	輸出電壓值、上升時間、持續時間；輸出電流上限值
電壓可設定段數	五段
輸出方式	鱷魚夾頭高壓輸出線、接地線

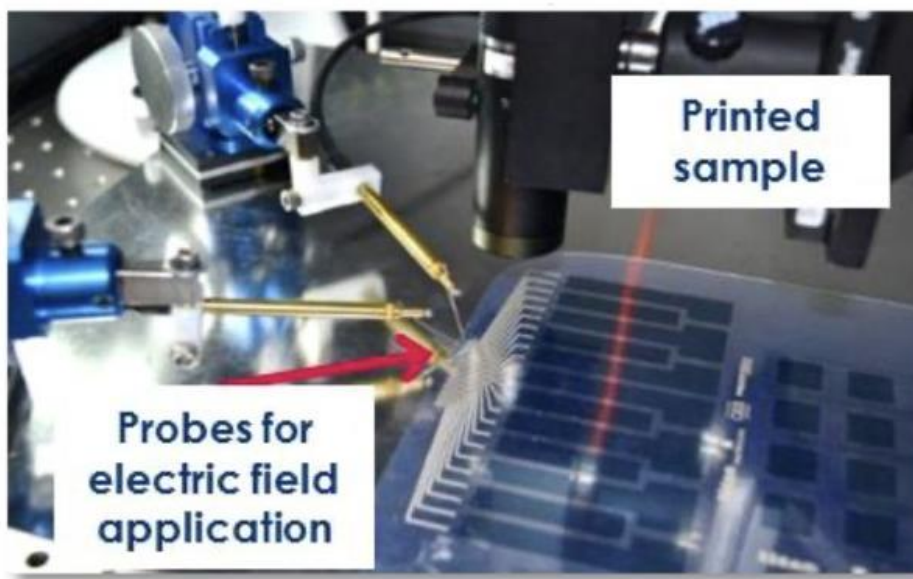


圖 2-50 直接探針接觸系統[45]

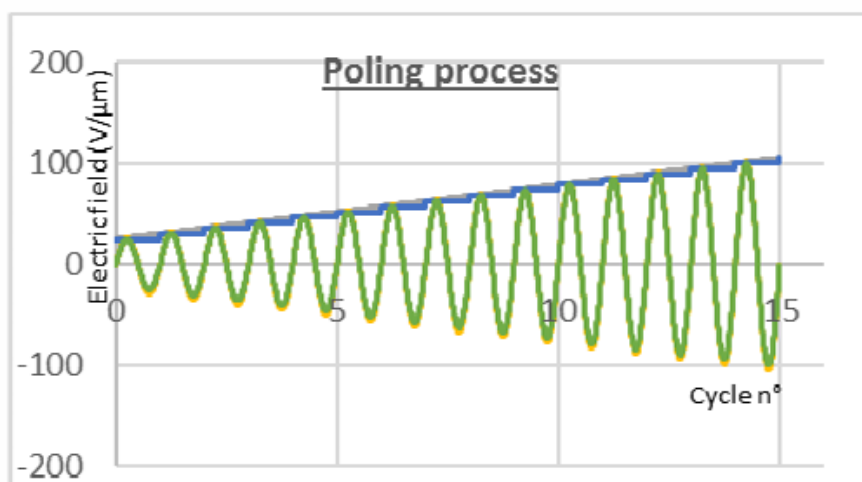


圖 2-51 Ink H、FC25 極化電壓[47]

接觸式極化嘗試兩種實驗架設，如圖 2-52、圖 2-53 所示，首先說明架設 1 的實驗方式：將塗佈之薄膜脫膜後直接去進行 2.3.7 節的電極濺鍍，接著透過圖 2-54 所示，薄膜的一面接輸出高壓端，另一面接地的連接方式進行極化，最大電壓必須搭配實際膜厚乘以 100 ($\text{V}/\mu\text{m}$)，升壓過程設定為 100 (V/min)，最高電壓的持續時間為分別嘗試 1、15、30 分鐘。除 100 ($\text{V}/\mu\text{m}$) 也有向下嘗試其它電壓值，為每隔 10 ($\text{V}/\mu\text{m}$) 間隔，最小至 30 ($\text{V}/\mu\text{m}$)，實際極化後的結果皆為極化失敗，

如圖 2-55 所示有眾多黑點（紅色圈起處）產生，觀察為擊穿現象，在聚合物中代表分子間的鍵結被電流打斷，此情況即發生材料損壞無法使用。

架設 2 的實驗方式則是將塗佈之薄膜脫膜後，在薄膜上下各放置一片銅片，最上方和最下方再以壓克力夾住固定，示意圖和實際圖如圖 2-56、圖 2-57 所示，所嘗試的參數和架設 1 都相同，最終的極化結果也都是極化失敗，主因一樣都是擊穿的問題，如圖 2-58 黑色圈起處的黑點所示。實驗過程中擊穿的瞬間薄膜表面會有些微聲響產生，下一瞬間便因電流瞬間變大（因擊穿），使得高壓儀器自動停機，此外當調整電壓至較低值時，其實較無擊穿產生，但透過後續 d_{33} 量測卻也只量到 2-3pC/N，明顯未極化成功，也因此只能夠加大電壓或增加極化時間，加大電壓即會產生擊穿問題，極化時間的提升曾嘗試供電 2 小時，但皆未極化成功，就目前的嘗試皆呈現失敗的結果，故本研究主要使用後續介紹之非接觸式極化。

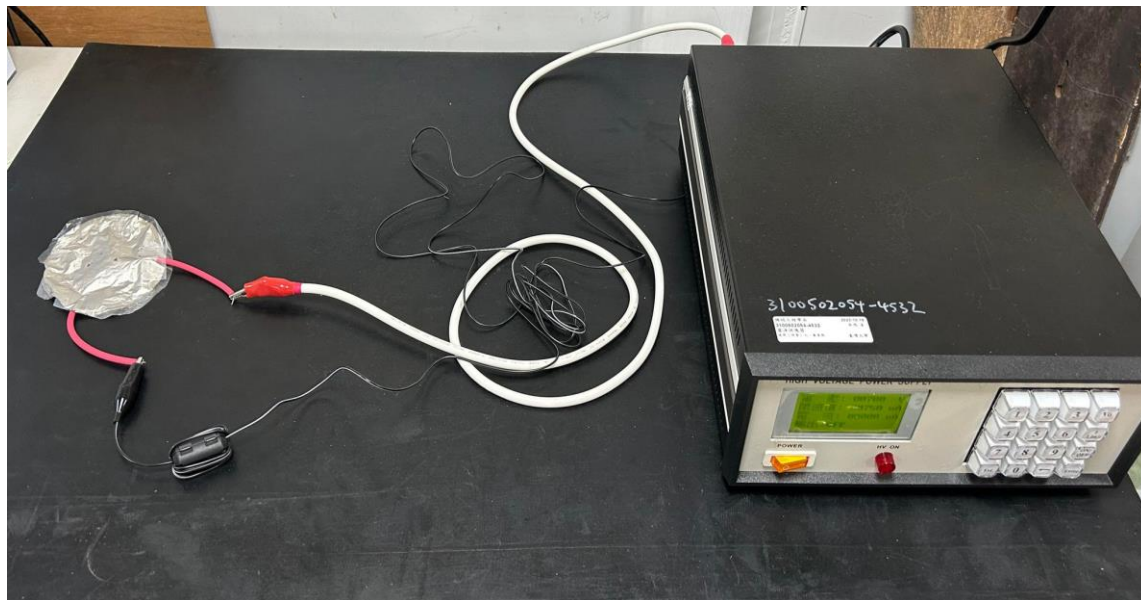


圖 2-52 接觸極化實驗架設 1

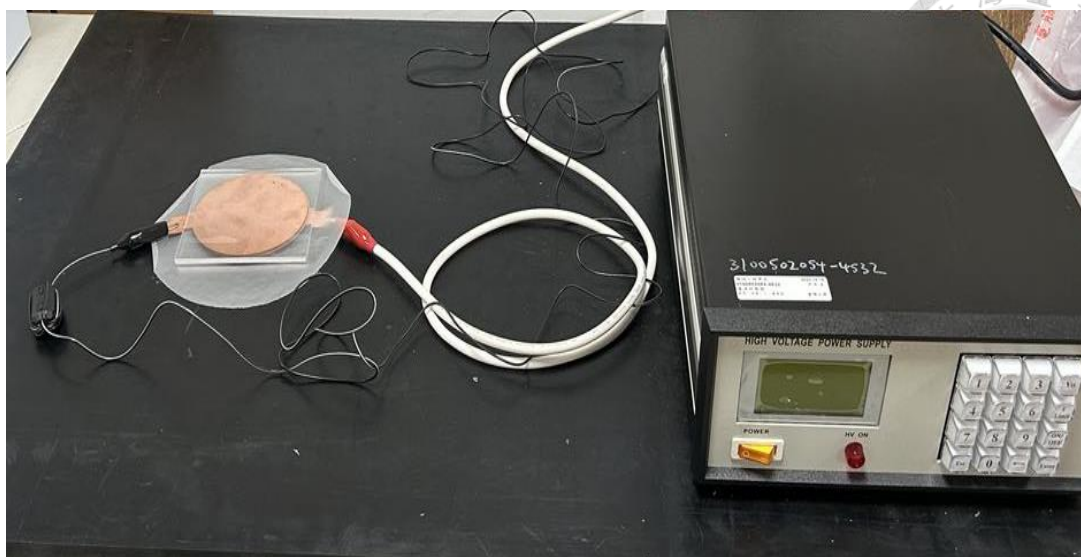


圖 2-53 接觸極化實驗架設 2

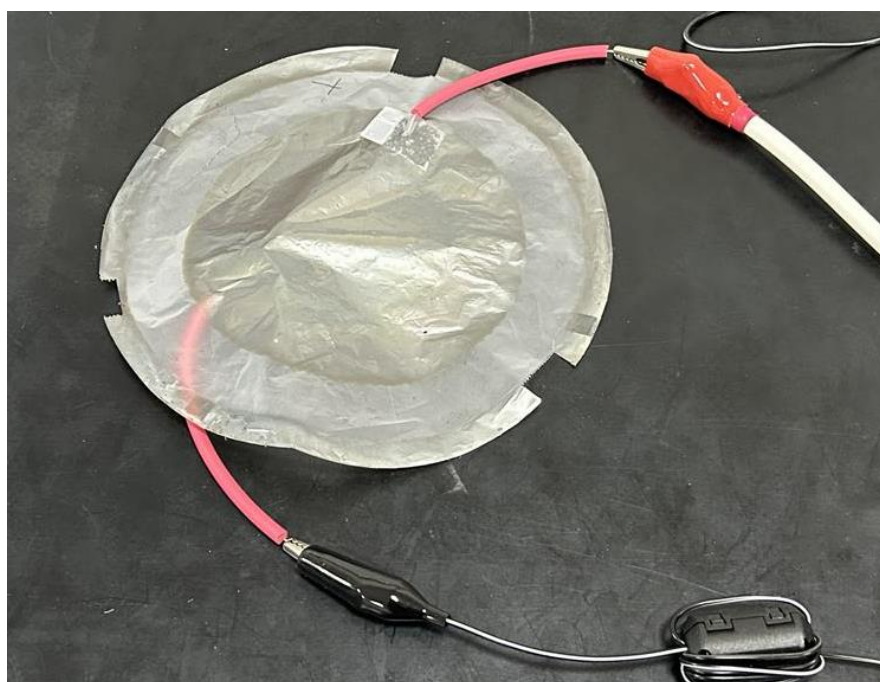


圖 2-54 架設 1 薄膜端接線



圖 2-55 極化架設 1-擊穿現象

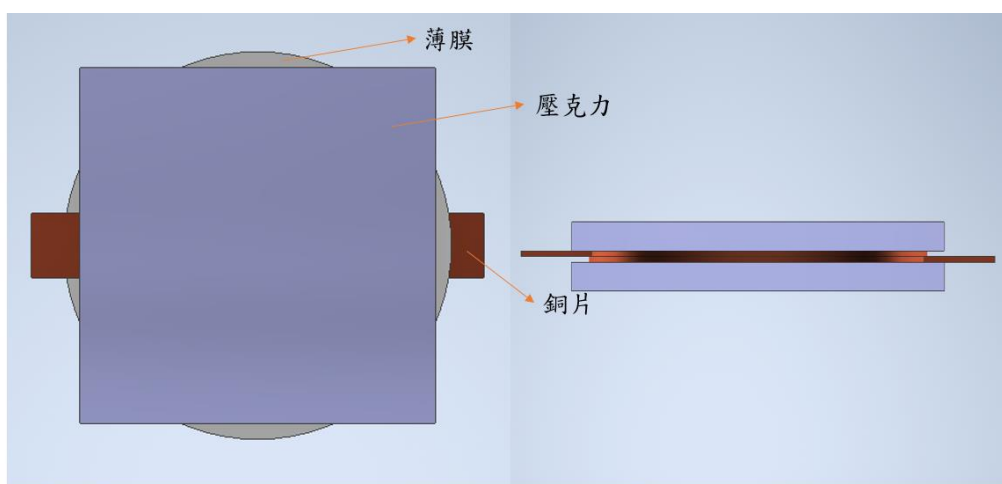


圖 2-56 架設 2 夾具示意圖

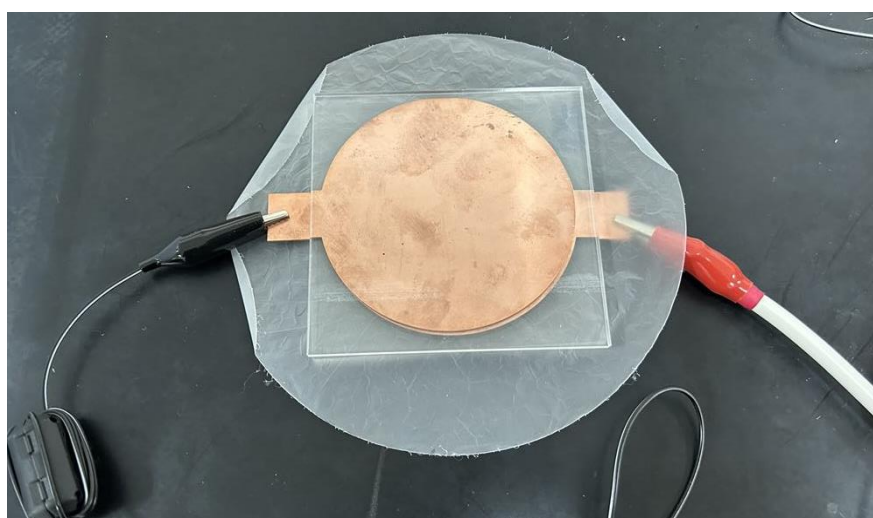


圖 2-57 架設 2 薄膜端

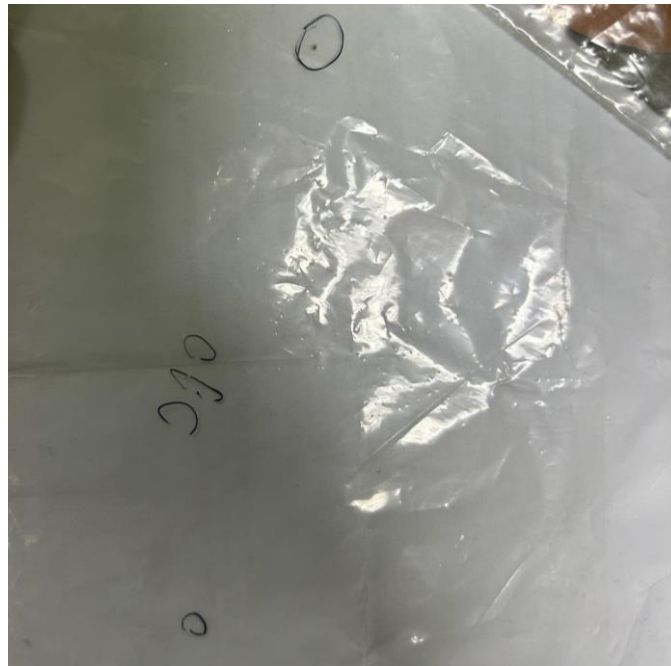


圖 2-58 極化架設 2-擊穿現象

非接觸性極化的部分，透過旭鼎公司的 POL-57A 儀器進行極化，該儀器將薄膜通以 5000V 以上的高電壓產生強感應電場，強制使偶極矩排列方向一致，極化時間約 10 分鐘即可完成，同時不會有擊穿問題，故選擇其作為本研究中的極化方式。

而評估以上極化情況之優劣，以量測 d_{33} 壓電係數作為衡量標準，薄膜在壓電係數部分主要參數為 d_{31} 與 d_{33} ，在此關注 d_{33} 是由於在本研究中主要此係數為振動與聲學上的表現影響參數，而電場給定方向為 3 方向（厚度方向），產生振膜振動也是在 3 方向推動，以因此 d_{33} 大小的影響較大，量測方式如圖 2-59 所示，透過 d_{33} 量測儀將夾持薄膜中夾夾並讀取 d_{33} 值，量測點如圖 2-60 所示，總計 20 個位置點，希望平均數值可以達到 24-30 (pC/N) 之間（圖 2-17），且不超過 2 個標準差。確立了量測基準後，利用 d_{33} 值來探討本研究的製程穩定度，也就是不同製程對極化後 d_{33} 數值的影響，主要依三大面向進行討論，分別為有無退火、調配流程的兩

種差異和膜厚差異等三者。以下討論內容會先以銅基材為主，後續再討論 ITO 基材的情況。



圖 2-59 d_{33} 量測

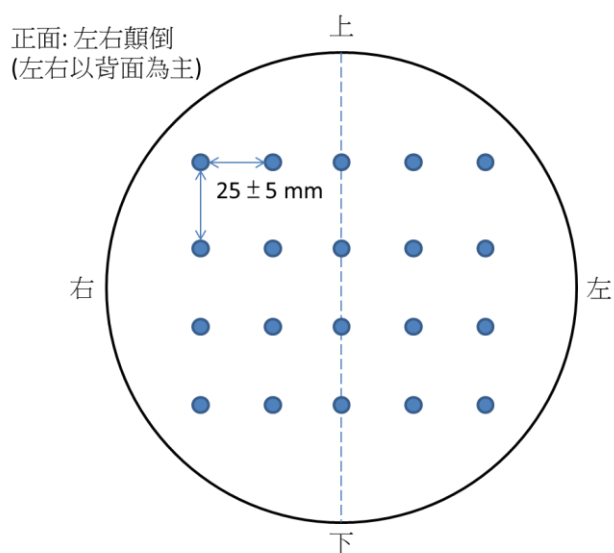


圖 2-60 d_{33} 量測點

首先，有無退火對於 d_{33} 壓電性質的影響，意即其於實驗中的變因皆固定，只差在有無退火的步驟，在此溶液調配以 2.3.2 節的流程 1 為例，結果如圖 2-61 與圖 2-62 所示，兩者的標準差皆小於 2，顯示其壓電性在薄膜上均勻分布，有退火之薄膜其 d_{33} 平均達 27.15 pC/N，無退火之薄膜僅有 4.12 pC/N，此結果即呼應了 2.3.4 節中退火的重要性。

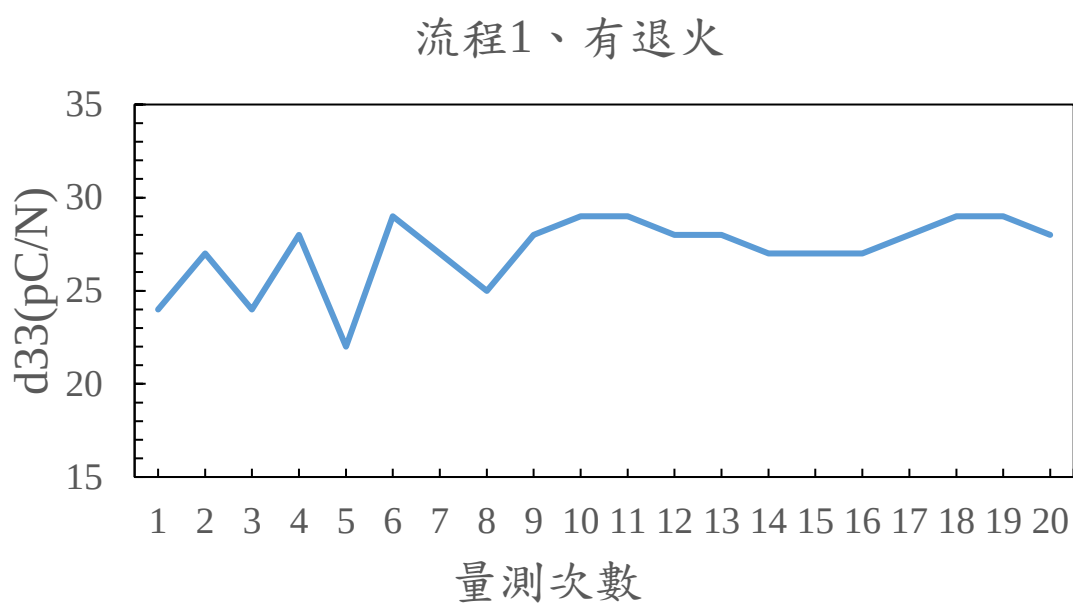


圖 2-61 流程 1、有退火之 d_{33} 值 (AVG : 27.15、SD : 1.95)

流程1、沒退火

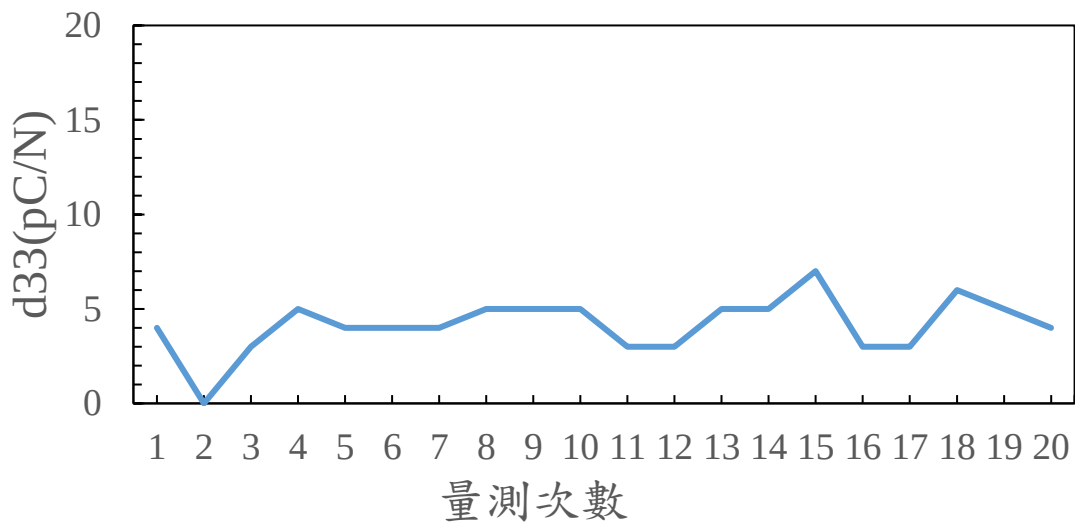


圖 2-62 流程 1、無退火之 d_{33} 值 (AVG : 4.15、SD : 1.46)

第二個要討論的則是在 2.3.2 節中兩個調配流程的差異對於 d_{33} 數值的影響，對比的兩個結果圖如圖 2-61 與圖 2-63 所示，皆為有退火之情況且固定其它變因，結果顯示流程 2 的 d_{33} 平均達 27.45 pC/N，標準差為 2.24，雖標準差超過設定的標準 2，但整體而言呈現均勻的分布，平均數值則也落在預期的範圍內，因此得出兩調配流程的不同對於 d_{33} 數值影響極小。

另對於 2.3.2 節中的溶液混合流程進行推論，也就是在都能使溶液均勻混合完全的情況下，其得到的溶液情況是極其接近的，也就是假使後續需要更換溫度、時間、轉速等製程參數，可以把混合後呈現均勻混合之光學透明狀為目標，降低溶液調配上的難度。本論文後續考量時間成本，選擇調配流程 1 對後續應用的嘗試較能夠量產。

流程2、有退火

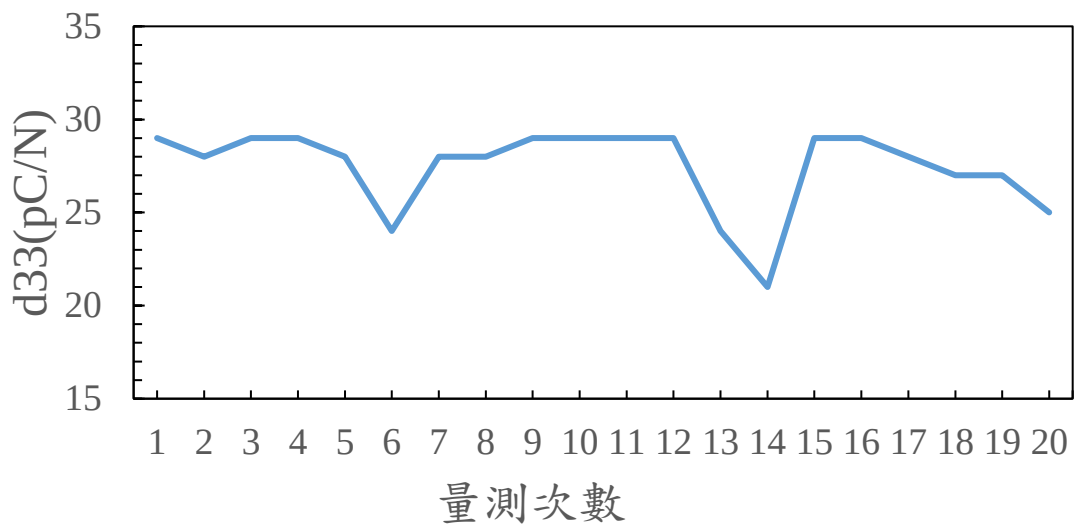


圖 2-63 流程 2、有退火之 d_{33} 值 (AVG : 27.45、SD : 2.24)

第三點則是以不同膜厚，也就是塗佈轉速上的不同對於 d_{33} 值所會有的影響，同樣其餘皆為固定變因，結果圖如圖 2-64 至圖 2-67 所示，四個轉速下的標準差最大為 2.22，可以說各轉速壓電性質於極化後的分布相當均勻，平均值也都落在 26-28 pC/N 的範圍內，相當符合預期的結果，也因此可得出的結論為在各不同塗佈轉速下製作出的薄膜其對壓電性質無顯著影響。這也可呼應前兩點的探討，也就是影響壓電性的因素主要為初始的溶液調配是否有調配完善，像是是否有混合均勻呈光學透明狀或水氣的滲入是否過多等等，另一點則是退火，退火促進 β 相結晶生成的確有其必要性。

綜合至目前為止的製程討論，在以銅基材為底製作的薄膜皆能在 24-30 pC/N 的範圍內，可說此製程具有高穩定度，代表有利於後續振動與聲學量測上不會使用到參數性質差異大的薄膜，使得可以將薄膜當成應用於聲振特性的分析之固定變因。

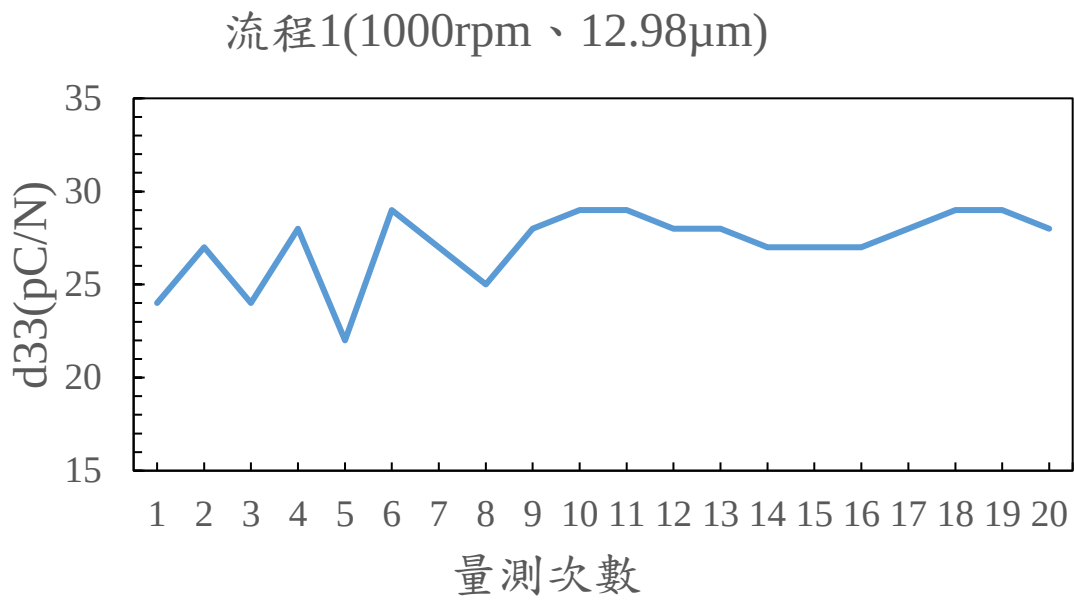


圖 2-64 塗佈轉速 1000rpm 之 d_{33} 值 (AVG : 27.15、SD : 1.95)

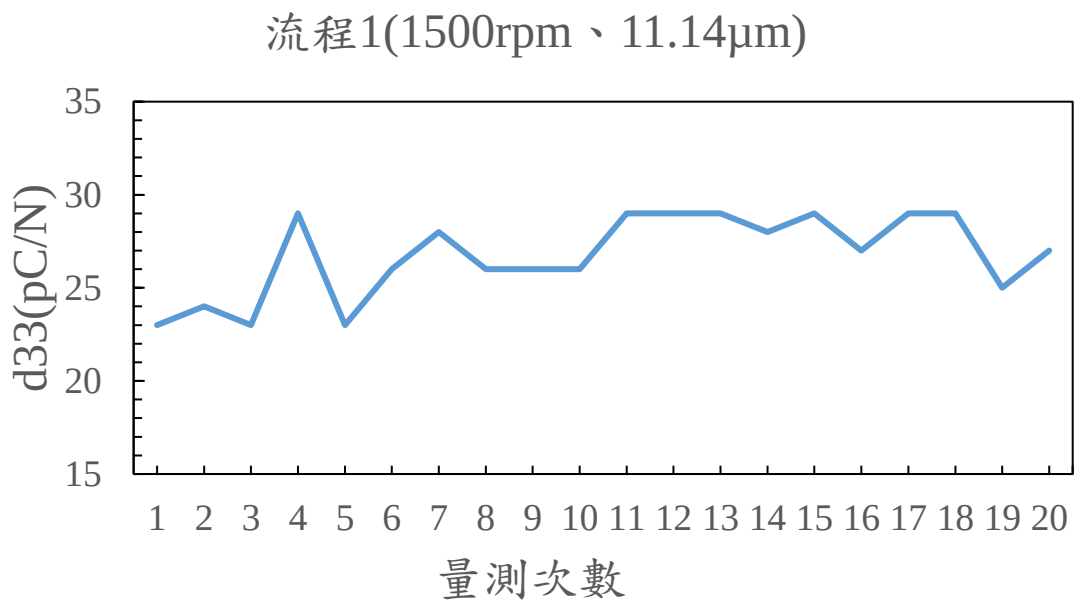


圖 2-65 塗佈轉速 1500rpm 之 d_{33} 值 (AVG : 26.75、SD : 2.22)

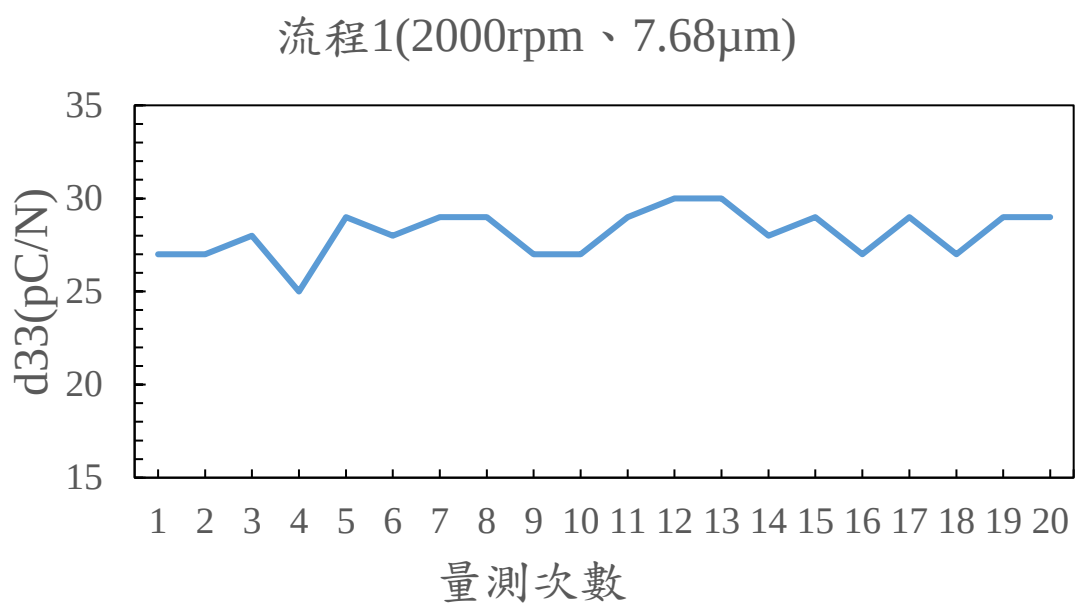


圖 2-66 塗佈轉速 2000rpm 之 d_{33} 值 (AVG : 28.15、SD : 1.26)

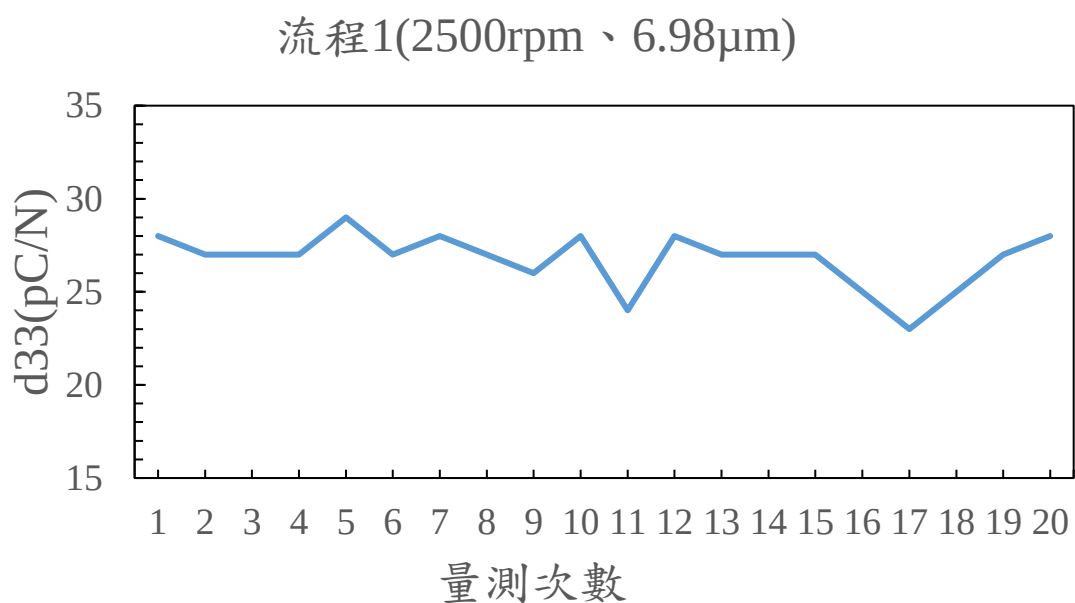


圖 2-67 塗佈轉速 2500rpm 之 d_{33} 值 (AVG : 26.75、SD : 1.48)

接著說明以 ITO 基材為底所做出的薄膜，由於已從銅基材得到調配流程 1、2 不影響 d_{33} 、膜厚不影響 d_{33} 和退火步驟顯著影響 d_{33} 這三點結論，故 ITO 基材製作的試片，以流程 1、有退火和 1000rpm 塗佈轉速這三個固定條件下量測 d_{33} 數值進行討論，得到的結果如圖 2-68 至圖 2-70 所示，總共有三組結果，極化時間皆為 10 分鐘，標準差皆為 2 以內，顯示 d_{33} 均勻度足夠，但在數值平均上僅為 20-21 pC/N，與所預期之 24-28 pC/N 有點差異，故接下來將對其嘗試進行改良與討論。

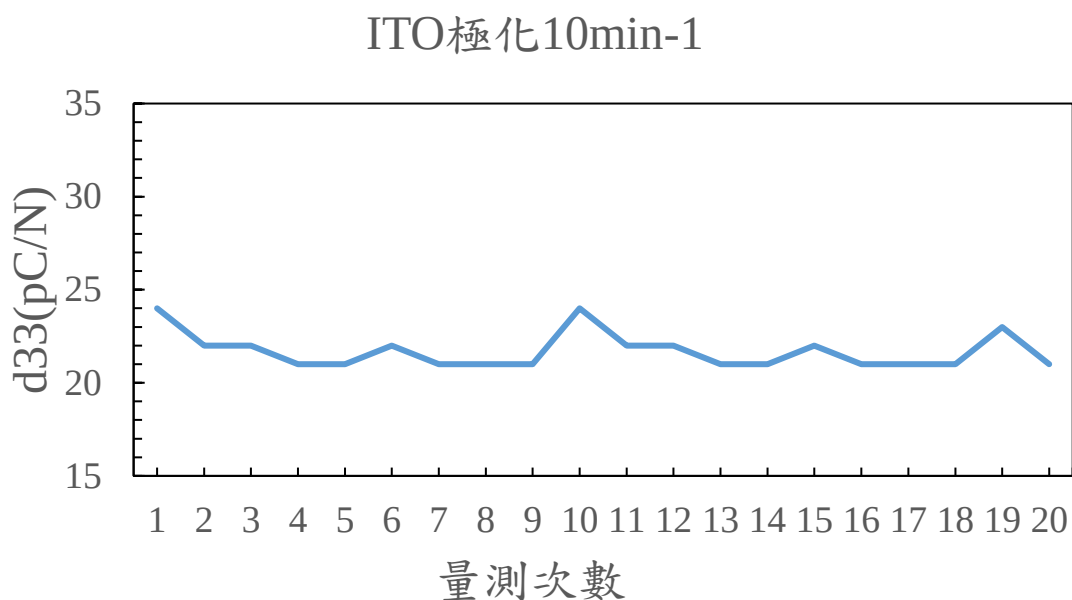


圖 2-68 ITO 基材極化之 d_{33} 值(10min-1) (AVG : 21.70、SD : 0.98)

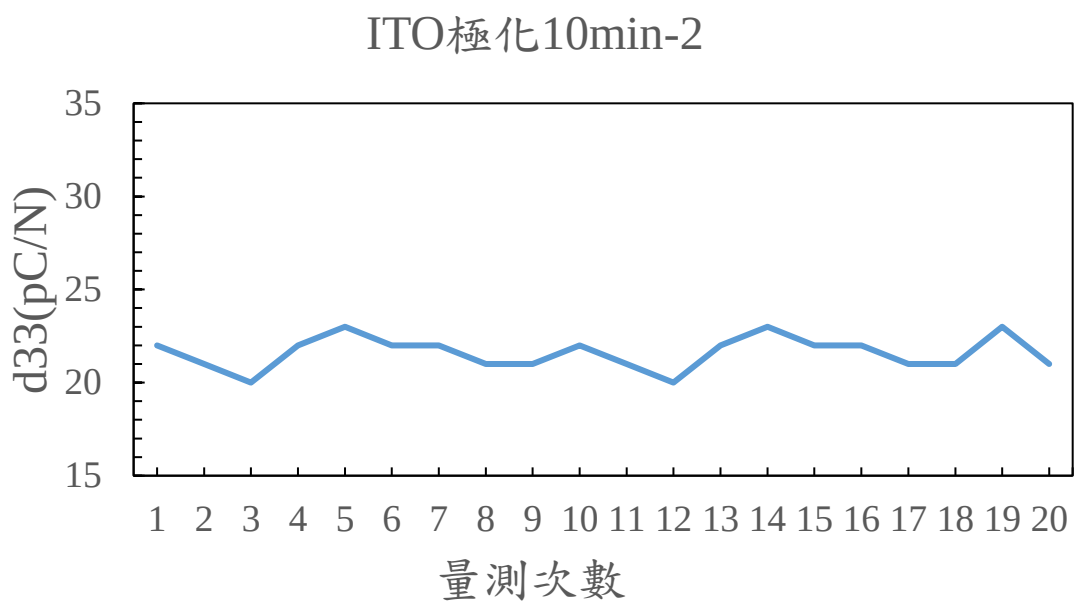


圖 2-69 ITO 基材極化之 d_{33} 值(10min-2) (AVG : 21.60、SD : 0.88)

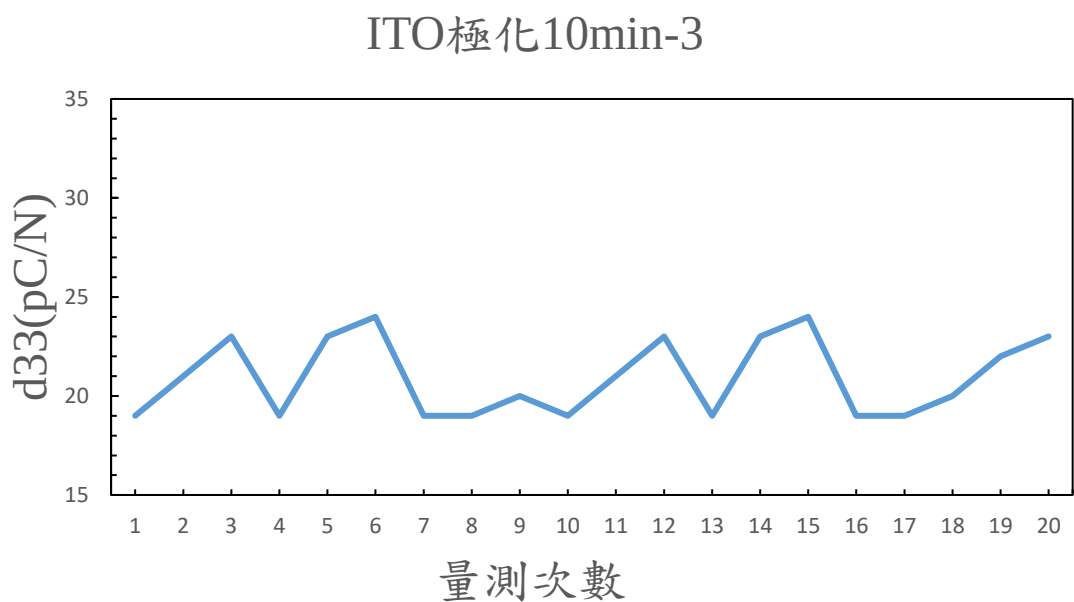


圖 2-70 ITO 基材極化之 d_{33} 值(10min-3) (AVG : 20.95、SD : 1.96)

首先嘗試將極化時間提高至 20 分鐘，透過持續較久時間的電場，希望增強 d_{33} 特性。結果如圖 2-71 至圖 2-73 所示，總共也是極化三組，結果可以看到 d_{33} 均勻度仍高，但平均數值上仍與極化 10 分鐘結果差異不大。推測主要原因在於即使 ITO

電阻值已小至 7 歐姆，但相比於銅基材幾乎無電阻的情況來看，對於極化上還是會有所影響，也就是此電阻下所能達到的極化上限。



ITO極化20min-1

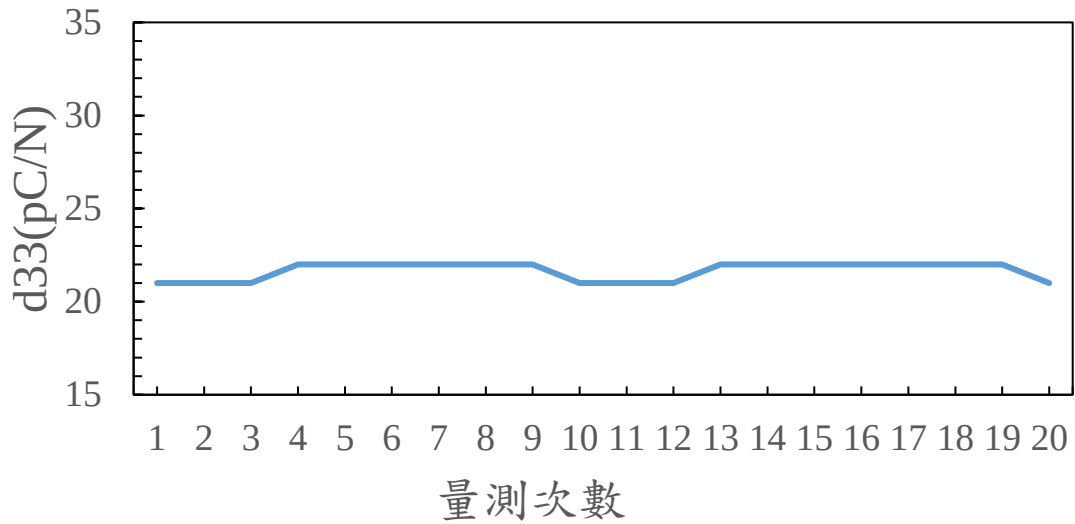


圖 2-71 ITO 基材極化之 d_{33} 值(20min-1) (AVG : 21.65、SD : 0.49)

ITO極化20min-2

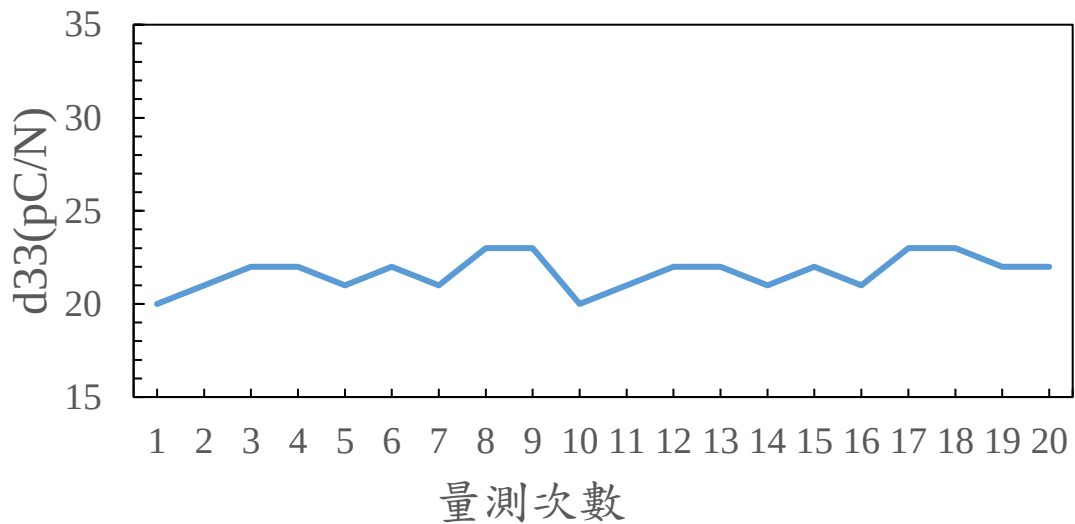


圖 2-72 ITO 基材極化之 d_{33} 值(20min-2) (AVG : 21.70、SD : 0.92)

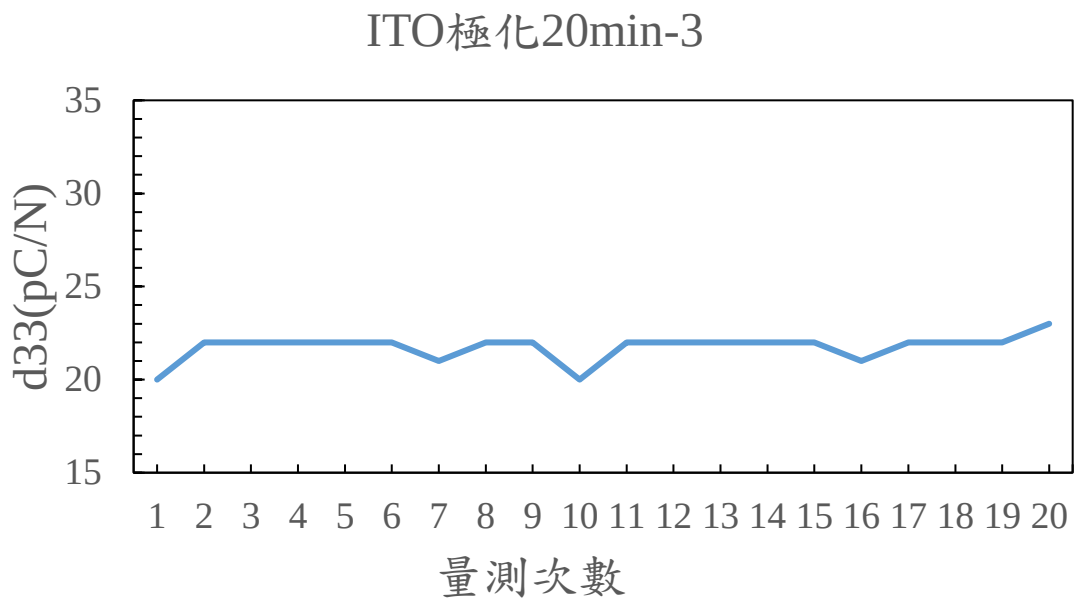


圖 2-73 ITO 基材極化之 d_{33} 值(20min-2) (AVG : 21.75、SD : 0.72)

而由於從 2.3.3 即開始探討兩種不同基材，也因此在此極化與 d_{33} 量測為止的製程，順序上會有些微差異，故在此過程中的實驗流程整理成下圖 2-74，區分兩種不同塗佈基材從塗佈溶液之後到電極濺鍍之前，以利了解本研究。

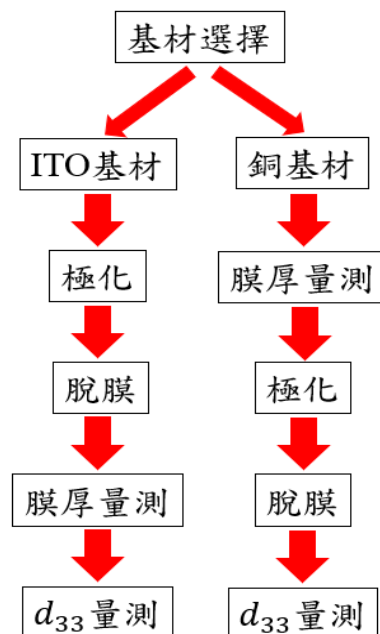


圖 2-74 基材選擇不同之實驗流程順序



2.3.7 電極濺鍍

在完成極化和進行壓電係數的量測後，便進入製程實驗的最後一個步驟，也就是將電極濺鍍至薄膜上，使其能夠做為電致動元件使用，實際濺鍍的示意圖如圖 2-75 所示，其運作原理為先將整個濺鍍腔體抽真空後，通入惰性氣體（通常為氬氣）並加熱使其變成電漿態後，將此離子束打出撞擊於欲濺鍍的材料上，此材料稱靶材 (Target)，利用撞擊的動能使靶材表面原子濺出，而後透過外加電場和磁力的作用，使得原子均勻掉落至基材上，這裡的基材在本研究中即為欲濺鍍的壓電薄膜，後續持續用離子束撞擊達到欲濺鍍的厚度後便可停止，完成濺鍍。

本研究中由於無自有儀器，加上為初步進行製程的嘗試，因此以委外代工的方式進行此步驟，委外的廠商為嘉明真空公司，濺鍍靶材為鋁，採用雙面濺鍍，同時希望兩面的電阻值都在 200 歐姆以內，也就是薄膜本身為近似絕緣體的構造，希望表面電極的電阻越小，使得後續在振動與聲學量測時所通的交流電訊號能夠發揮完整的效果，不會因表面電阻過大而使電致振動特性無法完整展現，而在 200 歐姆的條件下，實際濺鍍約需濺鍍 120 奈米的電極厚度才能達成，兩面濺鍍完厚度約增加 240 奈米，此增加的電極層厚度對於膜厚為 10-19 微米的微米等級薄膜來說，在不論振動或聲學的量測上，可將其影響視為極低，也因此僅需考慮薄膜本身厚度分析即可。

在此說明濺鍍廠商所使用的參數：首先不希望濺鍍時掉落至薄膜上的金屬原子瞬間接觸溫度太高，這是因為擔心超過 2.3.2 節中提到的居禮溫度，將使原本具有鐵電性的 β 相結晶超過居禮溫度時，鐵電性會轉變為順電性，也就代表著此材料不會有自發性極化的產生，當極化電場去除後也就不會有剩餘的極化量產生，如圖 2-76 所示，使得去極化的機率便大幅提升，壓電性降低，因此在輸出功率，也就是撞擊靶材的功率就必須調低，因此剛開始先以 500 瓦的功率去進行濺鍍，此功率下每次可濺鍍 2-3 奈米，最終約進行 40-50 次的流程，使厚度可以達到電阻值的要求，也就是 120 奈米厚，濺鍍完成後除了確認表面電阻和表面有無破損外，

另外則需是要再進行一次 d_{33} 量測，確認薄膜是否受到去極化，使得壓電性消失或降低，結果顯示此功率下薄膜情況良好，無破損或去極化，而後嘗試 1000 瓦的功率，每次約可濺鍍 4 奈米，濺鍍約 30 次即可完成，後續量測壓電係數也並無問題，故最終採用較快速省時的 1000 瓦輸出功率的參數來進行濺鍍。

最終得到的薄膜濺鍍完成圖如圖 2-77，中間有一未濺鍍環型區域為刻意為之，也就是在濺鍍時如圖 2-78 所示，以圓環遮擋一些區域，目的是擔心如果整面都濺鍍電極，濺鍍的金屬原子可能會濺鍍到厚度方向的側面區域，使上下電極導通變成一個導體，此時壓電薄膜便無法展現其特性。圖 2-79 為濺鍍後所進行的 d_{33} 量測架設圖。

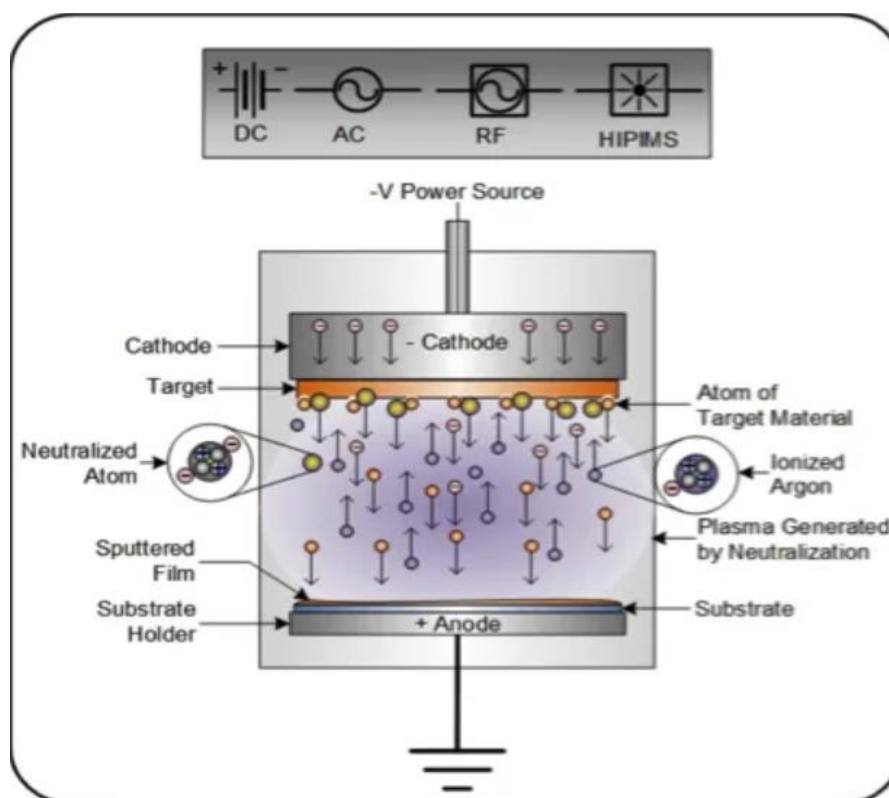


圖 2-75 濺鍍示意圖[51]

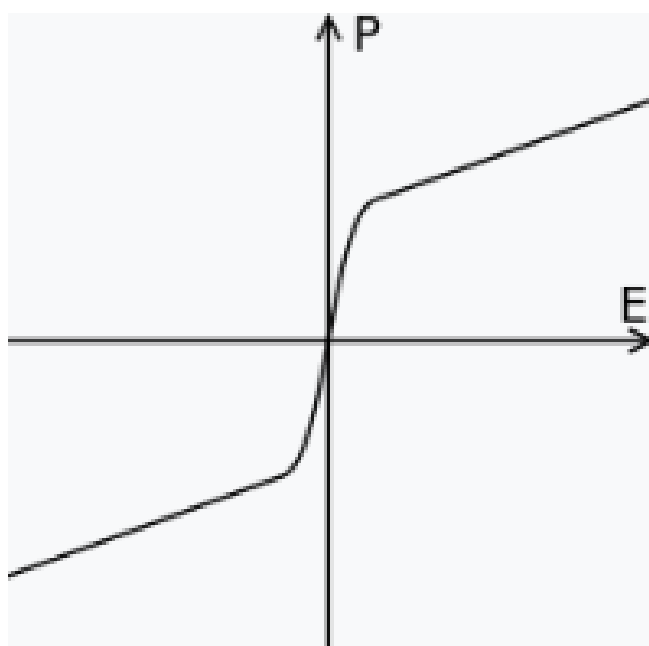


圖 2-76 順電材料極化示意圖[52]



圖 2-77 濺鍍完成薄膜



圖 2-78 薄膜環型遮鍍



圖 2-79 濺鍍後 d_{33} 量測圖

而在 2.3.2 節中提及如未在退火步驟中去除殘留溶劑，會導致在濺鍍產生問題，在此將進行說明。2.3.4 節中提到因玻璃基材導熱性較差，故將退火加熱時間從 15 分鐘提升至 60 分鐘，其目的就是要將退火的效果充分發揮至薄膜上以及確

保將殘留溶劑充份去除，也因此將加熱時間提升至 60 分鐘以確保達成兩點需求；第一點可對應 ITO 試片在極化後 d_{33} 數值未達到預期值的問題，雖並未再嘗試加熱更久時間，但導熱差即可推斷，可能薄膜未達理想壓電性質原因為未退火完全；第二點上則是從圖 2-80 的結果圖看出，如未完全去除殘留溶劑濺鍍區域明顯呈深黑色，而並非鋁金屬的偏銀色，顯示金屬離子在濺鍍過程接觸到薄膜表面時，因其殘留的丁酮溶液導致兩者產生反應，而此黑色區域後續經三用電表量測，電阻值極高，有量測至 10^6 歐姆等級，甚至更高到超過量測上限，也就是接近絕緣體的概念，因此便不能做為電極使用。

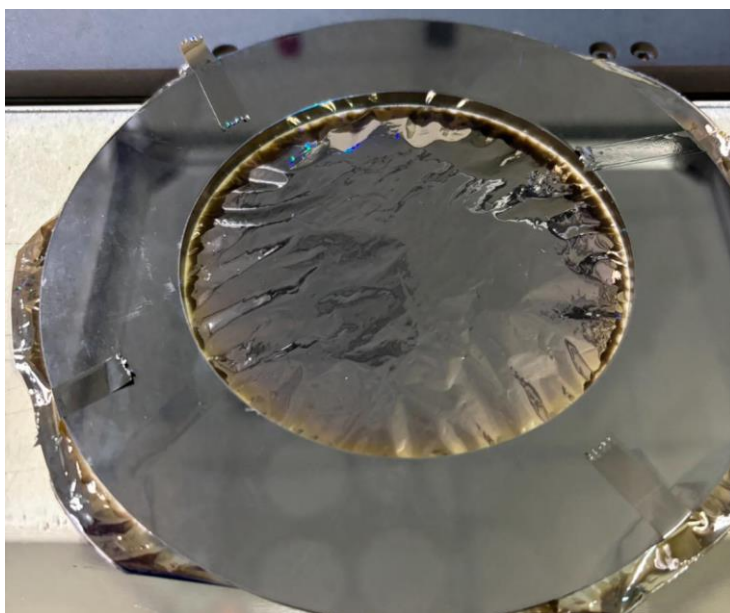


圖 2-80 濺鍍後 d_{33} 量測圖(未完全去除殘留溶劑)

2.4 薄膜材料常數量測

在薄膜製作完成到後續的聲學元件製作前，必須先對於薄膜的材料參數進行量測，得到材料參數後在後續不論有限元素模擬和薄膜與壓電圓盤理論解析上，方能進行與實驗量測結果對照的分析，所需要的材料參數主要有薄膜密度、薄膜平面方向的楊氏模數和蒲松比、壓電常數 d_{33} 和 d_{31} ，後續在第四章薄膜理論分析與模擬

和第五章壓電圓盤理論分析與模擬會詳細說明材料參數的作用，這裡僅就如何量測獲得參數為主。

首先在 d_{33} 數值量測部分為 2.3.6 節中的方式進行量測， d_{31} 則是由於薄膜難以對於此方向進行參數量測，加上後續在振動與聲學上的表現來說，因 d_{31} 為平行薄膜平面方向的壓電效應，故影響將其視為極小。這邊也參考 Arkema 公司對於 FC20 給予特性表資訊，如圖 2-81 所示，將本研究得到 d_{33} 數值與圖表中 28(pC/N) 的比值差異。從圖中可看出在薄膜製作完成後，相關的材料參數皆非一定單一值，而是有上下限範圍，顯示即使是相同製程，也會得到略為不同的材料參數，因此，此因素也會對於在接下來要討論的楊氏模數、蒲松比量測結果的選擇上有所影響。

壓電/熱電特性(於 23°C)	
d_{33} (pC/N)	$-28 \pm 10\%$
d_{31} (pC/N)	$6 \pm 10\%$
d_{32} (pC/N)	$6 \pm 10\%$
g_{33} (V.m/N) 於 1kHz	$0.2 \pm 20\%$
P_3 ($\mu\text{C}/\text{m}^2\text{K}$)	$-30 \pm 25\%$
介電特性(於 23°C)	
ϵ_r 於 1kHz	$10 \text{ to } 11 \pm 10\%$
$\tan \delta$ 於 1 kHz	$0.016 \pm 10\%$
機械特性(於 23°C)	
楊氏模數(MPa)	$2600 \pm 20\%$
溫度特性(於 23°C)	
熔點(°C)	$150 \pm 5\%$
居禮溫度(°C)	$136 \pm 5\%$

圖 2-81 FC20 原廠參考特性表[53]

量測完壓電常數後，便是對於楊氏模數和蒲松比的量測，這也是本論文的重點量測參數，這兩者參數量測的方式為透過拉伸試驗機搭配數位影像相關法（DIC）[54]進行實驗量測，拉伸試驗機量測楊氏模數而 DIC 則可獲得楊氏模數和蒲松比，透過交叉比對的方式得出兩個數據值，表 2-10 為設定拉伸試驗機時所使用的規格，圖 2-82 為拉伸試驗機相關組件，包含基座和上下兩個氣動夾頭（Pneumatic Grips）以及它的控制器（Supply Controller），在基於 ASTM D882 的拉伸規範下，設定四種試片尺寸分別為長寬 60mm×15mm、60mm×10mm、50mm×15mm、50mm×10mm，厚度皆為 13 μm ，裁切好試片後在表面噴上些微黑漆，然後將頭尾以壓克力進行黏貼以利後續夾持於拉伸試驗機上，實際試片如圖 2-83 所示，噴黑漆的目的為讓後續 DIC 的分析可以看得清楚特徵點，試片夾持至拉伸機和 DIC 相機架設圖如圖 2-84 所示。

表 2-10 拉伸試驗機設定規格

型號	MTS Criterion model 42
Load cell	250N
Stretching speed	5 mm/min
薄膜拉伸規範	ASTM D882
規範規定試片大小	取樣長度應大於夾具間距 50mm 以上，寬度在 5~25.4mm 之間



圖 2-82 拉伸試驗機組件



圖 2-83 拉伸試片圖



圖 2-84 拉伸試片夾持與相機架設圖

將四種尺寸的試片各做 3-5 個進行拉伸試驗，此時將一樣參考圖 2-81，以 Arkema 提供之 FC20 的楊氏模數為 $2.6 \pm 20\%$ (GPa) 作為基準，以此與拉伸試驗機量測數值做比對後再確認 DIC 量測之蒲松比，換言之，如拉伸試驗機量測出的數值在 $2.6 \pm 20\%$ (GPa) 範圍附近則再去看此時 DIC 同時所量到的數值為何，如一樣在範圍，則再評估其蒲松比，以此來獲得這兩者數值，最終符合條件之結果如圖 2-85、圖 2-86、圖 2-87 所示，其它組結果為未收斂或未在設定範圍內則未列出，但從圖中可以發現這三組收斂情況也不一，推測有以下原因，其一為使用壓克力夾具夾持薄膜，在黏貼壓克力的過程，壓克力角落可能會對於薄膜造成肉眼上看不出的損壞，使得其較預期的更早拉斷，導致結果不準；其二為薄膜夾持至拉伸試驗機上時，由於一樣為手動的方式去控制機器夾持的位置，也因此若有些微的夾歪，對於薄膜來說最終呈現的數值便會有很大的差異；最後為薄膜本身可能在脫膜或者

塗佈完成之後表面變有看不到的缺陷，使得結構不符合預期的產生，導致量測上無從依據。

最終蒲松比決定採取三者平均的情況 0.6 去做後續的分析，但在楊氏模數上由於有實際的參考值，故選擇 2.6GPa 去做分析；而由於後續會應用到壓電圓盤理論，理論結果會與物體的密度有關，故在此也會進行測量，但目前由於儀器上較有侷限，因此量測方式以磅秤量測其重量後除以薄膜塗佈之後所得到的體積，以此來獲得密度值，在膜厚 $13\mu m$ 得情況下，密度值為 $1965\text{ (kg/m}^3\text{)}$ ，量測圖如圖 2-88 所示。

從以上參數量測可以發現在對於密度和蒲松比上，得到的量測結果可能並不可靠，而此部分將會從後續第四、五、六章的分析來觀察其實際對於振動、聲學特性上的影響。

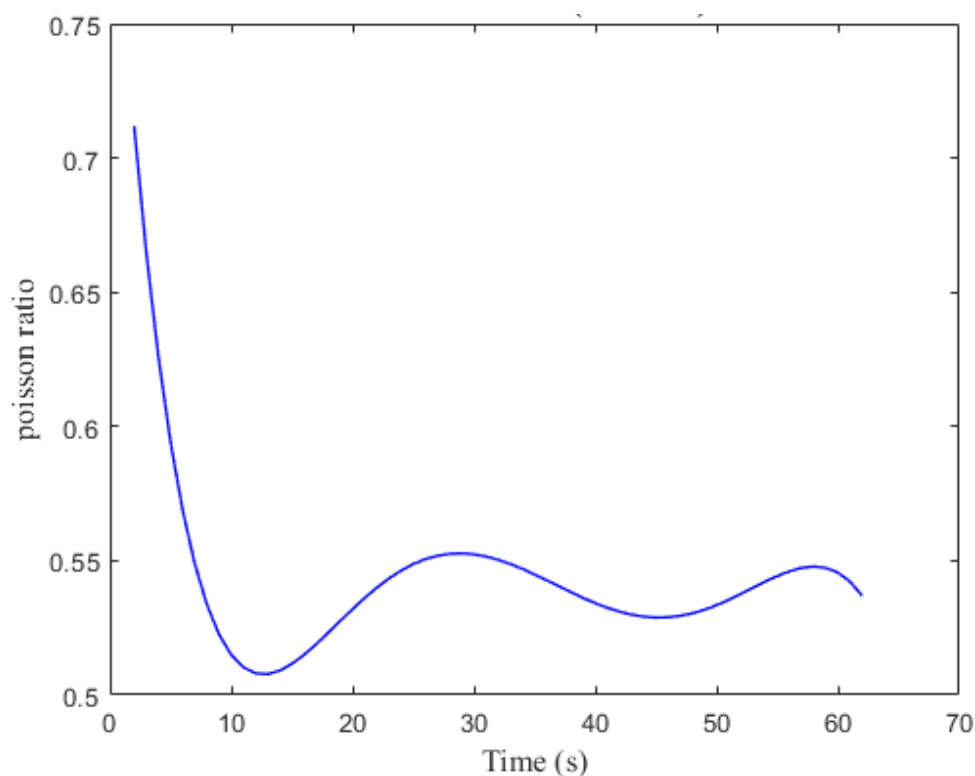


圖 2-85 $E=2.06\text{GPa}$ 、Poisson ratio: 0.55

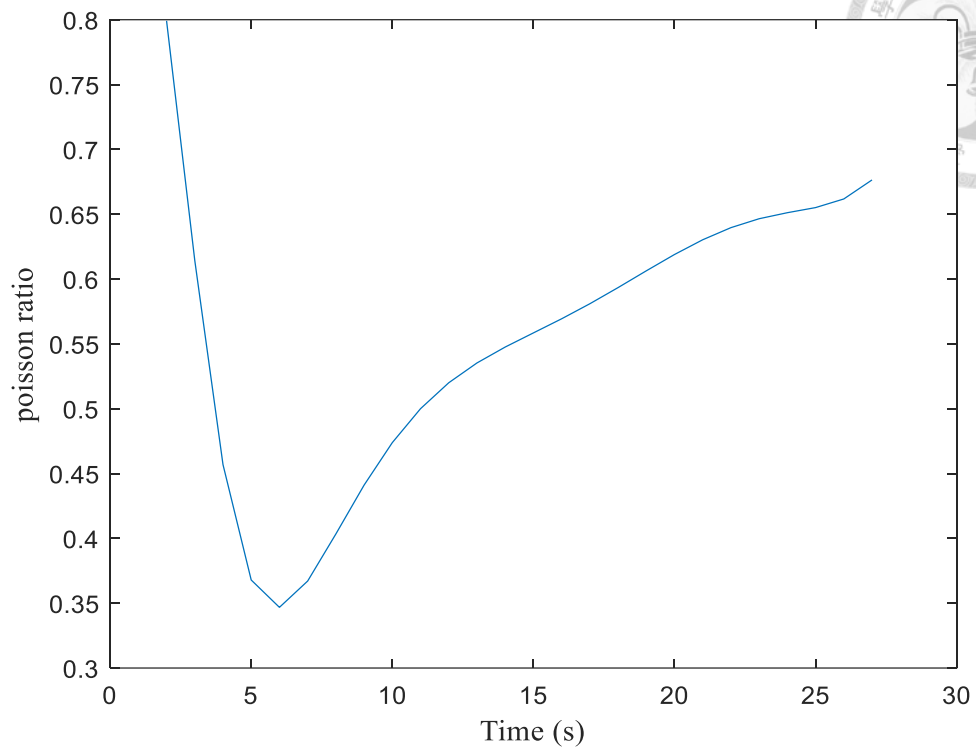


圖 2-86 $E=2.18\text{GPa}$ 、Poisson ratio: 0.65

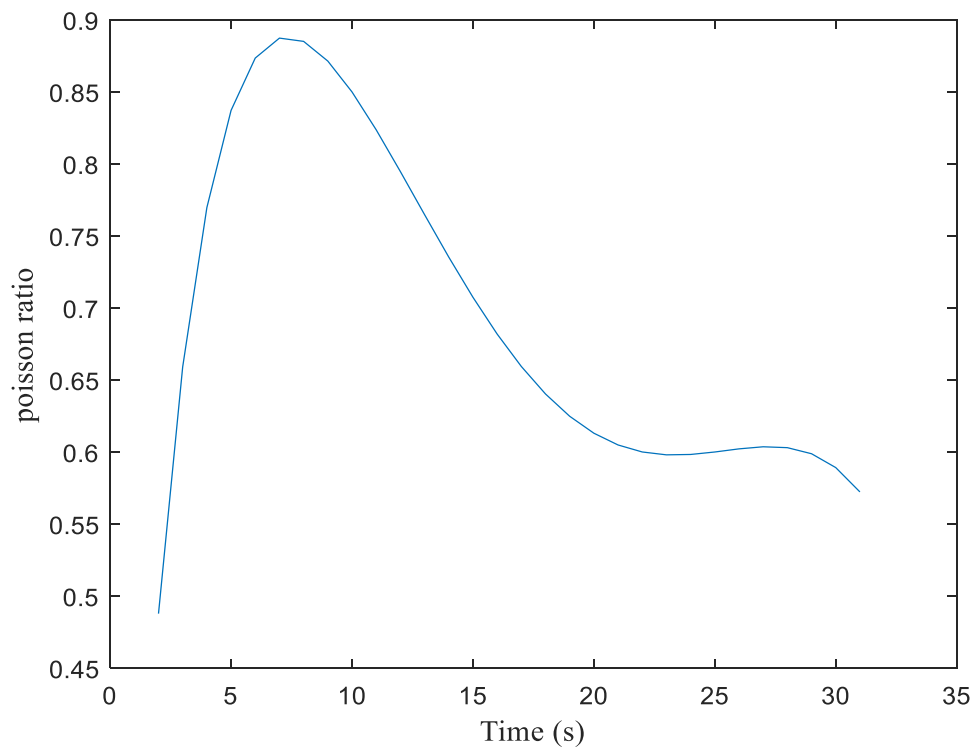


圖 2-87 $E=2.12\text{GPa}$ 、Poisson ratio: 0.6



圖 2-88 薄膜重量量測圖



2.5 聲學元件設計與製作

將壓電薄膜製作完成並量測其相關材料參數後，便可將薄膜製作成聲學元件，以應用於後續測量此自製 P(VDF-TrFE) 壓電薄膜的振動和聲學特性，也就是透過壓電材料本身有的逆壓電效應，使此聲學元件能夠達到電能致振的情況下，進一步地去觀察它在振動和聲學上的效果，並希望未來能夠將其應用於喇叭或耳罩式耳機等發聲體上，達到好的聲音效果和輕量且輕薄的優勢。

2.5.1 聲學元件設計

首先在聲學元件的設計上考量薄膜實際塗佈的範圍為直徑 18cm，加上在膜厚度量測時可以發現薄膜越靠近外圈所量測到的膜厚為整體均勻度的離群值來源，即使是均勻度高的情況下，外圍的點所量測之膜厚依舊是靠近膜厚上限值的點（約直徑 12cm 以外的範圍），也因此為了避免後續實驗量測和模擬的結果因膜厚不均而造成影響，故最大可應用於元件製作的範圍設定為 12cm，而在後續製作過程的繃膜步驟上由於會需要有多餘的部分工黏貼使用，也因此最終尺寸上又會再降低，這部分會在 2.5.2 節詳細說明。綜合以上因素後最終所選擇製作的元件大小為外徑 70mm、內徑 40mm 的圓形結構，其中內徑 40mm 的範圍為實際振動的薄膜區域，其於為壓克力外框，外框會在兩面各有一小型區域供導線放置。實體圖如圖 2-89 所示，並將相關材料參數整理如表 2-11 所示。

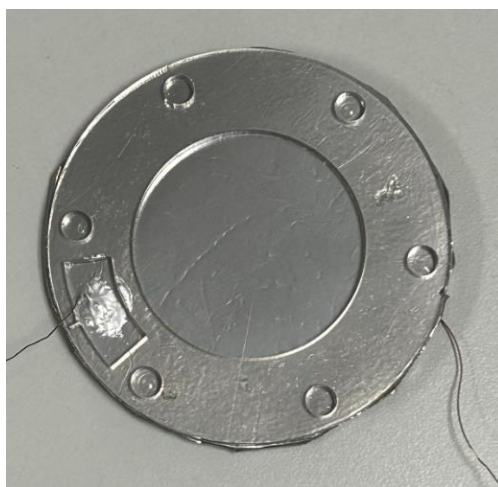


圖 2-89 自製薄膜聲學元件實體圖

表 2-11 自製薄膜相關參數



Property		Values
Mechanical		
Radius(mm)	R	20
Thickness(μm)	h_m	10-19
Density(kg/m^3)	ρ_m	1965
Elastic Modulus(GPa)	E	2.6
Poisson's ratio	ν_m	0.6
Dielectric		
Relative Dielectric Constants(@1kHz)	ϵ^T / ϵ_0	10
Dielectric Constant in Vacuum(F/ m)	ϵ_0	8.854×10^{-12}
Piezoelectric		
Piezoelectric strain coefficient(pC/ N)	d_{33}	$-24 \sim -30$
	d_{31}	6
	d_{32}	6

而在後續的實驗量測和模擬上主要會探討自製薄膜的各種不同厚度特性比較、自製薄膜同厚度不同 d_{33} 的特性比較、繃膜平整度對特性影響、市售薄膜(由 PVDF 製成)與自製薄膜的特性比較等等的,由以上這些來對於自製薄膜做振動、聲學特性觀察。因此總共設計出 8 種試片做為比較,代號分別為(A)~(H),資訊如表 2-12 所示,自製薄膜主要根據 2.3.5 所得出的膜厚上下限範圍中去做厚度選擇,選擇上限厚度約 18-19 μm 、下限厚度 10-11 μm 以及薄膜製程過程中最常用以分析的 12-14 μm ,以這三種作為設計,觀察後續改變膜厚的影響; d_{33} 差異和平整度的影響則都以厚度 12-14 μm 的區間去做考量。而自製繃膜所頂出高低差皆為 3mm,為可繃膜上限值,超過此高度在繃膜上即會有撐破薄膜的情況發生,不選擇其它高低差將於 4.4 節中說明。市售薄膜為向 TE connectivity 公司購買之 PVDF 壓電薄膜,購買 110 μm 和 28 μm 進行比較,其中 28 μm 有進行不同繃膜高低差的比較,後續也

會在 4.4 節的張力分析中進行探討，市售薄膜試片如圖 2-90 所示，其相關材料參數整理如表 2-13 所示。

表 2-12 各試片相關資訊

代號	相關參數簡述
A	自製薄膜、 $19\ \mu\text{m}$ 、 d_{33} 值 25 (pC/ N)，其餘如表 2-11 所示
B	自製薄膜、 $12.85\ \mu\text{m}$ 、 d_{33} 值 25.5 (pC/ N)，其餘如表 2-11 所示
C	自製薄膜、 $11\ \mu\text{m}$ 、 d_{33} 值 26 (pC/ N)，其餘如表 2-11 所示
D	自製薄膜、 $12.5\ \mu\text{m}$ 、 d_{33} 值 21 (pC/ N)，其餘如表 2-11 所示
E	自製薄膜、 $12.3\ \mu\text{m}$ 、 d_{33} 值 26 (pC/ N)、繃膜不平整，其餘如表 2-11 所示
F	市售薄膜、 $110\ \mu\text{m}$ ，繃膜高低差 5mm，其餘如表 2-13 所示
G	市售薄膜、 $28\ \mu\text{m}$ ，繃膜高低差 5mm，其餘如表 2-13 所示
H	市售薄膜、 $28\ \mu\text{m}$ ，繃膜高低差 7mm，其餘如表 2-13 所示



圖 2-90 市售薄膜聲學元件實體圖



圖 2-91 繃膜不平整元件實體圖

表 2-13 PVDF 市售薄膜相關參數（有些參數參考[55]）

Property		Values
Mechanical		
Radius(mm)	R	20
Thickness(μm)	h_m	28、110
Density(kg/m^3)	ρ_m	1780
Elastic Modulus(GPa)	E	3
Poisson's ratio	ν_m	0.4
Dielectric		
Relative Dielectric Constants(@1kHz)	$\varepsilon^T / \varepsilon_0$	12[55]
Dielectric Constant in Vacuum(F/ m)	ε_0	8.854×10^{-12}
Piezoelectric		
Piezoelectric strain coefficient(pC/ N)	d_{33}	-33
	d_{31}	23
	d_{32}	2[55]



2.5.2 聲學元件製作流程

設計完所需要的試片規格後，本節將進入聲學元件的實際製作流程，各步驟詳細剖析，最為關鍵的為繃膜的步驟，透過繃膜才能夠讓薄膜有張力，使其在受力後可以恢復原本的形狀，相關理論會在 4.1 節中說明。也因此在這裡會對於繃膜製程多加說明。元件製作流程如圖 2-92 所示。

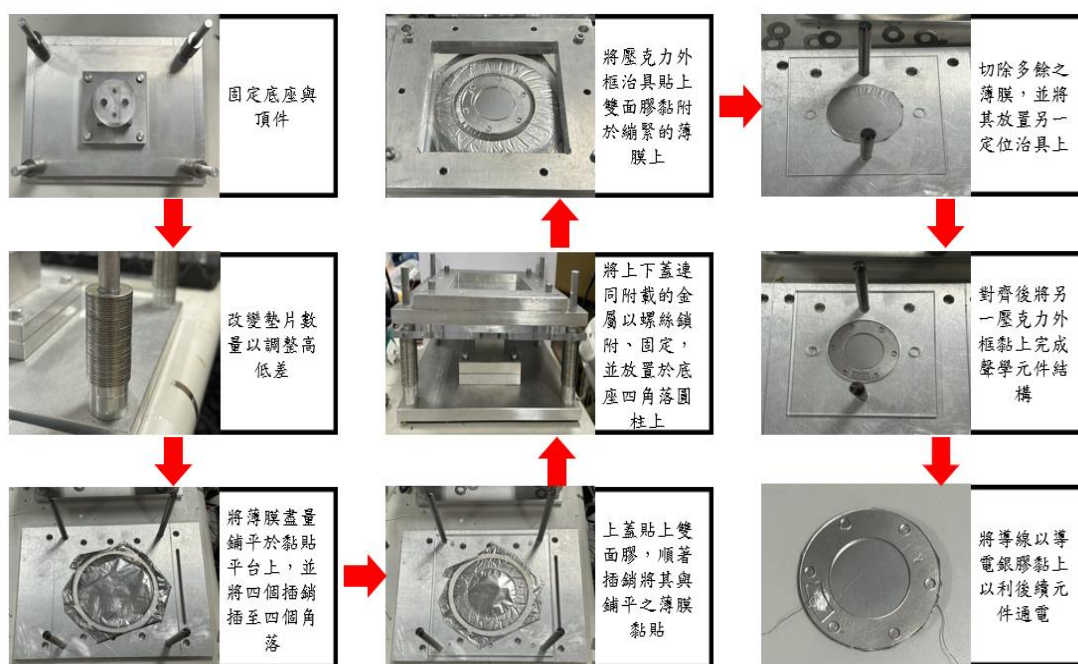


圖 2-92 聲學元件製作流程圖

繃膜製程說明

由於需要讓薄膜具有均勻的張力，因此需要有繃膜的步驟，故在此設計了由底座、墊片、頂件、上蓋和下蓋所組成之繃膜治具，如圖 2-93、圖 2-94 所示，利用治具之間的高低差為設計概念，藉由改變底座上墊片的數量以調整下壓的位移，使頂件頂出薄膜，進而產生張力的效果，概念示意圖如圖 2-95 所示。實際操作上需先以雙面膠黏貼於上蓋，如圖 2-96 所示。接著將上蓋四角落之孔洞對齊插銷並套入以此黏貼鋪平之薄膜，而後將上、下蓋組合和附載重物一同鎖起形成四層結構，如圖 2-97 所示。附載重物的目的為使薄膜在下壓時能夠施加各方向均勻的張力，不會產生因用手去壓而張力不均的現象。



圖 2-93 上下蓋組合併

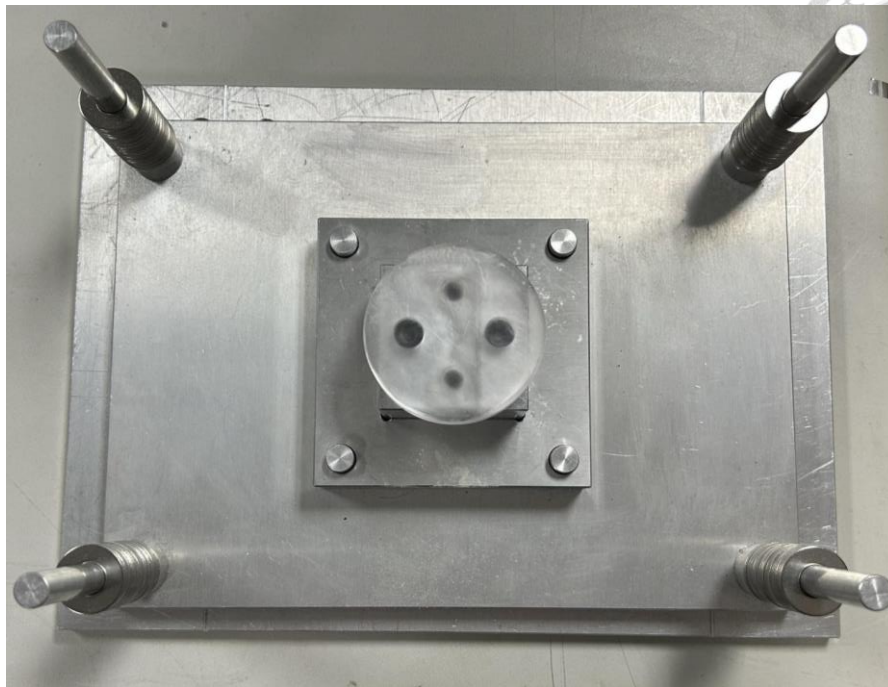


圖 2-94 底座、墊片、頂件組合併

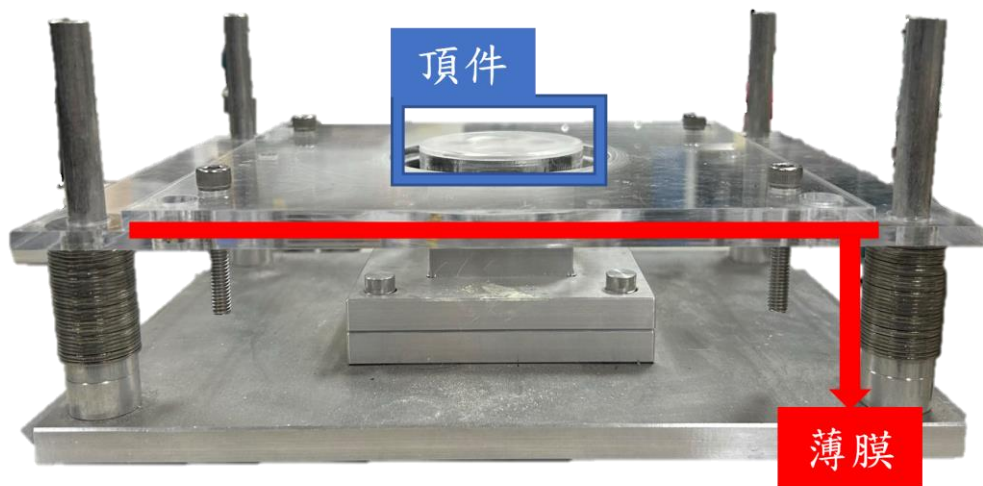


圖 2-95 整體組合併



圖 2-96 上蓋黏貼雙面膠



圖 2-97 上、下蓋組合和附載重物四層結構

導線黏貼說明

繃膜製作完的元件需將前後兩面接上導線，藉此來進行後續一系列的實驗量測。導線部分選擇漆包線，將外圍的漆刮除後黏貼至壓克力外框事先預留的空間上，也就是與薄膜電極直接連接，在黏貼方式上選用雙園科技公司的 AB 型導電銀膠，其型號為 OP-928，圖 2-98 所示，因為此產品除導電外也有黏著的功能，符合所需的黏貼需求，實際操作為 A 型膠與 B 型膠等量均勻混合後，塗抹至薄膜上並靜置一天方能導電。



圖 2-98 AB 型導電銀膠

2.6 小結

本章首先對於薄膜製程上的全部流程進行了說明，從實驗原料的選擇再到各個製程上所使用的實驗參數，過程中提出了所遇到的問題以及對應的解決方案，並將製作完的薄膜測量其相關材料參數以及製作成聲學元件，而以下列出幾點為此章節中所得到的成果與相關討論。

1. 溶液混合上，在設定的溫度範圍（60-80°C）內，只要能讓溶液混合均勻呈澄清透明狀，不論是用流程 1(2h35m)隨時間調整溫度、轉速，還是流程 2(24h)固定溫度、轉速，對最終壓電性質影響甚小，而後續考量時間成本以流程 1 製出的薄膜皆能表現穩定壓電性，也顯示此製程的高穩定度。
2. 退火對於壓電性質表現上有顯著的影響，間接證實了其對於提高 β 相結晶度的作用。
3. 膜厚對於壓電性質無顯著影響，結合第 1 點說明，回到本身溶液調配的參數，因此推論溶液調配的穩定度對其影響甚大；而在後續振動與聲學分析上也可觀察膜厚是否影響結果。
4. 得到膜厚與轉速的關係，以此獲得薄膜厚度的上下限，利於聲學元件在選擇上的多樣性。
5. ITO 基材做出的薄膜雖降低了脫膜難度，但在壓電性卻呈現低於預期的範圍，需透過更換基材電阻值等方式進一步去評估使用此類型基材的效果。

第三章 實驗量測儀器、原理、架設與壓電基本理論

本章將介紹後續振動和聲學量測上會使用到的實驗儀器、技術與架設方法，同時也對於後續使用的壓電基本理論進行介紹。在儀器量測的部分包含了以雷射都卜勒測振儀和全域振動量測系統來量測振動特性；以人工耳和無限大障板下無響室分別量測封閉音場和自由音場之聲學特性。

3.1 雷射都卜勒測振儀

雷射都卜勒振動儀 (Laser Doppler Vibrometer, LDV)，是一款利用都卜勒效應來測量物體表面的振動速度的儀器。都卜勒效應，即物體運動時對光波頻率的影響。當雷射光射到運動中的物體表面後，反射光的頻率會因物體的運動而改變。透過這種變化，可以精確量測出目標點之速度、位移或加速度，是一種無需接觸物體的光學系統。

本研究所使用的 LDV 為 Polytec 公司生產的型號 OFV-505，如圖 3-1 所示，規格如，主要是利用聲光調製器 (Acousto-Optic Modulator, AOM) 系統，或又稱為布拉格盒 (Bragg Cell) 系統，進行量測。此系統的原理乃是基於聲波在晶體材料中的傳遞，當聲波傳遞時，晶體材料的折射率會隨之變化，進而影響光的行為，此現象稱為聲光效應。如圖 3-2 所示，系統的結構包括晶體材料兩端分別連接轉換器和減振器。轉換器產生聲波，該聲波在晶體材料中傳遞，最終被減振器吸收。當雷射光穿過晶體材料時，可通過調整聲波的頻率來改變光波的繞射角度。透過此種幾何形狀的聲波傳遞方式，該系統可以做到調製數兆赫茲的頻寬。

假設轉換器所產生之聲波頻率為 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：

$$T = \frac{V_a}{f_a} \quad (3-1)$$

設入射光的波長為 λ_0 ，晶體材料的折射率為 n ，則入射光在晶體材料內傳遞時，其波長變為：

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} \quad (3-2)$$

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：

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

系統內部如圖 3-3 所示，雷射光經過分光鏡後分為兩道光，一道透過布拉格盒調整出適當的頻率，最後傳導至檢測器，另一道則傳至待測試片。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之差異進而測量得出速度。



圖 3-1 LDV-OFV505

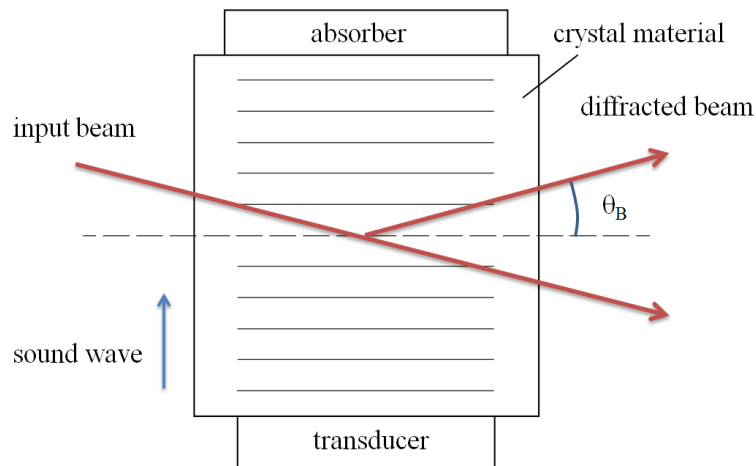


圖 3-2 聲光調製器基本構造

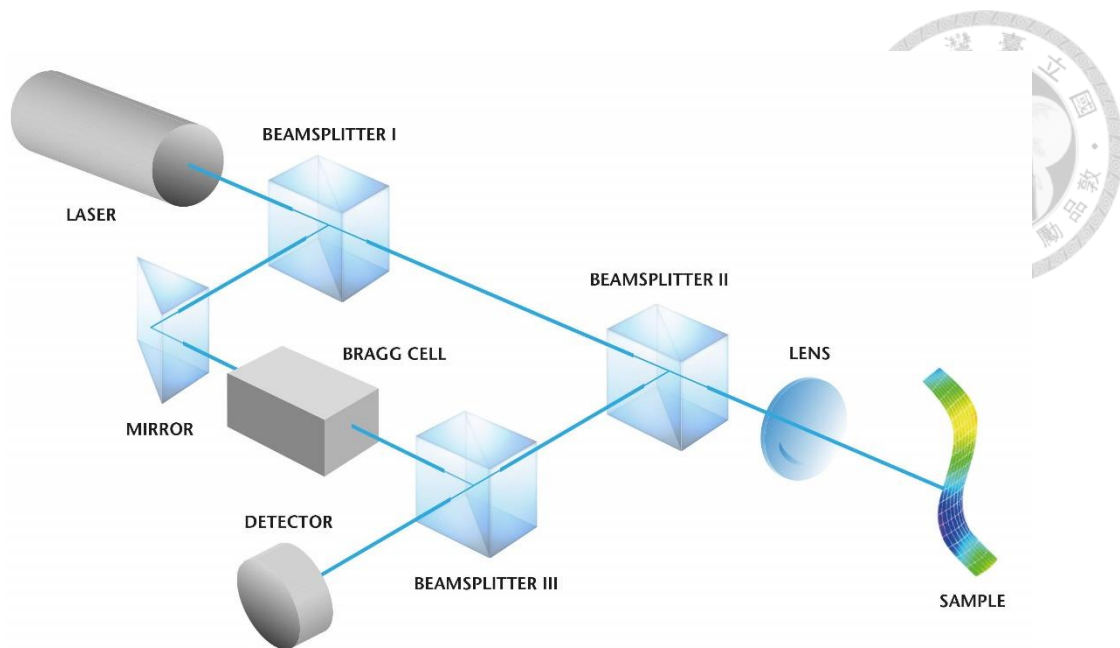


圖 3-3 LDV 內部光路圖

表 3-1 LDV 規格

Specifications↵	
Operating temperature↵	5°C ~ 40°C (41°F ~ 104°F)↵
Relative humidity↵	Max. 80%, non-condensing↵
Weight↵	7.5 lb. (3.4kg)↵
Dimensions [W x H x L]↵	4.7 in x 3.1 in x 13.6 in (3247.12951 cm)↵
Visibility maxima↵	234 mm + n · 204 mm↓ n = 0, 1, 2, 3, ... measured from the focusing ring↵
Maximum stand-off distance↵	Up to 300 m (with OFV-SLR, surface dependent)↵
Laser class↵	Class 2, < 1 mW (eye-safe)↵
Laser wavelength↵	633 nm, visible red laser beam↵



3.2 全域振動量測系統

本研究所使用的全域振動量測系統（Distributed Parameter Method, DPM）為前實驗室振原學長所開發的系統[56]。該系統包含 LDV、微動振鏡組、資料擷取系統（NI-DAQ）以及訊號產生器。在此所選用之資料擷取系統為 NI-9234，如圖 3-4，其規格如表 3-2。訊號產生器為 Keysight 33621A，如圖 3-5。微動振鏡組則如圖 3-6，規格如表 3-3，該裝置由兩面反射鏡組成，而兩鏡面分別以一步進馬達來進行角度控制。在 LDV 雷射出口處之正前方安裝微動振鏡組，透過外部系統控制馬達轉動鏡面的角度，一面反射鏡在水平方向上調整反射之雷射，另一面則在垂直方向作調整，由此達到控制雷射射入待測物上任意點的功能。

實驗量測的整個流程見圖 3-7。首先透過 LabVIEW 系統將振鏡轉動函式傳送給鏡組，控制鏡組將反射之雷射至待測點。接著，在指示 LDV 進行自動對焦後，設定訊號產生器生成特定之穩態頻率與電壓訊號來激振待測物（在本研究中待測物為壓電薄膜），最後將 LDV 所量測到的速度由資料擷取系統進行記錄整理，回傳至 LabVIEW 中。以上是完成一個點的量測，而藉由多次重複以上步驟即可做到所欲測量之範圍內的全域速度測量。實驗量測之架設如圖 3-8 所示。由於是量測穩態的振動模態，因此可以透過輸入頻率的資訊將所量測到的速度轉換為位移，再經由判斷正負相位，求得試片全域模態振動的振形。



圖 3-4 NI-9234 資料擷取系統



圖 3-5 Keysight 33621A 訊號產生器



圖 3-6 微動振鏡系統 Raylase Miniscan III-10

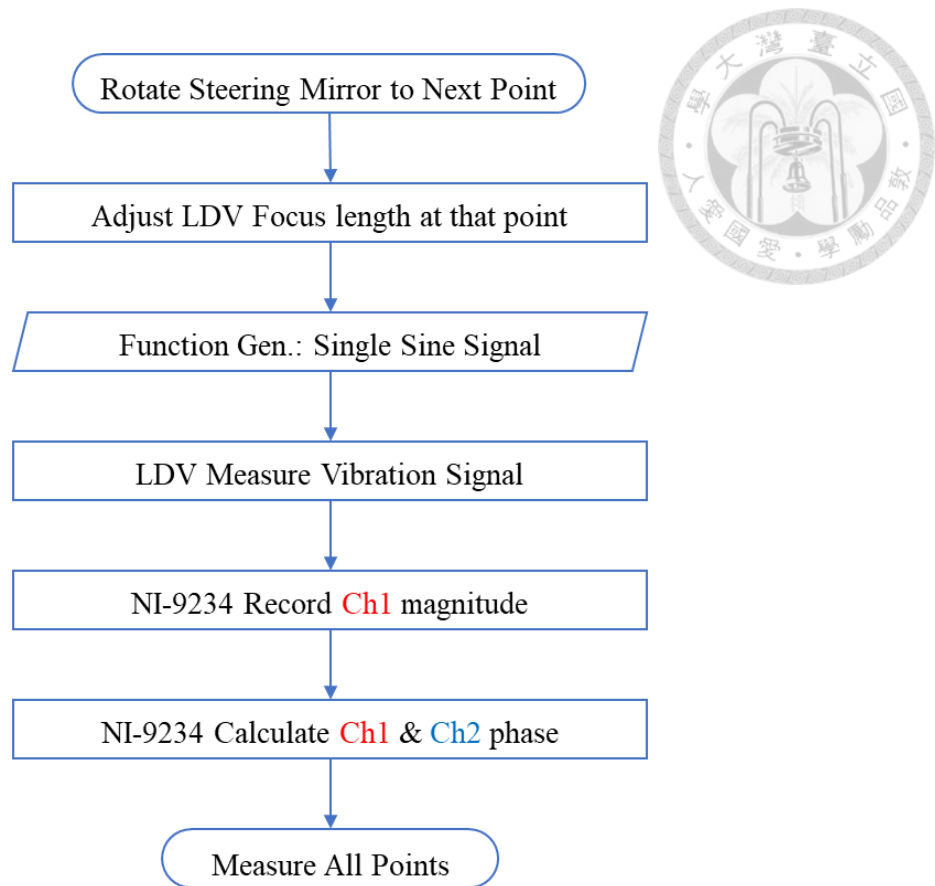


圖 3-7 全域振動量測系統實驗流程圖

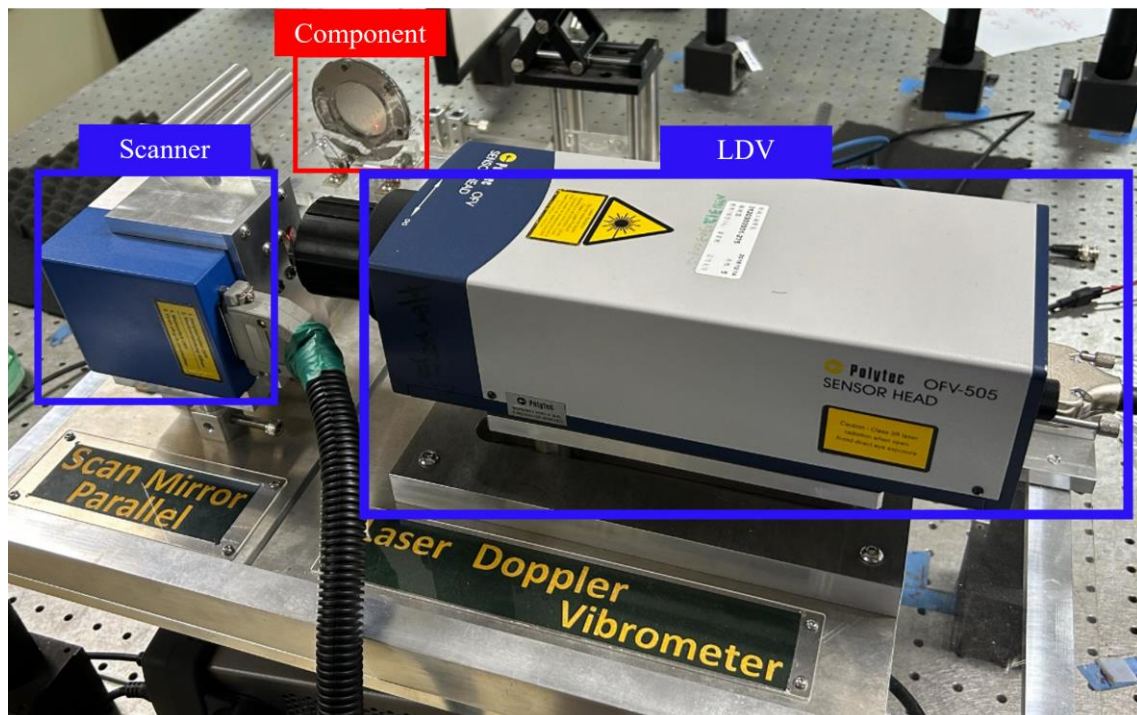


圖 3-8 全域振動量測系統實驗架設圖

表 3-2 NI-DAQ 規格

	NI-9234
Voltage	$\pm 5 \text{ V}$
Max Sampling Frequency	51200 Hz
Max Sampling Frequency	65536 points
Resolution	24 bits
Channels	4

表 3-3 微動振鏡規格

Specifications	
Max rotate angle	$\pm 22.53^\circ$
Resolution	0.000687°
Rotate Speed	85 rad/sec
Mirror Wavelength	1064 nm
Firmware	Marking_2.7A ActiveX Control (.ocx)



3.3 無響室量測

無響室量測 (Anechoic Room) 是模擬理想無窮遠聲場環境的一種方法。在這個環境中，四周裝有吸音材料，使得無響室內接近完全無反射的自由音場。麥克風用來測量聲壓，如圖 3-9 所示。無響室也稱為 Anechoic Chamber，本研究後續將簡稱為 Chamber。測試標準採用音響工程協會 (Audio Engineering Society, Inc.) 發行的 AES2-1984 (r2003) 標準方法。障板的尺寸規格為 1650×1350 [mm]，如圖 3-10 所示，障板上簍空位置為提供試片放置區域，位置偏向右上角是為了避免測試時產生駐波，使波數集中於特定頻段上，駐波頻段會因無響室大小而不同。使用的麥克風規格為 4191 1/2-inch (12.7-mm) 的自由聲場麥克風 (free-field microphone)，動態頻率範圍為 3 至 40k Hz，製造商為 Bruel & Kjaer Sound & Vibration Measurement A/S, Naerum, 丹麥。無響室的最低截止頻率為 80 Hz (根據 ISO 3745 和 ANSI 12.35 測試標準)。測試環境的室溫範圍是 15 至 35℃，相對濕度在 30% 至 70% 之間。環境背景噪音低於 15dB(A)。

在本研究中，測量方法是將聲學元件固定於障板上，並使其與麥克風水平距離保持在 10 cm，此距離為參考業界廠商應用於筆電上揚聲器的待測距離。給定 1/24 八音帶的 20 至 20000Hz 掃頻訊號，通過快速傅立葉變換 (FFT) 獲得相應的聲壓頻率響應曲線。實際的設置如圖 3-11 所示。

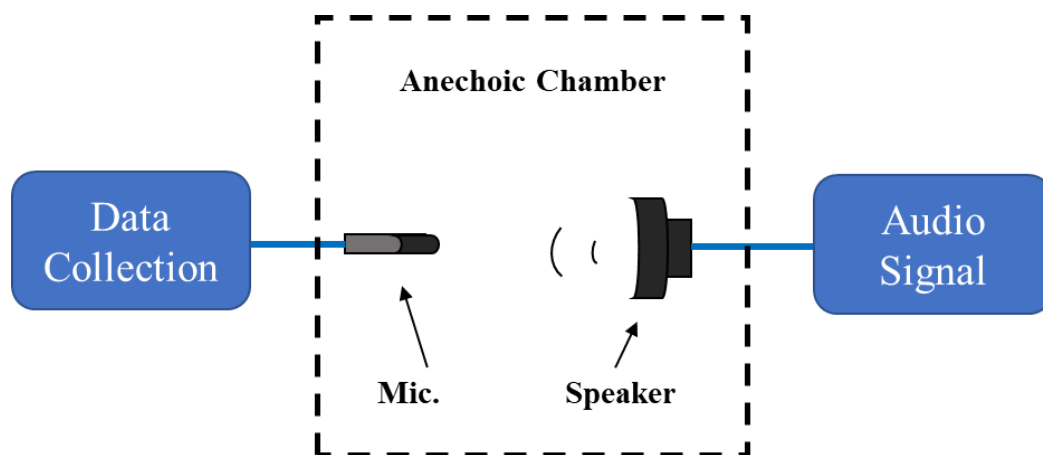


圖 3-9 無響室測量示意圖(虛線部分為無響室區域)

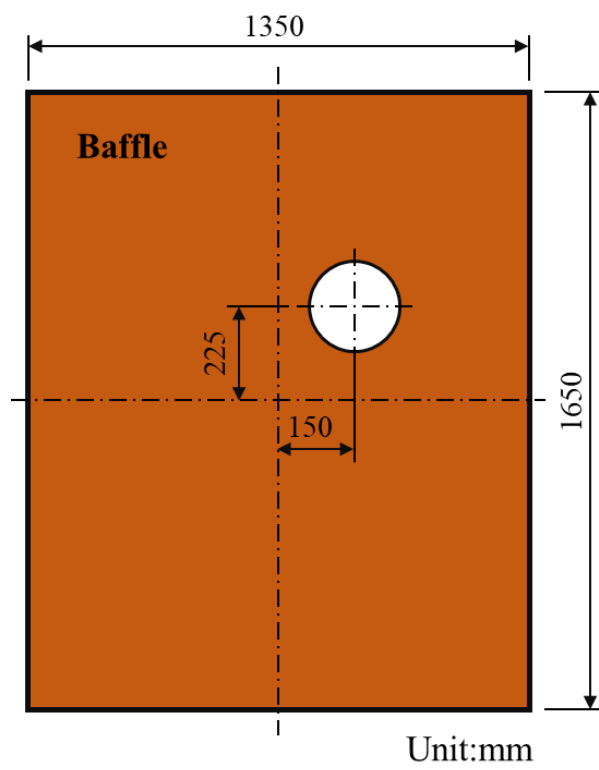


圖 3-10 障板規格示意圖(AES2-1984 r2003 標準規範)



圖 3-11 無響室實際量測圖

3.4 人工耳量測

人工耳（Artificial Ear）是一種用於測試耳機性能的設備，主要用於模擬人耳的聽覺感受，以評估耳機在頻率響應、失真和洩漏等方面的表現。在本研究中，使用了一款名為 GRAS 43AG-9 Hi-Res Ear Simulator 的人工耳模型，如圖 3-12，詳細規格見表 3-4。這個模型符合國際電工委員會（IEC）制定的標準 IEC60318-4，並且被廣泛用於耳機測試中。人工耳的結構主要包括下方的麥克風和上方的仿真右耳模型及夾具。下方的麥克風模擬了真實人耳的鼓膜，以捕捉耳機輸出的聲音信號。而上方的仿真右耳模型和夾具則用於模擬佩戴耳罩式耳機時的真實情況，以提高測試的真實性。為了確保測量的準確性，研究中使用了聲音校準器（G.R.A.S. 42AG Multifunction Sound Calibrator, Class 1），如圖 3-13，進行麥克風的校準。通過設定 94dB（SPL）的聲壓和 1kHz（Frequency）的訊號，確保麥克風能夠準確量測。測試過程中將裝有耳墊的聲學元件罩住右人體耳廓並放置在頰板上，以形成一個封閉的音場空間。如圖 3-14 的人工耳實際架設所示，將電訊號輸入耳機量測量耳機的頻率響應、失真和其他聲學參數。



圖 3-12 人工耳(GRAS 43AG-9 Hi-Res Ear Simulator)

表 3-4 人工耳麥克風規格表

GRAS 43AG-9 Hi-Res Ear Simulator	
Sensitivity	1.6(mv/Pa)
Dynamic range lower limit	44(dB)
Dynamic range upper limit	169(dB)
Frequency range	100-50000(Hz)

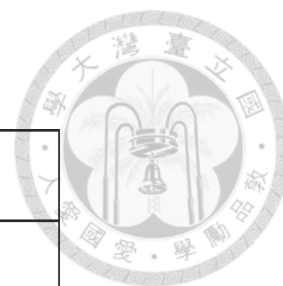


圖 3-13 多功能聲音校準器(G.R.A.S. 42AG)



圖 3-14 人工耳實際量測圖



3.5 壓電基本理論

壓電效應為一種機械能與電能相互轉換的現象。分為正壓電效應（direct piezoelectric effect）與逆壓電效應（convers piezoelectric effect），正壓電效應是對壓電材料施加壓力使之產生表面電荷，例如將壓電材料當成感測器，當壓電材料受應力的時會產生電荷來感測運動現象；逆壓電效應則是施加電場於壓電材料使之產生形變，例如可作為致動器。

本論文將壓電之特性假設為線性材料，進行理論推導。首先可利用能量守恆與熱力學第一定律得到以下關係式：

$$\delta\tilde{U} = T_{ij}\delta S_{ij} + \tilde{E}_i\delta D_i \quad (3-4)$$

其中 $\tilde{U}$ 為壓電之能量密度(Energy Density for Piezoelectric Material)

T_{ij} 為應力 (Stress)

S_{ij} 為應變 (Strain)

$\tilde{E}_i$ 為電場 (Electric Field)

D_i 為電位移 (Electric Displacement)

接著定義電力學的焓密度 $\tilde{H}$ (electric enthalpy) 表示為

$$\tilde{H} = \tilde{U} - \tilde{E}_i D_i \quad (3-5)$$

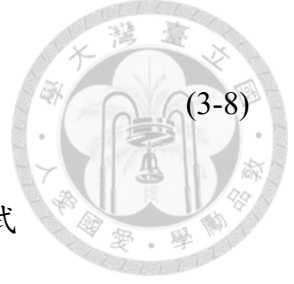
將(3-5)微分並將(3-4)代入可以得到

$$\delta\tilde{H} = T_{ij}\delta S_{ij} - \tilde{E}_i\delta D_i \quad (3-6)$$

焓密度 $\tilde{H}$ 為 S_{ij} 、 $\tilde{E}_i$ 之函數 $\tilde{H}(S_{ij}, \tilde{E}_i)$ ，將之微分可以得到

$$\delta\tilde{H} = \frac{\partial\tilde{H}}{\partial S_{ij}}\delta S_{ij} + \frac{\partial\tilde{H}}{\partial \tilde{E}_i}\delta \tilde{E}_i \quad (3-7)$$

比較(3-6)和(3-7)的係數可得到



$$T_{ij} = \frac{\partial \tilde{H}}{\partial S_{ij}} \quad D_i = -\frac{\partial \tilde{H}}{\partial \tilde{E}_i} \quad (3-8)$$

在線性壓電理論的假設下，我們可將焓密度 $\tilde{H}$ 表示為二式方程式

$$\tilde{H} = \frac{1}{2} c_{ijkl}^E S_{ij} S_{kl} - e_{kij} \tilde{E}_k S_{ij} - \frac{1}{2} \varepsilon_{ij}^S \tilde{E}_i \tilde{E}_j \quad (3-9)$$

其中 c_{ijkl}^E 為固定電場下的彈性常數 (elastic constants)

ε_{ij}^S 為固定應變下之介電常數 (dielectric constants)

e_{kij} 為壓電應力常數 (piezoelectric stress constants)

將(3-9)代回(3-8)式偏微分得到壓電之本構方程式

$$\begin{cases} T_{ij} = c_{ijkl}^E S_{kl} - e_{kij} E_k \\ D_i = e_{ikl} S_{kl} + \varepsilon_{ij}^S E_j \end{cases} \quad (3-10)$$

用矩陣表示法(matrix notation)取代張量表示法(tensor notation)

$$T_{ij} = T_p, \quad c_{ijkl}^E = c_{pq}^E, \quad e_{ikl} = e_{iq} \quad (3-11)$$

其中下標 $p, q=1\sim 6$ ，分別對應 $ij, kl=11, 22, 33, 23, 13, 12$ ，並且當 q

$=1, 2, 3$ 時 $S_{kl} = S_q$ ， $q=4, 5, 6$ 時， $2S_{kl} = S_q$ 。

即可將(3-10)式簡化為

$$\begin{cases} T_p = c_{pq}^E S_q - e_{kp} E_k \\ D_i = e_{iq} S_q + \varepsilon_{ik}^S E_k \end{cases} \quad (3-12)$$

若以應力與電場為變數，則可將壓電本構方程式改寫為

$$\begin{cases} S_p = s_{pq}^E T_q - d_{ip} E_i \\ D_i = d_{iq} T_q + \varepsilon_{ij}^T E_j \end{cases} \quad (3-13)$$

其中 s_{pq}^E 為固定電場下之柔性常數 (compliance constants)， d_{ip} 為壓電常數

(piezoelectric constants)， ε_{ij}^T 為固定應力下之介電常數。而(3-12)式及(3-13)式中的

材料常數關係可藉由以下得到：

$$\begin{aligned}
s_{pq}^E c_{qp}^E &= 1, s_{pq}^D c_{qp}^D = 1 \\
s_{pq}^D &= s_{pq}^E - d_{ip} g_{pk}, \varepsilon_{ik}^T = \varepsilon_{ik}^S + d_{ip} e_{pk} \\
d_{ip} &= e_{iq} s_{qp}^E
\end{aligned} \tag{3-14}$$

固定電場下的楊氏模數可搭配浦松比轉為三個柔性係數，可表示為

$$s_{11}^E = \frac{1}{Y_{11}^E}, s_{33}^E = \frac{1}{Y_{33}^E}, s_{12}^E = -\nu s_{11}^E, s_{66}^E = 2(s_{11}^E - s_{12}^E) \tag{3-15}$$

壓電材料常數與機電耦合係數的關係為 $d_{ij}^2 = k_{ij}^2 \varepsilon_{ii}^T s_{jj}^E$ ，擷取部分壓電係數與柔

順係數的轉換條件，如 $d_{15}^2 = k_{15}^2 \varepsilon_{11}^T s_{55}^E$ ，因此

$$s_{55}^E = \frac{d_{15}^2}{k_{15}^2 \varepsilon_{11}^T} = s_{44}^E \tag{3-16}$$

固定電場與固定電位移的柔性係數的關係為

$$s_{13}^E = s_{13}^D (1 - k_{31}^2) + k_{31} k_{33} \sqrt{s_{11}^E s_{33}^E} \tag{3-17}$$

在(3-12)式中可知勁度常數 c_{pq}^E 有 21 個獨立常數，壓電常數 e_{ip} 有 18 個，介電常數

ε_{ij}^S 有 6 個，因此要描述壓電材料之行為總共需要 45 個材料常數，由於晶體具有對

稱性，故不會有如此多的獨立常數，本研究先參考文獻[57]，先以壓電陶瓷 PZT(六

方晶系 6mm 點群) 探討，其極化方向為厚度方向 (3 方向)，本構方程式以圓柱座

標矩陣方式可表示為

$$\begin{bmatrix} e_{rr} \\ e_{\theta\theta} \\ e_{zz} \\ e_{\theta z} \\ e_{zr} \\ e_{r\theta} \\ D_r \\ D_\theta \\ D_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{31} \\ s_{12}^E & s_{11}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{31} \\ s_{13}^E & s_{13}^E & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66}^E & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & \varepsilon_{11}^T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{11}^T & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{33}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{rr} \\ \sigma_{\theta\theta} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{\theta z} \\ \sigma_{zr} \\ \sigma_{r\theta} \\ E_r \\ E_\theta \\ E_z \end{bmatrix} \tag{3-18}$$

由(3-18)式可知壓電陶瓷材料只需要 5 個柔性常數、3 個壓電常數及 2 個介電常數，總共 10 個獨立常數便可決定其特性。

接著來探討 PVDF，因其與本研究 P(VDF-TrFe)其晶相結構相同，僅差在各晶相結晶程度不同，因此探討 PVDF 的本構方程即可。而從文獻[57]中可得知對於 PVDF 薄膜來說，因其幾何形狀的關係較難以量測非極化方向的相關參數像 d_{15} 、 ε_{11}^T 等等，但也由於極化和振動表現上的應用皆為 3 方向，因此其餘方向的表徵對其影響極小，故在此可將其忽略，因此呼應表 2-11 即為分析上所需要的常數。

除了上述(3-18)的壓電本構方程式外，還需要以下關係式加以描述機械能與電能耦合的運動行為，包括：

(1) 運動平衡方程式 (equation of motion)

$$\sigma_{ij,j} = \rho \ddot{u}_i \quad (3-19)$$

其中 ρ 為密度， u_i 為位移。

(2) 應變位移關係式 (strain-displacement relations)

$$S_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (3-20)$$

(3) 靜電方程式 (charge equation of electrostatics)

$$D_{i,i} = 0 \quad (3-21)$$

(4) 電場電位關係式 (electric field -electric potential relations)

$$E_k = -\varphi_{,k} \quad (3-22)$$

其中 φ 為電位。

第四章 薄膜振動特性分析與實驗量測

本章節首先以薄膜振動理論分析，採用圓形薄膜也就是本研究中聲學元件幾何的形狀，分析其所受到張力時的振動特性，並以 LDV 實驗量測的共振頻率來反算張力，以此張力來代回理論解析得出理論值，同時也代入有限元素模擬，得出模擬結果與理論進行比較，探討此分析方法的可行性，過程中也將對張力數值的分析流程進行說明。

4.1 薄膜振動特性理論分析

薄膜在振動分析上為二階的統御方程式。相較於後續提到的壓電圓盤薄板理論來說，薄膜的模型忽略了材料本身的剛性；一般來說，當一固體在振動時，其剛性效應能帶來恢復振動前狀態的能力，而薄膜假設並無此剛性特性，但取而代之的是透過張力來讓薄膜具有恢復力，也因此薄膜理論會在忽略材料剛性係數，也就是視為完全彈性體的情況，並且假設薄膜上張力為均勻分布，以此條件進行分析。

4.1.1 圓形薄膜統御方程式

而薄膜統御方程式類似於弦的橫向振動，推導前有以下基本假設：

- ◆ 薄膜無剛性、完全可撓，因此不能承受彎矩力。
- ◆ 薄膜內部為均勻材質，單位體積之質量為 ρ_m (kg/m³)。
- ◆ 薄膜每點單位長度之張力都是 T (N/m)
- ◆ 薄膜中每一點因垂直位移量小，因此斜率變化很小，故 $\alpha \approx \beta \approx 0$ 、 $\alpha^* \approx \beta^* \approx 0$ ，

如圖 4-1 所示。

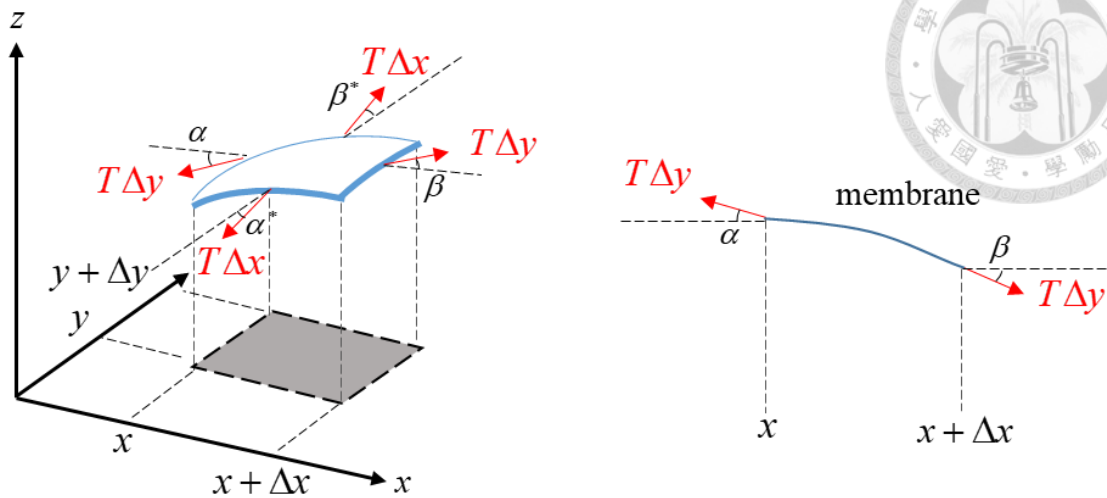


圖 4-1 單位面積薄膜之受力分析

而根據牛頓第二運動定律，以一個小元素進行三方向的力平衡分析：

$$\begin{cases} \sum F_x = ma_x \\ \sum F_y = ma_y \\ \sum F_z = ma_z \end{cases} \quad (4-1)$$

由於薄膜 xy 固定於平面上，因此加速度 $a_x = a_y = 0$ ；而單位體積的質量改寫為

$\rho_m h_m \Delta x \Delta y$ ，因此(4-1)改寫為下式：

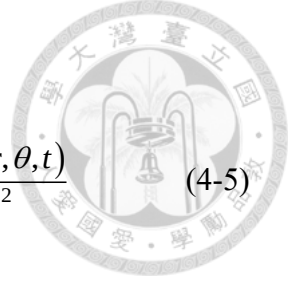
$$\begin{cases} T\Delta y \cos \beta - T\Delta y \cos \alpha = 0 \\ T\Delta x \cos \beta^* - T\Delta x \cos \alpha^* = 0 \\ T\Delta y \sin \beta - T\Delta y \sin \alpha + T\Delta x \sin \beta^* - T\Delta x \sin \alpha^* = \rho_m h_m \Delta x \Delta y a_z \end{cases} \quad (4-2)$$

將基本假設 D 和 $a_z = \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}$ 代入(4-2)式中得下式：

$$\begin{aligned} & \left[T\Delta y \frac{\partial w(x+\Delta x, y, t)}{\partial x} - T\Delta y \frac{\partial w(x, y, t)}{\partial x} \right] + \left[T\Delta x \frac{\partial w(x, y+\Delta y, t)}{\partial y} - T\Delta x \frac{\partial w(x, y, t)}{\partial y} \right] \\ & = \rho_m h_m \Delta x \Delta y \frac{\partial^2 w(x, y, t)}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (4-3)$$

式(4-3)兩邊同除 $T\Delta x \Delta y$ ，改寫為下式：

$$\frac{\partial^2 w(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w(x, y, t)}{\partial y^2} = \frac{1}{c_d^2} \frac{\partial^2 w(x, y, t)}{\partial t^2} \quad (4-4)$$



因分析圓形，故將式(4-4)改寫為下式：

$$\frac{\partial^2 w(r, \theta, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w(r, \theta, t)}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w(r, \theta, t)}{\partial \theta^2} = \frac{1}{c_d^2} \frac{\partial^2 w(r, \theta, t)}{\partial t^2} \quad (4-5)$$

其中 w 為軸向振動的位移振幅， $c_d = \sqrt{\frac{T}{\rho_m h_m}}$ 為波數。

4.1.2 圓形薄膜之自由振動理論分析

得出本構方程後，本節將進入實際的解析求解。首先薄膜振動以角速度 ω 進行簡諧運動，其軸向位移假設可表示為：

$$w(r, \theta, t) = W(r, \theta) e^{i\omega t} \quad (4-6)$$

將(4-6)式位移假設代入(4-5)式統御方程中，式子左右消去 $e^{i\omega t}$ 項，可得與時間無關之方程式：

$$\frac{\partial^2 W(r, \theta)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial W(r, \theta)}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 W(r, \theta)}{\partial \theta^2} + k_d^2 W(r, \theta) = 0 \quad (4-7)$$

其中薄膜波速為 $k_d = \frac{\omega}{c_d}$

接著利用分離變數法，將 $W(r, \theta) = R(r)\Theta(\theta)$ 代入(4-7)式中求解，得軸向振動位移通解為：

$$W(r, \theta) = [A_n J_n(k_d r) + B_n Y_n(k_d r)] \cos n(\theta + \phi), \quad n=0, 1, 2, 3, \dots \quad (4-8)$$

其中 J_n 為第一類 n 階貝索函數 (nth order Bessel function of the first kind)， Y_n 為第二類 n 階貝索函數 (nth order Bessel function of the second kind)。

而由於求解為圓形，即環形內徑為零，對貝索函數 Y_n 來說半徑趨近於零時有極值產生，也就是位移可能趨近於無限大，如圖 4-2 所示，此時違反物理意義，故須令(4-8)式中的係數 B 為 0，因此圓形薄膜最終軸向振動通解為：

$$W(r, \theta) = [A_n J_n(k_d r)] \cos n(\theta + \phi) \quad (4-9)$$

其中 A, B 為常數，而 ϕ 值可由初始條件得到，在此先令 ϕ 值為零，而



$$k_d^2 = \frac{\rho_m h_m \omega^2}{T} \quad (4-10)$$

接著外圈固定邊界條件加入，如圖 4-3 所示，外圈($r=R$)固定邊界位移為零，因此邊界條件為：

$$W(r, \theta)|_{r=R} = 0 \quad (4-11)$$

將軸向振動通解(4-9)式代入邊界條件(4-11)式，得：

$$[EJ_n(k_d R)] \cos(n\theta) = 0 \quad (4-12)$$

其特徵方程式為：

$$J_n(k_d R) = 0 \quad (4-13)$$

且由(4-10)可得固定邊界軸向振動之共振頻率為：

$$f = \frac{\eta}{2\pi R} \sqrt{\frac{T}{h_m \rho_m}} \quad (4-14)$$

其中 $\eta = k_d R$

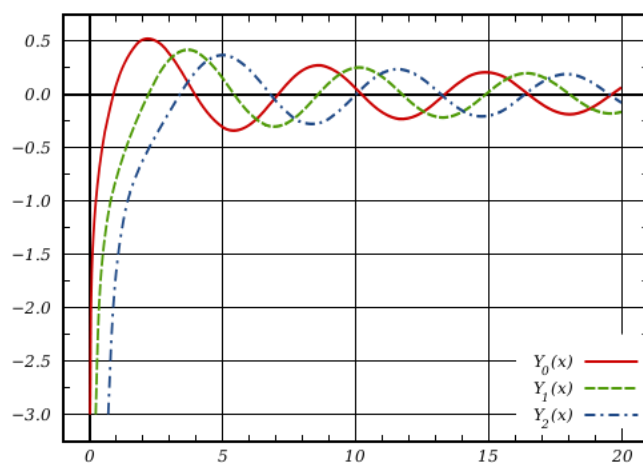


圖 4-2 第二類 n 階貝索函數圖

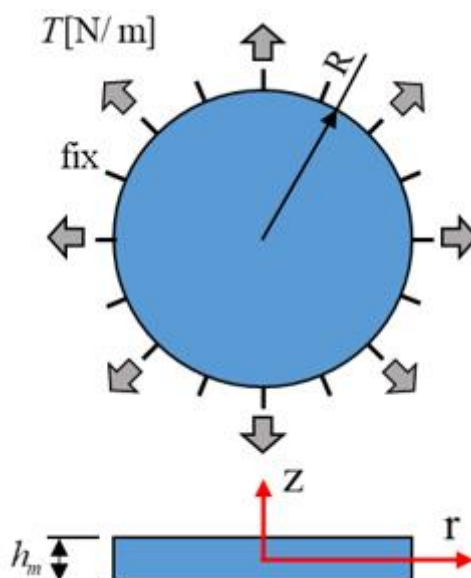


圖 4-3 圓形薄膜示意圖

4.2 薄膜有限元素數值分析

接著進行有限元素模擬分析的設定說明，在本研究上使用 ABAQUS 商用套裝軟體，分析外圈固定邊界且具有特定張力之圓形薄膜，研究薄膜受張力後的應力應變情況和共振頻率與模態振形，故模擬設定中會設定兩步驟的分析，先利用 Static 靜力分析得出薄膜應力應變，接著在此有受張力的情況下建立第二個步驟 Frequency 來分析共振頻率，以下分別對於兩步驟相關設定進行說明。

I. Static, General 靜力分析

- 由於在 4.1 的基本假設中有薄膜完全可撓、內部不產生彎矩力和厚度非常薄，故在模型的建立上將以薄殼(shell)類型中的薄膜元素(membrane)進行建模，也就是在繪圖完之後設定材料特性(property)時將分部(section)選為薄膜(membrane)，並輸入薄膜厚度，如圖 4-4 所示，其中模型的材料參數設定以表 2-11、表 2-13 的參數做設定、尺寸皆為直徑 40mm。
- 而由於薄膜與一般常見材料相比容易產生大變形的機制，故在分析時須於分析步驟(Step)中開啟幾何非線性(Nlgeom)的功能，在軟體分析過程中才會將勁度矩陣更新，分析結果能夠更準確。

- 
- 在張力部份為了讓薄膜圓周上的受力皆為均勻，因此將後續 4.4 節實驗量測反算的張力結果帶回理論解析，將所得到的張力大小轉換成等值節點力分佈在圓周節點上，示意圖如圖 4-5 所示，各節點力的計算為節點力=圓周長×(單位長度之力量/圓周節點數)，負載設定 (Load) 如圖 4-6。
 - 最後需注意在邊界條件的部份，會將中心固定一個節點，以防止薄膜因數值計算的偏差而有水平移動導致受張力不均，也呼應著實際在繃膜製作聲學元件時的理想情況。以上為 Step 1 的相關重要設定，完成後便可進入下方 Step 2 也就是 Frequency 的相關設定

II. Frequency 共振頻率分析

- 首先延續著前面 Static General 的 Step 1，在其後建立 Step 2 為共振頻率 (Frequency) 的步驟，與 Step 1 一樣將幾何非線性 (Nlgeom) 打開，以確保結果準確。
- 接著將薄膜外圈設定全固定邊界條件($U1=U2=U3=UR1=UR2=UR3=0$)，設定如圖 4-7 所示，這裡需注意將 Step 1 所設定的中心固定情況關閉，因振動必然產生中心點的位移，故使其不會影響共振頻率的分析，如圖 4-8 所示，此設定情況也符合實際在繃膜完之後已有張力的情況下，對於固定邊界之薄膜進行共振頻量測的情形。Mesh 網格則採用 M3D8R 的三維二階薄膜 8 節點減積分元素網格

以上兩步驟設定完後便可進行分析，後續之結果討論將於 4.3 、4.4 節中進行說明。

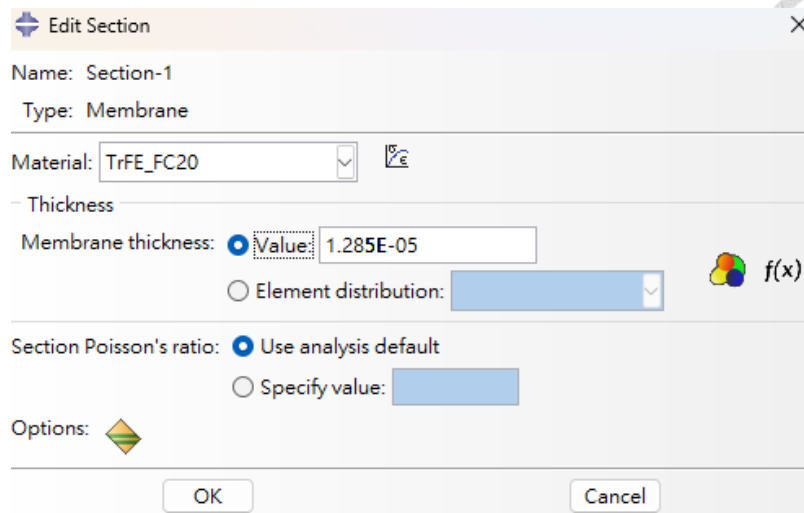


圖 4-4 Membrane 設定

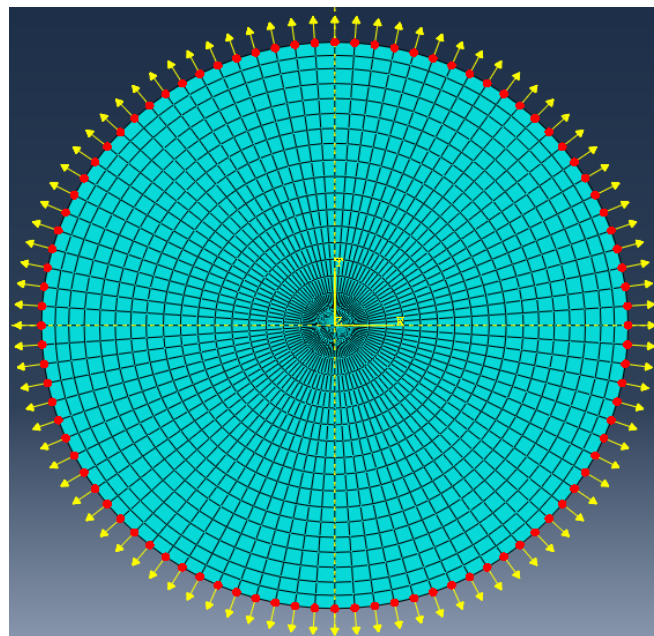


圖 4-5 薄膜張力邊界



Edit Load

Name: Load-1
Type: Concentrated force
Step: Step-1 (Static, General)
Region: outside

CSYS: Part-1-1 mem

Distribution: Uniform $f(x)$
CF1: 0.0019
CF2: 0
CF3: 0
Amplitude: (Ramp) $f(x)$
☐ Follow nodal rotation
Note: Force will be applied per node.

OK Cancel

圖 4-6 張力設定

Edit Boundary Condition

Name: fix-round
Type: Symmetry/Antisymmetry/Encastre
Step: Step-2 (Frequency)
Region: (Picked)

CSYS: Part-1-1 mem

☐ XSYMM ($U1 = UR2 = UR3 = 0$)
☐ YSYMM ($U2 = UR1 = UR3 = 0$)
☐ ZSYMM ($U3 = UR1 = UR2 = 0$)
☐ XASYMM ($U2 = U3 = UR1 = 0$; Abaqus/Standard only)
☐ YASYMM ($U1 = U3 = UR2 = 0$; Abaqus/Standard only)
☐ ZASYMM ($U1 = U2 = UR3 = 0$; Abaqus/Standard only)
☐ PINNED ($U1 = U2 = U3 = 0$)
☒ ENCASTRE ($U1 = U2 = U3 = UR1 = UR2 = UR3 = 0$)

OK Cancel

圖 4-7 圓周固定邊界設定

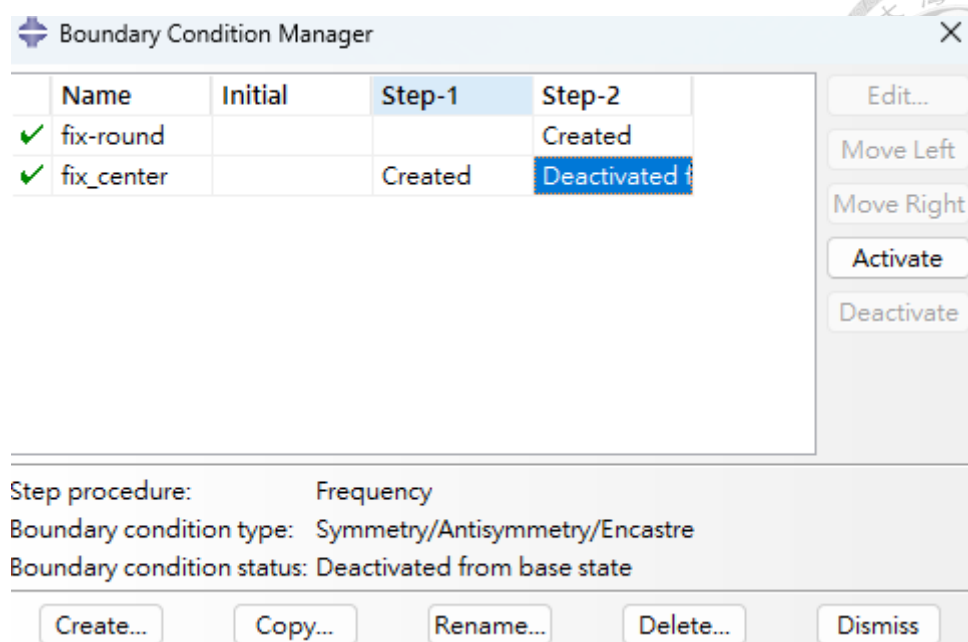


圖 4-8 兩步驟邊界條件

4.3 圓形薄膜振動理論解析與數值分析之比較

本節將對於模擬結果與理論解析進行分析比較，以下先對於張力模擬結果進行分析，以試片 B（表 2-12）膜厚 $12.85\ \mu\text{m}$ 的分析結果呈現應力與應變結果，如圖 4-9 與圖 4-10 所示，應力部份可以看到除最外圍些微區域外，整體所受到的應力都屬相同區間，可以說明在實際繃膜中的最理想情況，而從理論反算代入的張力為 $7.5033(\text{N/m})$ ，除以厚度的尺寸 $12.85\ \mu\text{m}$ 可得 583.91kPa 的應力大小，對比圖中模擬的結果十分的符合，而最外圍呈現略大於理論計算的應力結果，推測是在施力拉扯的瞬間會有應力集中的現象，而這現象也與實際繃膜過程中在利用高低差擠出薄膜的瞬間會有的情況相同，另一個有些偏差可能的原因為外圍的節點不夠多，使得無法趨近於張力均勻的情況，但整體結果仍是相當理想的。而其餘 7 個試片皆能得到相同的趨勢與結果，說明以此設定方法來進行靜力模擬分析具有高準確度，在此不將其一一列出。

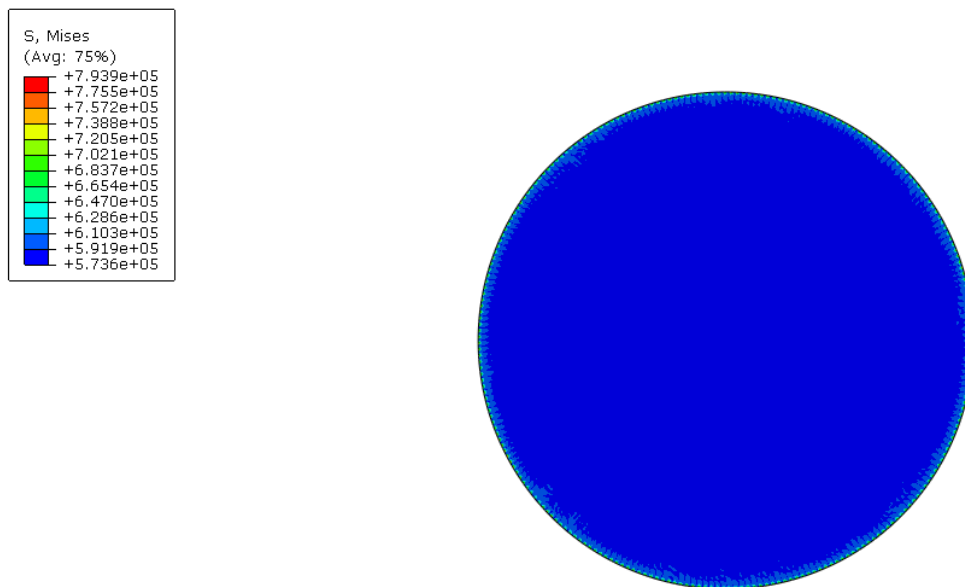


圖 4-9 應力結果圖

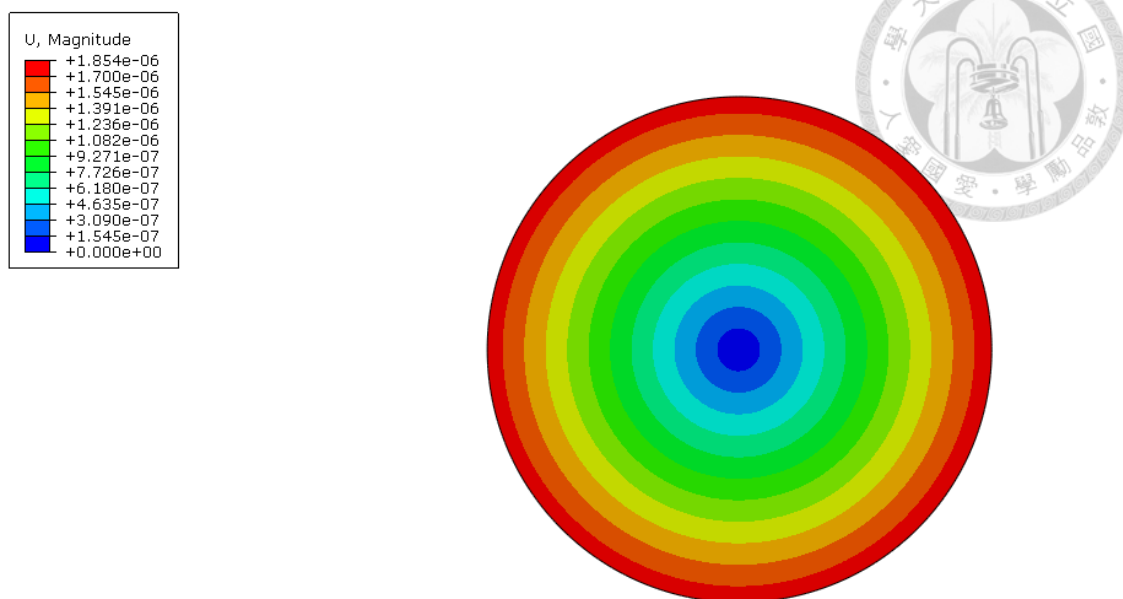
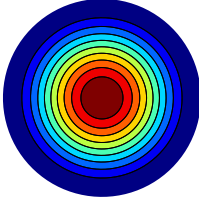
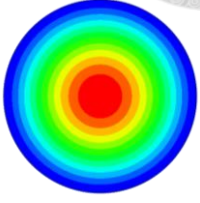
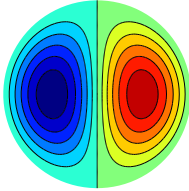
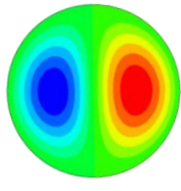
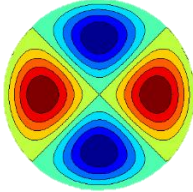
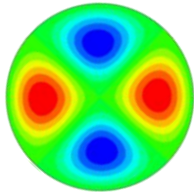
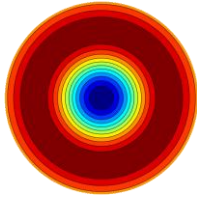
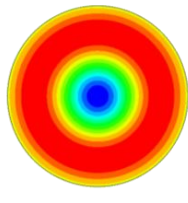


圖 4-10 應變結果圖

接著進入共振頻率的分析，以下會列出試片 A、B、C、F、G（表 2-12）的前八個共振頻及其模態結果，分別為分析自製薄膜不同厚度和兩個市售不同厚度的薄膜，來觀察膜厚變化和參數不同所呈現的模擬結果並與理論解析結果比較，結果如表 4-1 至表 4-5 所示，從結果中可以看到共振頻率誤差都在 2% 以內且節線節圓模態順序皆可對應上，表中模態振形以 (m,n) 表示， m 為節線數， n 為節圓數。而從各個不同類型試片的結果也可呼應在 4.1 節中理論推導所得到的結果，也就是最終的共振頻率受到其幾何形狀（大小、厚度）和張力大小的影響為主。

表 4-1 試片 A，固定邊界下的理論解析與 FEM 比較

Mode		Theory	FEM(Error, %)
1	Mode Shape (0,1)		
	Freq(Hz)	228.01	225.70(1.01)
2	Mode Shape (1,1)		
	Freq(Hz)	363.41	359.61(1.05)
3	Mode Shape (2,1)		
	Freq(Hz)	487.02	481.99(1.03)
4	Mode Shape (0,2)		
	Freq(Hz)	523.52	518.07(1.04)

(接續上表)

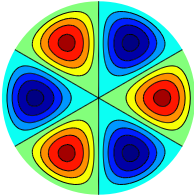
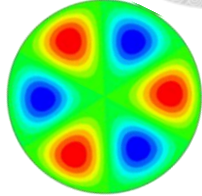
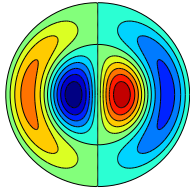
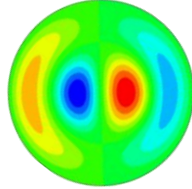
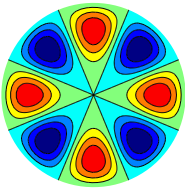
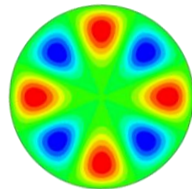
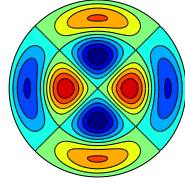
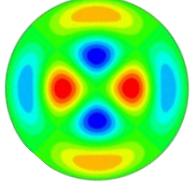
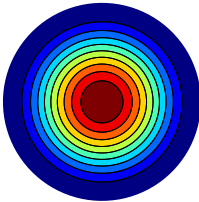
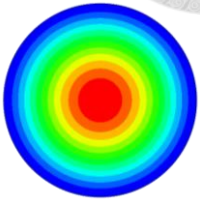
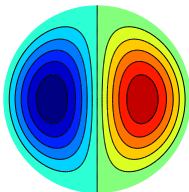
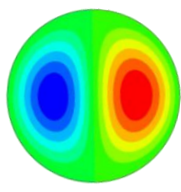
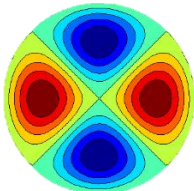
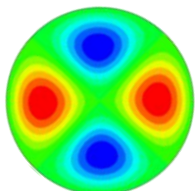
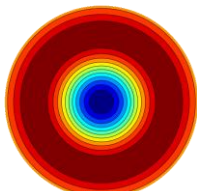
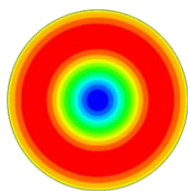
Mode		Theory	FEM(Error, %)
5	Mode Shape (3,1)		
	Freq(Hz)	605.03	598.79(1.02)
6	Mode Shape (1,2)		
	Freq(Hz)	665.33	658.42(1.03)
7	Mode Shape (4,1)		
	Freq(Hz)	719.63	712.18(1.03)
8	Mode Shape (2,2)		
	Freq(Hz)	798.23	789.97(1.03)

表 4-2 試片 B，固定邊界下的理論解析與 FEM 比較

Mode		Theory	FEM(Error, %)
1	Mode Shape (0,1)		
	Freq(Hz)	329.93	331.78(-0.56)
2	Mode Shape (1,1)		
	Freq(Hz)	525.62	528.63(-0.57)
3	Mode Shape (2,1)		
	Freq(Hz)	704.53	708.52(-0.56)
4	Mode Shape (0,2)		
	Freq(Hz)	757.23	761.56(-0.57)

(接續上表)

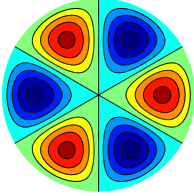
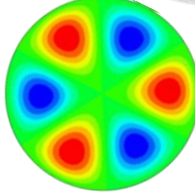
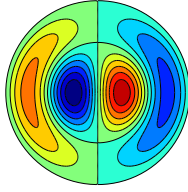
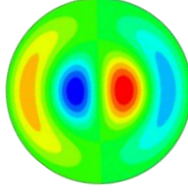
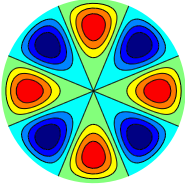
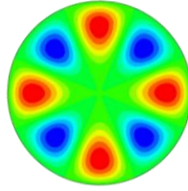
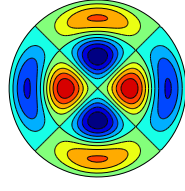
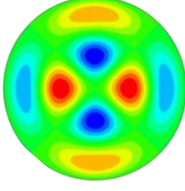
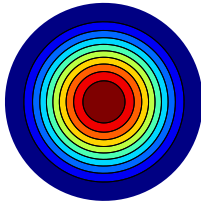
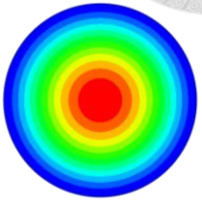
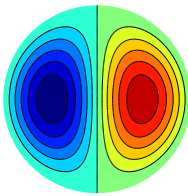
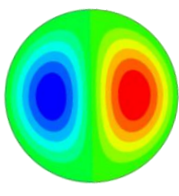
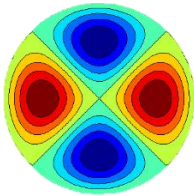
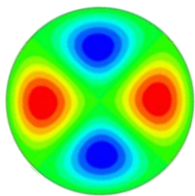
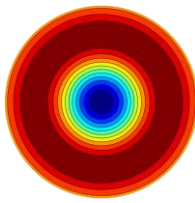
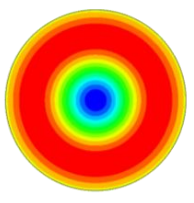
Mode		Theory	FEM(Error, %)
5	Mode Shape (3,1)		
	Freq(Hz)	875.24	880.22(-0.56)
6	Mode Shape (1,2)		
	Freq(Hz)	962.34	967.89(-0.57)
7	Mode Shape (4,1)		
	Freq(Hz)	1040.9	1046.9(-0.57)
8	Mode Shape (2,2)		
	Freq(Hz)	1154.7	1161.3(-0.57)

表 4-3 試片 C，固定邊界下的理論解析與 FEM 比較

Mode		Theory	FEM(Error, %)
1	Mode Shape (0,1)		
	Freq(Hz)	343.01	339.19(1.11)
2	Mode Shape (1,1)		
	Freq(Hz)	544.92	540.45(0.82)
3	Mode Shape (2,1)		
	Freq(Hz)	730.33	724.36(0.81)
4	Mode Shape (0,2)		
	Freq(Hz)	785.03	778.59(0.81)

(接續上表)

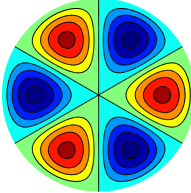
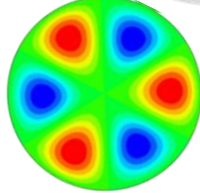
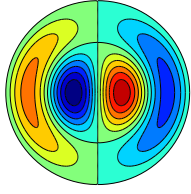
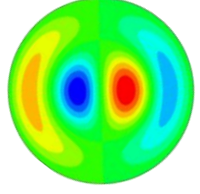
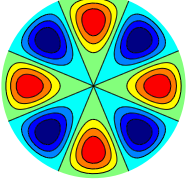
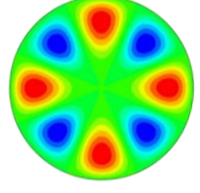
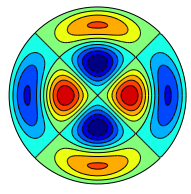
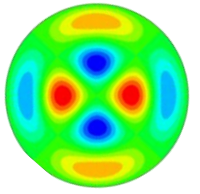
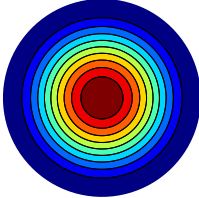
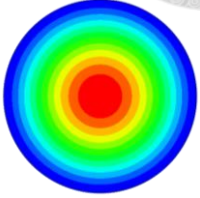
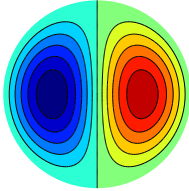
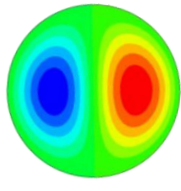
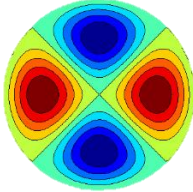
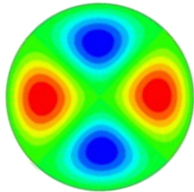
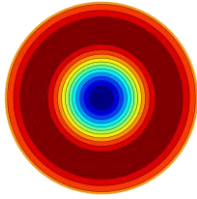
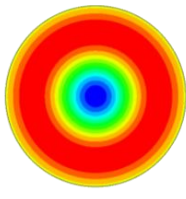
Mode		Theory	FEM(Error, %)
5	Mode Shape (3,1)		
	Freq(Hz)	907.34	899.9(0.81)
6	Mode Shape (1,2)		
	Freq(Hz)	997.64	989.53(0.81)
7	Mode Shape (4,1)		
	Freq(Hz)	1079.2	1070.3(0.84)
8	Mode Shape (2,2)		
	Freq(Hz)	1197.1	1187.2(0.82)

表 4-4 試片 F，固定邊界下的理論解析與 FEM 比較

Mode		Theory	FEM(Error, %)
1	Mode Shape (0,1)		
	Freq(Hz)	254.11	253.48(0.24)
2	Mode Shape (1,1)		
	Freq(Hz)	404.82	403.89(0.22)
3	Mode Shape (2,1)		
	Freq(Hz)	542.62	541.33(0.23)
4	Mode Shape (0,2)		
	Freq(Hz)	583.22	581.85(0.23)

(接續上表)

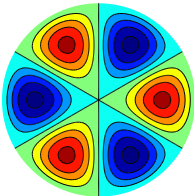
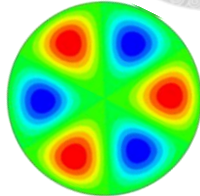
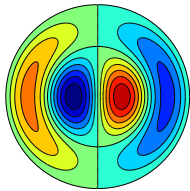
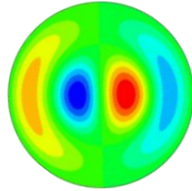
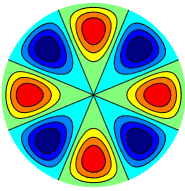
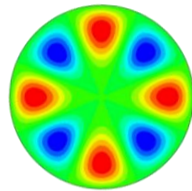
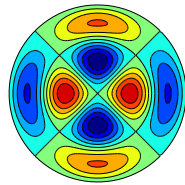
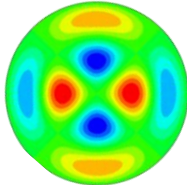
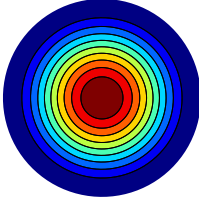
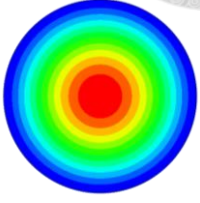
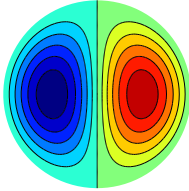
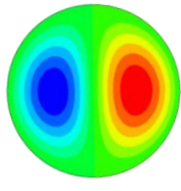
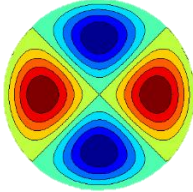
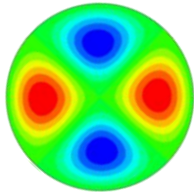
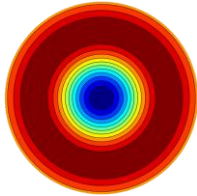
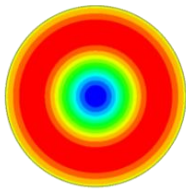
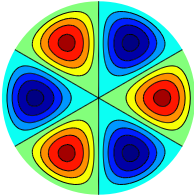
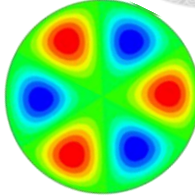
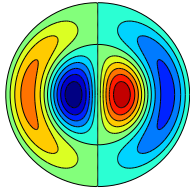
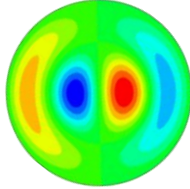
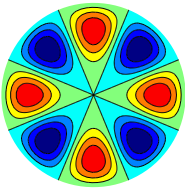
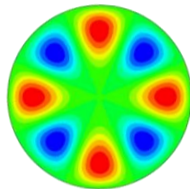
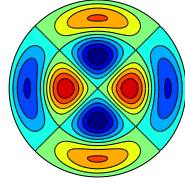
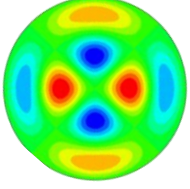
Mode		Theory	FEM(Error, %)
5	Mode Shape (3,1)		
	Freq(Hz)	674.13	672.51(0.24)
6	Mode Shape (1,2)		
	Freq(Hz)	743.23	739.49(0.50)
7	Mode Shape (4,1)		
	Freq(Hz)	801.74	799.86(0.23)
8	Mode Shape (2,2)		
	Freq(Hz)	889.34	887.23(0.23)

表 4-5 試片 G，固定邊界下的理論解析與 FEM 比較

Mode		Theory	FEM(Error, %)
1	Mode Shape (0,1)		
	Freq(Hz)	239.41	242.29(-1.20)
2	Mode Shape (1,1)		
	Freq(Hz)	381.51	386.05(-1.19)
3	Mode Shape (2,1)		
	Freq(Hz)	511.32	517.42(-1.19)
4	Mode Shape (0,2)		
	Freq(Hz)	549.62	556.16(-1.18)

(接續上表)

Mode		Theory	FEM(Error, %)
5	Mode Shape (3,1)		
	Freq(Hz)	635.33	642.81(-1.17)
6	Mode Shape (1,2)		
	Freq(Hz)	698.53	706.83(-1.18)
7	Mode Shape (4,1)		
	Freq(Hz)	755.63	764.54(-1.17)
8	Mode Shape (2,2)		
	Freq(Hz)	838.14	848.05(-1.18)



4.4 薄膜振動實驗量測與張力分析

不論是在模擬或理論解析中，可以發現必須先有張力的條件，才能求出後續的共振頻率和模態振形，也因此得到張力為達成理論解析解和得到模擬結果的重要關鍵，本節將對於如何得到張力和繃膜對張力的影響進行說明與分析。

首先在獲取張力的部份為利用 LDV 單點量測出其共振頻率，接著以第一共振頻率的結果帶回理論中反算張力大小，單點量測架設如圖 4-11 所示。在此以試片 B 進行量測結果說明，量測結果圖如圖 4-12 所示。以第一共振頻 330Hz 代入(4-14)式反算可得出張力 7.5033(N/m)，再將張力帶回理論解出後續共振頻率的結果，即為 4.3 節中所得到的結果，而以第一共振頻代入反算的主要原因在於此頻率為僅一個節圓的振動模態，在聲學的表現上，此模態相較於其他模態會產生較均勻的壓力分佈，具有強烈的直射聲波和特定頻率的共振增強效應。這些特性使其成為設計和控制聲場的有用工具，在聲學元件的應用上發揮重要作用，詳細的聲學分析會在後續第六章中提到。

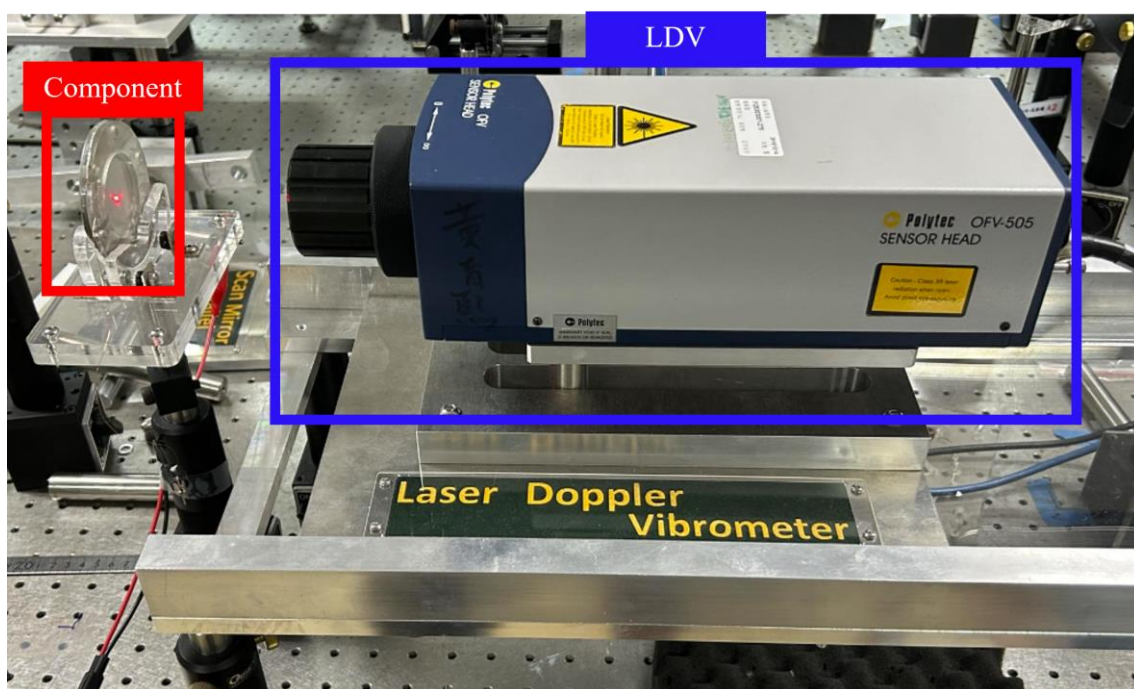


圖 4-11 LDV 單點共振頻量測架設

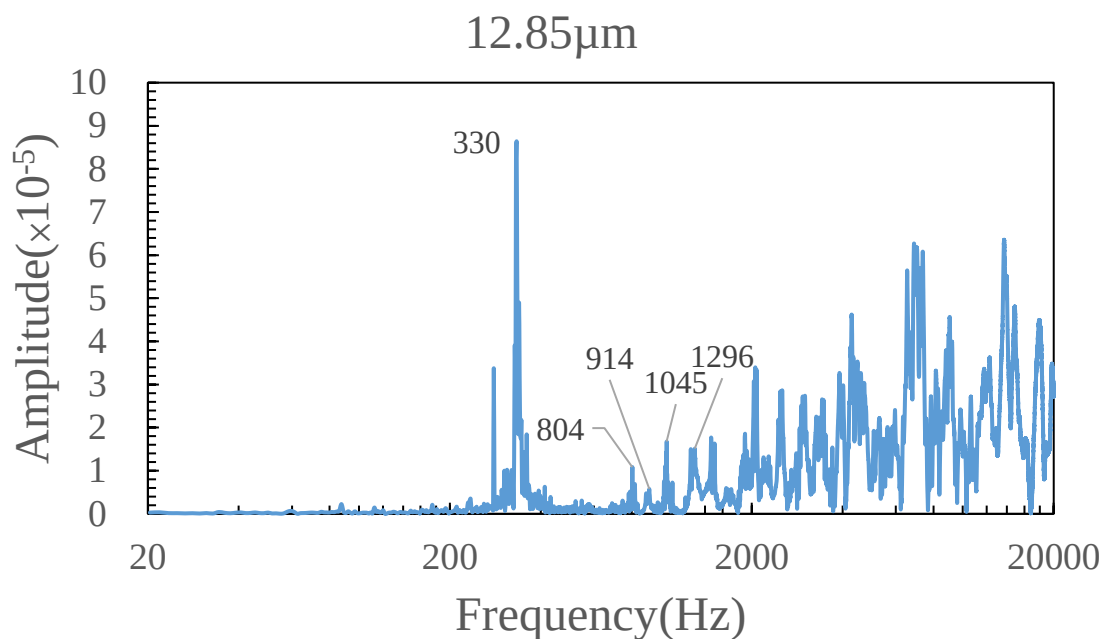


圖 4-12 試片 B(膜厚 $12.85\mu m$)單點共振頻量測結果

而雖然利用第一共振頻反算可得模擬與理論符合的結果，但在薄膜理論的基本假設條件下，薄膜為完全彈性體的存在，也就是不論利用第幾共振頻去反算都應得到相同的張力大小，但本研究不論使用市售或是自製的薄膜皆不為完全彈性體；市售 PVDF 製成的薄膜由於須獲得好的壓電性，會經過拉伸的製程步驟，而此拉伸會使得薄膜在特定方向的性質異於其他方向，使得其不為完全彈性體；自製薄膜部分雖利用旋轉塗佈方式使其均勻向外擴張，但在厚度方向上則未必能達到和平面方向一樣的材料剛性效果，製程效應近似於對徑向方向進行拉伸的效應，而這點可從利用其它共振頻率來進行反算驗證，經由各共振頻率反算張力的結果整理如表 4-6 所示，表中可發現第二共振頻（630Hz）未出現於圖 4-12，但在使用全域量測系統上有量測到相關模態振形，故將其納入反算的分析中，此部分全域量測結果詳細內容會於第五章進行說明。而從反算結果中可以得知的確其張力結果各不相同，除了說明其非完全彈性體外，也代表此自製薄膜之原料的確具備有塑料的黏彈性質，反過來思考在 4.3 節的數值模擬上所設定的材料參數為楊氏模數三維方向

相同的條件下，對於共振頻率雖不會造成影響，但在應力與應變上可能就造成數值上有偏差的來源。

在自製試片中皆是以 3mm 高低差進行繃膜製程，原因為在此高低差下可以獲得最大張力的薄膜，也就是可以繃最緊的情況，讓其在振動以及聲學的量測上可以保持盡量相同的張力大小設定為實驗的固定變因，高於 3mm 進行繃膜也會使薄膜承受不住張力而導致破損，較低的 2mm 和 1mm 則又會出現張力過小導致在振動時不足，無法提供足夠的恢復回恢復薄膜原本的狀態，這在聲學上則反映了其聲音頻會有容易失真的問題，也就是當音樂在頻率改變時無法展現它真實輸出的音頻，使得聽感上產生不和諧的噪音出現。

由於自製薄膜性質關係，現階段繃膜高低差較無法調整為 3mm 以外的作法，雖然在同是 3mm 的情況下可能會因人為繃膜因素而導致張力不同，但此情況就難以去評估高低差所帶來的影響，故在此會以試片 G、H，即市售 28 μm 薄膜討論在不同高低差的情況下所對於張力產生的影響和共振頻率的差異。此款市售 PVDF 薄膜主要因其韌性較高，且表面性質因商用品製程上有經過優化處理，故較不會因人為因素導致繃膜黏貼時有黏貼不平整的情況產生，也就是容錯率的提高使得固定變因較佳，所以在此將討論繃膜高低差 5mm 和 7mm 的情況，LDV 結果圖如圖 4-13 與圖 4-14 所示，從後續全域膜態的量測中可知圖中前四個峰值所列出來的共振頻率的確為其前四個共振頻率，詳細膜態資訊會在 5.6 節中加以說明，在此的結果初步顯示當繃膜高低差變大，會使得張力有所提升，進而使整體共振頻率上升，此結果對於在未來需要設計使特定頻率區間欲產生較好的聲學響應有很大的幫助，意即透過調整繃膜張力大小以達到所需要的聲音特性。

表 4-6 試片 B，不同共振頻反算張力值

		薄膜張力(N/m)
共振頻率(Hz)	330	7.5033
	630	10.804
	804	9.8049
	914	10.904
	1045	10.704
	1296	13.606

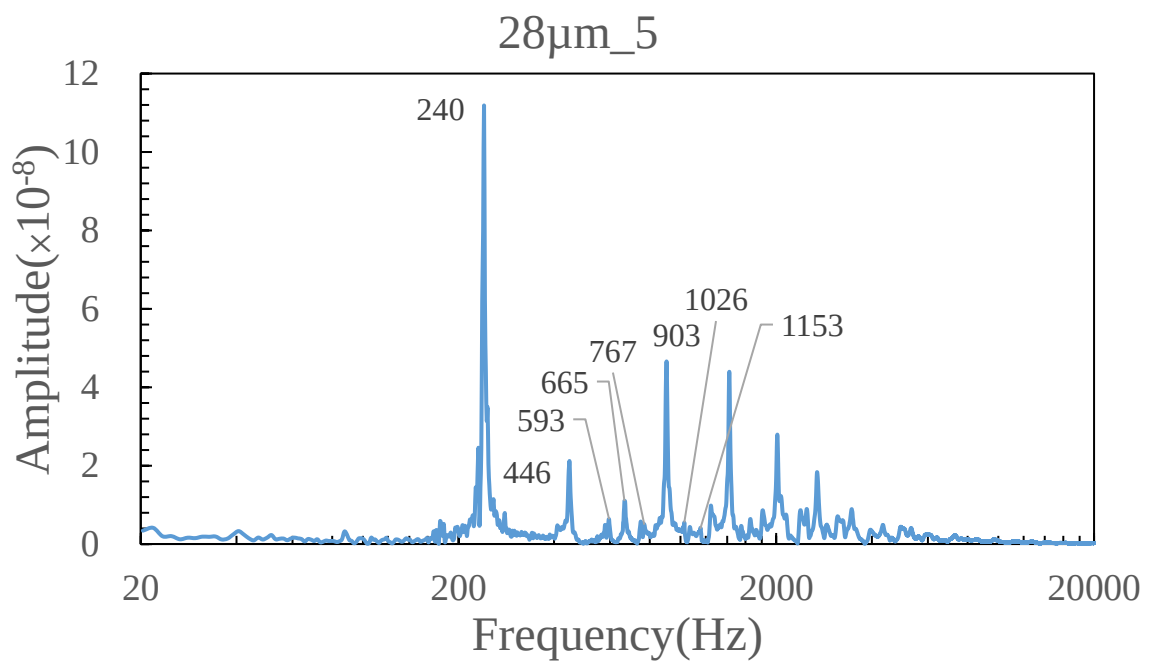
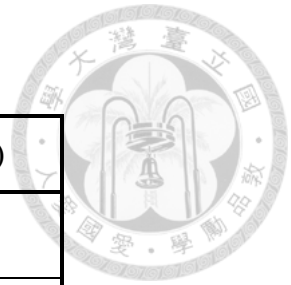


圖 4-13 試片 G(市售 28 μ m、高低差 5mm)單點共振頻量測結果

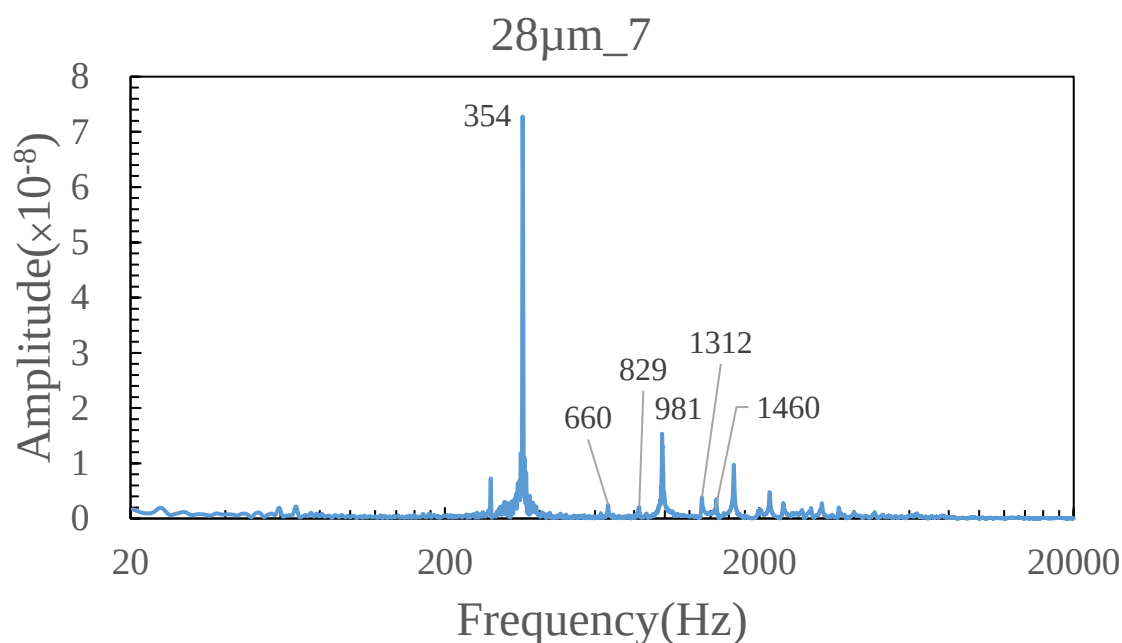


圖 4-14 試片 H(市售 $28\mu\text{m}$ 、高低差 7mm)單點共振頻量測結果

4.5 小結

在此章節中利用薄膜理論的解析解和有限元素模擬中的薄膜分析模型進行比較，過程中結合 LDV 實驗量測得出張力數值，使理論解析和模擬分析可以完善，最後也對於繃膜製程的高低差所影響張力和共振頻率的效應進行了說明，以下將列出幾點為此章節中所得到的成果與相關討論。

1. 在以薄膜理論為基底的解析解與有限元素模擬結果，兩者在共振頻率上呈現良好的對應性，整體誤差不超過 2%。
2. 有限元素靜力模擬所得出的應力分析結果符合薄膜理論所計算之數值，同時也滿足實際在繃膜製程時讓其有張力的情況，結合第 1 點的說明，可視為此模擬建模方式對於不考慮壓電性質而純以完全彈性體薄膜的分析方法仍具有其可靠度。
3. 承接上點，由於實際薄膜具黏彈特性加上具有張力，模擬將其設定為節點力可能有節點不夠多的問題，可能為導致應力量值有些微為誤差的來源。

- 
4. 利用不同共振頻率反算張力所得出的頻率飄移結果，間接證實自製薄膜的黏彈特性；而從市售薄膜不同高低差的情況下，則可以看出張力對於共振頻率的提升效應。
 5. 在本章節中可以發現，不論是一開始的薄膜理論解析或是後續的有限元素薄膜模型，都未考慮壓電薄膜所具有的壓電效應造成的影響，而這也是後續第五章探討的重點，主要為了觀察在具有壓電性後的薄膜對於振動上產生怎樣的效應。

第五章 壓電圓盤振動特性分析與實驗量測

本章節接續在前一章薄膜振動分析中提到的薄膜理論並未考量壓電薄膜的壓電性問題，對於分析壓電薄膜實際振動可能會存在的落差，可經由實驗量測薄膜共振頻率時觀察出量測的共振頻與理論解析與模擬結果相比，除了第一共振頻率因此反算基準計算必定準確對應之外，其餘的頻率都是屬於有偏差的情況，取試片 B ($12.85\ \mu\text{m}$) 與試片 G ($28\ \mu\text{m}$) 分別為自製與市售薄膜各一來進行範例說明，取前六個共振頻率來觀察，如表 5-1、

表 5-2 所示。可以發現不論自製或市售薄膜除第一共振頻外，其餘頻率都是呈現很大的誤差，並且都是低於實驗結果的情形，也因此考慮是否因未考慮壓電性的影響，因而產生了誤差的情況。故此章會從壓電圓盤理論解析出發，搭配套裝模擬軟體的壓電模型進行分析，同時也會呈現利用全域量測系統所量測出的模態，透過理論、模擬以及實驗三者來觀察壓電薄膜的振動情形；特別是在模擬的部分，希望透過壓電圓板的模型，將其設定為薄膜等級的厚度時，也可以模擬壓電薄膜的振動情況。過程中也會比較以薄膜理論模擬模型與壓電圓板的模擬模型兩者的差異，探討更適用於本研究後續的聲學分析中的模型。

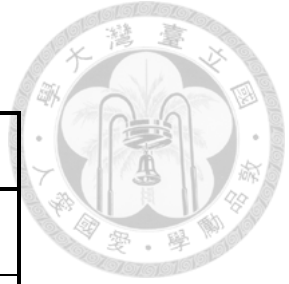


表 5-1 試片 B，模擬與實驗結果比較

	FEM	LDV(Error, %)
共振頻(Hz)	331.78	330(0.53)
	528.63	X
	708.52	804(-13.4)
	761.56	914(-20.0)
	880.22	1045(-18.7)
	967.89	1296(-33.8)

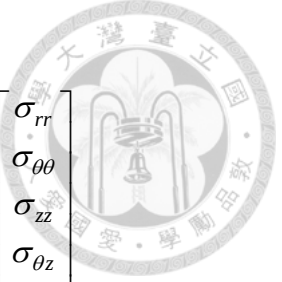
表 5-2 試片 G，模擬與實驗結果比較

	FEM	LDV(Error, %)
共振頻(Hz)	242.29	240(0.94)
	386.05	446(-15.5)
	517.42	593(-14.6)
	556.16	665(-19.5)
	642.81	767(-19.3)
	706.83	903(-27.7)

5.1 壓電圓盤振動分析理論推導

本節使用 3.5 節線性壓電理論，同時因試片為圓形，故採用圓柱座標以方便推導，以下為推導過程所需要使用的方程式：

(1) 壓電本構方程式（Constitutive Equation），以圓柱座標矩陣方程式表示為：



$$\begin{bmatrix} e_{rr} \\ e_{\theta\theta} \\ e_{zz} \\ e_{\theta z} \\ e_{zr} \\ e_{r\theta} \\ D_r \\ D_\theta \\ D_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{31} \\ s_{12}^E & s_{11}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{31} \\ s_{13}^E & s_{13}^E & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66}^E & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & \varepsilon_{11}^T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{11}^T & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{33}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{rr} \\ \sigma_{\theta\theta} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{\theta z} \\ \sigma_{zr} \\ \sigma_{r\theta} \\ E_r \\ E_\theta \\ E_z \end{bmatrix} \quad (5-1)$$

(2) 運動平衡方程式 (Equation of motion)

$$\sigma_{ij,j} = \rho \ddot{u}_i \quad (5-2)$$

圓柱座標之運動方程式 (Stress equation of motion) 如下所示:

$$\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} + \frac{1}{r} (\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}) - \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad (5-3)$$

$$\frac{\partial \sigma_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_{\theta z}}{\partial z} + \frac{2}{r} \sigma_{r\theta} - \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0 \quad (5-4)$$

$$\frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{1}{r} \sigma_{rz} - \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0 \quad (5-5)$$

其中 $\sigma_{rr}, \sigma_{r\theta}, \dots, \sigma_{zz}$ 為應力分量； u 、 v 及 w 分別為 r 、 θ 和 z 方向的位移； ρ 是材料密度。

(3) 應變-位移關係式 (Strain-displacement relations)

$$S_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (5-6)$$

以圓柱座標表示為:

$$\begin{aligned} e_{rr} &= \frac{\partial u}{\partial r}, \quad e_{\theta\theta} = \frac{u}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta}, \quad e_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z} \\ e_{r\theta} &= \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r}, \quad e_{rz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r}, \quad e_{\theta z} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} \end{aligned} \quad (5-7)$$

其中 $e_{rr}, e_{r\theta}, \dots, e_{zz}$ 為應變分量。

(4) 靜電方程式 (Charge equation of electrostatics)

假設壓電材料內部自由電荷為零，僅有表面存在自由電荷：

$$\frac{\partial D_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial D_\theta}{\partial \theta} + \frac{1}{r} D_r + \frac{\partial D_z}{\partial z} = 0 \quad (5-8)$$

(5) 電場-電位關係式 (Electric field – electric potential relations)

$$E_r = -\frac{\partial \varphi}{\partial r}, \quad E_\theta = -\frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta}, \quad E_z = -\frac{\partial \varphi}{\partial z} \quad (5-9)$$

在推導之前，本研究之基本假設是依據 Rogacheva (1994) 之文章[11]，如下述幾點：

- (a) 正向應力分量 σ_{zz} 與其他分量相比而言可以被忽略，即可假設為 $\sigma_{zz} = 0$ 。
- (b) 從圓盤中央平面伸延的每個正向單位結構，在形變前後都維持正向垂直於各單位結構，即對中央平面而言 $e_{rz} = e_{\theta z} = 0$ 。
- (c) 電位沿厚度方向呈二次方的變化，即 $\varphi = \varphi^{(0)} + \varphi^{(1)}z + \varphi^{(2)}z^2$ ；其中 $\varphi^{(0)}$ ， $\varphi^{(1)}$ 與 $\varphi^{(2)}$ 皆為常數。
- (d) 由於壓電材料是在 z 方向極化，故沿著面內方向的電位移與面外相比非常小，故可將面內電位移視為趨近於零 $D_r \cong D_\theta \cong 0$ ，靜電方程式可改寫為 $\frac{\partial D_z}{\partial z} = 0$ 。

將(5-1)式本構方程式展開，並依極化方向 $+z$ 及 $-z$ 列為：

$+z$ 極化方向為

$$\begin{cases} e_{rr} = s_{11}^E(\sigma_{rr} - \nu_p \sigma_{\theta\theta}) + d_{31}E_z \\ e_{\theta\theta} = s_{11}^E(\sigma_{\theta\theta} - \nu_p \sigma_{rr}) + d_{31}E_z \\ e_{zz} = s_{13}^E(\sigma_{rr} + \sigma_{\theta\theta}) + d_{33}E_z \\ e_{r\theta} = 2s_{11}^E(1 + \nu_p)\sigma_{r\theta} \\ D_z = d_{31}(\sigma_{rr} + \sigma_{\theta\theta}) + \varepsilon_{33}^T E_z \end{cases} \quad (5-10)$$

$-z$ 極化方向為

$$\begin{cases} e_{rr} = s_{11}^E(\sigma_{rr} - \nu_p \sigma_{\theta\theta}) - d_{31}E_z \\ e_{\theta\theta} = s_{11}^E(\sigma_{\theta\theta} - \nu_p \sigma_{rr}) - d_{31}E_z \\ e_{zz} = s_{13}^E(\sigma_{rr} + \sigma_{\theta\theta}) - d_{33}E_z \\ e_{r\theta} = 2s_{11}^E(1 + \nu_p)\sigma_{r\theta} \\ D_z = -d_{31}(\sigma_{rr} + \sigma_{\theta\theta}) + \varepsilon_{33}^T E_z \end{cases} \quad (5-11)$$

將(5-10)式、(5-11)式整理為應力與電場關係式，可得(5-12)式、(5-13)式



$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{rr} = \frac{1}{s_{11}^E(1-v_p^2)}(e_{rr} + v_p e_{\theta\theta}) - \frac{d_{31}}{s_{11}^E(1-v_p)} E_z \\ \sigma_{\theta\theta} = \frac{1}{s_{11}^E(1-v_p^2)}(e_{\theta\theta} + v_p e_{rr}) - \frac{d_{31}}{s_{11}^E(1-v_p)} E_z \\ \sigma_{r\theta} = \frac{1}{2s_{11}^E(1+v_p)} e_{r\theta} \\ E_z = -\frac{d_{31}}{\varepsilon_{33}^T}(\sigma_{rr} + \sigma_{\theta\theta}) + \frac{1}{\varepsilon_{33}^T} D_z \end{array} \right. \quad (5-12)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{rr} = \frac{1}{s_{11}^E(1-v_p^2)}(e_{rr} + v_p e_{\theta\theta}) + \frac{d_{31}}{s_{11}^E(1-v_p)} E_z \\ \sigma_{\theta\theta} = \frac{1}{s_{11}^E(1-v_p^2)}(e_{\theta\theta} + v_p e_{rr}) + \frac{d_{31}}{s_{11}^E(1-v_p)} E_z \\ \sigma_{r\theta} = \frac{1}{2s_{11}^E(1+v_p)} e_{r\theta} \\ E_z = \frac{d_{31}}{\varepsilon_{33}^T}(\sigma_{rr} + \sigma_{\theta\theta}) + \frac{1}{\varepsilon_{33}^T} D_z \end{array} \right. \quad (5-13)$$

其中平面普松比(Poisson's ratio) $v_p = -\frac{S_{12}^E}{S_{11}^E}$

若考慮 $u_r = u|_{z=0}$ 為中央平面上徑向位移及 $v_\theta = v|_{z=0}$ 為中央平面上切向位移，

而 w 為軸向位移，則各方向位移場可表示為(5-14)式

$$\left\{ \begin{array}{l} u = u_r(r, \theta, t) + z \frac{\partial w}{\partial r} \\ v = v_\theta(r, \theta, t) + \frac{z}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} \\ w = w(r, \theta, t) \end{array} \right. \quad (5-14)$$

假設輸入壓電材料的電壓為 $Ve^{i\omega t}$ ，其中 V 為常數， ω 為角頻率， t 為時間。

在此將時間項予以省略，則位移場可表示為(5-15)式



$$\begin{cases} u = U(r) + z \frac{\partial W}{\partial r} \\ v = \Theta(r) + \frac{z}{r} \frac{\partial W}{\partial \theta} \\ w = W(r, \theta) \end{cases} \quad (5-15)$$

其中徑向和切向位移假設為軸對稱(axisymmetric motion)，即只跟 r 變數有關；軸向假設為非軸對稱運動(non-axisymmetric motion)，即跟 r 、 θ 變數有關。

將(5-15)式帶回(5-7)式，則可得到應變 e_{rr} 、 $e_{\theta\theta}$ 及 $e_{r\theta}$ 與位移關係式，表示為(5-16)式

$$\begin{cases} e_{rr} = \frac{\partial U}{\partial r} + z \frac{\partial^2 W}{\partial r^2} \\ e_{\theta\theta} = \frac{U}{r} + \frac{z}{r} \frac{\partial W}{\partial r} + \frac{z}{r^2} \frac{\partial^2 W}{\partial \theta^2} \\ e_{r\theta} = -\frac{\Theta}{r} + \frac{\partial \Theta}{\partial r} - \frac{2z}{r^2} \frac{\partial W}{\partial \theta} + \frac{2z}{r} \frac{\partial^2 W}{\partial r \partial \theta} \end{cases} \quad (5-16)$$

5.2 單層壓電圓盤振動特性理論分析

通過前一節的基本推導和整理後，本節對本研究中的固定邊界下的單層壓電圓盤振動特性進行分析，推導分析過程參照文獻[18]，希望能夠以此達到後續分析固定邊界的圓形壓電薄膜振動特性。先假設壓電圓盤的半徑為 R ，厚度為 h_p （同薄膜理論中 h_m ）極化方向為 z 方向（厚度方向），如圖 5-1 所示。

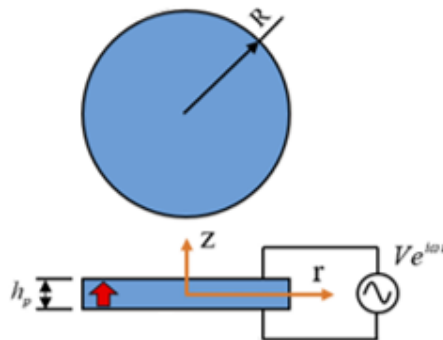


圖 5-1 單層壓電圓盤

而根據文獻[18]，接著透過基本假設(c)、(d)，得 $E_z = -\frac{\partial \varphi}{\partial z} = -\varphi^{(1)} - 2z\varphi^{(2)}$ ，先將(5-12)式中的 $E_z = -\frac{d_{31}}{\varepsilon_{33}^T}(\sigma_{rr} + \sigma_{\theta\theta}) + \frac{1}{\varepsilon_{33}^T}D_z$ 對厚度方向 z 作微分，然後將(5-16)應變-位移式代入(5-12)應力-應變式中，同時應力代入 $\frac{\partial E_z}{\partial z} = -2\varphi^{(2)}$ ，可得+z 極化方向的電位常數為：

$$\varphi^{(2)} = \frac{k_p^2}{4d_{31}(1-k_p^2)} \left(\frac{\partial^2 W}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial W}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 W}{\partial \theta^2} \right) \quad (5-17)$$

其中機電耦合係數為：

$$k_p^2 = \frac{2d_{31}^2}{\varepsilon_{33}^T S_{11}^E (1-\nu_p)} \quad (5-18)$$

接著將+z 極化方向電場對厚度積分，並代入電位邊界條件 $\varphi|_{z=\pm \frac{h_p}{2}} = \pm V$

$$\int_{-\frac{h_p}{2}}^{\frac{h_p}{2}} E_z dz = \int_{-\frac{h_p}{2}}^{\frac{h_p}{2}} -\varphi^{(1)} - 2z\varphi^{(2)} dz = 2V \quad (5-19)$$

得+z 極化方向電位常數為：

$$\varphi^{(1)} = \frac{2V}{h_p} \quad (5-20)$$

解出電位常數 $\varphi^{(1)}$ 、 $\varphi^{(2)}$ 後得：

$$E_z = -\frac{2V}{h_p} - \frac{zk_p^2}{2d_{31}(1-k_p^2)} \left(\frac{\partial^2 W}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial W}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 W}{\partial \theta^2} \right) \quad (5-21)$$

然後將(5-16)、(5-21)式代入(5-12)式可得：



$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_{rr} &= \frac{1}{s_{11}^E(1-\nu_p^2)} \left(\frac{\partial U}{\partial r} + \nu_p \frac{U}{r} + z \frac{\partial^2 W}{\partial r^2} + \nu_p \frac{z}{r} \frac{\partial W}{\partial r} + \nu_p \frac{z}{r^2} \frac{\partial^2 W}{\partial \theta^2} \right) \\ &\quad - \frac{d_{31}}{s_{11}^E(1-\nu_p)} \left[-\frac{2V}{h_p} + \frac{k_p^2}{4d_{31}(1-k_p^2)} (h_p - 2z) \left(\frac{\partial^2 W}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial W}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 W}{\partial \theta^2} \right) \right] \\ \sigma_{\theta\theta} &= \frac{1}{s_{11}^E(1-\nu_p^2)} \left(\frac{U}{r} + \nu_p \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{z}{r} \frac{\partial W}{\partial r} + \frac{z}{r^2} \frac{\partial^2 W}{\partial \theta^2} + \nu_p z \frac{\partial^2 W}{\partial r^2} \right) \\ &\quad - \frac{d_{31}}{s_{11}^E(1-\nu_p)} \left[-\frac{2V}{h_p} + \frac{k_p^2}{4d_{31}(1-k_p^2)} (h_p - 2z) \left(\frac{\partial^2 W}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial W}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 W}{\partial \theta^2} \right) \right] \\ \sigma_{r\theta} &= \frac{1}{2s_{11}^E(1+\nu_p)} \left(-\frac{\Theta}{r} + \frac{\partial \Theta}{\partial r} - \frac{2z}{r^2} \frac{\partial W}{\partial \theta} + \frac{2z}{r} \frac{\partial^2 W}{\partial r \partial \theta} \right) \end{aligned} \right. \quad (5-22)$$

本研究以薄板理論為假設，並假設面外(軸向)與面內(切向、徑向)振動為非耦合(uncoupling)，同時也因本研究聲學元件的聲壓主要貢獻來源為面外振動所提供，故以下將對軸向振動進行探討。

由於軸向振動是非軸對稱運動，與 r 、 θ 兩變數有關，在給予交流電驅動的情況下，軸向位移可表示為：

$$w(r, \theta, t) = W(r, \theta) e^{i\omega t} \quad (5-23)$$

將(5-23)式代入(5-22)式中後，再將改寫後之(5-22)式帶回(5-3)~(5-5)三式中，接著將三式乘以 z 並對厚度 $z = -\frac{h_p}{2}$ 到 $z = \frac{h_p}{2}$ 做積分，可得以下彎曲振動之統御方程式(詳細過程參照[18])：

$$D' \nabla^4 W - \rho h_p \omega^2 W = 0 \quad (5-24)$$

其中 ∇^4 為雙調和運算子(biharmonic operator)

$$\nabla^4 = \left(\frac{\partial^4}{\partial r^4} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial^4}{\partial^2 r \partial^2 \theta} + \frac{1}{r^4} \frac{\partial^4}{\partial \theta^4} + \frac{2}{r} \frac{\partial^3}{\partial r \partial r^3} - \frac{2}{r^3} \frac{\partial^3}{\partial r \partial^2 \theta} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{4}{r^4} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r^3} \frac{\partial}{\partial r} \right) \quad (5-25)$$

D' 為等效彎曲剛性

$$D' = \frac{h_p^3}{12} \cdot \frac{2 - (1 - \nu_p) k_p^2}{2s_{11}^E (1 - \nu_p^2) (1 - k_p^2)} \quad (5-26)$$

接著利用分離變數法可得以下軸向位移通解：

$$W(r, \theta) = \left[A_1^{(n)} J_n(\beta_1 r) + B_1^{(n)} Y_n(\beta_1 r) + A_2^{(n)} I_n(\beta_1 r) + B_2^{(n)} K_n(\beta_1 r) \right] \cos n(\theta + \phi) \quad (5-27)$$

, $n=0,1,2,3,\dots$

其中 J_n 為第一類 n 階貝索函數， Y_n 為第二類 n 階貝索函數， I_n 為第一類 n 階修正貝索函數， K_n 為第二類 n 階修正貝索函數。

此時因貝索函數 Y_n 與 K_n 在半徑趨近於零時會有極值，違反物理意義，如圖 5-2 所示，故須令 $B_1^{(n)} = B_2^{(n)} = 0$ ，則圓盤軸向振動位移通解為：

$$W(r, \theta) = \left[A_1^{(n)} J_n(\beta_1 r) + A_2^{(n)} I_n(\beta_1 r) \right] \cos n(\theta + \phi) \quad , n=0,1,2,3,\dots \quad (5-28)$$

其中 $A_n^{(1)}$ 與 $A_n^{(2)}$ 為常數，而 ϕ 值可由初始條件得到，在此先令 ϕ 值為零，而

$$\beta_1^4 = \frac{\rho h_p \omega^2}{D'} = \frac{12 \rho \omega^2}{h_p^2} \cdot \frac{2s_{11}^E (1 - \nu_p^2) (1 - k_p^2)}{2 - (1 - \nu_p) k_p^2} \quad (5-29)$$

接著外圈固定邊界條件加入，外圈($r=R$)固定邊界位移量和斜率為零，因此邊界條件為：

$$W(r, \theta) = 0 \quad (5-30)$$

$$\frac{\partial W(r, \theta)}{\partial r} = 0 \quad (5-31)$$

將兩邊界代入(5-28)式通解中得：

$$\left[A_1^{(n)} J_n(\eta) + A_2^{(n)} I_n(\eta) \right] \cos n\theta = 0 \quad (5-32)$$

$$\beta_1 \left[A_1^{(n)} J_n'(\eta) + A_2^{(n)} I_n'(\eta) \right] \cos n\theta = 0 \quad (5-33)$$

其中 $\eta = \beta_1 R$ 。

而(5-32)、(5-33)式之係數矩陣行列式值必須為零，可得軸向振動特徵方程：

$$J_n(\eta) I_{n+1}(\eta) + I_n(\eta) J_{n+1}(\eta) = 0 \quad (5-34)$$

而由(5-28)、(5-32)、(5-33)式可得軸向振動全場位移為：



$$W(r, \theta) = A_1^{(n)} \left[J_n(\beta_1 r) - \frac{J_n(\beta_1 R)}{I_n(\beta_1 R)} I_n(\beta_1 r) \right] \cos n\theta \quad (5-35)$$

並從(5-29)式得軸向振動共振頻率為：

$$f = \frac{h_p \eta^2}{2\pi R^2} \sqrt{\frac{2 - (1 - \nu_p) k_p^2}{24 \rho s_{11}^E (1 - \nu_p^2) (1 - k_p^2)}} \quad (5-36)$$

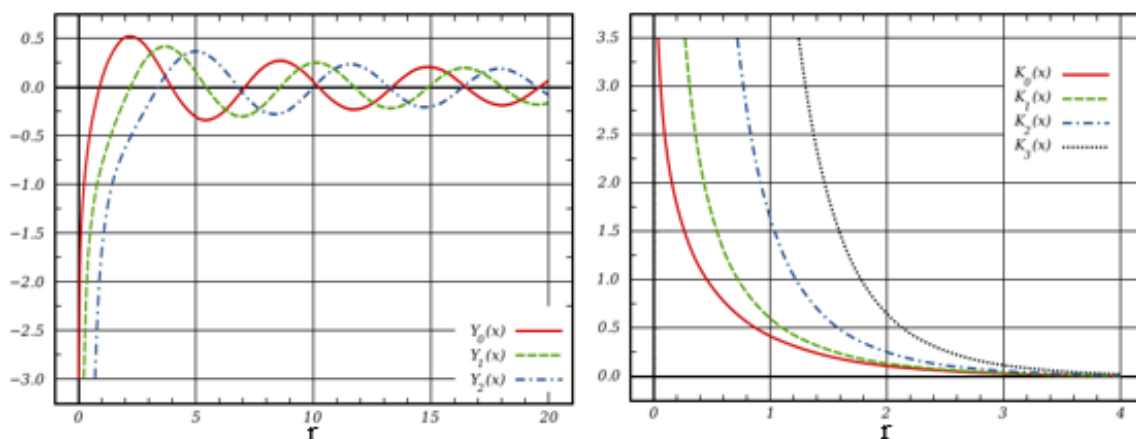


圖 5-2 第二類 n 階貝索函數與第二類 n 階修正貝索函數圖

5.3 壓電圓盤有限元素數值分析

接著進行有限元素模擬分析的設定說明，使用 ABAQUS 軟體分析外圈固定邊界且具有特定張力之壓電薄膜，與薄膜理論分析中不同的是，在此改為使用三維固體元素（3D Solid）的模型使其可具有壓電性質，透過設定極薄的厚度來近似於實際壓電薄膜，獲得其在受張力後的應力應變情況和共振頻率與模態振形，故模擬設定中同樣設定兩步驟的分析，先利用 Static 靜力分析得出壓電薄膜受張力的應力應變，接著在受有張力的情況下建立第二個步驟 Frequency 來分析共振頻率。以下分別對於兩步驟相關設定進行說明。

I. Static, General 靜力分析

- 為了考量壓電薄膜具有的壓電性，在前章討論無壓電薄膜的模型，意及沒有具備同時考量其無抵抗彎矩能力和具有壓電性質的狀況下，因此選擇了以三維固體元素（3D Solid）來設定模型並使其具有壓電性的剛體形態，也因此所模

擬的結果會是在薄膜具備剛性的情況，為探討壓電性質的影響，材料所需設定的特性於 property 中如圖 5-3 所示，包含密度、介電係數、彈性係數和壓電係數，需輸入的參數值同表 2-11、表 2-13 所示。

- 設定完材料使其具壓電性後，由於壓電薄膜的極化方向為厚度方向，因此需設定切角方向 (Orientation)，如圖 5-4 所示。
- 而由於所設定的厚度為薄膜等級，因此一樣假設其容易產生大變形的機制，故在分析時須於分析步驟 (Step) 中開啟幾何非線性 (Nlgeom) 的功能，在軟體分析過程中將勁度矩陣更新，使分析結果更準確。
- 張力部份一樣以 4.4 節實驗量測結果代回理論解析所得到的張力大小為基準，設定上設定壓力 (Pressure) 給定，如圖 5-5 所示，輸入數值部分會等於反算張力除以膜厚。
- 最後在邊界條件的部份，一樣將中心節點固定，以防止薄膜移動導致受張力不均，呼應實際在繃膜製作聲學元件時的理想情況。以上為 Step 1 的相關重要設定，完成後便可進入下方 Step 2 也就是共振頻率分析 (Frequency) 的相關設定

II. Frequency 共振頻率分析

- 首先延續著前面 Static General 的 Step 1，在後方建立 Step 2 為 Frequency 的步驟，與 Step 1 一樣將幾何非線性 (Nlgeom) 打開，以確保結果準確。
- 接著將薄膜外圈設定全固定邊界條件($U1=U2=U3=UR1=UR2=UR3=0$)，一樣需將 Step 1 所設定的中心固定情況關閉，使其不會影響共振頻率的分析，接著由於壓電薄膜具有壓電性，因此須設定電位，使其壓電性質可以展現，全部的邊界條件設定如圖 5-6 所示。網格 (Mesh) 則採用 C3D20RE 的三維二階壓電 20 節點減積分元素網格。

以上兩步驟設定完後便可進行分析，後續之結果討論將於 5.4 、5.5 、5.6 節中進行說明。

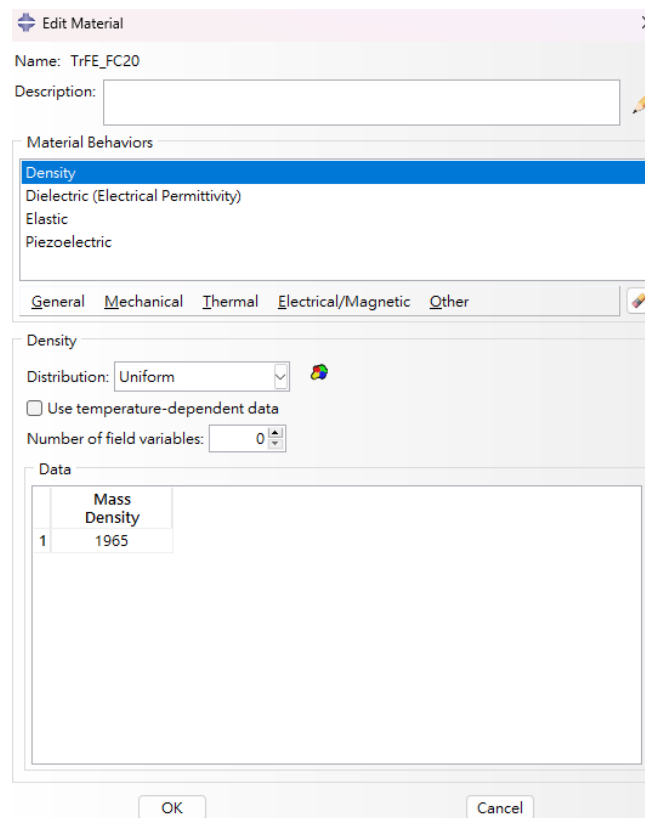


圖 5-3 所需設定材料參數

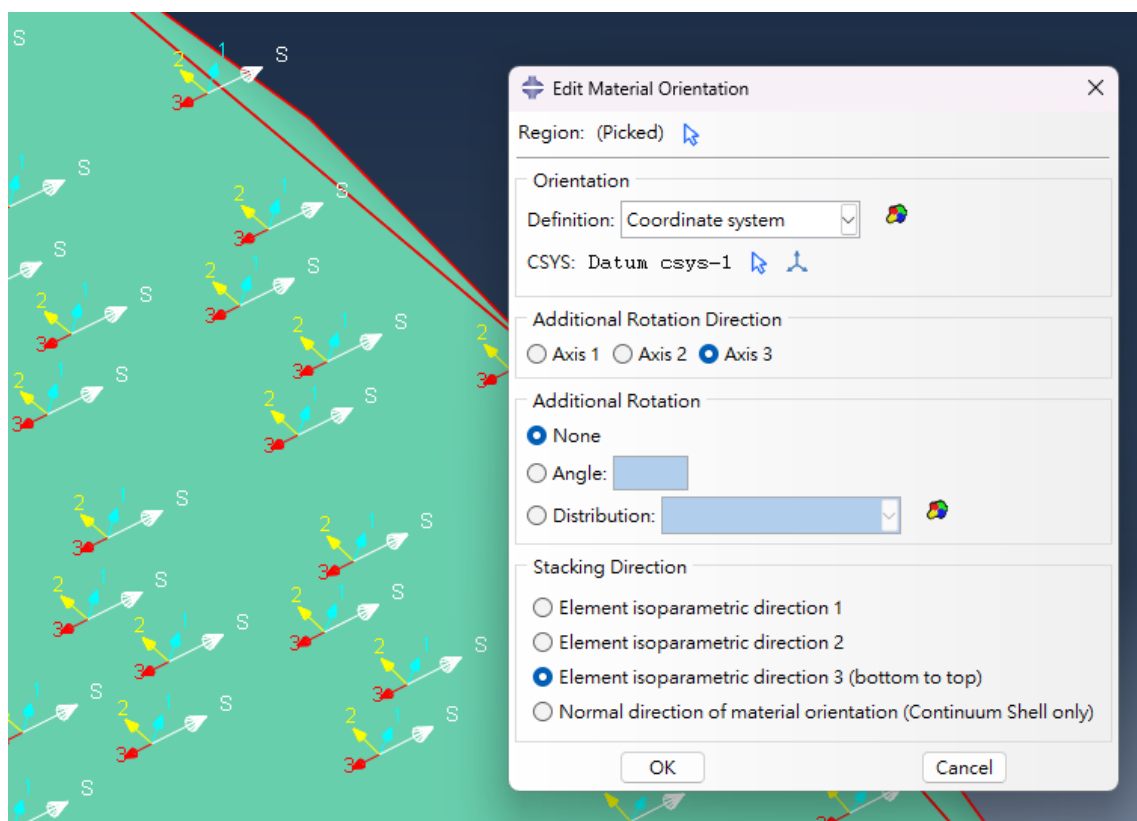


圖 5-4 極化方向設定

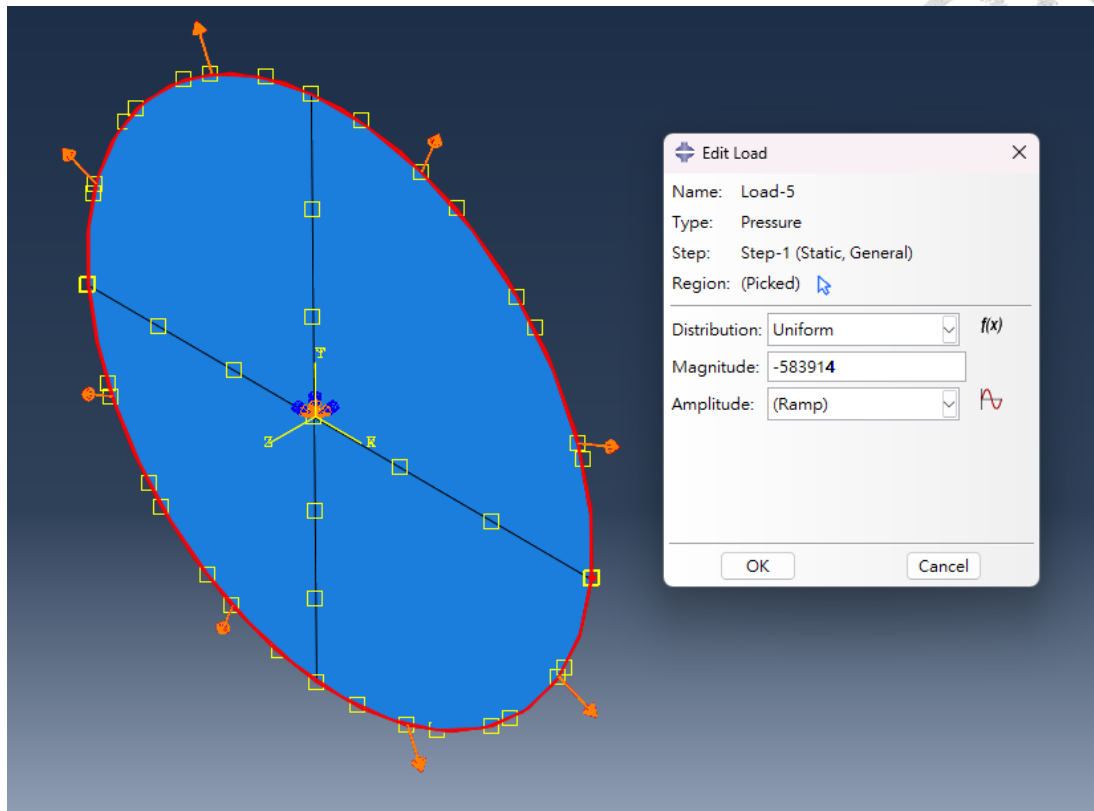


圖 5-5 張力設定

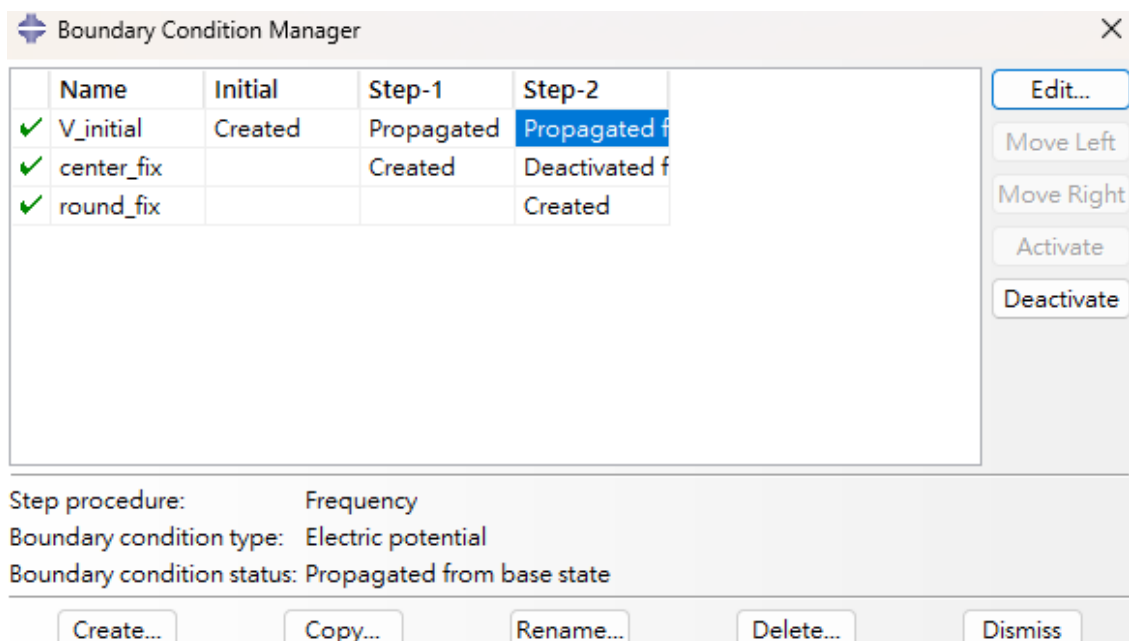


圖 5-6 邊界條件設定

5.4 壓電圓盤振動理論解析與數值分析之比較(無張力)

本節中將對模擬結果與理論解析解進行比較，由於在理論推導並未考量實際受張力情況下之情形，也就是固定邊界下之壓電薄板的推導不具輸入張力的條件，故在模擬上會考量未受張力的情況，以此與理論解析結果進行，後續再比較受張力情況下之模擬，並與 LDV 全域實驗量測結果比較。而也因在此考量未受張力的情況，故在此只觀察其共振頻率的結果。

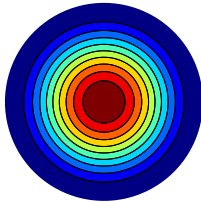
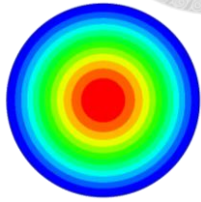
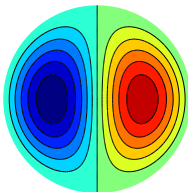
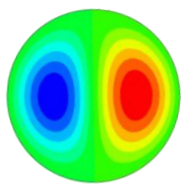
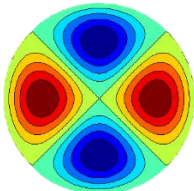
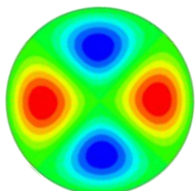
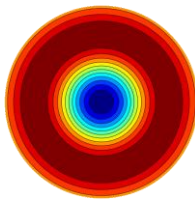
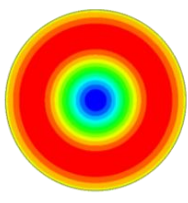
以下同樣列出試片 A、B、C、F、G 的前八個共振頻及其模態結果，分別為分析自製薄膜不同厚度和兩個市售不同厚度的薄膜，來觀察膜厚變化和參數不同所呈現的模擬結果並與理論解析結果比較。結果如表 5-3 至表 5-7 所示，在試片 B、F、G 呈現良好的對應性，整體誤差在 2% 以內且出現的節線節圓模態順序皆可對應上，表中模態振形以 (m,n) 表示， m 為節線數， n 為節圓數。但在試片 A、C 的部份則是有較大的誤差產生，將這兩個試片與試片 B 一起進行討論，三者皆為自製薄膜，差別在於其膜厚不同，而在 5.2 節中對於共振頻率所推導的結果，可以看到會因膜厚而使得共振頻率有改變，但對於厚度是微米等級的情況來說，其對於共振頻率的影響甚微，這點從試片 A、B、C 三者模擬結果幾乎一樣可獲得驗證，因此膜厚並非造成頻率差異的主因，故在此推測主要原因在於密度和蒲松比上，呼應在 2.4 節中提過的密度和蒲松比的量測可能有不可靠的問題，該節的量測是以膜厚約 $13\ \mu\text{m}$ 進行試片的量測，此厚度可對應試片 B 的規格的，故量測結果於理論與模擬分析只適用於對應的厚度區間，也因此 $19\ \mu\text{m}$ 、 $11\ \mu\text{m}$ 上不能使用同樣的材料參數，而已知密度、蒲松比、柔性常數會對共振頻率造成影響，這些參數的不同可能使結果呈現較大誤差；由此即可以推論在溶液的旋轉塗佈上，透過轉速的不同來控制不同的膜厚，可能會使得其近一步的改變它的材料參數，也就是當溶液在高轉速時會甩掉較多的溶液，使得其減少的質量與其塗佈出的體積相比，可能使密度有所下降的，同時因轉速的提高使其在平面方向的離心力增加，導致平面拉伸的效應變的更明顯，也可能使得蒲松比也跟著提高。綜合以上，推測高轉速製程會



使得共振頻率上升，這部分可從試片 A 相比試片 B 對於模擬值是高估，而試片 C 相比試片 B 是低估的情況驗證，也因此不同的厚度可能都須進行對應的參數量測才能完全確保理論跟模擬的正確性，而市售薄膜試片 F、G 則因都是確認的材料參數，故在理論解析和模擬上呈現良好的對應性。

即使在試片 A 與 C 因未量測其對應的材料參數因而產生對應性差的問題，但從其他三個確認材料參數下的試片 B、F、G 當中仍可得到，理論解析與模擬結果是可有良好對應特性，也因此透過此結論將其分析方法改為受張力情況下之壓電模擬的模型，假設其理論解析與模擬是對應性良好的狀況下，將模擬結果作為基準以利於與實驗量測結果進行比較，將於 5.5 、5.6 節詳細說明。

表 5-3 試片 A，固定邊界、無張力之理論解析與 FEM 比較

Mode		Theory	FEM(Error, %)
1	Mode Shape (0,1)		
	Freq(Hz)	32.10	22.03(31.3)
2	Mode Shape (1,1)		
	Freq(Hz)	66.80	45.73(31.5)
3	Mode Shape (2,1)		
	Freq(Hz)	109.60	74.98(31.5)
4	Mode Shape (0,2)		
	Freq(Hz)	125.00	85.50(31.6)

(接續上表)

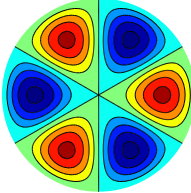
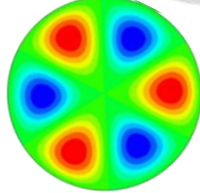
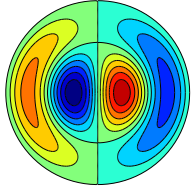
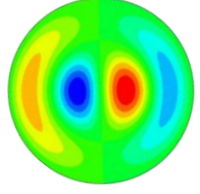
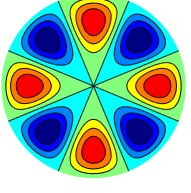
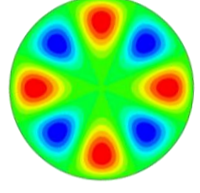
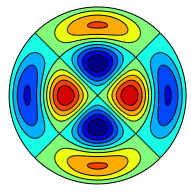
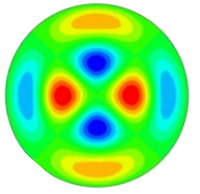
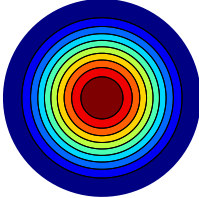
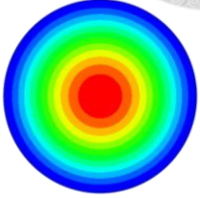
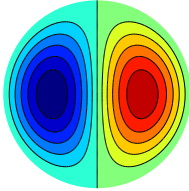
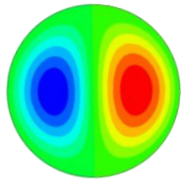
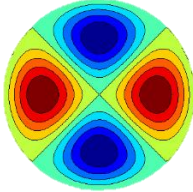
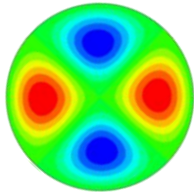
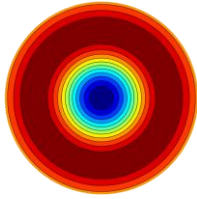
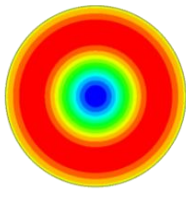
Mode		Theory	FEM(Error, %)
5	Mode Shape (3,1)		
	Freq(Hz)	160.40	109.71(31.6)
6	Mode Shape (1,2)		
	Freq(Hz)	191.20	130.77(31.6)
7	Mode Shape (4,1)		
	Freq(Hz)	219.01	149.76(31.6)
8	Mode Shape (2,2)		
	Freq(Hz)	265.81	181.82(31.5)

表 5-4 試片 B，固定邊界、無張力之理論解析與 FEM 比較

Mode		Theory	FEM(Error, %)
1	Mode Shape (0,1)		
	Freq(Hz)	21.70	22.03(-1.52)
2	Mode Shape (1,1)		
	Freq(Hz)	45.50	45.73(-0.50)
3	Mode Shape (2,1)		
	Freq(Hz)	74.10	74.99(-1.20)
4	Mode Shape (0,2)		
	Freq(Hz)	84.50	85.51(-1.19)

(接續上表)

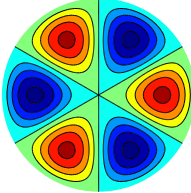
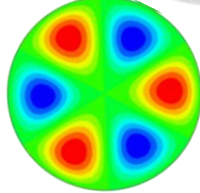
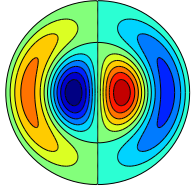
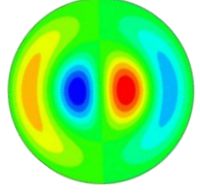
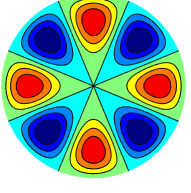
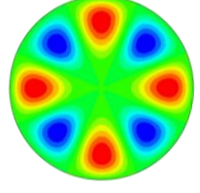
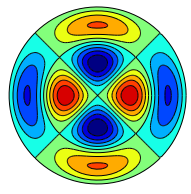
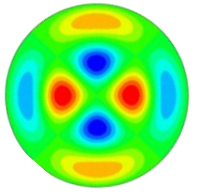
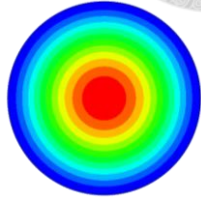
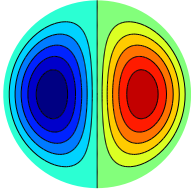
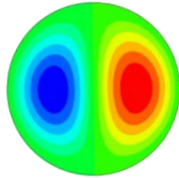
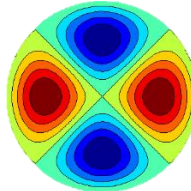
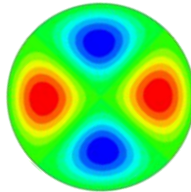
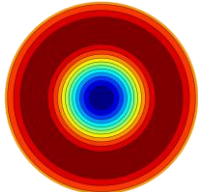
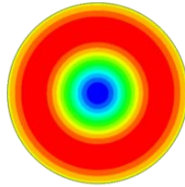
Mode		Theory	FEM(Error, %)
5	Mode Shape (3,1)		
	Freq(Hz)	108.50	109.71(-1.11)
6	Mode Shape (1,2)		
	Freq(Hz)	129.30	130.78(-1.14)
7	Mode Shape (4,1)		
	Freq(Hz)	148.10	149.77(-1.12)
8	Mode Shape (2,2)		
	Freq(Hz)	179.80	181.83(-1.12)

表 5-5 試片 C，固定邊界、無張力之理論解析與 FEM 比較

Mode		Theory	FEM(Error, %)
1	Mode Shape (0,1)		
	Freq(Hz)	X	22.03
2	Mode Shape (1,1)		
	Freq(Hz)	38.70	45.73(-18.1)
3	Mode Shape (2,1)		
	Freq(Hz)	63.50	74.99(-18.0)
4	Mode Shape (0,2)		
	Freq(Hz)	72.40	85.51(-18.1)

(接續上表)

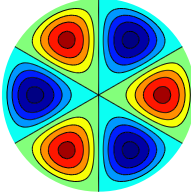
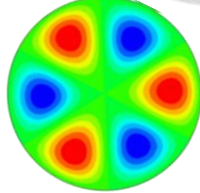
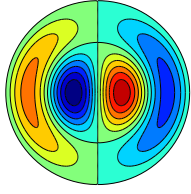
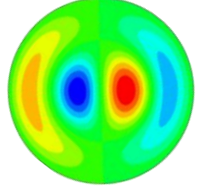
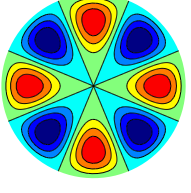
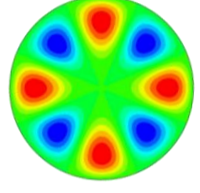
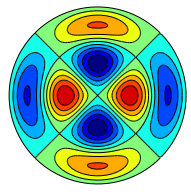
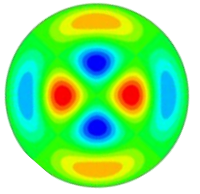
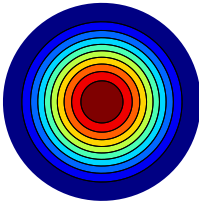
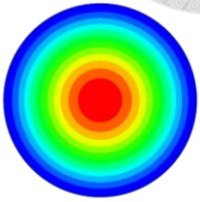
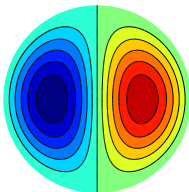
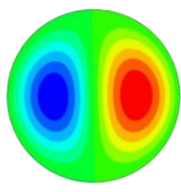
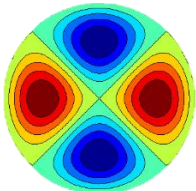
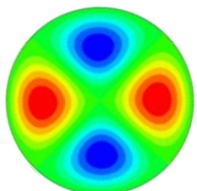
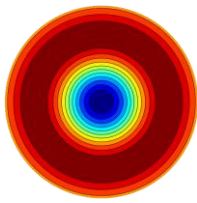
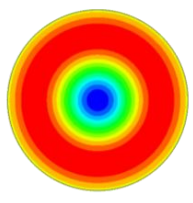
Mode		Theory	FEM(Error, %)
5	Mode Shape (3,1)		
	Freq(Hz)	92.90	109.72(-18.1)
6	Mode Shape (1,2)		
	Freq(Hz)	110.70	130.78(-18.1)
7	Mode Shape (4,1)		
	Freq(Hz)	126.80	149.78(-18.1)
8	Mode Shape (2,2)		
	Freq(Hz)	153.90	181.84(-18.1)

表 5-6 試片 F，固定邊界、無張力之理論解析與 FEM 比較

Mode		Theory	FEM(Error, %)
1	Mode Shape (0,1)		
	Freq(Hz)	186.10	185.47(0.33)
2	Mode Shape (1,1)		
	Freq(Hz)	387.41	385.96(0.37)
3	Mode Shape (2,1)		
	Freq(Hz)	635.53	633.09(0.38)
4	Mode Shape (0,2)		
	Freq(Hz)	724.73	721.94(0.38)

(接續上表)

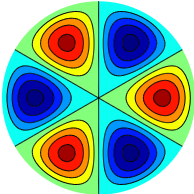
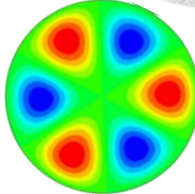
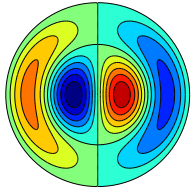
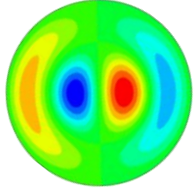
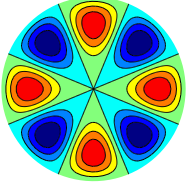
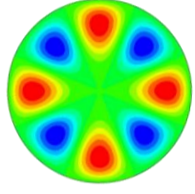
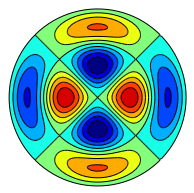
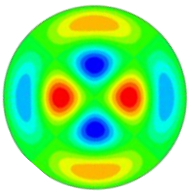
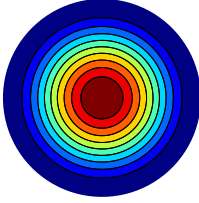
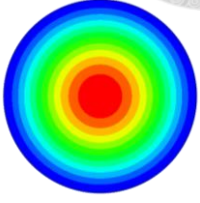
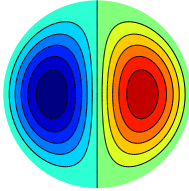
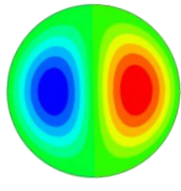
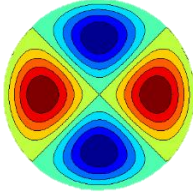
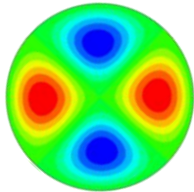
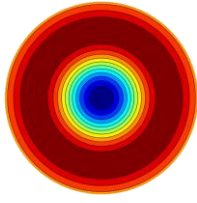
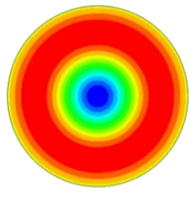
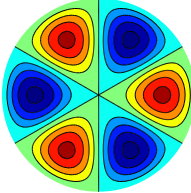
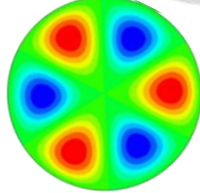
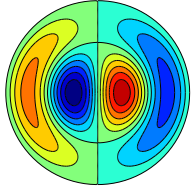
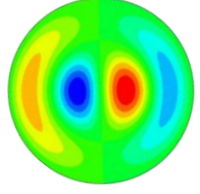
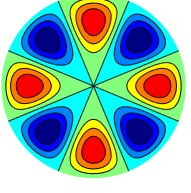
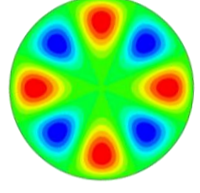
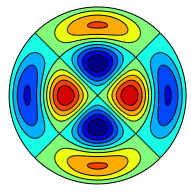
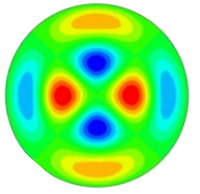
Mode		Theory	FEM(Error, %)
5	Mode Shape (3,1)		
	Freq(Hz)	929.84	926.26(0.38)
6	Mode Shape (1,2)		
	Freq(Hz)	1108.5	1104.1(0.39)
7	Mode Shape (4,1)		
	Freq(Hz)	1269.5	1264.4(0.40)
8	Mode Shape (2,2)		
	Freq(Hz)	1541.3	1534.9(0.41)

表 5-7 試片 G，固定邊界、無張力之理論解析與 FEM 比較

Mode		Theory	FEM(Error, %)
1	Mode Shape (0,1)		
	Freq(Hz)	47.40	47.32(0.16)
2	Mode Shape (1,1)		
	Freq(Hz)	98.60	98.47(0.13)
3	Mode Shape (2,1)		
	Freq(Hz)	161.80	161.54(0.16)
4	Mode Shape (0,2)		
	Freq(Hz)	184.50	184.21(0.15)

(接續上表)

Mode		Theory	FEM(Error, %)
5	Mode Shape (3,1)		
	Freq(Hz)	236.71	236.36(0.14)
6	Mode Shape (1,2)		
	Freq(Hz)	282.11	281.74(0.13)
7	Mode Shape (4,1)		
	Freq(Hz)	323.11	322.67(0.13)
8	Mode Shape (2,2)		
	Freq(Hz)	392.31	391.76(0.14)



5.5 壓電圓盤理論與薄膜理論分析差異

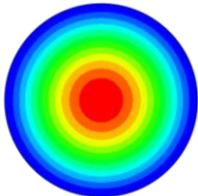
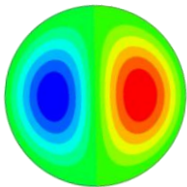
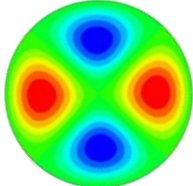
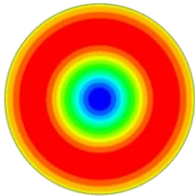
在本節會將張力加入壓電圓盤的有限元素模擬之中，也就是先將薄膜理論反算得出的張力值加到圓盤之圓周邊界進行模擬，得出在此張力情況下的共振頻率分析結果後，接著與薄膜模型的模擬結果做比較，在此考量 5.4 節提到的材料參數問題，故僅以試片 B、F、G 下去做探討，結果如表 5-8 至表 5-10 所示，可以看到其在三個試片的結果壓電模型都呈現頻率高於薄膜模型的情況，推測主要是由於壓電模型考量壓電性質再加上此模型必定也會考量材料本身的剛性，綜合兩者因素造成此現象的產生，而此現象也可以從試片 F、G 中的結果明顯看出，當所設定的厚度越厚時，其分析條件使厚度越接近於壓電薄板模型，也因此使得其剛性效果更為明顯，導致膜厚越厚的共振頻結果與薄膜理論差異越大；此外，三個試片也都有越往高頻與薄膜理論差異越大的情況，也說明了當一般具有剛性的壓電片在實際振動時，其低頻的振動效果相較於高頻來說是偏差較少，呈現較與薄膜相近的振動效果，而此現象對於後續的聲學模擬分析上會有相關的情況產生，這部分會於第六章詳細說明。

由於已知壓電模型具有剛性效應對於共振頻率上的分析會造成影響，也就是當將反算得到的張力加入壓電薄板中時，其對於共振頻的影響是會類似於剛性的效果，可想像為增加了一開始即具有材料剛性又外加了預應力造成的剛性效應，對於薄膜來說則是僅利用張力來達到剛性的效應，也因此在使用壓電模型時，如再用反算張力輸入分析模型，會造成對於張力數值高估的問題，使得高估整體共振頻率，也因此接下來會透過調整張力的方式來達到調整剛性效應的目的，更接近實際薄膜之情況。

透過薄膜反算張力時所使用的第一共振頻作為基準，調低模擬時設定的張力使其第一共振頻數值趨近相同，調整張力後大小如表 5-11 所示，接著薄膜模型進行比較，試片 B、F、G 的結果比較如表 5-12 至表 5-14 所示，可以發現共振頻所呈現的趨勢與無設定張力情況下相同，也就是越到高頻與薄膜理論的差異會變大，

顯現其壓電性和剛性所造成的效應，而同樣從試片 F 較厚的薄膜厚度來看，厚度越大時其越不適合使用薄膜模型作為基準進行分析。由於薄膜模型未考量壓電性質的關係，也因此利用壓電模型來進行模擬較能夠呈現實際壓電薄膜在振動時的特性，至於整體剛性受張力的效應則利用調整設定的張力大小，以此趨近實際壓電薄膜所具有的恢復力。

表 5-8 試片 B，壓電圓盤模型與薄膜模型模擬比較

Mode		壓電模型	薄膜模型(差異, %)
1	Mode Shape (0,1)		同左
	Freq(Hz)	335.31	331.78(1.05)
2	Mode Shape (1,1)		同左
	Freq(Hz)	534.87	528.63(1.16)
3	Mode Shape (2,1)		同左
	Freq(Hz)	717.89	708.52(1.30)
4	Mode Shape (0,2)		同左
	Freq(Hz)	772.02	761.56(1.35)

(接續上表)

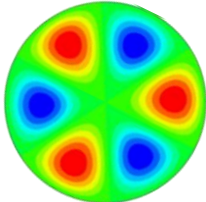
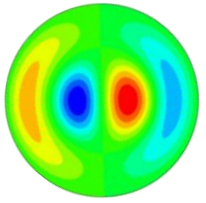
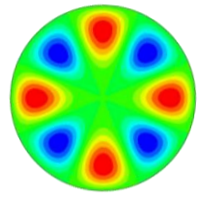
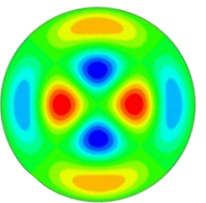
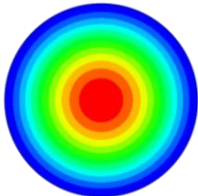
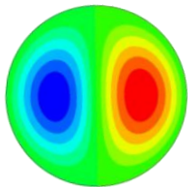
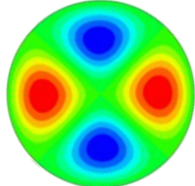
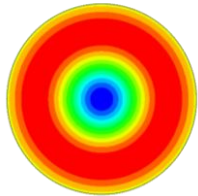
Mode		壓電模型	薄膜模型(差異, %)
5	Mode Shape (3,1)		同左
	Freq(Hz)	893.44	880.22(1.47)
6	Mode Shape (1,2)		同左
	Freq(Hz)	983.46	967.89(1.58)
7	Mode Shape (4,1)		同左
	Freq(Hz)	1064.8	1046.9(1.68)
8	Mode Shape (2,2)		同左
	Freq(Hz)	1183.0	1161.3(1.83)

表 5-9 試片 F，壓電圓盤模型與薄膜模型模擬比較

Mode		壓電模型	薄膜模型(差異, %)
1	Mode Shape (0,1)		同左
	Freq(Hz)	330.22	253.48(23.2)
2	Mode Shape (1,1)		同左
	Freq(Hz)	577.05	403.89(30.0)
3	Mode Shape (2,1)		同左
	Freq(Hz)	851.42	541.33(36.4)
4	Mode Shape (0,2)		同左
	Freq(Hz)	994.30	581.85(41.4)

(接續上表)

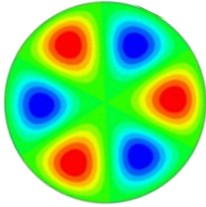
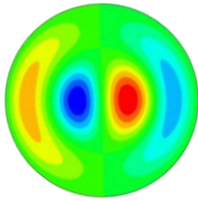
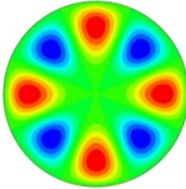
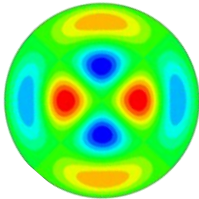
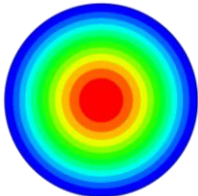
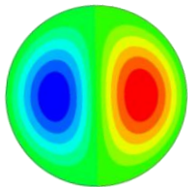
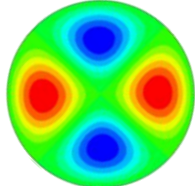
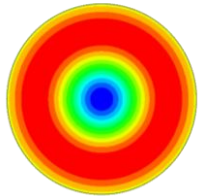
Mode		壓電模型	薄膜模型(差異, %)
5	Mode Shape (3,1)		同左
	Freq(Hz)	1162.4	672.51(42.1)
6	Mode Shape (1,2)		同左
	Freq(Hz)	1344.7	739.49(45.0)
7	Mode Shape (4,1)		同左
	Freq(Hz)	1512.9	799.86(47.1)
8	Mode Shape (2,2)		同左
	Freq(Hz)	1787.6	887.23(50.3)

表 5-10 試片 G，壓電圓盤模型與薄膜模型模擬比較

Mode		壓電模型	薄膜模型(差異, %)
1	Mode Shape (0,1)		同左
	Freq(Hz)	252.63	242.29(4.09)
2	Mode Shape (1,1)		同左
	Freq(Hz)	406.37	386.05(5.00)
3	Mode Shape (2,1)		同左
	Freq(Hz)	551.30	517.42(6.14)
4	Mode Shape (0,2)		同左
	Freq(Hz)	595.10	556.16(6.54)

(接續上表)

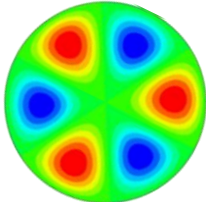
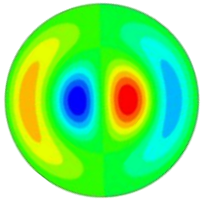
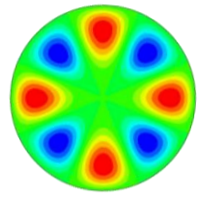
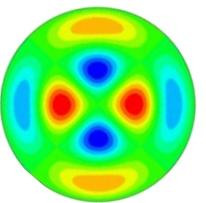
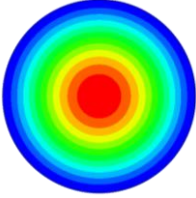
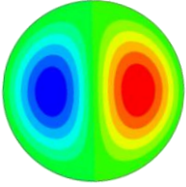
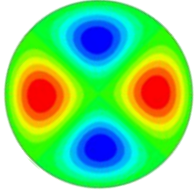
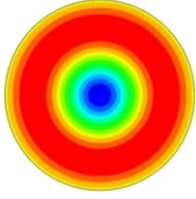
Mode		壓電模型	薄膜模型(差異, %)
5	Mode Shape (3,1)		同左
	Freq(Hz)	694.84	642.81(7.48)
6	Mode Shape (1,2)		同左
	Freq(Hz)	770.59	706.83(8.27)
7	Mode Shape (4,1)		同左
	Freq(Hz)	840.08	764.54(8.99)
8	Mode Shape (2,2)		同左
	Freq(Hz)	943.82	848.05(10.1)

表 5-11 試片張力調整

		實際反算張力(N/m)	調整後張力(N/m)
試片編號	B	7.5033	7.2977
	F	34.5168	13.9766
	G	7.8034	7.0474

表 5-12 試片 B，張力調整後壓電圓盤模型與薄膜模型模擬比較

Mode		壓電模型	薄膜模型(差異, %)
1	Mode Shape (0,1)		同左
	Freq(Hz)	330.77	331.78(-0.30)
2	Mode Shape (1,1)		同左
	Freq(Hz)	527.64	528.63(-0.18)
3	Mode Shape (2,1)		同左
	Freq(Hz)	708.21	708.52(0.04)
4	Mode Shape (0,2)		同左
	Freq(Hz)	761.62	761.56(<0.01)

(接續上表)

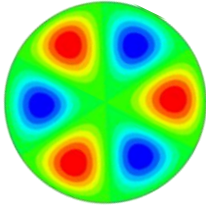
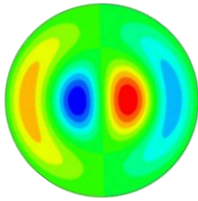
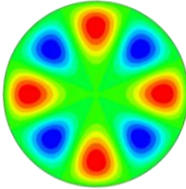
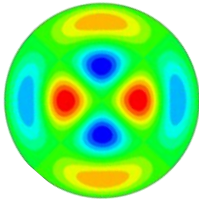
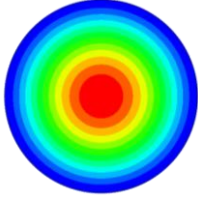
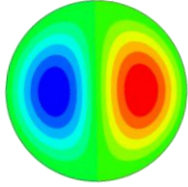
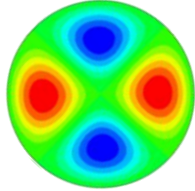
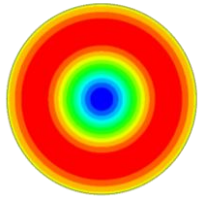
Mode		壓電模型	薄膜模型(差異, %)
5	Mode Shape (3,1)		同左
	Freq(Hz)	881.43	880.22(0.13)
6	Mode Shape (1,2)		同左
	Freq(Hz)	970.27	967.89(0.24)
7	Mode Shape (4,1)		同左
	Freq(Hz)	1050.5	1046.9(0.34)
8	Mode Shape (2,2)		同左
	Freq(Hz)	1167.2	1161.3(0.50)

表 5-13 試片 F，張力調整後壓電圓盤模型與薄膜模型模擬比較

Mode		壓電模型	薄膜模型(差異, %)
1	Mode Shape (0,1)		同左
	Freq(Hz)	254.13	253.48(0.25)
2	Mode Shape (1,1)		同左
	Freq(Hz)	472.00	403.89(14.4)
3	Mode Shape (2,1)		同左
	Freq(Hz)	728.25	541.33(25.6)
4	Mode Shape (0,2)		同左
	Freq(Hz)	817.87	581.85(28.8)

(接續上表)

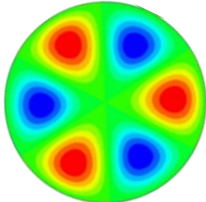
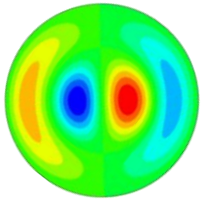
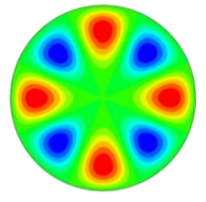
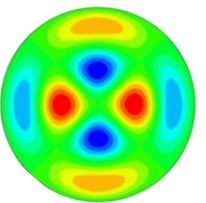
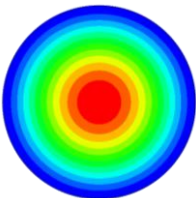
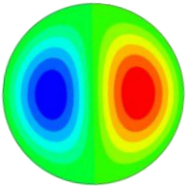
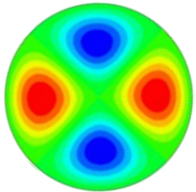
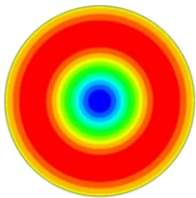
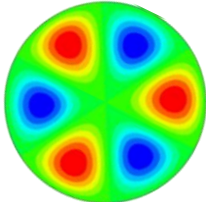
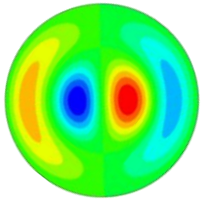
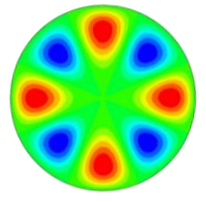
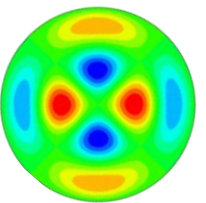
Mode		壓電模型	薄膜模型(差異, %)
5	Mode Shape (3,1)		同左
	Freq(Hz)	1027.0	672.51(34.5)
6	Mode Shape (1,2)		同左
	Freq(Hz)	1205.7	739.49(38.6)
7	Mode Shape (4,1)		同左
	Freq(Hz)	1368.9	799.86(41.5)
8	Mode Shape (2,2)		同左
	Freq(Hz)	1640.2	887.23(45.9)

表 5-14 試片 G，張力調整後壓電圓盤模型與薄膜模型模擬比較

Mode		壓電模型	薄膜模型(差異, %)
1	Mode Shape (0,1)		同左
	Freq(Hz)	240.86	242.29(-0.59)
2	Mode Shape (1,1)		同左
	Freq(Hz)	387.81	386.05(0.45)
3	Mode Shape (2,1)		同左
	Freq(Hz)	526.77	517.42(1.77)
4	Mode Shape (0,2)		同左
	Freq(Hz)	568.87	556.16(2.23)

(接續上表)

Mode		壓電模型	薄膜模型(差異, %)
5	Mode Shape (3,1)		同左
	Freq(Hz)	664.87	642.81(3.31)
6	Mode Shape (1,2)		同左
	Freq(Hz)	737.97	706.83(4.21)
7	Mode Shape (4,1)		同左
	Freq(Hz)	805.10	764.54(5.03)
8	Mode Shape (2,2)		同左
	Freq(Hz)	905.58	848.05(6.35)

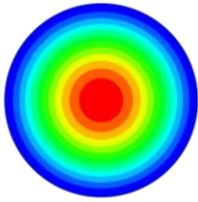
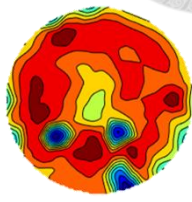
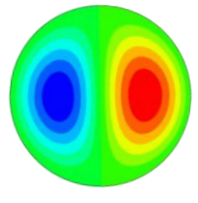
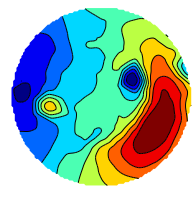
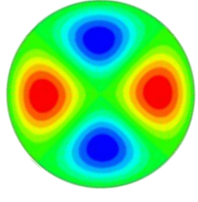
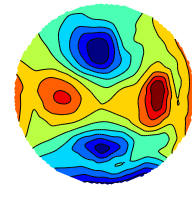
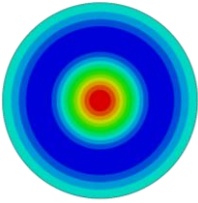


5.6 數值分析結果與實驗量測之比較

在確立以壓電模型作為後續分析上的基準後，便將其與 LDV 全域量測系統 (DPM) 量測結果做比較，在此一樣以試片 B、F、G 三者確定材料參數的試片情況進行分析比較，結果如表 5-15 至表 5-17 所示，第一共振頻因作為張力基準故對應性良好，但在試片 B 和 G 仍可以明顯觀察到越高頻時其誤差會越來越大，而相較起來試片厚度 $110\ \mu\text{m}$ 的試片 F 則較無此問題出現，推測此情況是由於即使利用降低張力減少了整體的剛性效應，但在對於壓電薄膜來說，其本身所擁有的薄膜特性還是十分顯著的，也因此試片 F 的模擬與實驗兩者對應性良好是建立在膜厚情況較為接近壓電薄板的情形，以及市售 PVDF 薄膜相對於自製的 P(VDF-TrFE) 來說，其材料性質上本就呈現較硬的情況，也就是剛性較高的情形，這點可從 PVDF 參數表得知，如表 2-13 所示。而以此討論試片 B 與 G 的特性，試片 G 也是 PVDF 製成，但厚度相對而言較接近薄膜也因此較具薄膜特性，使得到了高頻之後薄膜的特性會越來越明顯導致誤差越來越大，而自製薄膜試片 B 則更為明顯，其材料質地本就相對於市售薄膜軟，加上膜厚極薄，在薄膜的特性部分會更加顯著，同時因實驗上也可能會受繃膜影響，使其於薄膜表面具有細微的不平整產生，綜合以上導致試片 B 之實驗量測與壓電模型模擬呈現誤差最大的情況。

透過以上討論，可以發現使用壓電模型進行模擬仍有其缺陷，也就是無法反映薄膜在越往高頻時的實際振動情況，主要受限於壓電模型先天的剛性效應影響，但因為該分析模型能夠發揮出壓電薄膜的壓電性質，故後續第六章還是會用此壓電模型來進行聲學上的模擬相關分析。

表 5-15 試片 B，FEM 模擬與 DPM 比較

Mode		FEM	DPM(Error, %)
1	Mode Shape (0,1)		
	Freq(Hz)	330.77	330(0.23)
2	Mode Shape (1,1)		
	Freq(Hz)	527.64	630(-19.3)
3	Mode Shape (2,1)		
	Freq(Hz)	708.21	804(-13.5)
4	Mode Shape (0,2)		
	Freq(Hz)	761.62	X

(接續上表)

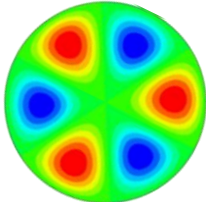
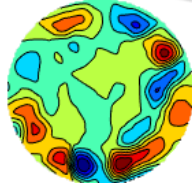
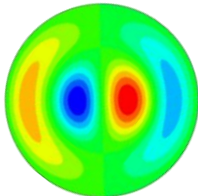
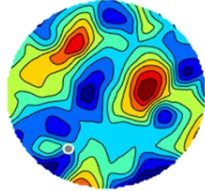
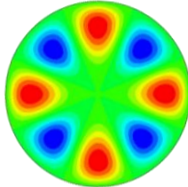
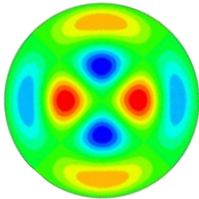
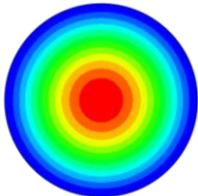
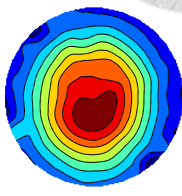
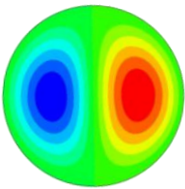
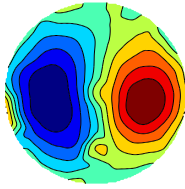
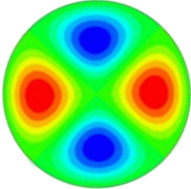
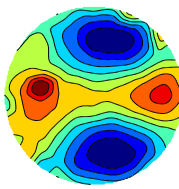
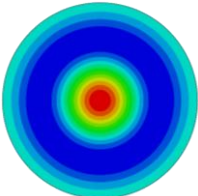
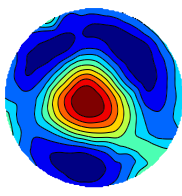
Mode		FEM	DPM(Error, %)
5	Mode Shape (3,1)		
	Freq(Hz)	881.43	1045(-18.5)
6	Mode Shape (1,2)		
	Freq(Hz)	970.27	1296(-33.5)
7	Mode Shape (4,1)		
	Freq(Hz)	1050.5	X
8	Mode Shape (2,2)		
	Freq(Hz)	1167.2	X

表 5-16 試片 F，FEM 模擬與 DPM 比較

Mode		FEM	DPM(Error, %)
1	Mode Shape (0,1)		
	Freq(Hz)	254.13	254(0.05)
2	Mode Shape (1,1)		
	Freq(Hz)	472.00	453(4.02)
3	Mode Shape (2,1)		
	Freq(Hz)	728.25	726(0.30)
4	Mode Shape (0,2)		
	Freq(Hz)	817.87	850(-3.92)

(接續上表)

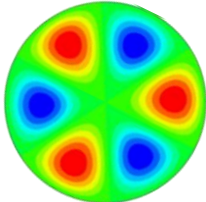
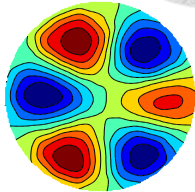
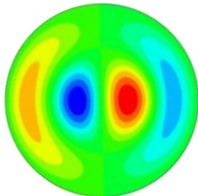
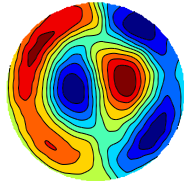
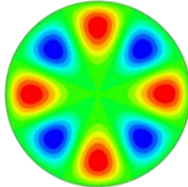
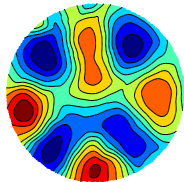
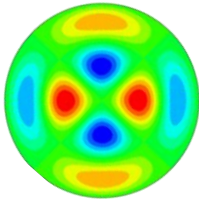
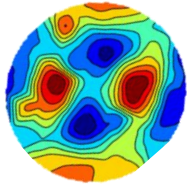
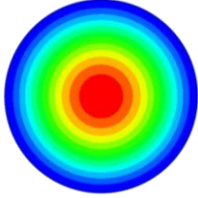
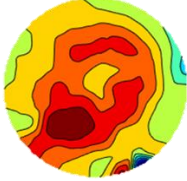
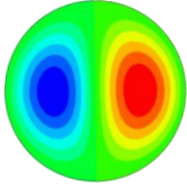
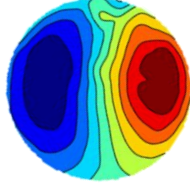
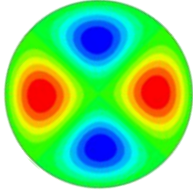
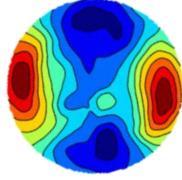
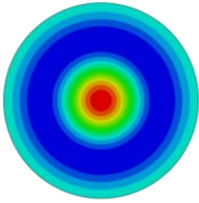
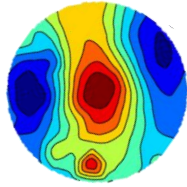
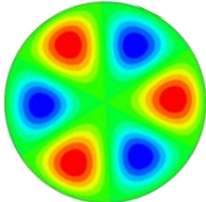
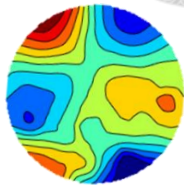
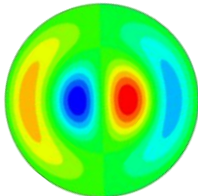
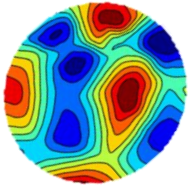
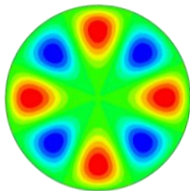
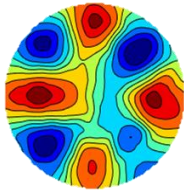
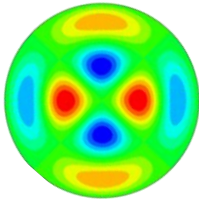
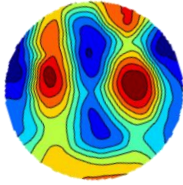
Mode		FEM	DPM(Error, %)
5	Mode Shape (3,1)		
	Freq(Hz)	1027.0	1040(-1.26)
6	Mode Shape (1,2)		
	Freq(Hz)	1205.7	1203(0.22)
7	Mode Shape (4,1)		
	Freq(Hz)	1368.9	1400(-2.27)
8	Mode Shape (2,2)		
	Freq(Hz)	1640.2	1653(-0.78)

表 5-17 試片 G，FEM 模擬與 DPM 比較

Mode		FEM	DPM(Error, %)
1	Mode Shape (0,1)		
	Freq(Hz)	240.86	240(0.35)
2	Mode Shape (1,1)		
	Freq(Hz)	387.81	446(-15.0)
3	Mode Shape (2,1)		
	Freq(Hz)	526.77	593(-12.5)
4	Mode Shape (0,2)		
	Freq(Hz)	568.87	665(-16.8)

(接續上表)

Mode		FEM	DPM(Error, %)
5	Mode Shape (3,1)		
	Freq(Hz)	664.87	767(-15.3)
6	Mode Shape (1,2)		
	Freq(Hz)	737.97	903(-22.3)
7	Mode Shape (4,1)		
	Freq(Hz)	805.10	1026(-27.4)
8	Mode Shape (2,2)		
	Freq(Hz)	905.58	1153(-27.3)



5.7 小結

本章節先對於壓電圓盤薄板進行理論分析，得出其共振頻率、全場位移通解，接著利用壓電模型進行有限元素模擬後，將兩者無張力情況下進行比較，得出結果後將壓電模型模擬推廣至受張力情況下之模擬，並與薄膜模型模擬結果相互比較，觀察其壓電性和剛性所帶來之影響，最後將壓電模型與全域實驗量測結果對比，並進行相關討論。以下列出幾點為此章節中所得到的成果與相關討論。

1. 在無張力且材料參數數值確定的情況下壓電圓盤理論與壓電模型的模擬結果呈現對應性良好的情況，如試片 B、F、G 所呈現的結果，整體誤差不超過 2%。
2. 將壓電模型模擬推廣至有受反算所得到的張力情況下時，其與薄膜模型模擬相比會呈現因壓電性和剛性造成差異，而此差異會隨著膜厚越厚，也就是越不接近薄膜的情況而變得明顯。其中張力的施加會使得剛性效應有提升的現象，故須調整張力值以趨近實際壓電薄膜的情況。
3. 調降張力後的壓電模型模擬在共振頻率呈現明顯的下降，將其比較薄膜模型仍有高估的情況，表示其壓電性和剛性效應仍是造成影響；而將壓電模型模擬結果與 DPM 實驗量測相比，呈現低估共振頻率的情況，也就是說若為完全彈性體的薄膜，會因未考量壓電性而使得實際壓電薄膜振動情況低估，但若將其以壓電模型進行分析，其模擬又無法展現實際壓電薄膜的薄膜特性，也就是喪失薄膜在高頻區域的準確性。
4. 因壓電模型是可具有電致動驅動力的模擬效果，因此後續的聲學分析會以此模型為主。

第六章 聲學元件之聲學特性分析與實驗量測

本章節將透過有限元素模擬和聲場實驗量測來分析所製作的聲學元件其聲學特性，模擬主要使用第五章的壓電平板模型進行自由音場模擬；聲學量測上則會以無響室的自由音場量測和人工耳的封閉音場量測為主，其中將自由音場的量測結果與模擬做比較，觀察其現象和差異，此外也會就實驗結果對不同膜厚、 d_{33} 、繃膜平整度以及與市售薄膜這幾點差異來進行討論，以此探討本研究自製薄膜之優勢與特點。

6.1 無限大障板下自由音場之聲學特性分析

首先進行自由聲場的分析，利用壓電模型進行有限元素聲學模擬，並與實際無響室量測結果比較，觀察模擬與實驗的現象和差異外，也會就實驗結果進行不同試片的分析比較，來評估自製薄膜於自由聲場的特點。

6.1.1 無限大障板下自由音場之有限元素分析

有限元素模擬分析的部分，同樣使用 ABAQUS 軟體的壓電模型，因此設定上會與第五章的模擬類似，同樣須先設定靜力分析 (Static)，使其在具有張力的情況在進行下一個步驟，此時採用前章討論中調整後的張力，使其可以對應實驗量測的第一共振頻率。主要的不同會是在設定上多了一個計算聲場的設定步驟，以下將對聲場模擬設定進行相關說明。

I. 直接穩態動力學 (Steady-state dynamics, Direct) 於聲場分析

- 首先需在建模步驟 (Part) 中繪製一個半球形自由聲場區域，其半徑配合實際的無響室量測設為 0.1m，示意圖如圖 6-1 所示，在半圓球的下方需將其挖空出可供試片放置的區域，也就是試片的厚度大小，接著將此區域設定為空氣區域，並給予對應的材料參數，在此設定環境溫度為 22°C，其所需體積模數 (Bulk Modulus) 為 139.799kPa，密度為 1.18 (kg/m³)，所需設定參數如圖 6-2 所示。

- 略過 Step 1 的張力分析說明，接著在 Step 2 的設定上選用穩態動態分析（Steady-state dynamics, Direct）來進行聲場模擬，其設定如圖 6-3 所示，由於量測上以 1/24 八音帶進行，故需設定相關頻率值。
- 而在交互作用關係（Interaction）部分則是利用緊密連結（tie）的連接方式將試片與聲場緊密黏合，使其振動所產生的聲音效應可以傳遞，最後需設定電位的邊界條件，方式為在試片上表面設定正電位，下表面設定對應的負電位，在此設定電壓 24Vpp，則在上電極表面設定+12，下電極表面設定-12，邊界條件與電位設定如圖 6-4、圖 6-5 所示。
- 接著空氣的網格部分設定為三維 10 節點聲學耦合 AC3D10 的二階網格，其餘壓電試片相關設定同 5.3 節所示。

以上為模擬相關設定，結果會在後續 6.1.2 節中進行分析。

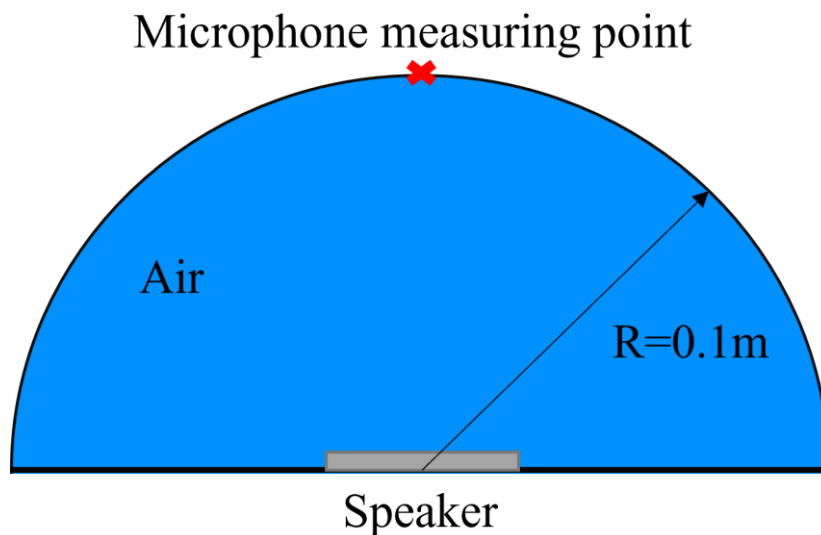


圖 6-1 聲學元件與聲場配置示意圖

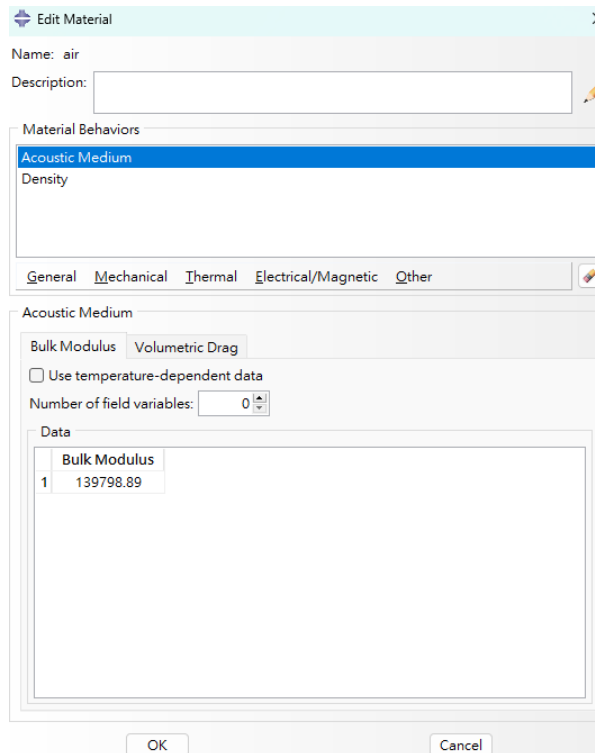


圖 6-2 空氣需設定參數

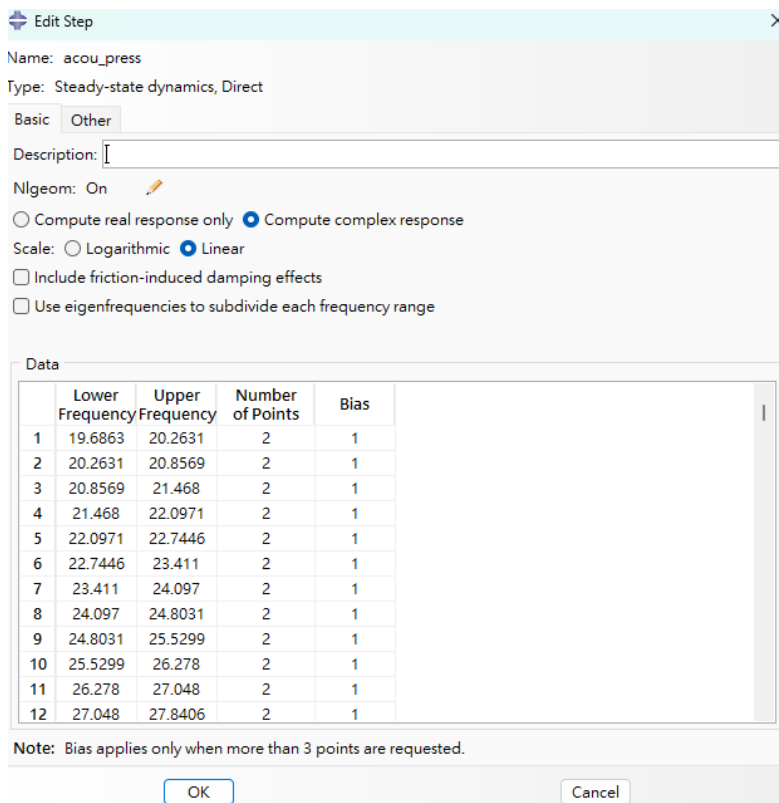
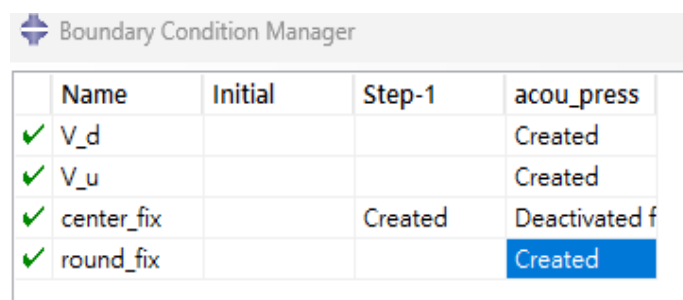


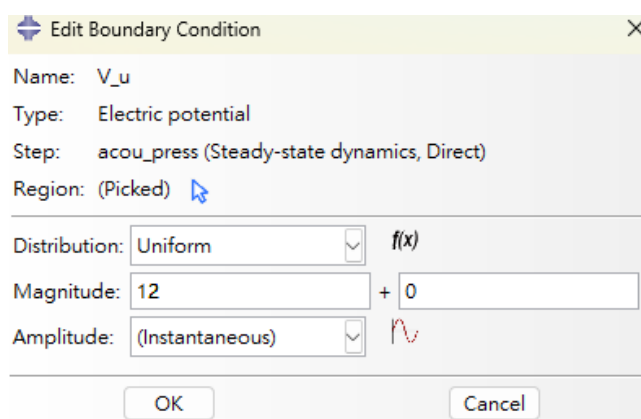
圖 6-3 Steady-state dynamics 設定



	Name	Initial	Step-1	acou_press
✓	V_d			Created
✓	V_u			Created
✓	center_fix		Created	Deactivated f
✓	round_fix			Created



圖 6-4 邊界條件設定



Name: V_u
 Type: Electric potential
 Step: acou_press (Steady-state dynamics, Direct)
 Region: (Picked)

Distribution: Uniform $f(x)$
 Magnitude: 12 + 0
 Amplitude: (Instantaneous)

OK Cancel

圖 6-5 電位設定

6.1.2 無限大障板下自由音場實驗量測與數值分析比較

本節將對於無響室的實驗量測結果與有限元素模擬結果進行比較，在此呈現試片 B、F、G、H 的結果，使用確定材料參數之試片來觀察實驗與模擬結果的差異，結果如圖 6-6 至圖 6-9 所示，圖中由上至下分別為模擬與實驗量測比較(上)；無響室所量測到的前四個聲壓貢獻較大的峰值及其模態、高頻聲壓貢獻較大的峰值及其模態(中)；模擬出的前四個聲壓貢獻較大的峰值及其模態、高頻聲壓貢獻較大的峰值及其模態(下)。其中在實驗量測的峰值部分，如果在小範圍區間段內有多個峰值則會取 SPL 高於 40dB 的來做為峰值，因 40dB 為在一般安靜的情況下人耳所可聽到的音量。模擬上所設定的電壓為 24Vpp，換算成無響室所需設定為 8.48Vrms，以此數值來對試片進行電致動的量測。

由於無響室的最低截止頻率為 80Hz，因此在 80Hz 以下的頻段所量測出的數值主要為雜訊組成，在分析上不考慮此區間，但為了配合模擬是以 20 至 20000Hz



的人耳聽力範圍作為分析，因此結果呈現上仍會以 20Hz 作為起始頻率點。首先在試片 B 的自製薄膜部分，可以看到其在模擬上所得到的峰值，都可在實驗量測中得到相對應的峰值，也就是兩者的 SPL 曲線趨勢接近；而有些峰值在模擬中並沒有出現，尤其在中低頻的部分（ $<2000\text{Hz}$ ）更為明顯，推測有以下原因，首先，由於此試片在低頻的失真率較高，如圖 6-10 所示，可以看到除了一些峰值之外的失真皆在 60% 以上，代表輸入訊號與輸出訊號間有極大的不同，使其無法展現應有的聲音特性，而推測造成失真的原因之一為本身的幾何尺寸設計，由於尺寸設計過小導致各個共振頻率較為接近，使得在聲學上互相受影響導致失真，另一個原因為試片上的繃膜有鬆脫的現象，使其無法完整的展現該頻率所具有的特性；第二個峰值不同的原因為壓電模型模擬所造成的問題，也就是本來因薄膜的特性會產生較大貢獻的聲壓頻段，因其考量了壓電剛性的關係使用平板模型，使得這些頻段消失，此部分也可以從試片 F、G、H 的結果得到證實，當膜厚越厚時，其造成的剛性效應更為明顯，就會使得低頻段的許多本該會造成聲壓貢獻的峰值消失。此外，從結果圖也可再次驗證第五章中所發現的現象，也就是壓電模型模擬結果與實驗量測相比會有低估共振頻率的問題，而共振頻率會影響到聲壓的峰值分佈。

而在試片 F、G、H 的部份，其失真率如圖 6-11 至圖 6-13 所示，三者相比以試片 B 來說，整體失真的區間減少許多，驗證了市售薄膜本身質地較硬且平整，不易因繃膜製程的人為問題導致失真。但在觀察四個試片後皆可看到在第一個峰值以前都是失真率極大的情況，主要原因除了其本身幾何構造的限制外，壓電薄膜本身的致振力較弱也是極大的因素，其壓電性相較於壓電陶瓷來說較弱，因此在低頻的發揮會受到限制，導致無法完整展現低頻段的聲壓。此外除前一段提到過的低頻段峰值消失的問題外，試片 F、G、H 整體的聲壓值與自製薄膜試片 B 相比，明顯又更低許多，這部分原因推測也是由於其剛性效應造成，即市售薄膜本身剛性就較大加上厚度的效應使模擬時聲壓變得更低，但出現的峰值仍能對應上實際量測結果。



接著在高頻區段中，四種試片在特定頻段附近皆有出現峰值，且其所貢獻的聲壓為量測區間 20-20000Hz 中最為顯著的，因此會觀察此頻段下所造成聲壓貢獻的模態。從量測的結果可以發現模態雖然都是呈現較為破碎狀的振形，但仍可觀察出中心區域有較多同相的振動產生，也就是對聲壓貢獻較大的機制，同時也可推論薄膜的振動特性對於高頻的影響相較於低頻較為顯著。

然而，雖然圖中列出的模擬峰值是可以對應上實驗的情況，但在峰值下的膜態卻未必有完全對應實驗量測的情況，實驗中可發現大多聲壓貢獻還是會由較多的節圓模態或是同相振動較多的模態來貢獻，但在模擬上貢獻聲壓的區域仍是節線較多的模態，推測原因也是壓電薄板在節線較多的模態對於聲壓仍是有很大的影響。

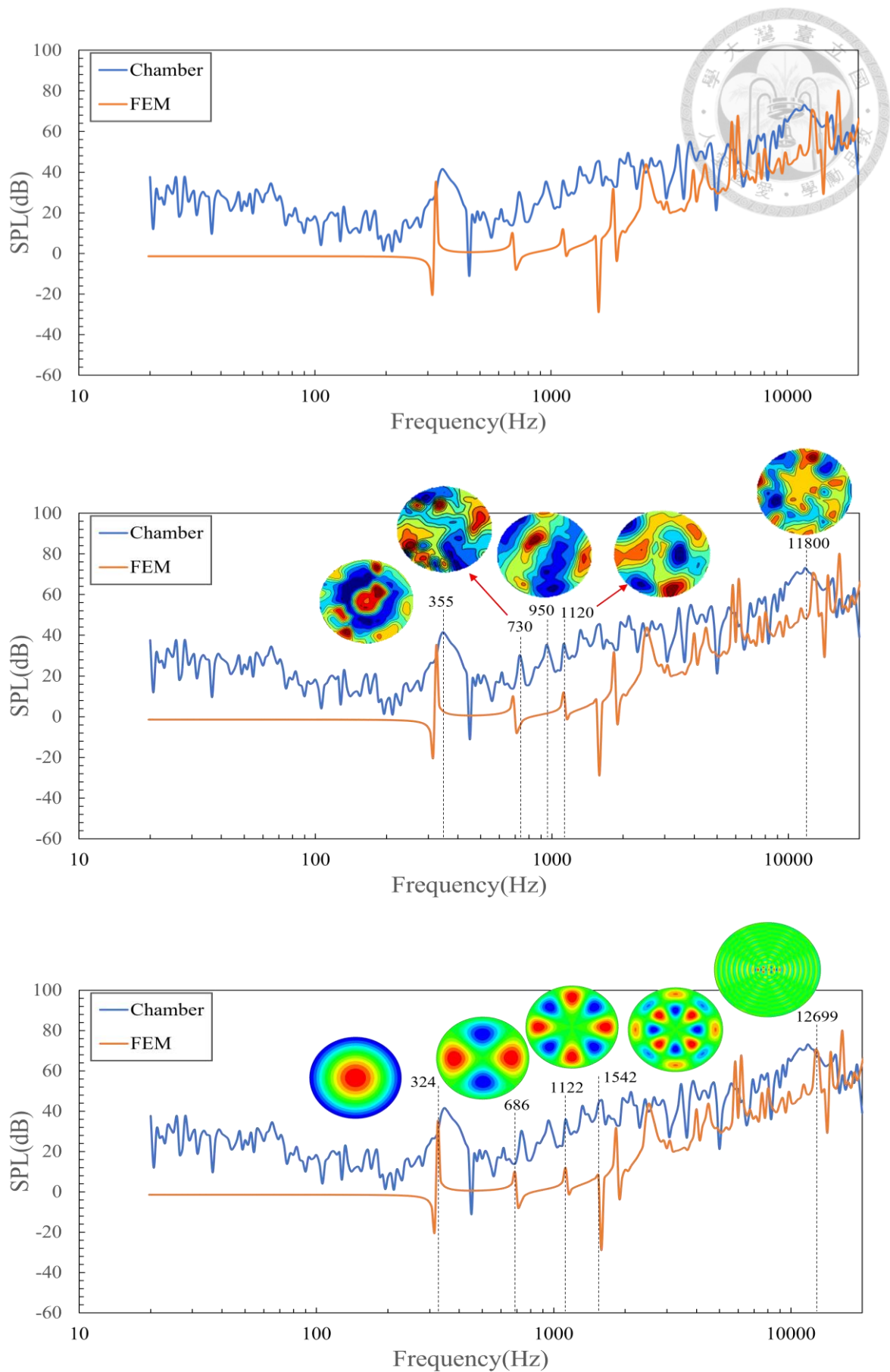


圖 6-6 試片 B，自由音場實驗量測與數值分析圖

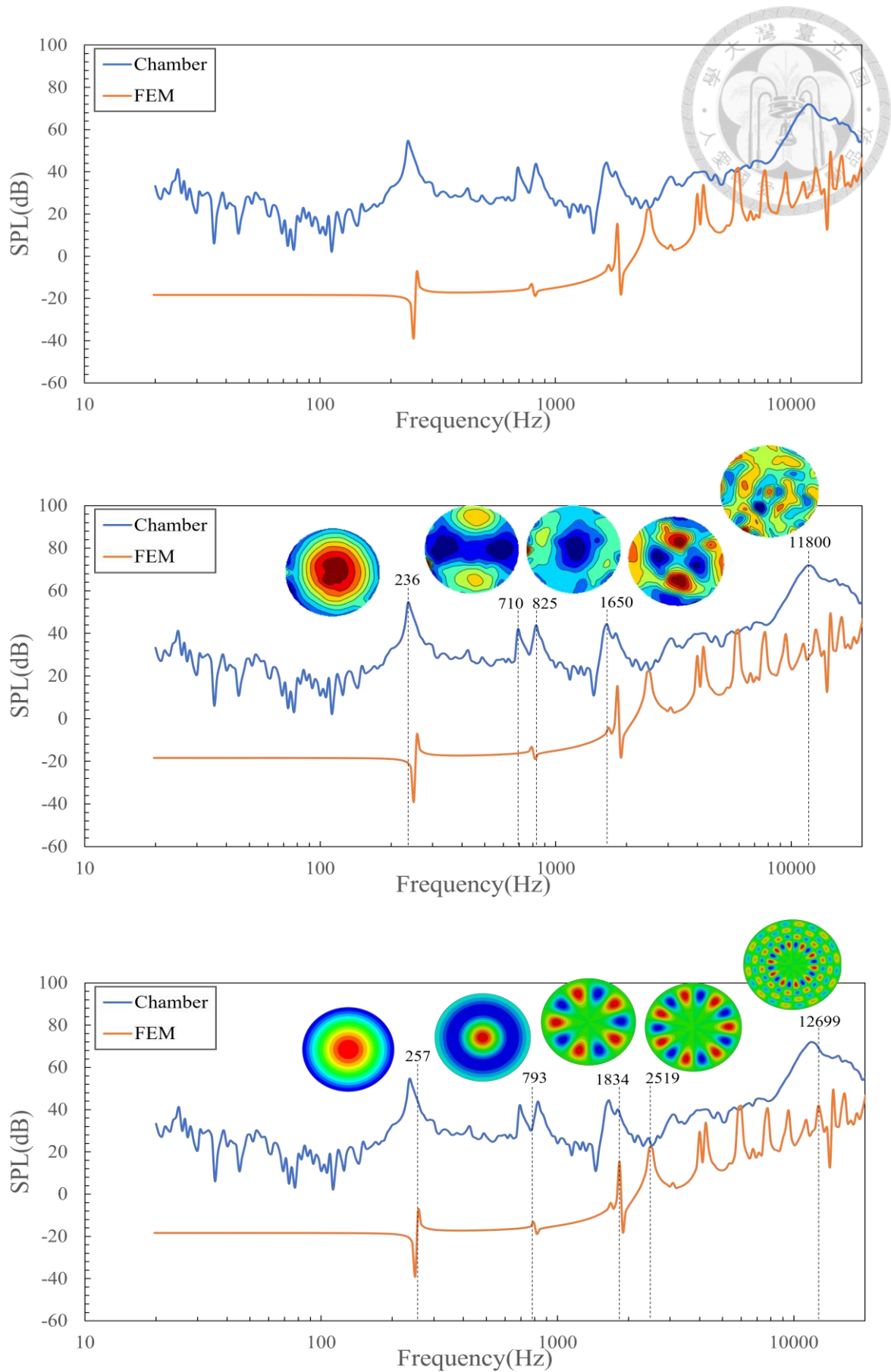


圖 6-7 試片 F，自由音場實驗量測與數值分析圖

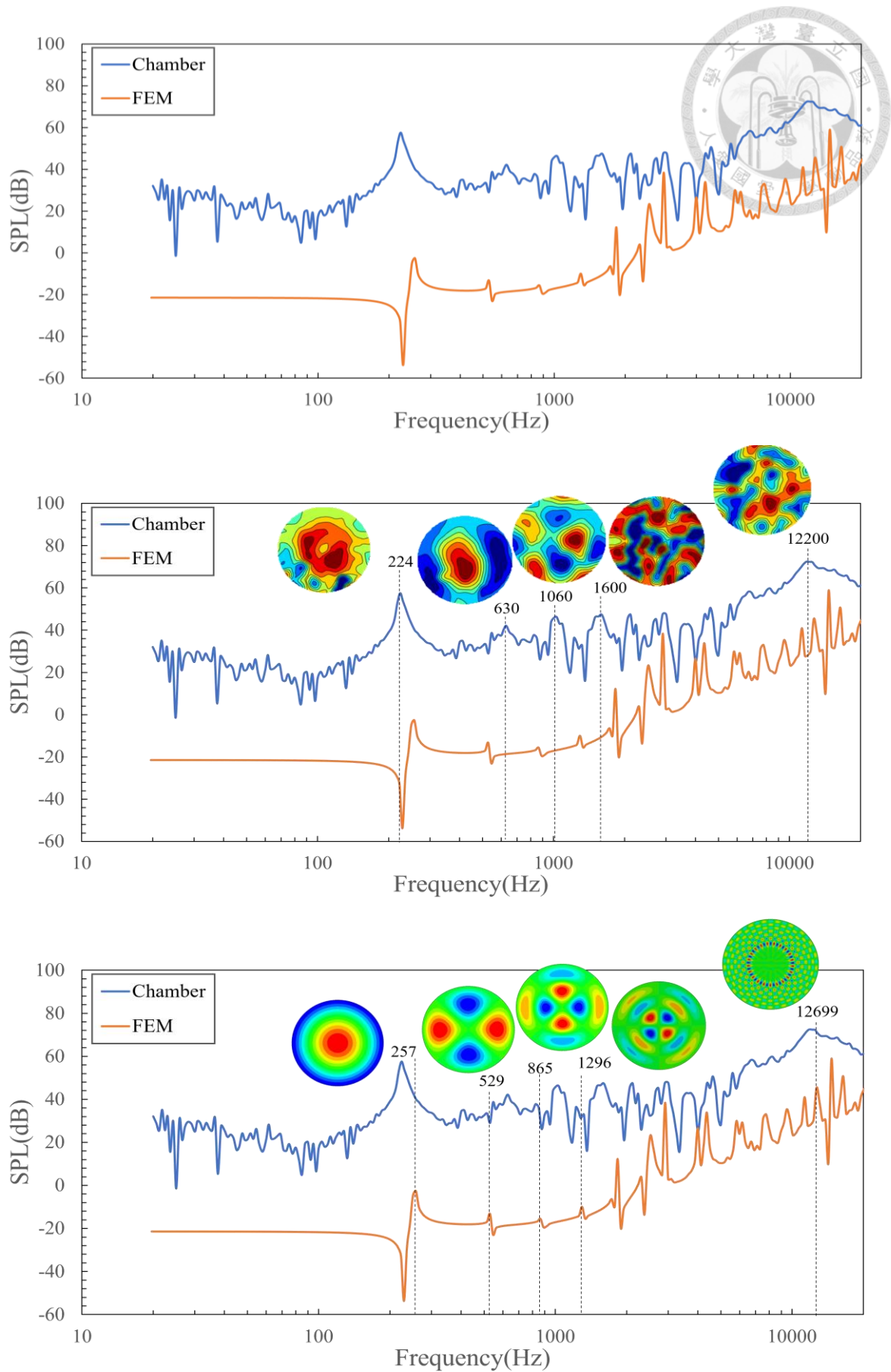


圖 6-8 試片 G，自由音場實驗量測與數值分析圖

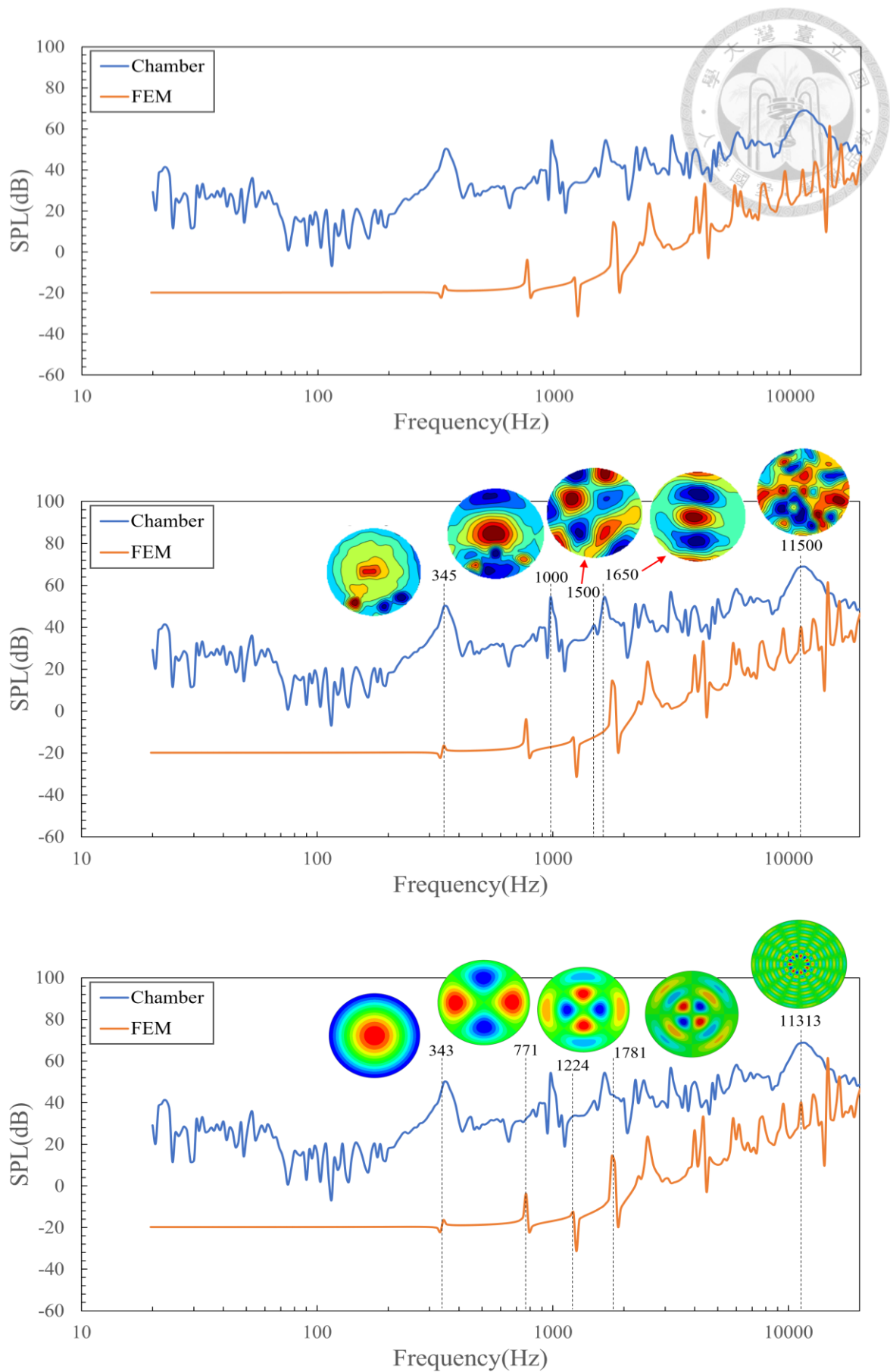


圖 6-9 試片 H，自由音場實驗量測與數值分析圖

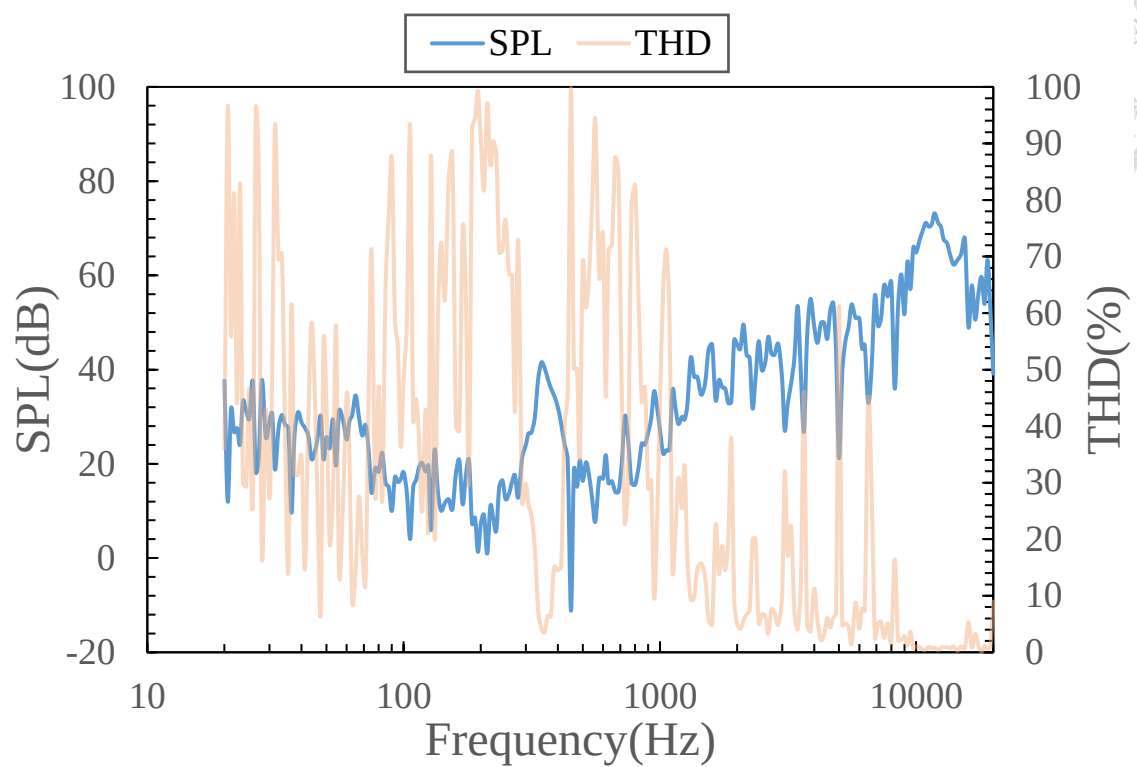


圖 6-10 試片 B，失真率 (THD)

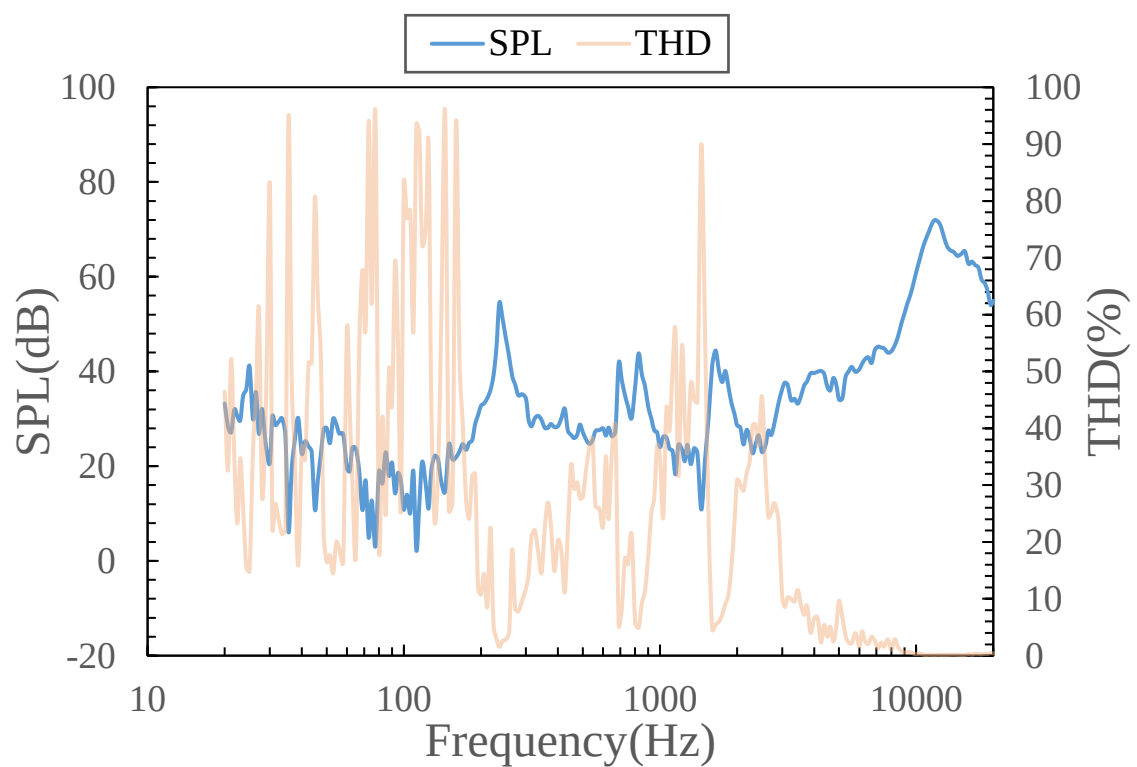


圖 6-11 試片 F，失真率 (THD)

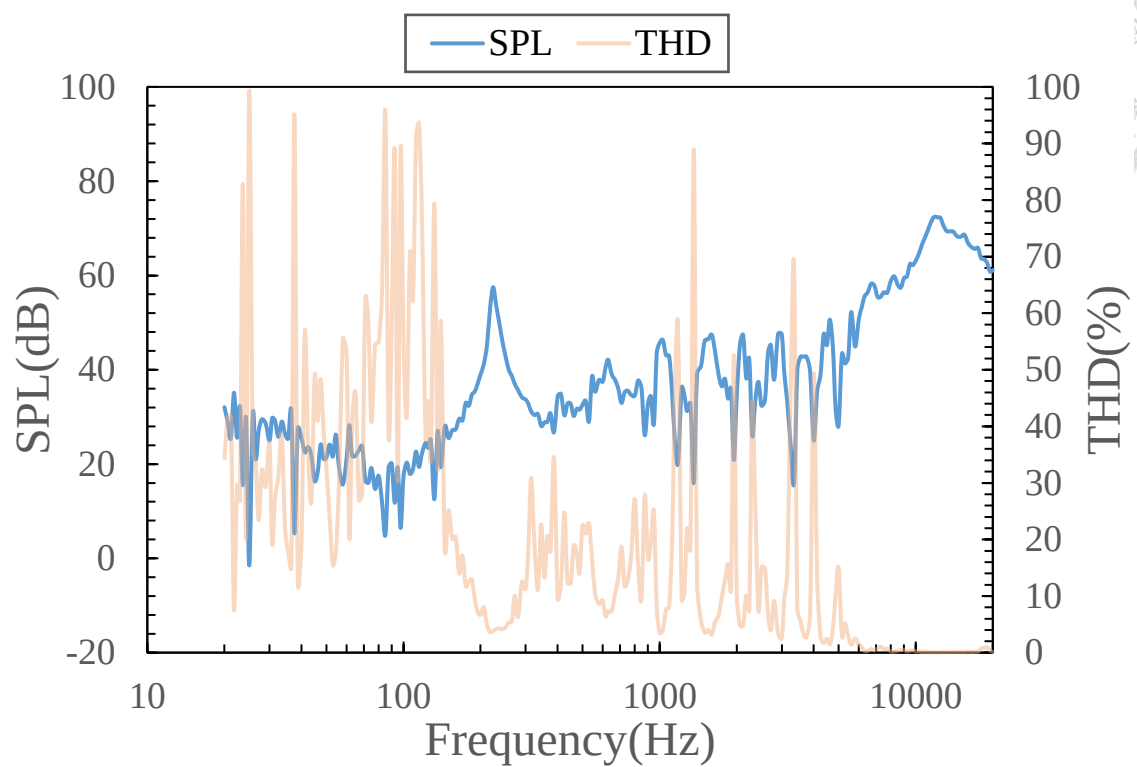


圖 6-12 試片 G，失真率 (THD)

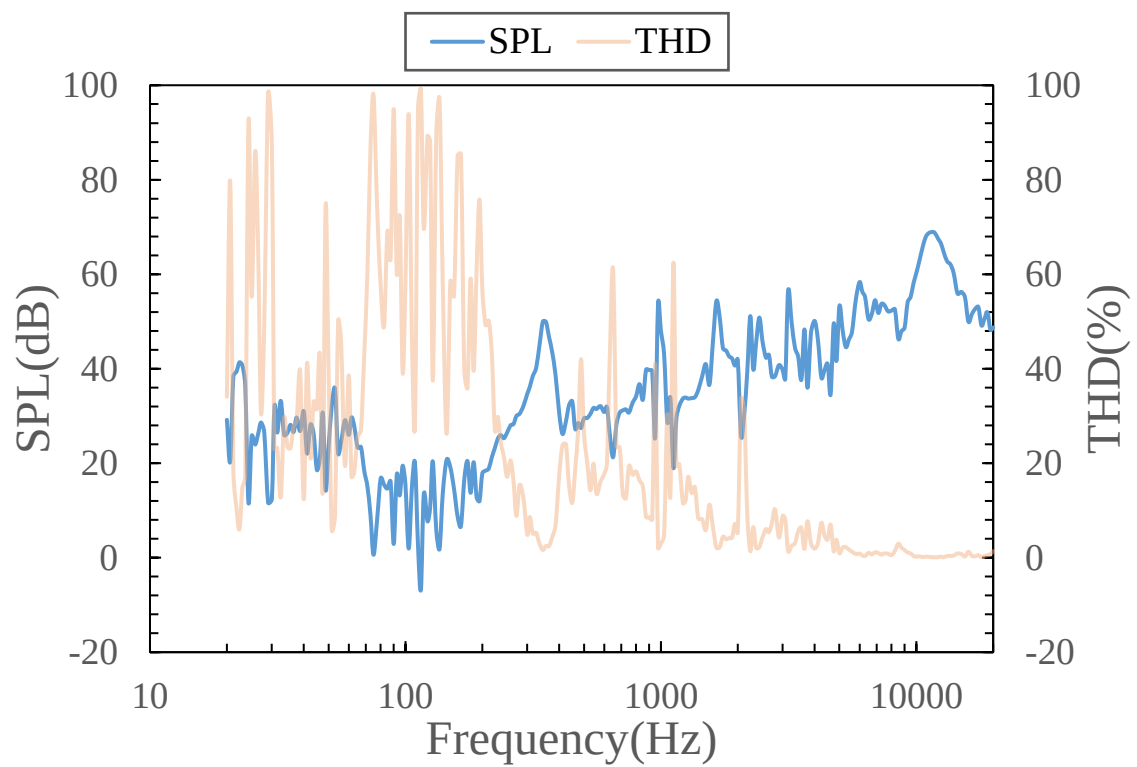


圖 6-13 試片 H，失真率 (THD)



6.1.3 各不同試片聲學特性比較

分析完模擬與實驗的差異後，本節將以實驗量測結果所觀察到的現象討論各種不同試片間的特性比較，分別有不同膜厚的自製薄膜比較 (A、B、C)，不同 d_{33} 量值 (B、D)，不同繃膜平整度 (B、E)，自製薄膜與市售薄膜 (A、F、G)。以下依序針對這四種條件的比較進行說明。

不同膜厚自製薄膜比較

以試片 A ($19\ \mu\text{m}$)、B ($12.85\ \mu\text{m}$)、C ($11\ \mu\text{m}$) 來做分析，如圖 6-14 的比較結果，其低頻部分 ($<1000\text{Hz}$) 特別是第一共振頻前，因失真率較高，故較難進行討論，到了中高頻後整體頻響趨勢呈現相互對應的結果，而在 $12.85\ \mu\text{m}$ 和 $11\ \mu\text{m}$ 兩者比較上並無發現隨厚度不同產生明顯差異之處，推測膜厚區間較為接近 (僅相差 $2\ \mu\text{m}$)，動態特性無太大差異，但將厚度增加到 $19\ \mu\text{m}$ ，也就是膜厚接近 2 倍時，整體 SPL 平滑度和低頻的聲壓大小皆有提升，由此可知，當膜厚顯著增厚時，其對於低頻的聲壓會有些微增強的作用，且可使中高頻的聲壓區間縮小，聽感上較不會出現忽大忽小聲的情況。

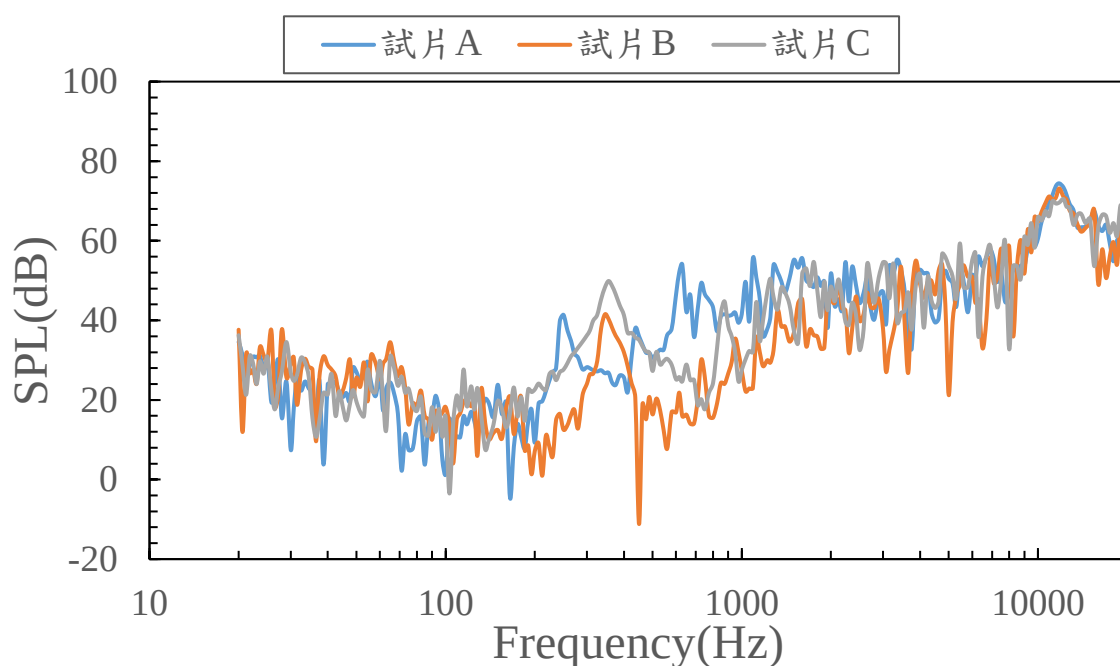


圖 6-14 不同膜厚 Chamber 量測比較圖



不同 d_{33} 量值比較

如圖 6-15 所示的比較結果，兩種不同 d_{33} 之自製薄膜在低頻時聲壓上有些微差異，但因低頻會受失真率的影響很大，因此較難評斷是否為 d_{33} 所引起，而中高频的部分則是並無明顯之差異，整體失真率較小的峰值皆在 40-60dB 的範圍內，此外由於 d_{33} 較小的試片 D 是以 ITO 玻璃為基材所製作而成，也因此可能發生即使同一膜厚的情況下，但材料性質大不相同，造成聲壓上的趨勢不同。

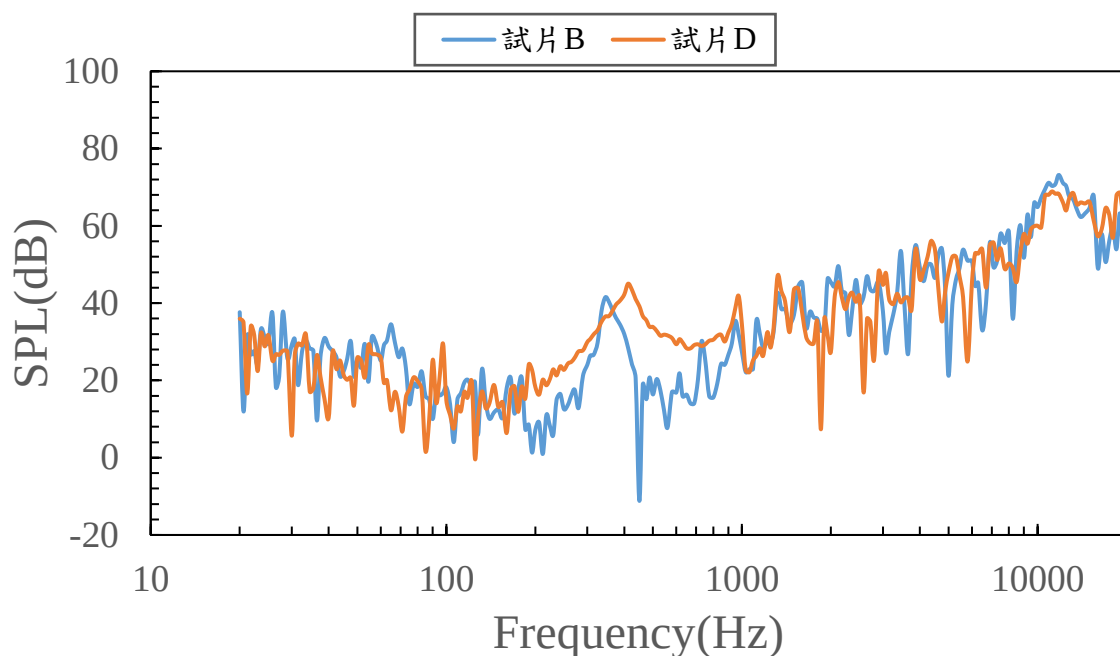


圖 6-15 不同 d_{33} Chamber 量測比較圖

不同繃膜平整度於自製薄膜比較

由於市售薄膜無繃膜不平整問題，因此取用自製之薄膜做為此比較的依據，如圖 6-16 所示，可以發現繃膜不平整的試片 E 在整體聲壓上反而有略高的趨勢，此情況與繃膜平整則可以展現好的模態振形並使得聲壓較為平滑的情形相異，推測此現象與失真率有關，試片 E 的失真情況如圖 6-17 所示，可以看到繃膜不平整的情況下，其從低頻到高频都呈現極高失真率，而推測是由於不平整使得試片在掃頻量測過程中，當從一個頻率點進入下個頻率量測點後，試片因不平整而區分為各個不同小區域，使得雖掃頻至下個數據點，但仍有一些區域停留在前筆頻率的特性而有延遲的現象，讓其顯現出高失真特性外，也因為這些不和諧的頻段，使聲壓有所提高。

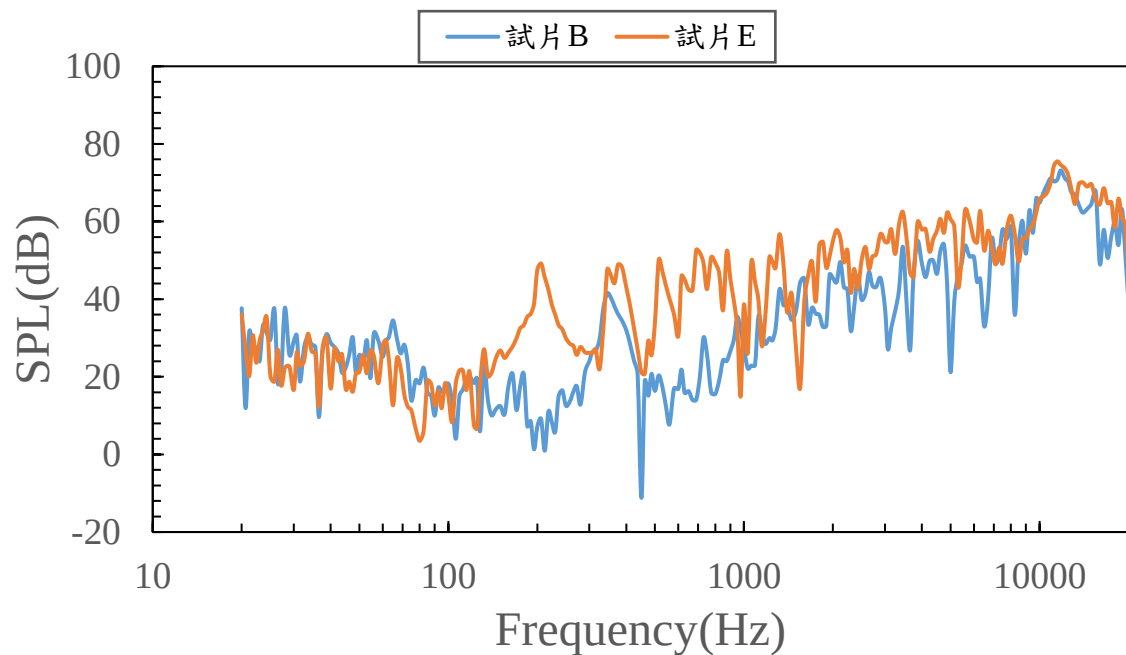


圖 6-16 不同繃膜平整度 Chamber 量測比較圖

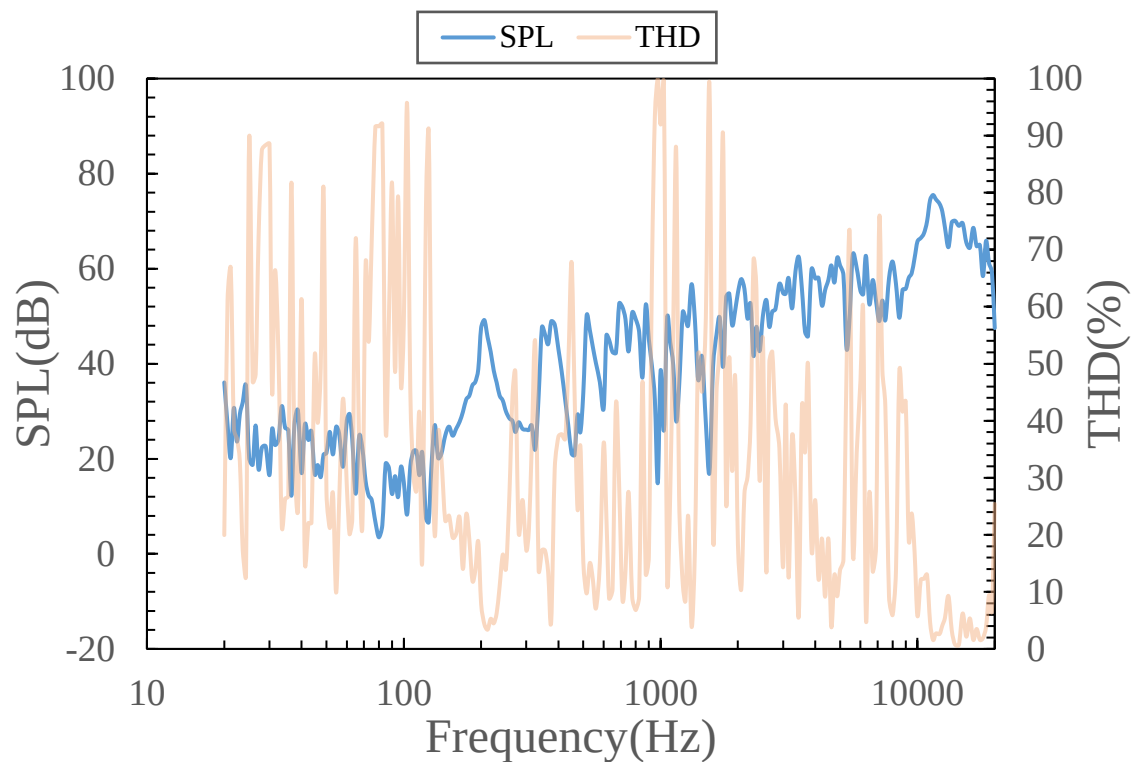


圖 6-17 試片 E，失真率（THD）

自製薄膜與市售薄膜比較

接著進入與市售薄膜的比較，這也是本論文研究關注的重點，觀察自製的薄膜與市售的相比是否具有更優良特點及優勢，在此選用自製試片中曲線最為平滑且膜厚較接近市售薄膜的試片 A 來進行比較，結果如圖 6-18 所示，試片 A 雖然在低頻部分，尤其是第一個峰值前對聲壓的貢獻較差，但整體的頻響曲線平滑度與均勻性高於市售兩種厚度之薄膜，其在中高頻的表現上更是明顯，除極高頻的頻段外（>12000Hz），此區間的 SPL 上下限不易超過 20dB，在聽感上較不會出現聲音忽大忽小的問題。

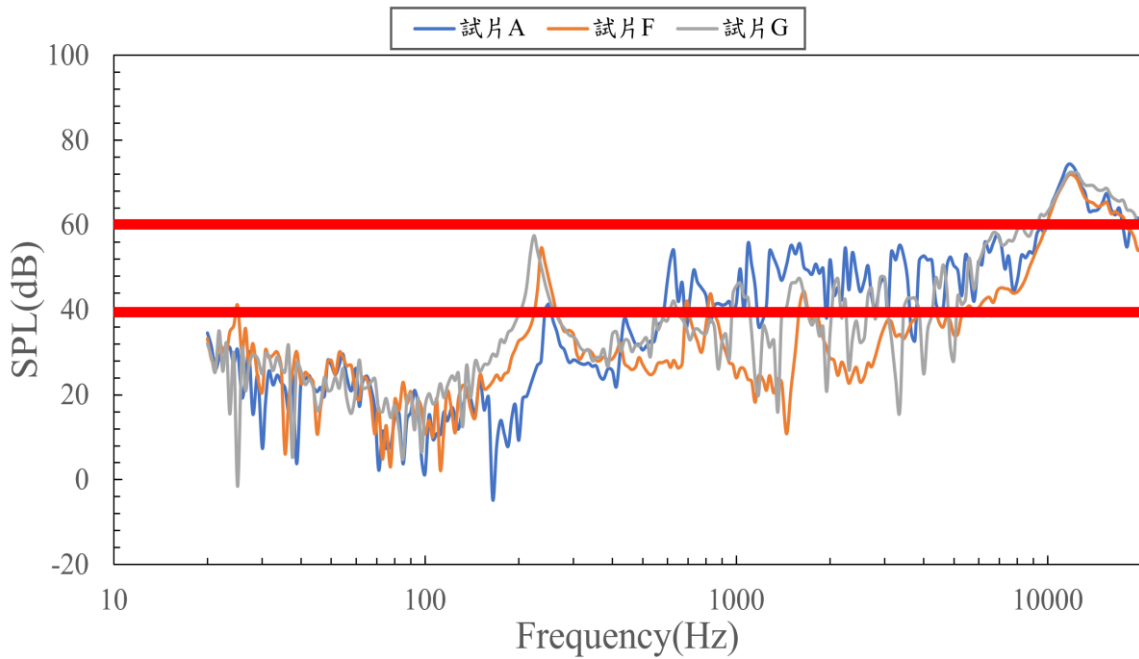


圖 6-18 自製與市售薄膜試片 Chamber 量測比較圖

6.1.4 驅動電壓對於 SPL 影響

本節將探討試片的輸入電壓大小對於 SPL 曲線所造成的影響，藉此預測後續如欲進一步發展至商用品時可能會有的線性度特性，而參考文獻[37][58]，於無限大障板下的情況時，可得聲壓與體積速度關係式，如(6-1)式所示：

$$p(r) = j\omega\rho_0 U \frac{e^{-jkr}}{2\pi r} \quad (6-1)$$

其中 p 為聲壓； U 為體積速度； r 為聲源與量測點的距離

而 U 與空氣粒子運動速度 u 成正比，且由壓電本構方程可知施加的電場 E 與壓電振動的位移成正比，綜合兩者可得 $p \propto E$ 。而 SPL 的計算是透過以下公式：

$$SPL = 20 \log\left(\frac{p_e}{p_{ref}}\right) \quad (6-2)$$

其中 $p_{ref} = 2 \times 10^{-5}$ Pa 是空氣的參考聲壓(Reference Sound Pressure)； p_e 為有效聲壓(effective sound pressure)，其計算方式如下：

$$p_e = \frac{|p(r)|}{\sqrt{2}} \quad (6-3)$$



因此可推論當將壓電試片的輸入電壓提高為兩倍時，其 SPL 會增加約 6dB，透過此結論來觀察試片在模擬與實驗是否皆產生此現象。輸入電壓的設定上以 8.48Vrms、4.24Vrms、2.12Vrm 來進行觀察，以下先列出繃膜平整之試片 A、B、C、F、G 的模擬與實驗結果（A、C 僅實驗），如圖 6-19 至圖 6-22 所示，可以看到模擬結果的部分聲壓隨電壓變大呈現向上平移的趨勢，而平移的量值符合所推論的 6dB 大小；而在實驗量測結果的部分由於每個頻段或多或少具有失真的效應，也因此非峰值，也就是失真大的區域，整體平移量值有些並不會差異 6dB 的量值，但在峰值的低失真區域，整體也呈現差距 6dB 的現象，與理論符合。接著考量繃膜不平整試片改變電壓後的情況，由於繃膜不平整的情況較難以透過模擬呈現，因此這邊就實驗結果討論，如圖 6-23 所示，可以發現在峰值失真小的區域，整體也呈現差距 6dB 的現象，但在失真率高的頻段聲壓的差異比於繃膜平整的試片來得更大，呼應了本節提到的繃膜平整度對於聲壓的影響性。

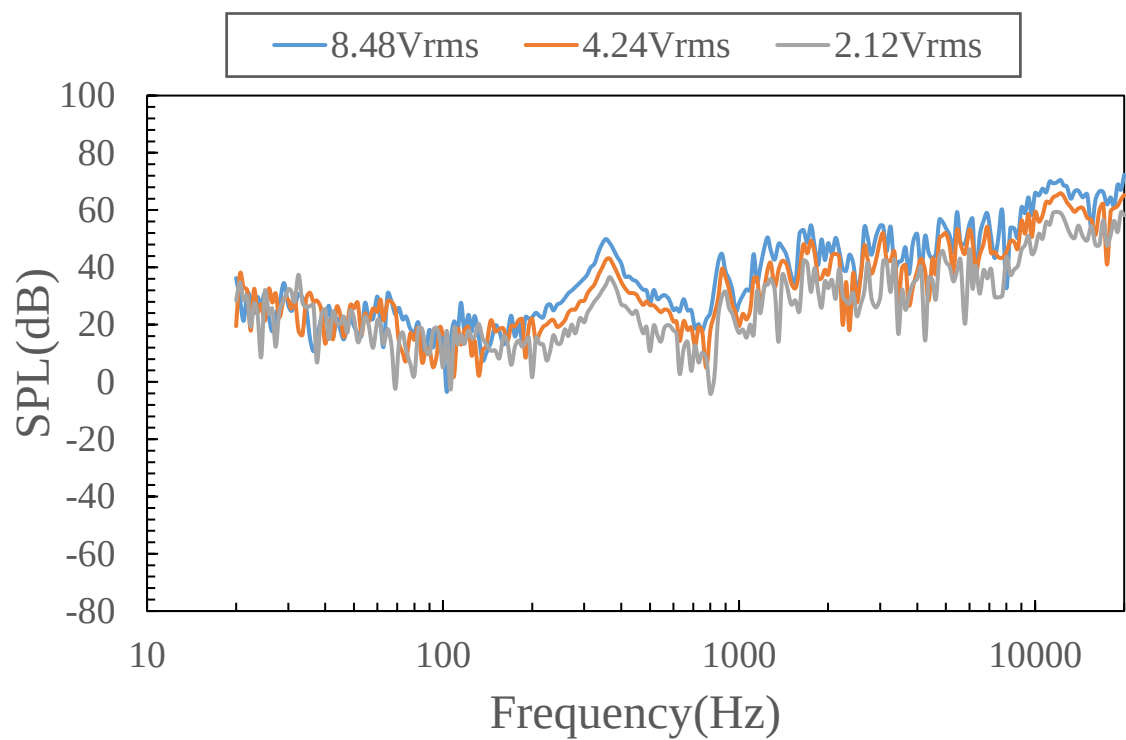
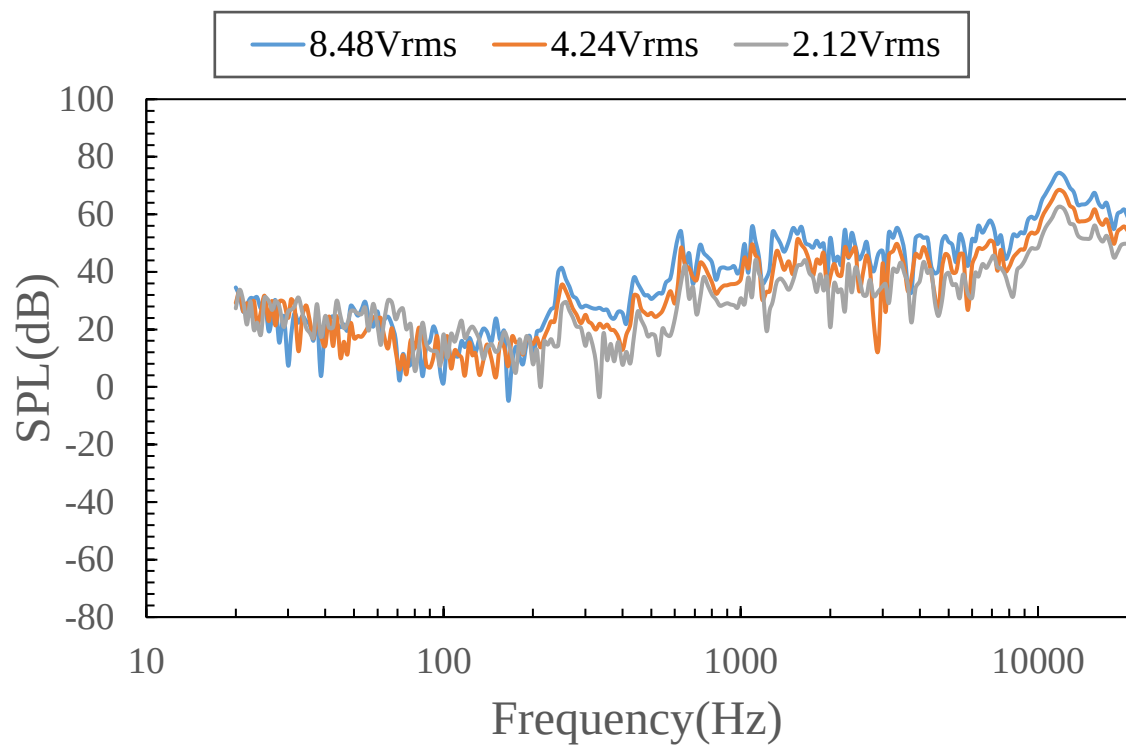


圖 6-19 試片 A(上)、試片 C(下)，實驗改變電壓之 SPL 結果圖

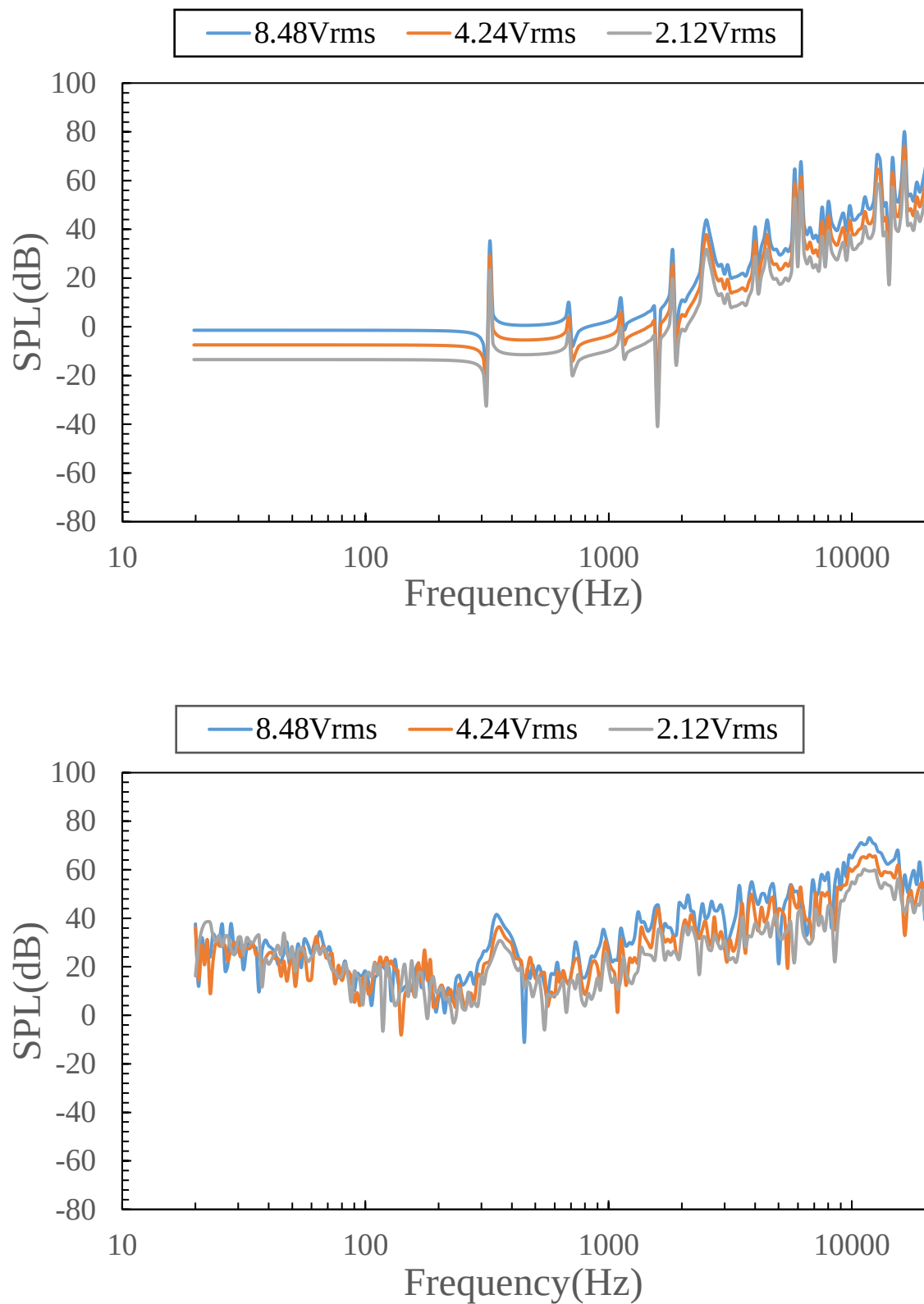


圖 6-20 試片 B，模擬(上)與實驗(下)改變電壓之 SPL 結果圖

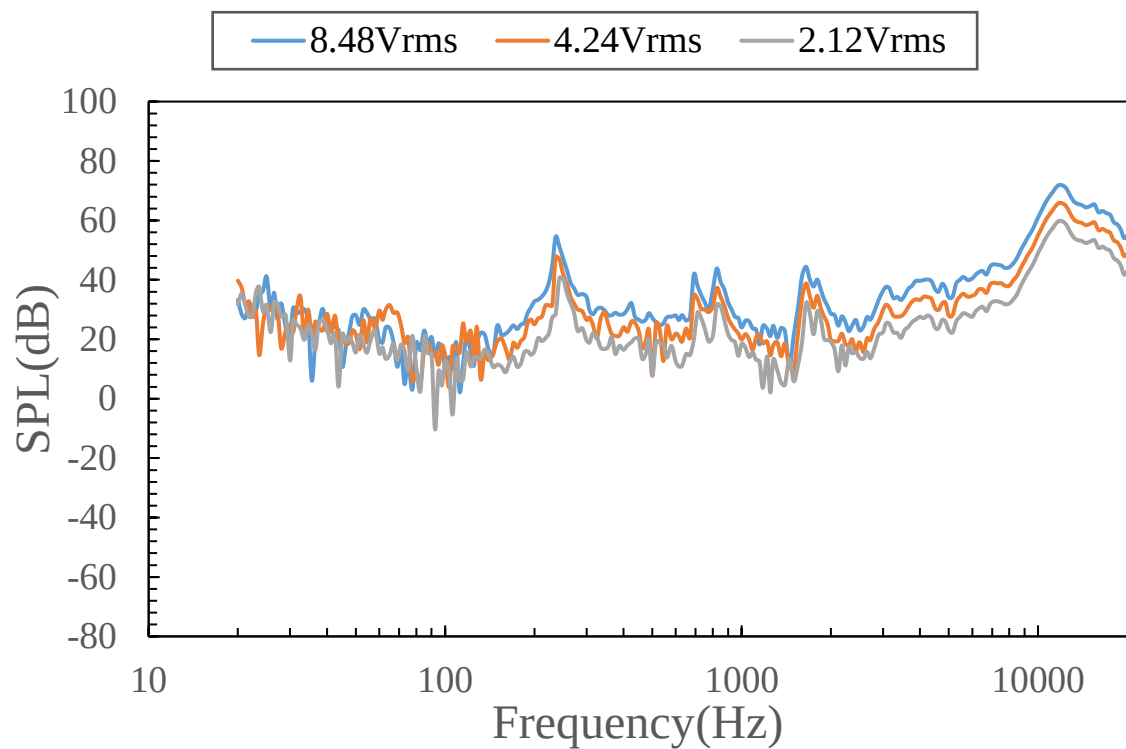
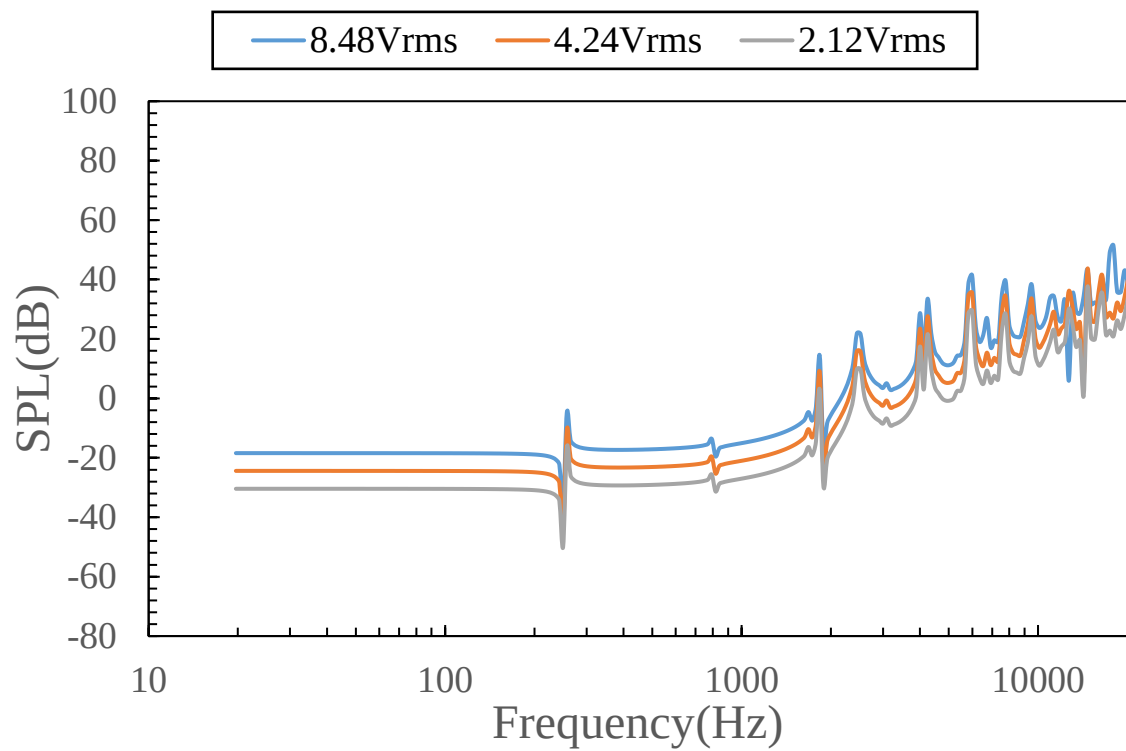


圖 6-21 試片 F，模擬(上)與實驗(下)改變電壓之 SPL 結果圖

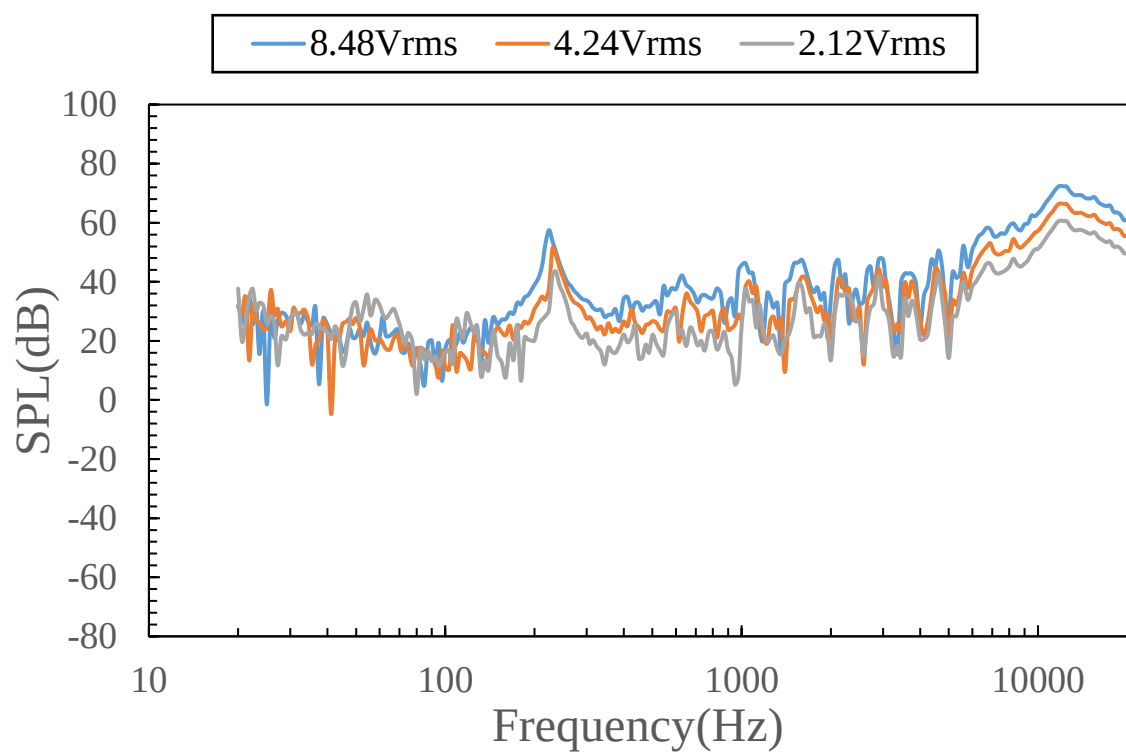
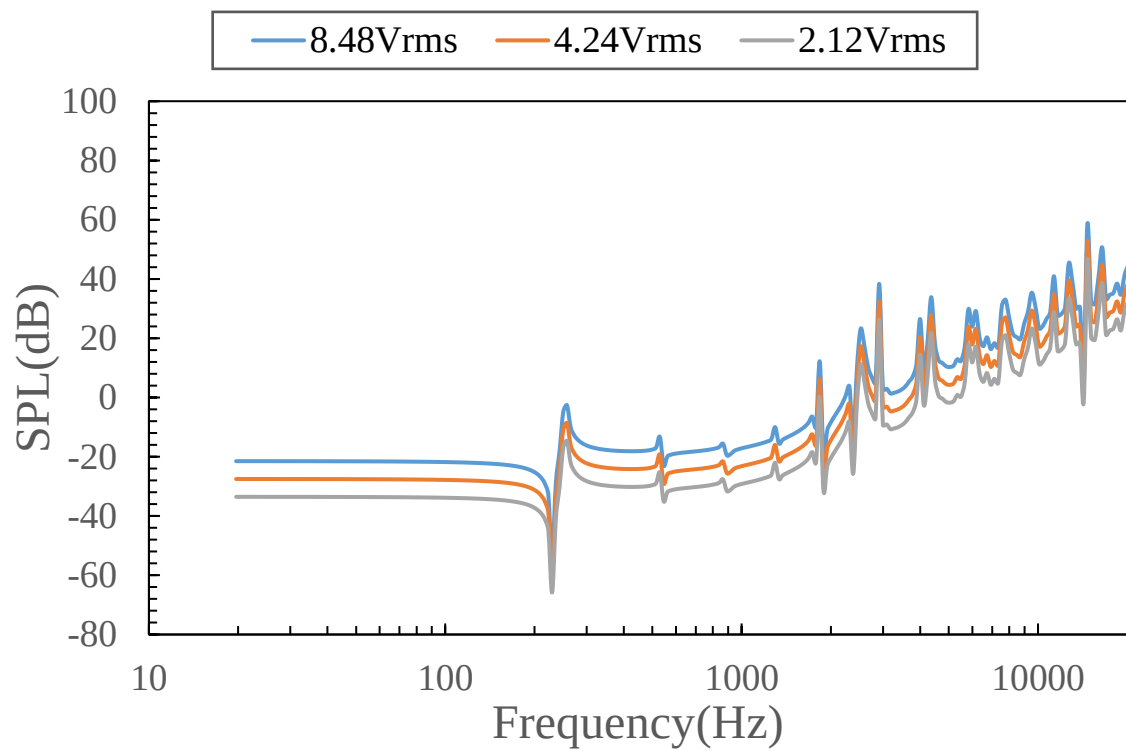


圖 6-22 試片 G，模擬(上)與實驗(下)改變電壓之 SPL 結果圖

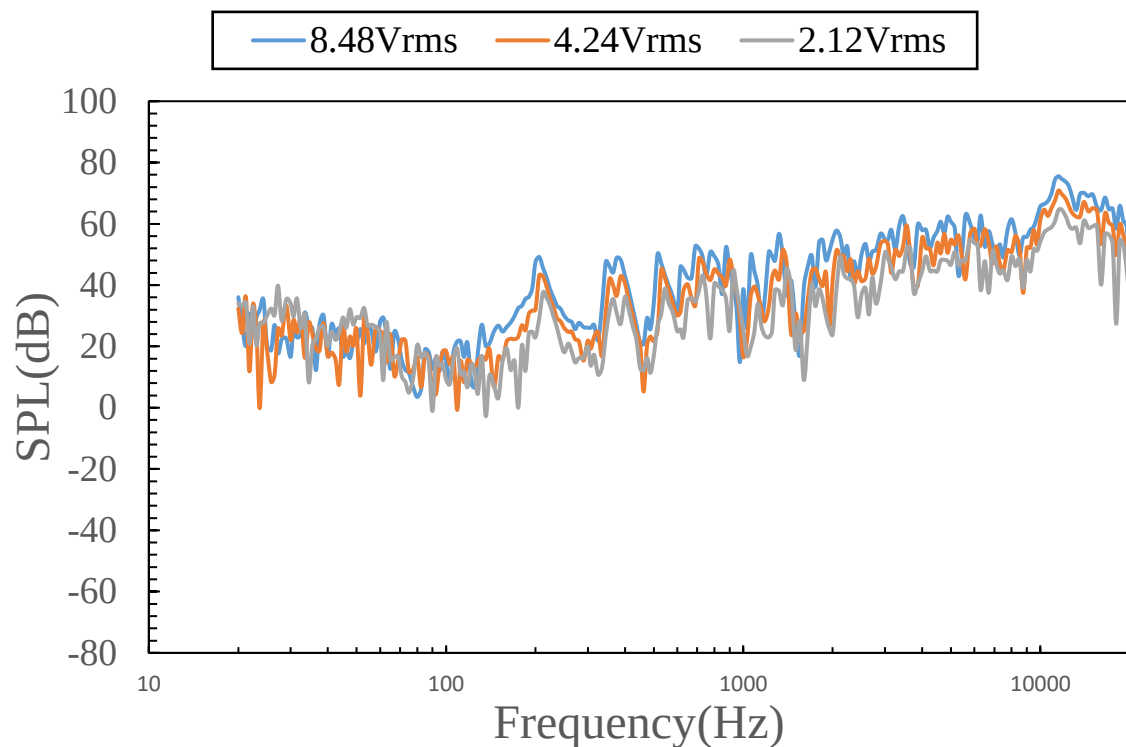


圖 6-23 試片 E，實驗量測改變電壓之 SPL 結果圖

6.2 封閉音場之聲學特性分析

分析完自由聲場的結果後，可以發現雖整體聲壓偏低，但中高频失真率低，表現較好的部分整體都在 40-80dB 間，以人在一般聊天交談的音量大小約 60dB 來說，作為發聲單體來說聲音大小偏低，說明其在開放式空間的音效不具優勢，也就是不適合做為用於自由音場的喇叭發聲單體元件。因此，本節將對於其在封閉音場的情況中進行分析，也就是觀察作為耳機這類發聲單體的潛力。

6.2.1 封閉音場之實驗量測

本節以人工耳實驗量測結果觀察到的現象，對於各個不同試片間的討論比較，分別有不同膜厚自製薄膜比較 (A、B、C)，不同 d_{33} 量值的比較 (B、D)，不同繃膜平整度的比較 (B、E)，自製與市售薄膜比較 (A、F、G)，以下依序對四種比較來進行說明。所設定的驅動電壓考量實際耳機通常不需要像喇叭等用於自由音場的情況來的那麼高，因此設定為 2.12Vrms 進行實驗量測，給定 1/24 八音帶的 20 至 20000Hz 掃頻訊號掃頻，但由於人工耳的最低截止頻率為 100Hz，因此在 100Hz



以下的頻段所量測出的數值主要為雜訊組成，在分析上不考慮此區間，然而因為聲學元件的設計理念為希望在人耳聽力範圍內能有好的聽感，故在結果上仍會以 20 至 20000Hz 呈現。

不同膜厚自製薄膜比較

以試片 A ($19\ \mu\text{m}$)、B ($12.85\ \mu\text{m}$)、C ($11\ \mu\text{m}$) 來做分析，如圖 6-24 所示的比較結果，低頻部分從圖 6-10 得知自由音場的量測第一峰值前失真率高，因此量測的數值可能由雜訊產生，故難以進行比較討論。因此主要分析第一峰值後的數值，三者試片到了大於 2000Hz 的中高頻後整體頻響趨勢上有呈現相互對應的結果，且聲壓範圍都穩定在 60-100dB 間，也就是此頻率區段表現相對穩定，用於耳機元件對人聲的聽感會呈現較好的聽覺效果；而在 2000Hz 以前的聲壓則是於 $19\ \mu\text{m}$ 相較 $12.85\ \mu\text{m}$ 和 $11\ \mu\text{m}$ 兩者來說，聲壓大小有所提升，呼應在自由音場的分析結果， $19\ \mu\text{m}$ 的膜厚同樣在封閉音場上具有好的聲壓表現。

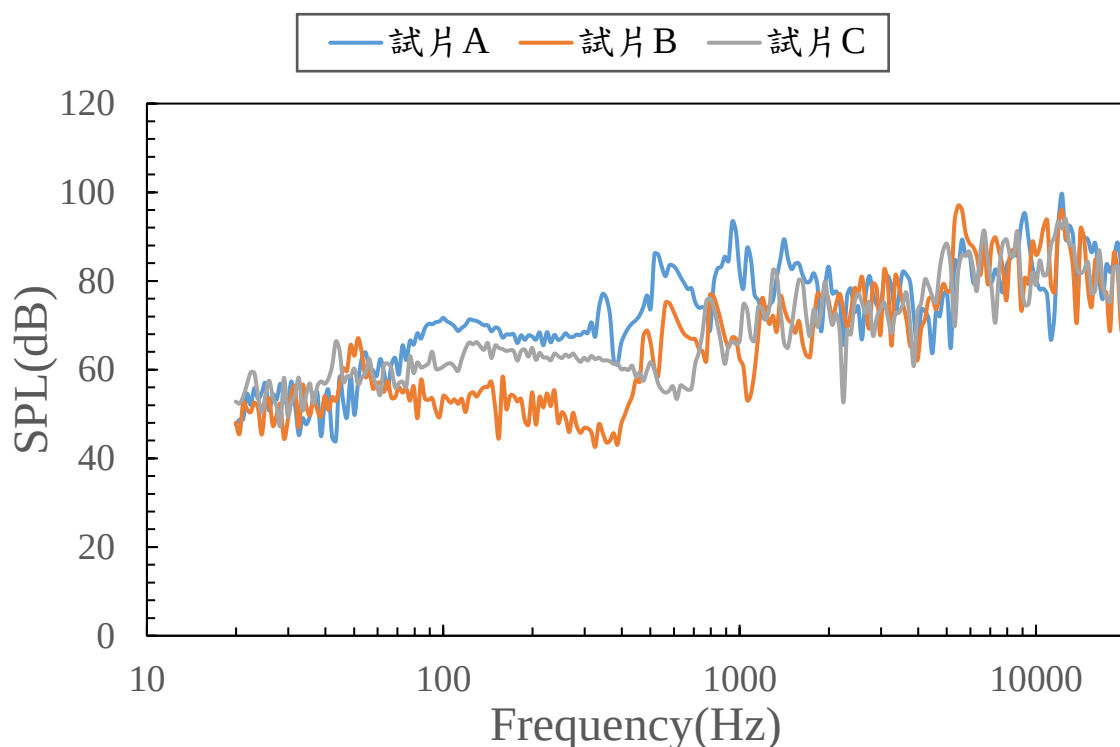


圖 6-24 不同膜厚人工耳量測比較圖

不同 d_{33} 量值自製薄膜比較

如圖 6-25 所示，比較兩不同 d_{33} 量值在第一個峰值後的聲壓分佈情況，可以發現兩者整體曲線平滑度差異不大，但 d_{33} 較大的試片 B 其整體的聲壓略高於試片 D，初步推測 d_{33} 在封閉音場的情況中對於聲音的貢獻有些微影響，但與自由音場時的分析相同，由於 d_{33} 較小的試片 D 是以 ITO 玻璃為基材製作而成，也因此可能即使同一膜厚的情況，但材料性質大不相同，也就是可能影響其聲壓的趨勢來自於製程上的不同。

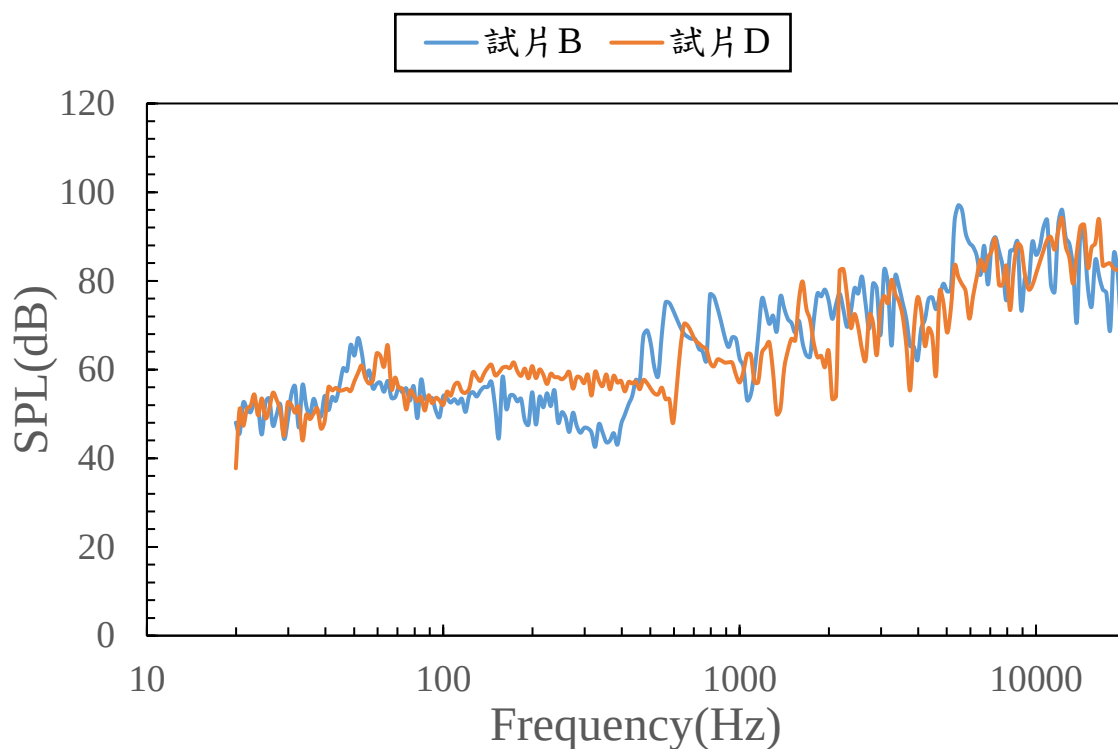


圖 6-25 不同 d_{33} 人工耳量測比較圖

不同繃膜平整度於自製薄膜比較

如圖 6-26 所示，結果與自由音場量測結果類似，可以發現繃膜不平整的試片 E 在整體聲壓上反而有略高的趨勢，此情況與繃膜平整則可以展現好的模態振形並使得聲壓較為平滑的情形相異，推測此現象也是由失真率造成，試片 E 因繃膜不平整故整體失真高，不平整使得試片在掃頻量測過程中，當從一個頻率點進入下個頻率量測點後，試片因不平整而區分為各個不同小區域，使得雖掃頻至下個數據點，但仍有一些區域停留在前筆頻率的特性而有延遲的現象，讓其顯現出高失真特性外，也因為這些不和諧的頻段，使聲壓有所提高。

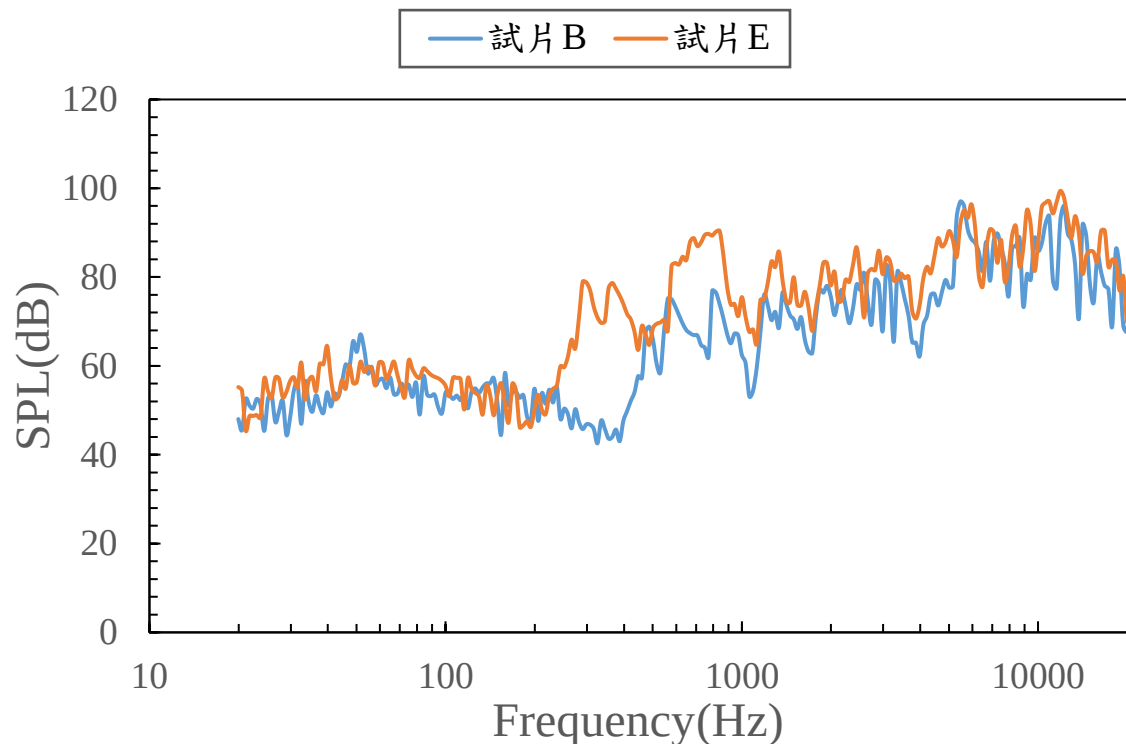


圖 6-26 不同繃膜平整度人工耳量測比較圖



自製與市售薄膜比較

接著進入與市售薄膜的比較，這也是本論文研究關注的重點，觀察自製薄膜與市售的相比在封閉音場中是否具有更優良特點及優勢，在此選用自製試片中平均聲壓最高、聲壓曲線平滑且膜厚較接近市售薄膜的試片 A 來進行比較，結果如圖 6-27 所示，從三種試片的曲線平滑度與均勻度來看，自製薄膜有略優於其餘兩市售薄膜的現象，而三者聲壓上下限的範圍接近，因此可以說本研究開發的自製薄膜可以用更為輕薄和較少製程程序，在封閉音場的部分達到與市售薄膜一樣甚至略優的效果，這點對於未來如進行最佳化設計後的元件，預期可達到與市售品一樣或更好的聲音效果。

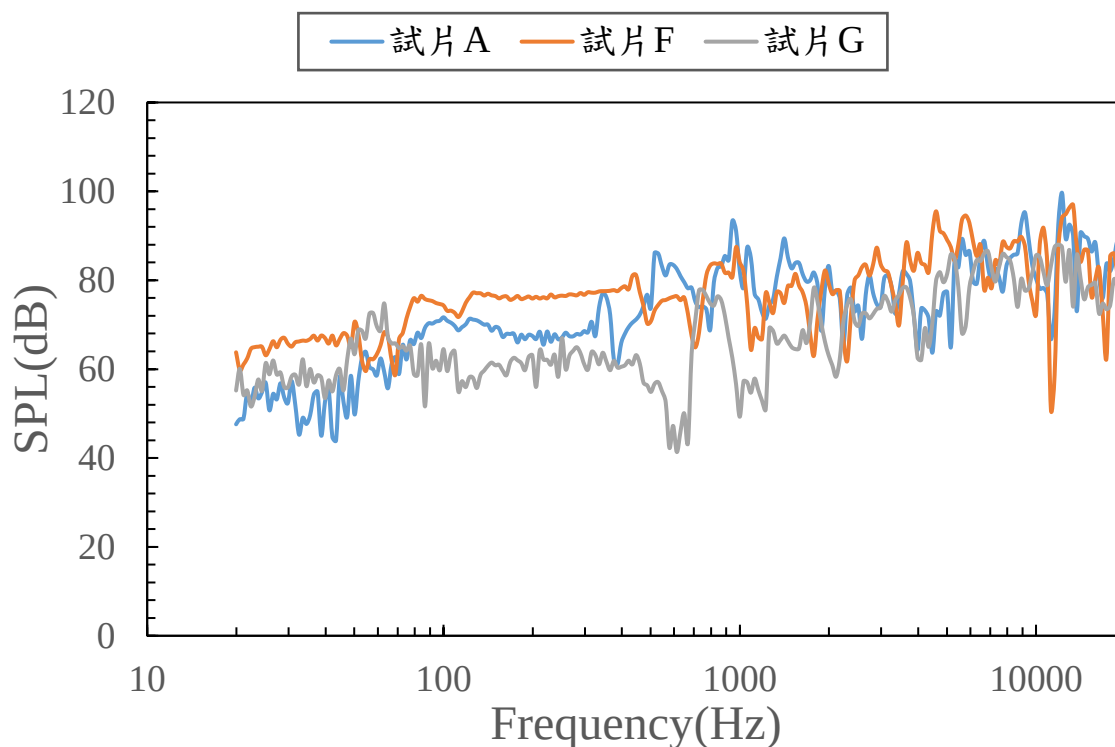


圖 6-27 自製與市售薄膜試片人工耳量測比較圖

6.2.2 類音箱效果量測

本節透過調製人工耳的量測手法，也就是非圖 3-14 的方式，而是改以圖 6-28 以手掌輕壓試片的形式，預其透過類似音箱的效果，觀察整體 SPL 曲線平滑或聲壓值是否有所變化。在此以目前自製薄膜整體 SPL 曲線最好的試片 A，以及市售

薄膜試片 F、G 作為分析試片，其結果如圖 6-29 至圖 6-31 所示，三個試片在 SPL 曲線上都有變平滑和聲壓提升的現象，雖然是以手掌遮擋的方式，但對於未來在設計上發聲元件上仍有啟發的參考價值，也就是若能挑選合適的音箱材料和尺寸大小，即能讓此自製薄膜發揮更加優異的聲音表現。



圖 6-28 人工耳量測(手掌輕壓)

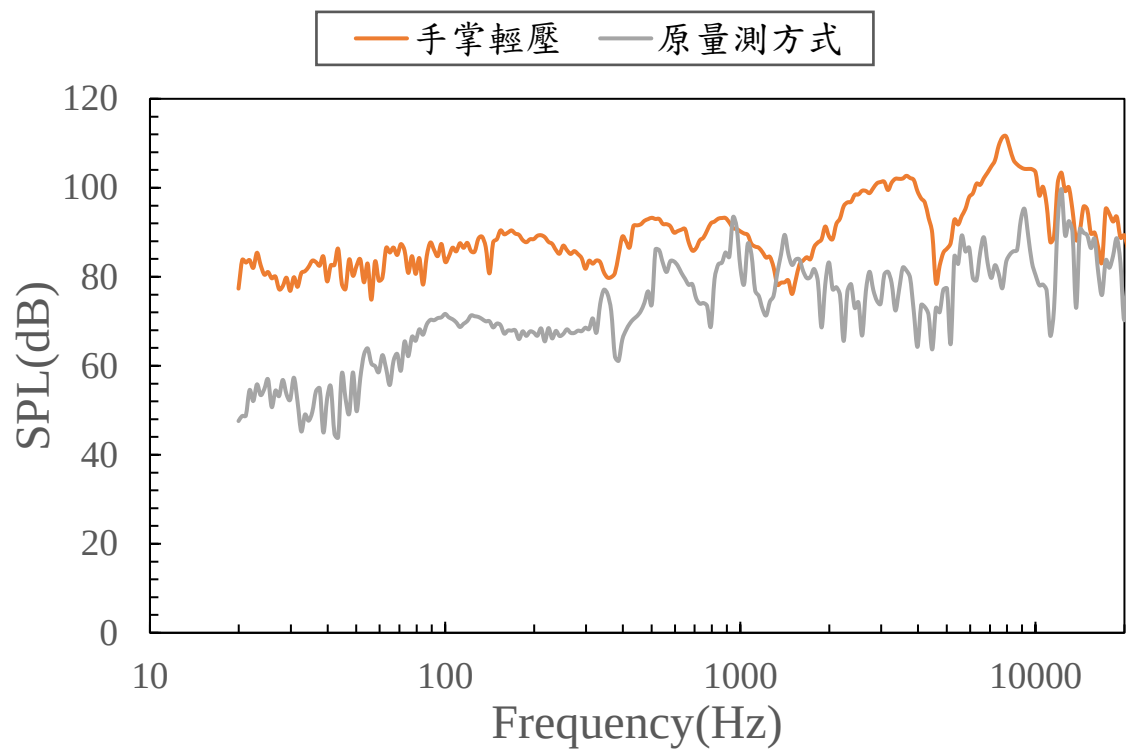


圖 6-29 試片 A，不同人工耳量測方式比較

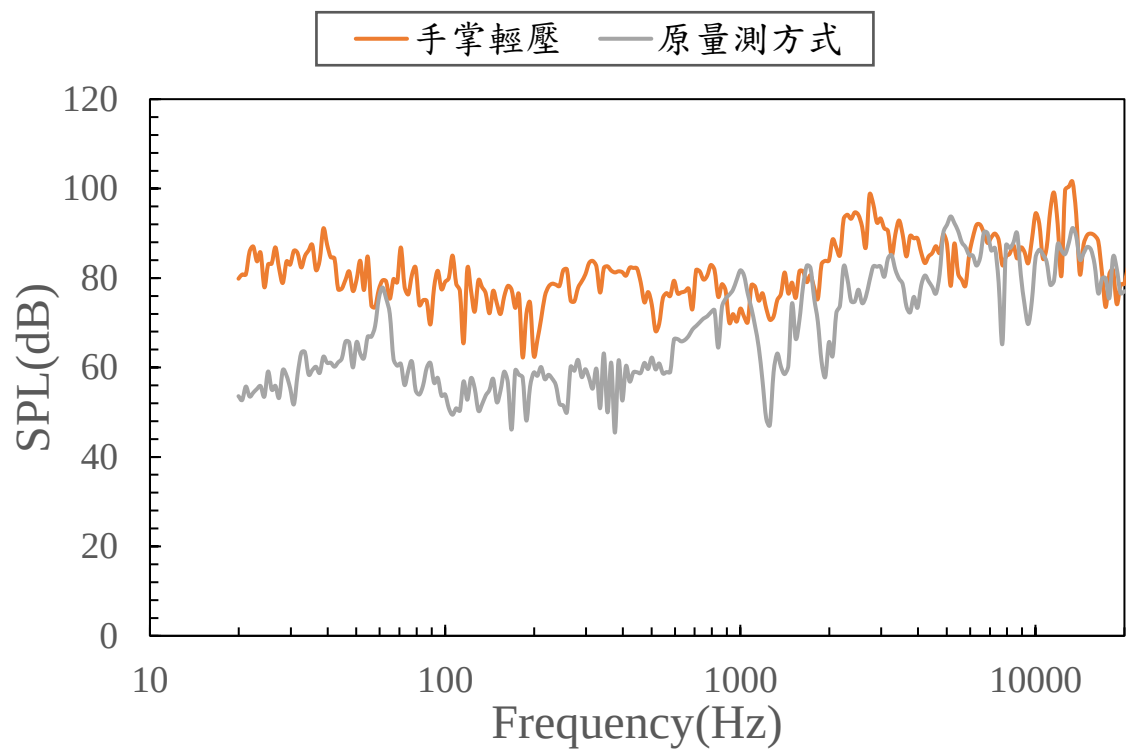


圖 6-30 試片 F，不同人工耳量測方式比較

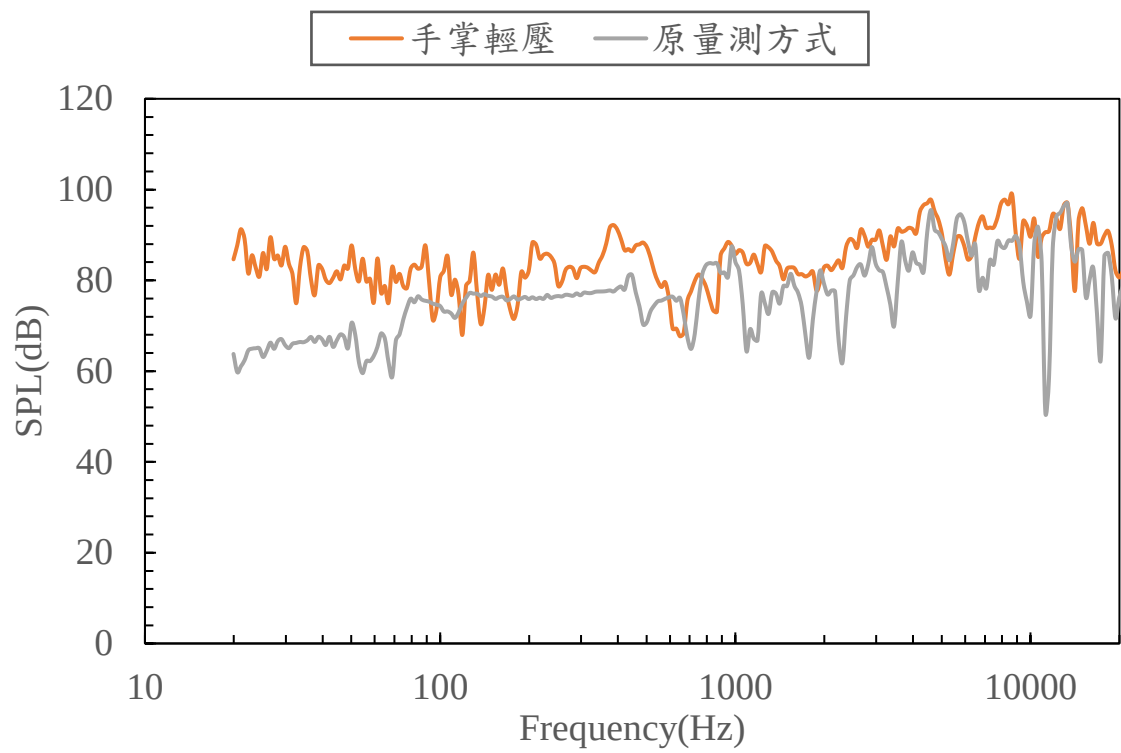


圖 6-31 試片 G，不同人工耳量測方式比較



6.3 小結

本章節首先以第五章的壓電圓板模型進行自由聲場的有限元素模擬，並且進行無響室的自由聲場量測，觀察兩者差異以及呈現的特性，同時也對不同試片的實驗結果進行分析，比較自製薄膜於不同膜厚、不同 d_{33} 、不同繃膜平整度和與市售薄膜的聲學特性差異，接著分析了不同驅動電壓下 SPL 曲線的趨勢變化。分析完自由聲場後進行封閉音場的比較分析，這部分以人工耳量測為主，一樣比較自製薄膜於不同膜厚、不同 d_{33} 、不同繃膜平整度和與市售薄膜的聲學特性差異，最後以類音箱的人工耳量測方式來對於未來可能設計出的發聲元件進行探討。

以下將列出幾點此章節中所得到的成果與相關討論。

1. 以壓電圓板模型進行自由音場模擬的方式，其結果與實驗量測結果在某些峰值上可以對應，特別是在高頻的部分對應性較好，但在低頻部分則有許多實驗量測的峰值並未在模擬呈現，推測主要有兩個原因，第一個為低頻的失真率高，使得其呈現的曲線不似模擬為理想的情況；第二個為利用壓電圓板模型模擬時，其剛性效應的作用使得在低頻時的許多頻率以很小的振動幅度運動，使得聲壓也受到影響。此外，剛性的影響也反映在當膜厚越厚時，整體的聲壓也跟著降低來驗證，也就是試片較難振動導致聲音較小。
2. 從自由音場在不同試片的量測比較下，可以得知如果自製薄膜的膜厚若在相當接近的情況時，其聲音表現差異不大，但若是膜厚相差較多的情況，如前文討論的差距兩倍時，就有可能使聲壓略為提高且使 SPL 曲線變平滑一些；在不同 d_{33} 則較難以衡量其影響；而在薄膜平整度的部分則是可以看出，對於失真率有顯著影響，進而導致聲壓有所變化；最後在與市售薄膜的比較部分則可以看出，自製薄膜於中高頻的 SPL 的表現優於市售的薄膜，自製薄膜在此中高頻區段具有優勢。

- 
3. 從不同電壓驅動壓電薄膜的結果，可以發現特性符合電場正比於壓電振動位移與聲源振動速度對於聲壓的影響，也就是輸入的電壓會與壓電薄膜產生的聲壓於低失真區呈線性增加，當電壓提高 2 倍時，SPL 會增加約 6dB。
 4. 封閉音場比較自由音場的四個試片量測結果，對於不同膜厚比較、不同 d_{33} 比較與不同繃膜平整度比較結果皆與自由音場情況接近；而在自製與市售薄膜的比較中，可得知自製薄膜可用更為輕薄和較少製程程序，在封閉音場達到與市售薄膜一樣甚至略優的效果。
 5. 最後利用不同的量測方式來類比具有小型音箱的封閉音場條件下，聲壓效果有所提升，對於未來設計發聲元件提供初步的參考依據。

第七章 結論與未來展望



本論文主要探討利用自製的壓電薄膜製作聲學元件的可行性，第二章中先建立自製壓電薄膜的製造流程，並對其相關材料性質進行檢測，接著在第四章與第五章中分別以薄膜理論與模擬，和壓電圓盤理論與模擬為對自製與市售薄膜進行振動特性分析，以此探討何種模型更適用於呈現壓電薄膜實際振動的特性，最後在第六章進行的聲學模擬與相關聲學實驗量測，檢視自製薄膜於聲學上所具備的特性，並與市售的薄膜進行比較。本章將總結與歸納本研究之成果，並提出此研究題目未來可能的方向。

7.1 結論

依照章節順序，本研究有以下成果與結論：

1. 成功建立了一套壓電薄膜的製程，其中在溶液混合的步驟，得到混合溫度在 P(VDF-TrFE) 易結晶的溫度區間中，使其均勻混合呈現澄清透明狀後，後續採用固定的步驟對於壓電性影響不大，後續透過本論文調配的流程之一，所製作出的壓電薄膜都能展現穩定的壓電性質，充分顯示本研究開發的製程的高穩定度；而退火的步驟則說明了其對於 β 相結晶度的影響，也就是經過退火後，壓電性質會得到顯著的提升，可說是影響壓電薄膜的壓電性質之關鍵因素。
2. 透過薄膜製程的旋轉塗佈步驟中，可以得出塗佈出的薄膜厚度與轉速的關係，使得在實際應用上可以透過控制轉速來獲取所需膜厚的薄膜，此外也得到了膜厚不影響壓電性質的結論，因此後續在分析不同膜厚對於振動及聲音的表現上，可將膜厚影響壓電性歸類於固定變因的條件，可獨立觀察實際膜厚不同所造成的聲抗特性影響。
3. 透過使用不同於銅片的 ITO 玻璃作為塗佈的基材，對製程的脫膜效率獲得顯著提升，雖然目前量測的壓電性質結果並未達到與以銅片做為基材的所製作出的薄膜一樣，但仍能顯現其在後續製程改良上具有潛力。

- 
4. 採用薄膜理論的解析結果與有限元素模擬結果，兩者在共振頻率上呈現良好的對應性，整體誤差不超過 2%，同時有限元素模擬所得出的應力分析結果也符合薄膜理論所計算之數值，滿足了實際在繃膜製程時使其具有張力的情況，綜合上述，可以說明此模擬建模方式對於不考慮壓電性質，而是考慮為完全彈性薄膜的分析方法有其準確度。
 5. 同樣在薄膜理論分析中，從市售薄膜不同高低差進行繃膜製作的情況下，可以看出張力對於共振頻率的提升效應；此外，從不同共振頻率反算自製薄膜張力所得出的結果，間接證實自製薄膜具有黏彈特性，也就是不符合完全彈性體的假設，加上壓電薄膜具有壓電性的緣故，因此利用薄膜理論於本研究實際試片情況有天生的缺陷，也因此改採壓電圓盤理論來進行分析討論。
 6. 壓電圓盤理論與壓電圓盤模型用於模擬結果在無張力的情況下，呈現振動特性對應良好的情況，整體誤差不超過 2%。藉由此對應性良好的情況將模擬推廣至受張力的情形，並與薄膜模型的模擬結果進行比較，會發現因壓電性和剛性所造成的共振頻率結果差異，會隨著膜厚越厚，也就是越接近平板結構厚度增加的情況時，頻率誤差變得更加明顯。其中也因為張力的施加會使得剛性的效應有提升的現象，故須調整張力值才能夠趨近實際壓電薄膜的情況。
 7. 調整張力後的壓電圓板模型於模擬在共振頻率明顯下降，將結果與薄膜模型相比仍呈現高估的現象，表示其仍受到壓電性和剛性的影響，而將壓電圓板模型於模擬結果與 DPM 實驗量測相比，特別是越往高頻的部分，其反而呈現低估共振頻率的情況，說明了如果使用薄膜理論分析，會因未能考量壓電性而使得實際壓電薄膜振動情況低估，但若將其以壓電圓板模型進行分析，其模擬情況又無法展現實際壓電薄膜的薄膜特性，也就是在高頻區段無法準確預測。經過兩者理論權衡後，最終仍以壓電圓板模型作為後續聲場模擬依據，因其能展現壓電性質，使壓電薄膜輸入電能致振產生聲音效果。

- 
8. 以壓電圓盤模型所進行的自由聲場模擬結果與無響室量測結果對比後，可發現模擬的峰值大多可對應實驗量測，但在低頻部分有許多實驗量測上的峰值並未在模擬中呈現，主要因低頻失真率高，使得實驗呈現的曲線不像模擬為理想的條件；再者是利用壓電圓板模型模擬時，其剛性效應的作用使得在低頻時有許多頻率振動幅度很小，使得聲壓間接受到影響。此外，剛性的影響也反映在當膜厚越厚時，其整體的聲壓也跟著降低這點來驗證，也就是試片較難振動導致聲音較小。
9. 比較不同試片在自由聲場下的量測結果，可以得知當自製薄膜的膜厚很接近的情況時，聲音的表現差異不大，但若是膜厚相差較多的情況，例如本文探討比較的 2 倍差距時，就有可能使聲壓略為提高且 SPL 曲線變更平滑；在不同 d_{33} 則因製程上變因不同較難以衡量其影響；而由薄膜平整度不平整則可看出對失真率有顯著影響，導致聲壓有所變化；最後在與市售薄膜的比較上則可以看出自製薄膜於中高頻的 SPL 優於市售的表現，整體在此頻率區段具有優勢。
10. 在封閉音場進行與自由音場的比較中，以不同膜厚比較、不同 d_{33} 比較、不同繃膜平整度比較，結果皆與自由音場情況接近；而在自製與市售薄膜的比較中，本研究之自製薄膜其優勢在於可以用更為輕薄和較少製程步驟，在封閉音場的部分達到與市售薄膜一樣甚至更優良的效果，顯示做為耳機發聲單體具有發展性。同時也利用類似音箱效應的量測方式，對未來設計最終發聲元件上提供參考方向。

綜合以上，利用壓電圓盤分析模型所模擬出的結果可對於實際壓電薄膜於自由音場中的聲振特性具有一定程度的分析可行性，特別是在高頻部分的對應性會比低頻好得許多，且在與市售薄膜的對比中，可以看出不論是在自由音場還是封閉音場的表現上，自製薄膜在中高頻的聲壓大小和 SPL 曲線平滑度的表現都是優於市售的薄膜成品，說明整體表現在此頻率區段具有優勢，此外在封閉音場的低頻段



表現上，自製薄膜也是略優於市售，說明在耳機等封閉音場的設計製作上極具潛力，若再加上音箱的效果，有機會製作成為市售耳機發聲單體的另一種選擇。

7.2 未來展望

綜合本研究之成果與過程中遇到的問題，在此提出改進的方向及此研究題目未來可發展的目標：

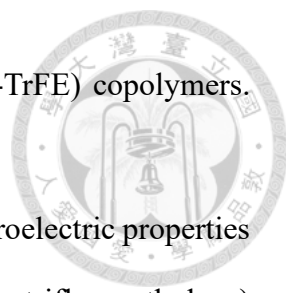
1. 薄膜製程部分可再採用不同類型的基材，來達到既能兼顧脫膜也能有好的壓電性質，進而使整體薄膜製造流程能夠提高達到更好的效率，以利後續要進行各式的振動與聲學元件的製作與開發測試。
2. 將極化製程的接觸性極化進行更多的嘗試，因膜厚會影響所需的極化電壓，也可先嘗試製作更厚的薄膜，讓電壓可容錯的上限提高，同時搭配矽油槽在絕緣的環境下進行極化，避免在極化過程中可能因接觸到空氣中的灰塵粒子，或不均勻度較高而導致瞬間電流過大造成擊穿現象。
3. 結合實驗室已開發出的圓形、矩形和跑道形薄膜系統，藉由不同幾何形狀的聲振特性，對於目前的壓電薄膜聲學元件進行形狀與尺寸的最佳化，期望能達到最好的頻率響應效果，也就是有更好的 SPL 曲線表現。
4. 透過推導壓電薄膜的相關理論，觀察在受張力下於固定邊界的條件，獲得振動特性的解析解，結合 LDV 實驗量測結果，反算出實際的張力大小，再由實驗量測反算之張力代入理論解驗證結果，並將其與 DPM 量測結果比較，觀察兩者的誤差。
5. 結合實驗室已開發出的壓電陶瓷複合薄膜的聲學元件系統，以壓電陶瓷試片複合本研究製作的壓電薄膜，設計製作頻響曲線的最佳化聲學元件，觀察壓電薄膜本身所具有的壓電性與柔性效應能否使整體聲音品質提高。並且在設計相關發聲單體的聲學元件時，透過 Thiele/Small 參數（TS parameters）中的容積法來設計音箱的最佳化尺寸，加裝至聲學元件上來提升整體頻響曲線的效果。

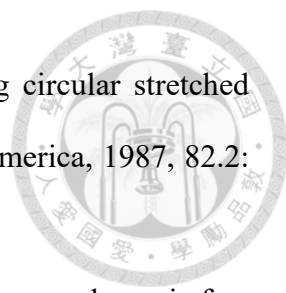
- 
6. 將此自製薄膜應用於感測器上，也就是應用其正壓電效應於結構受力時所產生的電訊號，具有其特殊應用的場域。
 7. 利用 X 射線繞射儀 (XRD) 來看薄膜晶相組成和晶格排列方向，驗證 P(VDF-TrFE) 所得到的晶相組成是否為 β 相比例最高。
 8. 將模擬和實驗量測所得到的 SPL 聲壓曲線的結果考量 A 加權 (A-weighting)，以此來評估人耳實際聽到聲音時的聲壓響應情況。並在實際量測中考量以粉紅噪音 (pink noise) 來進行聲音訊號的輸出，使得其更能模擬真實環境的聲音。

參考文獻



- [1] KIM, Jaehwan, et al. Piezoelectric electro-active paper (EAPap) speaker. *Journal of mechanical science and technology*, 2011, 25: 2763-2768.
- [2] YU, Xun, et al. Carbon nanotube-based transparent thin film acoustic actuators and sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2006, 132.2: 626-631.
- [3] MORSE, Philip McCord; ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA; AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS. *Vibration and sound*. New York: McGraw-Hill, 1948.
- [4] CURIE, Jacques; CURIE, Pierre. Development by pressure of polar electricity in hemihedral crystals with inclined faces. *Bull. soc. min. de France*, 1880, 3: 90.
- [5] CADY, Walter G. *Piezoelectricity*. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1946.
- [6] MASON, Warren Perry. *Piezoelectric Crystals and Their Application to Ultrasonics..* D. van Nostrand Company, 1959.
- [7] TIERSTEN, Henry Frank. *Linear piezoelectric plate vibrations: Elements of the linear theory of piezoelectricity and the vibrations piezoelectric plates*. Springer, 2013.
- [8] JAFFE, BERNARD; COOK, WILLIAM R.; JAFFE, H. J. P. C. The piezoelectric effect in ceramics. *Piezoelectric ceramics*, 1971, 7-21.
- [9] MINDLIN, RD0243. High frequency vibrations of piezoelectric crystal plates. *International Journal of Solids and Structures*, 1972, 8.7: 895-906.
- [10] IEEE Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control Society, in ANSI/IEEE Std 176, 1987.
- [11] ROGACHEVA, Nellya N. *The theory of piezoelectric shells and plates*. CRC press, 2020.
- [12] KAWAI, Heiji. The piezoelectricity of poly (vinylidene fluoride). *Japanese journal of applied physics*, 1969, 8.7: 975.
- [13] CUI, Zhaoliang; DRIOLI, Enrico; LEE, Young Moo. Recent progress in fluoropolymers for membranes. *Progress in Polymer Science*, 2014, 39.1: 164-198.

- 
- [14]LEGRAND, J. F. Structure and ferroelectric properties of P (VDF-TrFE) copolymers. *Ferroelectrics*, 1989, 91.1: 303-317.
- [15]MAO, Duo; GNADE, Bruce E.; QUEVEDO-LOPEZ, Manuel A. Ferroelectric properties and polarization switching kinetic of poly (vinylidene fluoride-trifluoroethylene) copolymer. *Ferroelectrics-Physical Effects*, 2011, 78-100.
- [16]CHANG, S. H.; DU, B. C.; LIN, J. F. Electro-elastic modeling of annular piezoceramic actuating disk transducers. *Journal of intelligent material systems and structures*, 1999, 10.5: 410-421.
- [17]林育志,「壓電元件於不同介質中的振動特性研究與實驗量測」,國立臺灣大學機械工程所碩士論文,2004。
- [18]何祥瑋,「壓電圓盤與壓電圓環共振特性的理論分析與實驗量測」,國立臺灣大學機械工程所碩士論文,2005。
- [19]HUANG, Chi-Hung. Free vibration analysis of the piezoceramic bimorph with theoretical and experimental investigation. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, 2005, 52.8: 1393-1403.
- [20]黃育熙,「壓電陶瓷平板,薄殼,與雙晶片三維耦合動態特性之實驗量測,數值計算與理論解析」,國立臺灣大學機械工程所碩士論文,2009。
- [21]許松逸,「多層壓電圓盤及圓環複合等向性材料三維振動特性之理論解析、數值分析與實驗量測」,國立臺灣科技大學機械工程所碩士論文,2018。
- [22]LAURA, P. A. A.; ROSSIT, C. A.; LA MALFA, S. Transverse vibrations of composite, circular annular membranes: exact solution. *Journal of Sound and Vibration*, 1998, 216.1: 190-193.
- [23]JABAREEN, M.; EISENBERGER, M. Free vibrations of non-homogeneous circular and annular membranes. *Journal of Sound and Vibration*, 2001, 240.3: 409-429.
- [24]RAO, Singiresu S. *Vibration of continuous systems*. John Wiley & Sons, 2019.

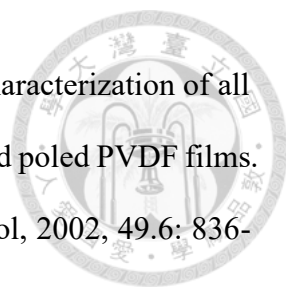
- 
- [25] STRENG, J. H. Calculation of the surface pressure on a vibrating circular stretched membrane in free space. The Journal of the Acoustical Society of America, 1987, 82.2: 679-686.
- [26] MELLOW, Tim; KÄRKKÄINEN, Leo. On the sound field of a circular membrane in free space and an infinite baffle. The Journal of the Acoustical Society of America, 2006, 120.5: 2460-2477.
- [27] HUANG, Yu-Hsi; CHIANG, Hsin-Yuan. Vibrational mode and sound radiation of electrostatic speakers using circular and annular diaphragms. Journal of Sound and Vibration, 2016, 371: 210-226.
- [28] SHEHZAD, M.; WANG, S.; WANG, Y. Flexible and transparent piezoelectric loudspeaker. npj Flexible Electronics, 2021, 5.1: 24.
- [29] KELLER, Kirill, et al. Fully Printed Flexible Ultrasound Transducer for Medical Applications. Advanced Materials Technologies, 2023, 8.18: 2300577.
- [30] MA, Chien-Ching, et al. Experimental and numerical investigations on resonant characteristics of a single-layer piezoceramic plate and a cross-ply piezolaminated composite plate. The Journal of the Acoustical Society of America, 2006, 119.3: 1476-1486.
- [31] WANG, C. Y. Vibration of an annular membrane attached to a free, rigid core. Journal of sound and vibration, 2003, 260.4: 776-782.
- [32] PINTO, Fabrizio. Analytical and experimental investigation on a vibrating annular membrane attached to a central free, rigid core. Journal of sound and vibration, 2006, 291.3-5: 1278-1287.
- [33] KIM, Hye Jin; YANG, Woo Seok; NO, Kwangsoo. Effects of an elastic mass on frequency response characteristics of an ultra-thin piezoelectric micro-acoustic actuator. IEEE

Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2013, 60.8: 1587-1594.

- [34] 林揚中，莊沅隴，「雙層壓電圓盤複合薄膜研製近場聲學元件之耦合聲場的理論數值與實驗研究」，國立台灣科技大學機械工程實務專題報告，2016。
- [35] 陳冠宇，「薄膜複合壓電圓板開發近場聲學元件之理論解析、數值計算與實驗量測」，國立台灣科技大學機械工程系碩士學位論文，2019。
- [36] 張哲睿，「壓電圓環複合薄膜於聲學元件之設計開發」，國立台灣大學機械工程研究所碩士論文，2021。
- [37] 黃御宸，「壓電薄板複合薄膜聲振研究之最佳化設計」，國立台灣大學機械工程研究所碩士論文，2022。
- [38] 陳奕安，「無網格法探討跑道形薄膜複合壓電板之聲振特性」，國立台灣大學機械工程研究所碩士論文，2023。
- [39] CHIANG, Hsin-Yuan; HUANG, Yu-Hsi. Resonance Mode and Sound Pressure of a Push-Pull Electrostatic Speaker Based on Elliptical Diaphragm. Journal of Vibration and Acoustics, 2023, 145.1: 011011.
- [40] 每日頭條，pvdf 材料的用途，<https://kknews.cc/zh-hk/news/xbmr4q9.html>
- [41] BYUTNER, Oleksiy G.; SMITH, Grant D. Conformational properties of poly (vinylidene fluoride). A quantum chemistry study of model compounds. Macromolecules, 1999, 32.25: 8376-8382
- [42] WANG, Yuan; ZHU, Laipan; DU, Cuifeng. Progress in piezoelectric nanogenerators based on PVDF composite films. Micromachines, 2021, 12.11: 1278.
- [43] KEYENCE ；旋轉塗佈機的概要，
<https://www.keyence.com.tw/ss/products/measure/sealing/coater-type/spin.jsp>
- [44] Kett 膜厚儀 LZ-990 昆山市精佳儀器設備有限公司，http://www.jingjia17.com/zh-tw/jingjia17_Product_22055466.html



- [45] TDS Piezotech FC, Arkema.
- [46] LI, Chia-Ling, et al. Insight into the preparation of poly (vinylidene fluoride) membranes by vapor-induced phase separation. *Journal of Membrane Science*, 2010, 361.1-2: 154-166.
- [47] Piezotech FC ink H processing guide – customers, Arkema .
- [48] TechNews , 淺談鐵電記憶體：如何實現下世代「記憶體內運算」？ , <https://technews.tw/2022/02/22/the-next-trend-feram/>
- [49] HU, Xiaoran, et al. Enhanced piezoelectric coefficient of PVDF-TrFE films via in situ polarization. *Frontiers in Energy Research*, 2021, 9: 621540.
- [50] BAE, Ji-Hun; CHANG, Seung-Hwan. Characterization of an electroactive polymer (PVDF-TrFE) film-type sensor for health monitoring of composite structures. *Composite Structures*, 2015, 131: 1090-1098.
- [51] Matt, Hughes. (2013, Oct 7). Thin Film Deposition By Sputtering: Essential Basics. Semicore. <https://www.semicore.com/news/70-thin-film-deposition-sputtering>
- [52] 維基百科，鐵電性， <https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E9%93%81%E7%94%B5%E6%80%A7>
- [53] 綠匯有限公司 P(VDF-TrFE) 共聚物 80/20 , <http://www.greatshiny.com/new/jishulingyu/20181119/71.html>
- [54] 林家雋,「數位影像相關法之自動特徵擷取及計算效能提升」,國立台灣大學機械工程研究所碩士論文,2023。
- [55] Baiyang Ren , Hwanjeong Cho and Cliff J. Lissenden., “AGuidedWaveSensor Enabling Simultaneous Wavenumber-Frequency Analysis for Both Lamb and Shear-Horizontal Waves.”, 2017.
- [56] 連振原,「雷射都卜勒振動儀之自動化全場聲振量測系統開發」,國立台灣大學機械工程研究所碩士論文,2023。

- 
- [57] ROH, Yongrae; VARADAN, Vasundara V.; VARADAN, Vijay K. Characterization of all the elastic, dielectric, and piezoelectric constants of uniaxially oriented poled PVDF films. IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, 2002, 49.6: 836-847.
- [58] KINSLER, Lawrence E., et al. Fundamentals of acoustics. American Journal of Physics, 1951, 19.4: 254-255.

附錄

在第六章中評估失真率的指標為總諧波失真 (Total Harmonic Distortion, THD)，在此進行補充說明。失真是指輸入訊號與輸出訊號不一致，常見的原因有本身尺寸設計、元件鬆脫、空間環境、噪音所造成，本研究以 THD 進行評估，當輸入的波經過系統後產生變形，使最終到的結果不是只有單純的輸入頻率，其計算公式如下：

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1}$$

THD 計算時的分母為輸入頻率，分子為所有倍頻（諧波）平方總和開根號，通常以第二與第三為準的諧波為主導。本研究提及之 THD 即用此概念計算而得。