

國立臺灣大學工學院機械工程學系



碩士論文

Department of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master's Thesis

基於巢狀式撓性放大機構之壓電噴射閥設計

Design of a Piezoelectric Jetting Dispensing Valve based
on a Nested-Type Amplified Actuator

林崇旭

Chung-Hsu Lin

指導教授：廖先順 博士

Advisor: Hsien-Shun Liao, Ph.D.

中華民國 114 年 7 月

July, 2025

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

基於巢狀式撓性放大機構之壓電噴射閥設計

Design of a Piezoelectric Jetting Dispensing Valve based on a
Nested-Type Amplified Actuator

本論文係林崇旭 (R12522638) 在國立臺灣大學機械工程學研究所設計組完成之碩士學位論文，於民國 114 年 7 月 15 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 Institute of Mechanical Engineering on 15, July, 2025 have examined a Master's thesis entitled above presented by Chung-Hsu Lin (R12522638) candidate and hereby certify that it is worthy of acceptance.

口試委員 Oral examination committee:

廖先順

高豐生

(指導教授 Advisor)

蘇偉陽

系主任/所長 Director:

莊嘉揚

致謝



時光荏苒，碩士生涯轉眼到了尾聲，謹在論文完成之時，向這一路上給予我幫助、支持與陪伴的師長和親朋好友們致上最誠摯的感謝。

首先，要由衷感謝廖先順教授讓我加入這個實驗室，給了我自由探索的空間和機會，並且在過程中給予我相當多指導；儘管有時會犯下在自己看來都有些愚蠢的錯誤，但教授會依然相當有耐心地將我導向正軌，讓我這兩年間不僅在學術上收穫良多，也人格上成長許多。

再來要感謝實驗室的起雲學長，在我剛進實驗室時，便帶我逐漸熟悉研究內容，並且留給我相當豐富的學術資產，對我完成的論文有著功不可沒的幫助；還有博班的政融學長，就像實驗室的老大一樣帶領著我們，解決各種疑難雜症。

還有就是同屆的善亞、永旭、景舜、嫻琳、宇喆（雖然我還是都叫杰倫）還有碩一學弟奕彬，沒想到在研究所還能遇到這麼多有趣的朋友，少了你們，我的整個碩士生涯將會變得枯燥乏味許多；從碩一中午下課後的午餐、台北各處的IKEA、被我拖出來的野餐、到實驗室角落的神秘摺疊桌，都充滿了難忘的回憶。雖然講了兩年的實驗室遊一直沒去成的，但我相信一定有機會的。

另外要感謝庫力索法高科的 Bruno 和佳霖，在暑期和產學計劃的期間，就像是前輩一樣，傳授給我非常多的專業知識和產業界的經驗，在我的研究上也給予相當大的支持。還有中研院精工室師傅們，雖然我每次都帶來一堆麻煩的工件，但師傅們總是能想辦法幫我加工出來。

最後要感謝我的家人，在這段時間持續的支援我，在研究感到疲乏時隨時接納我，讓我能無後顧之憂地完成學業。

摘要



目前主流的壓電噴射閥使用各式壓電放大機構，提供噴射閥撞針擊發膠水所需之運動行程。然而普通的放大機構為獲得足夠的放大倍率，佔據的體積往往較為龐大，造成壓電噴射閥的尺寸無法進一步小型化。為此，本研究提出一款採用改進型巢狀式撓性放大機構的壓電噴射閥。此巢狀式撓性放大機構結合菱形式、槓桿式及半菱形式三種撓性放大機構設計以提升空間利用率。實際完成之巢狀式撓性放大機構尺寸為 33.5 mm × 34.2 mm × 10 mm，透過 13.65 倍的位移放大率達到 207.5 μm 之最大行程。壓電致動器之最大推力 23.14 N、機構剛性為 0.1115 N/μm、共振頻率為 1946 Hz，兼顧了結構緊湊性並滿足壓電噴射閥的工作情境。在此放大機構之基礎上，本研究設計一款尺寸為 72.7 mm × 69.5 mm × 20 mm 之小型壓電噴射閥，並進行對壓電噴射閥實際點膠實驗，瞭解膠水黏度、擊發間距、開啟時間與壓力等參數對點膠穩定性的影響。量測結果顯示在擊發 1000 cP 黏度矽油時，相同擊發參數下之液珠尺寸的一致性相當高，其尺寸數據變異係數皆在 1.7 % 以下；且液珠尺寸也隨壓力和撞針開啟時長呈線性的變化。然而在應對較高黏度的矽油時，則遭遇因放大機構出力不足而無法保持穩定擊發的狀況。未來可進一步對壓電噴射閥的輸出力量性能進行改進，以期提升壓電噴射閥的應用範圍。

關鍵字: 壓電噴射閥、位移放大機構、撓性機構、液體分配、非接觸式點膠

Abstract



Piezoelectric jetting dispensing valves commonly adopt various displacement amplification mechanisms to achieve the stroke necessary for precise glue dispensing. However, conventional mechanisms often require bulky volume to realize sufficient amplification ratios, resulting in low spatial utilization and limiting valve miniaturization. To address this, this thesis proposed a compact piezoelectric jetting dispensing valve incorporating an improved nested compliant amplification mechanism. This mechanism integrates three compliant designs—diamond-type, lever-type, and semi-diamond-type—within a compact rectangular space, maximizing spatial efficiency. The developed mechanism measured $33.5 \text{ mm} \times 34.2 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, achieving a maximum displacement of $207.5 \text{ }\mu\text{m}$ and an amplification ratio of 13.65. Its maximum output force, stiffness, and resonant frequency were 23.14 N, $0.1115 \text{ N}/\mu\text{m}$, and 1946 Hz, respectively, demonstrating compactness and jetting suitability. Based on this mechanism, a compact valve was developed. Dispensing experiments investigated the effects of fluid viscosity, firing frequency, opening time, and input pressure on jetting stability. Results showed that with 1000 cP silicone oil, droplet sizes were highly consistent under identical firing conditions and varied linearly with parameter changes. At higher viscosities, limited output force led to unstable jetting. These findings suggest future work should enhance output performance to expand applicability to a broader range of fluids.

Keywords : Piezoelectric jetting valve, Displacement amplification mechanism, Flexible mechanism, Liquid dispensing, Non-contact dispensing

目次

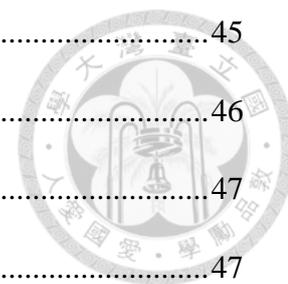


口試委員審定書.....	i
致謝.....	ii
摘要.....	iii
Abstract.....	iv
目次.....	v
圖次.....	viii
表次.....	xii
第一章 緒論.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 文獻回顧.....	2
1.2.1 層積式壓電致動器.....	2
1.2.2 撓性放大機構.....	3
1.2.3 槓桿式撓性放大機構.....	4
1.2.4 菱形撓性放大機構.....	5
1.2.5 複合式撓性放大機構.....	7
1.2.6 點膠閥概述.....	9
1.2.7 噴射式點膠閥設計.....	10
1.2.8 商用噴射閥.....	13
1.3 研究動機與目標.....	15
1.4 內容簡介.....	15
第二章 原理與設計.....	16
2.1 巢狀式撓性放大機構.....	16



2.1.1 層積式壓電致動器.....	16
2.1.2 巢狀式放大機構設計.....	17
2.1.3 放大機構組裝.....	19
2.1.4 有限元素分析.....	21
2.1.5 模態分析.....	25
2.2 噴射閥.....	27
2.2.1 噴射閥設計.....	27
2.2.2 噴射閥控制.....	29
第三章 量測系統架構與實驗儀器.....	31
3.1 實驗架構與量測系統概述.....	31
3.2 量測系統架構.....	32
3.2.1 行程量測系統.....	32
3.2.2 推力量測系統.....	33
3.2.3 頻率響應量測系統.....	35
3.2.4 液珠量測系統.....	36
3.3 壓電驅動設備.....	38
3.3.1 嵌入式控制器.....	38
3.3.2 壓電驅動器.....	39
3.3.3 鎖相放大器.....	40
3.3.4 商用噴射閥控制器.....	40
3.4 量測設備.....	41
3.4.1 雷射位移計.....	41
3.4.2 荷重元與應變規.....	42
3.4.3 穩壓電路.....	44

3.4.4 前置放大器.....	45
3.4.5 線掃描相機.....	46
第四章 實驗結果.....	47
4.1 實驗前準備.....	47
4.1.1 荷重元校正.....	47
4.1.2 矽油調配.....	49
4.2 行程量測結果.....	50
4.3 推力與剛性量測結果.....	53
4.4 放大機構頻率響應量測結果.....	56
4.5 液珠量測結果.....	57
4.5.1 連續擊發.....	58
4.5.2 壓力與開啟時間差異.....	58
4.5.3 黏度差異.....	61
第五章 結論與未來展望.....	65
參考文獻.....	67
附錄.....	71



圖次



圖 1.1 (a)各種層積式壓電致動器[附錄 A]、(b)層積式壓電致動器結構示[2]。	2
圖 1.2 常見之撓性鉸鏈設計[6]。	3
圖 1.3 常見撓性放大機構設計[9]。	4
圖 1.4 槓桿式撓性放大機構示意圖[10]。	4
圖 1.5 撓性鉸鏈受力變形導致的輸出位移損失[11]。	5
圖 1.6 菱形放大機構運動示意圖[12]。	5
圖 1.7 相同放大率下，(a)橋式、(b)槓桿式與 (c)二階段槓桿式放大機構所需空間示意圖[11]。	6
圖 1.8 (a)槓桿式放大機構與 (b)曲張式放大機構的寄生運動示意圖。	7
圖 1.9 吳起雲設計的巢狀式撓性放大機構[16]。	8
圖 1.10 吳起雲設計的巢狀式撓性放大機構演進過程，依序為 (a)初始之槓桿式放大機構、(b)二階段放大機構與 (c)三階段放大機構[16]。	9
圖 1.11 (a)時間-壓力式點膠閥、(b)螺旋泵點膠閥、(c)活塞式點膠閥、(d)噴射式點膠閥示意圖[18]。	10
圖 1.12 X. Shu 等人設計的氣動式噴射閥[20]。	10
圖 1.13 (a) J. Jeon 等人設計的轉軸槓桿式壓電噴射閥與其(b)驅動訊號[19]。	11
圖 1.14 X. Huang 等人設計的橫置撓性槓桿式壓電噴射閥[21]。	12
圖 1.15 S. Lu 等人設計之菱形撓性放大機構壓電噴射閥[22]。	12
圖 1.16 Vermes 公司之 MDS 3280 Series 噴射閥[23]。	13
圖 1.17 Nordson 公司之 PICO Pulse 噴射閥與壓電機構詳圖[24]。	14
圖 1.18 Marco 公司之 Sjet 噴射閥[25] 與壓電機構簡圖[26]。	14
圖 2.1 本研究設計之層積式壓電致動器與巢狀式撓性放大機構。	16
圖 2.2 本研究提出之巢狀式撓性放大機構外觀。	17

圖 2.3 巢狀式撓性放大機構各階段放大示意圖，依序為 (a) 第一階段、(b) 第二階段與 (c) 第三階段放大。.....	18
圖 2.4 (a) 菱形放大機構斜面角度與放大率和剛性關係圖與 (b) 示意圖。.....	18
圖 2.5 層積式壓電致動器在無預壓力時的位移-驅動電壓關係圖。.....	19
圖 2.6 (a) 層積式壓電致動器之原始長度，(b) 放大機構輸入端之中空長度，(c) 利用虎鉗放入層積式壓電致動器，以及 (d) 組裝完成後之層積式壓電致動器長度。.....	20
圖 2.7 模擬菱形放大機構力量輸入端的 (a) 負載與邊界條件，(b) 負載-位移關係圖。.....	21
圖 2.8 層積式壓電致動器與菱形放大機構之負載-位移關係圖。.....	22
圖 2.9 放大機構於 150V 驅動電壓下之有限元素分析位移圖。.....	23
圖 2.10 巢狀式放大機構於 150 V 驅動電壓下之等效應力分布圖。.....	24
圖 2.11 巢狀式撓性放大機構 (a) 第一、(b) 第二、(c) 第三、(d) 第四共振模態。.....	26
圖 2.12 自製壓電噴射閥機構之 (a) 外觀、(b) 尺寸與 (c) 機構剖面圖。.....	27
圖 2.13 放大機構 (藍色)、撞針 (紅色) 與噴嘴 (黃色) 的相對位置。.....	28
圖 2.14 噴射閥擊發週期的 (a) 輸入電壓波形以及對應之 (b) 撞針抬升高度。...29	29
圖 2.15 (a) 膠水於噴射閥中之流向與噴嘴之 (b) 抬升與 (c) 落下示意圖。.....	30
圖 3.1 量測系統使用設備與量測目標關係圖。.....	31
圖 3.2 行程量測系統機構圖。.....	32
圖 3.3 行程量測系統架構圖。.....	33
圖 3.4 推力量測系統機構圖。.....	34
圖 3.5 推力量測系統架構圖。.....	34
圖 3.6 頻率響應量測系統機構圖。.....	35
圖 3.7 頻率響應量測系統架構圖。.....	36

圖 3.8 液珠量測系統機構圖。	37
圖 3.9 液珠量測系統架構圖。	37
圖 3.10 嵌入式控制器 myRIO-1900。	38
圖 3.11 壓電驅動器 SVR350 bip / 3。	39
圖 3.12 鎖相放大器 SR830。	40
圖 3.13 商用噴射閥控制器 VC1245。	40
圖 3.14 (a) 雷射位移計 LK-H052 與 (b) 控制器 LK-G5001。	41
圖 3.15 荷重元 YZC131-05KG 和穩壓電路。	42
圖 3.16 單一應變規結構示意圖 [28]。	43
圖 3.17 由四組應變規組成的惠斯通電橋 [28]。	43
圖 3.18 穩壓電路圖。	44
圖 3.19 前置放大器 SR560。	45
圖 3.20 線掃描相機 PA4KGV-80KM 與位移平台。	46
圖 4.1 荷重元校正實驗設置。	47
圖 4.2 荷重元之負載-電壓關係圖。	48
圖 4.3 撓性放大機構輸出端於 0 - 150 V 驅動訊號下的位移行程。	50
圖 4.4 針對層積式壓電致動器在撓性放大機構中的行程量測機構圖。	51
圖 4.5 層積式壓電致動器在 (a) 測量點 A 與 (b) 測量點 B 的位移行程。	51
圖 4.6 層積式壓電致動器在撓性放大機構中的總位移行程。	52
圖 4.7 撓性放大機構輸出端於 0 - 150 V 驅動訊號下的推力。	53
圖 4.8 負載有無之撓性放大機構的輸出端位移行程。	54
圖 4.9 撓性放大機構於 0-150V 驅動訊號下之剛性。	54
圖 4.10 撓性放大機構行程-推力關係圖。	55
圖 4.11 撓性放大機構於 100-3000 Hz 正弦訊號驅動下之頻率響應。	56

圖 4.12 (a) 線掃描相機拍攝之原始影像與 (b) 裁切後之單一液珠影像，以及 (c) 經過二質化處理後之影像。.....	57
圖 4.13 單一實驗中，每序列之液珠直徑與連續擊發順序時間關係圖。.....	58
圖 4.14 不同壓力下，1000 cP 黏度矽油液珠平均直徑隨開啟時長變化之趨勢。.....	59
圖 4.15 噴嘴處矽油於 (a) 低壓力低開啟時長與 (b) 高壓力高開啟時長示意圖。.....	60
圖 4.16 (a) 2000 cP 黏度矽油實驗之原始影像與 (b) 第 10 顆、(c) 第 107 顆、以及 (d) 第 191 顆液珠之裁切影像。.....	61
圖 4.17 2000 cP 高黏度實驗中，各參數下真圓度大於 0.95 之液珠數量。.....	62
圖 4.18 2000 cP 矽油液珠於壓力 2 kg/cm^2 、開啟時長 15 ms 下的尺寸變化。...	63
圖 4.19 2000 cP 高黏度實驗中，各參數下的合格液珠數量。.....	64

表次



表 1.1 自製壓電噴射閥與市售噴射閥尺寸比較。.....	15
表 2.1 放大機構材料參數設定。.....	21
表 2.2 放大機構於 150 V 驅動電壓下之有限元素分析位移結果。.....	24
表 2.3 層積式壓電致動器材料參數設定 [附錄 A][27]。.....	25
表 3.1 液珠擊發實驗參數設定。.....	37
表 3.2 量測系統與相應驅動設備組合。.....	38
表 3.3 各量測系統設定之雷射位移計參數。.....	42
表 3.4 各量測系統之前置放大器參數設定。.....	45
表 4.1 荷重元校正的前置放大器參數設定。.....	48
表 4.2 實驗目標物黏度及對應調配比例。.....	49
表 4.3 1000 cP 黏度矽油之液珠平均尺寸數據。.....	59
表 4.4 於 2000 cP 高黏度時較適用之參數和其量測結果。.....	64

第一章 緒論



1.1 研究背景

現代精密點膠技術已經被廣泛應用在半導體封裝和電路組裝等應用上，尤其是噴射式點膠閥 (Jetting dispensing valve，以下簡稱噴射閥) 搭配三軸位移平台的設計，其非接觸式的設計不受流體張力和基板表面特性的影響，能夠精確控制出膠量。此外，由於無須 z 軸方向移動，擁有更高的工作效率，也能應對更複雜的表面。

噴射閥的挑戰在於高流體黏度和高擊發頻率，因此壓電致動器被引入作為許多驅動元件。雖然壓電致動器具有高剛性、響應速度快等優點，但其過小的輸出行程 (約數十微米) 導致其無法直接驅動噴射閥撞針 (約數百微米)，需透過位移放大機構使輸出行程放大。噴射閥內的位移放大機構除滿足放大率外，在設計時還需要考量到壽命和體積的問題。前者由於噴射閥需承受數以十億計的高頻運動，如轉軸等分離式的機構設計可能產生磨耗和間隙，因此許多噴射閥採用撓性放大機構避免磨耗問題；而後者關乎整個閥體的尺寸大小，會影響閥體安裝在位移平台上的便捷性。

為此，本研究提出一種採用新型巢狀式撓性放大機構的壓電噴射閥。巢狀式撓性放大機構和其緊緻的結構，同時能滿足壽命和體積的需求，並結合快拆式液盒設計，實際測試放大機構和噴射閥的性能參數。



1.2 文獻回顧

1.2.1 層積式壓電致動器

壓電致動器是一種透過逆壓電效應，將電能轉化為機械能的元件。施加外部電場在經過極化處理、內部偶極子 (Dipoles) 朝相同方向排列的壓電材料上，晶體會產生相應的小尺寸的形變。而當電場與極化方向相同時，使晶格間距縮小，導致壓電材料收縮，反之則會膨脹[1]。描述壓電材料作用的線性化本構關係可以式(1.1)、(1.2)表示[2]:

$$S_p = s^E T + d E \quad (1.1)$$

$$D = d T + \varepsilon^T E \quad (1.2)$$

其中， S_p 為壓電材料的應變張量 (Strain tensor)， s^E 為壓電材料受到恆定電場時的柔度矩陣 (Flexibility matrix)， T 為應力張量 (Tensor stress)， d 為材料的壓電常數矩陣， E 為外部電場向量， D 為材料內部的電位移向量， ε^T 則為在恆定應立下測得的介電常數矩陣。在各種壓電材料中，銻鈦酸鉛 (Lead zirconate titanate, PZT) 壓電陶瓷為最廣泛應用的壓電致動器的組成材料，其化學式為 $Pb(Zr_x Ti_{1-x})O_3$ ，壓電常數約為 500 ~ 700 pC/N[3]。

層積式壓電致動器 (Piezoelectric stack actuator，圖 1.1(a)) 將薄片狀的壓電陶瓷一層層交錯堆疊，中間隔以正負相反的電極，組成如圖 1.1(b) 之構造。電極通電時，正負兩電極間會產生電場，使其中的壓電材料產生收縮或膨脹的形變，最終各層累積的形變量總和，即為層積式壓電致動器的輸出位移[4]。

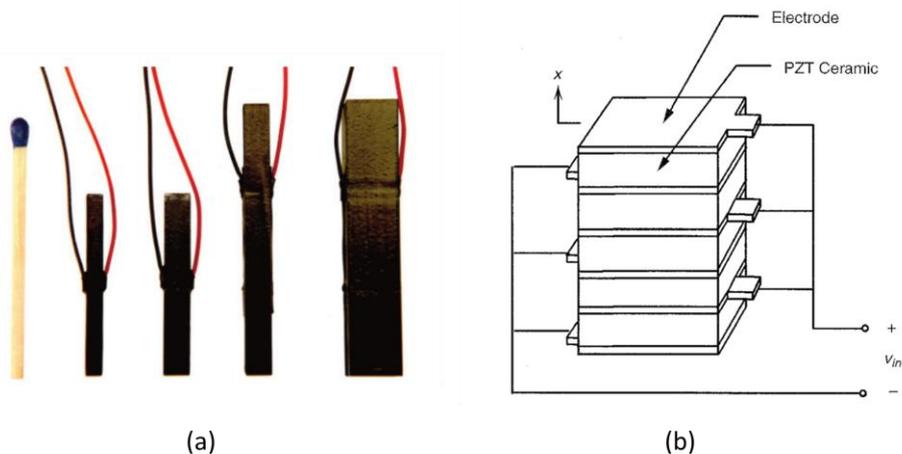


圖 1.1 (a)各種層積式壓電致動器[附錄 A]、(b)層積式壓電致動器結構示[2]。

層積式壓電致動器能夠進行奈米級別分辨率的位移運動，擁有數千赫茲以上的頻寬，並提供精確穩定的力量輸出。此外，由於沒有相對運動之部件，可避免磨擦損耗和背隙，適合精密的動態操作[2]。但由於多數層積式壓電致動器自身的行程僅為數十微米尺度，不足以滿足許多工業應用上的需求；若欲將行程增加，則需堆疊更多壓電單元，會導致致動器體積的增大和結構上的不穩定。因此實務上，層積式壓電致動器往往需要搭配特殊設計的行程放大機構。

1.2.2 撓性放大機構

撓性放大機構使用撓性鉸鏈 (Flexure hinge) 取代轉軸、滾珠等機械式放大機構常見的運動部件，透過在材料特定位置留下薄而窄的區段，產生可控的應力集中現象，使材料得以產生局部的彎曲形變。

撓性放大機構具有無摩擦、無間隙且精度高的優點，當應用在需要高頻率往復運動的機構上，也具有壽命上的優勢。此外，由於部件的減少，該機構亦能夠減少機構的體積與複雜度。然而撓性放大機構受限於材料的彈性極限與機構的先天限制，無法實現較大自由度的運動，因而限制其應用範圍。通常被應用在尺度小、精度高的機構上，如奈米級定位平台、壓電行程放大機構等[5]。

一般常見的撓性鉸鏈設計有正圓 (Circular)、圓角 (Corner-filletted) 和橢圓 (Elliptical)，如圖 1.2 所示，不同的鉸鏈設計具有不同的特性和適用場合。正圓鉸鏈的剛性較大、旋轉精度較高，但位移放大率較小。圓角鉸鏈的剛性隨著圓角半徑縮小而降低，適合高位移放大率應用的場合，但過小的半徑會導致過大的應力集中，進而降低壽命。此外，圓角鉸鏈的旋轉時，偏離旋轉中心的情況亦較嚴重，不適合應用在高精度用途上。而橢圓鉸鏈雖然旋轉精度最差，卻有著最小的應力，在壽命方面具有優勢[5-8]。

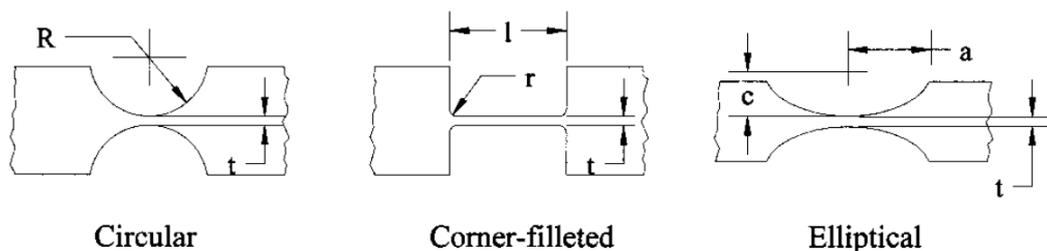


圖 1.2 常見之撓性鉸鏈設計[6]。

常見的撓性放大機構，按層積式壓電致動器驅動方式主要分為槓桿式 (Lever-type) 和曲張式 (Flextensional-type) 兩大種類，如圖 1.3 所示。本研究提出之複合式撓性放大機構設計，融合了槓桿式放大機構與曲張式衍伸出之菱形放大機構 (Rhombus-type)，在以下將對兩者作進一步介紹。

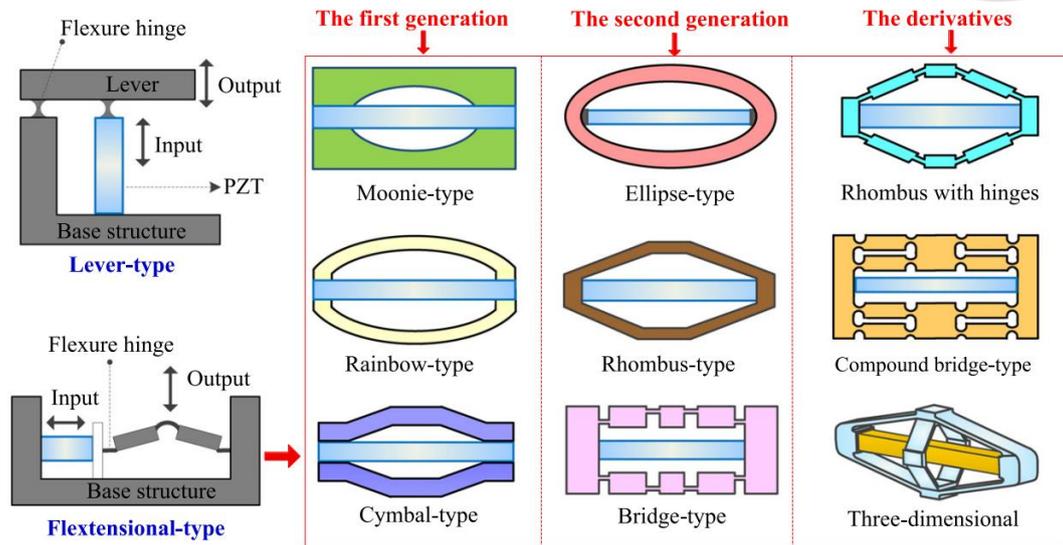


圖 1.3 常見撓性放大機構設計[9]。

1.2.3 槓桿式撓性放大機構

槓桿式撓性放大機構由槓桿結構衍伸而來，如圖 1.4 所示，槓桿一端固定在框架上，使用撓性鉸鏈作為旋轉支點，另一端則作為放大位移輸出端。設定槓桿上近支點一處作為層積式壓電致動器位移輸入端，同樣使用撓性鉸鏈作為連接構造。由於層積式壓電致動器的輸出為軸向位移，槓桿則為旋轉運動，撓性鉸鏈得以吸收槓桿的非軸向位移，避免側向力對層積式壓電致動器造成影響 [10]。

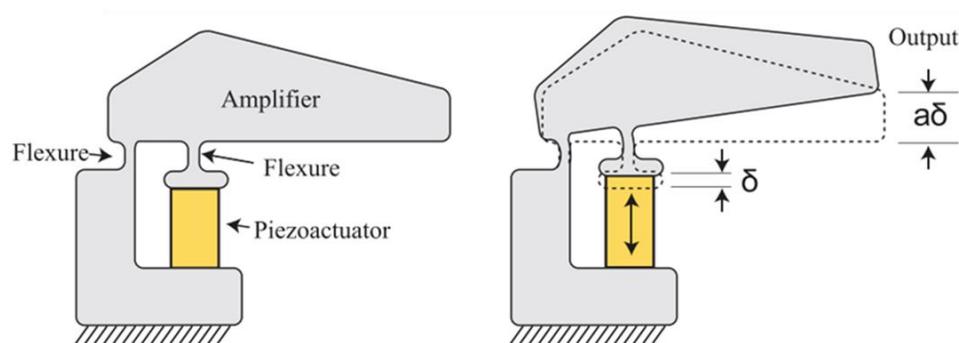


圖 1.4 槓桿式撓性放大機構示意圖[10]。

槓桿式撓性放大機構的放大率，理想上若忽略鉸鏈造成的位移損失，是為位移輸出端至支點長度與層積式壓電致動器輸入端至支點長度的比值。然而實際上，由於連接槓桿與層積式壓電致動器的撓性鉸鏈需承受極大的軸向力，造成不可忽略的形變，進而導致位移輸出的損失[11]，如圖 1.5 所示。因此在設計上需要對此部位做特別處理，或是利用複合式設計使軸向力分散，以確保誤差不致過大與結構安全性，實際偏差量仍需仰賴有限元素分析得知。

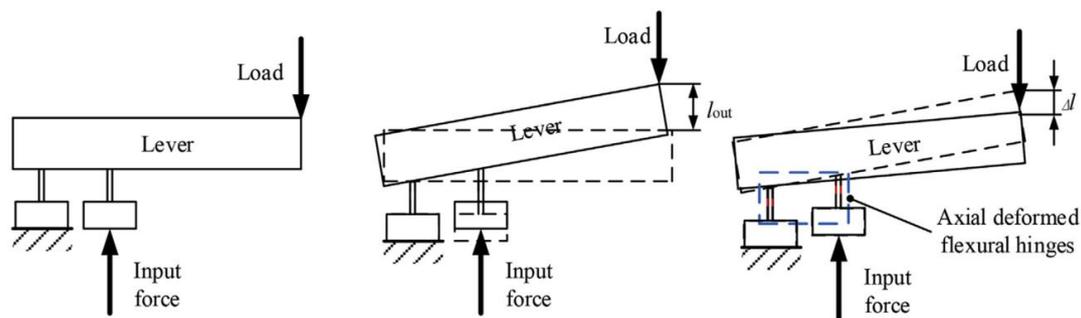


圖 1.5 撓性鉸鏈受力變形導致的輸出位移損失[11]。

1.2.4 菱形撓性放大機構

菱形撓性放大機構為一種曲張式放大機構，此類放大機構多將層積式壓電致動器置於機構中心，透過致動器的伸縮驅動整體機構的形變，產生垂直方向上的位移輸出，如圖 1.6 所示。而相較於槓桿式放大機構僅透過撓性鉸鏈產生形變，菱形放大機構使用厚度較薄的彈性梁，結合撓性鉸鏈與彈性梁的彎曲共同產生輸出位移。

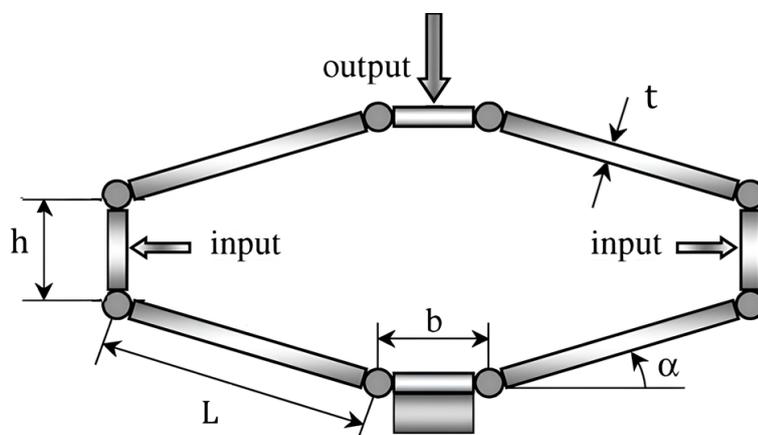


圖 1.6 菱形放大機構運動示意圖[12]。

曲張式設計的優勢在於結構緊湊，在相同的放大率下，所需體積遠較槓桿式放大機構小。圖 1.7 中以橋式放大機構作為代表，顯示在相同放大率下，不同撓性放大機構設計所需的體積[11]。此外，由於菱形放大機構的機構具有對稱性，在層積式壓電致動器連接處不易產生非軸向位移；菱形結構也能吸收負載端的產生的剪切力，防止對致動器造成破壞[13]。

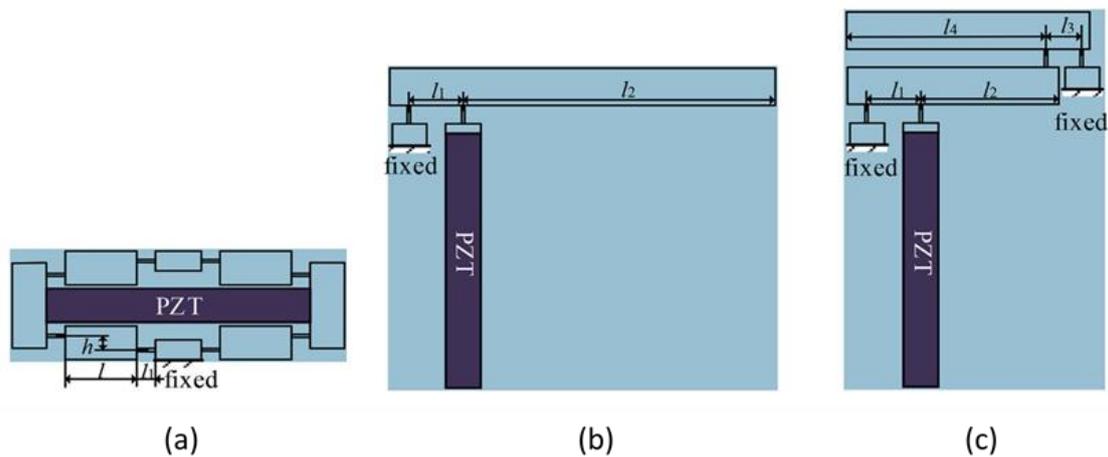


圖 1.7 相同放大率下，(a) 橋式、(b) 槓桿式與 (c) 二階段槓桿式放大機構所需空間示意圖[11]。

然而曲張式設計為封閉式結構，當放大率上升時，機構的應力也會相應顯著提升，需要針對應用場合特別考量。此外，由於菱形撓性放大機構結合了彈性梁的設計，在計算上無法直接使用幾何方式得到準確的放大率，H.-W. Ma 等人[14]結合了運動學分析與彈性梁理論，提出以下菱形放大機構放大率計算公式：

$$R_{amp} = \frac{\text{output}}{\text{input}} = \frac{L \cos\alpha \cdot \Delta\alpha}{(\cos\alpha \frac{t^2 \cos\alpha}{6L \sin\alpha} + L \sin\alpha) \cdot \Delta\alpha} \quad (1.3)$$

其中， L 為梁之長度， t 為厚度， α 為梁與致動器輸出方向的夾角，如圖 1.6 所示。此公式提供放大機構輸出端無負載時的理想輸出計算，由於本研究提出之巢狀式撓性放大機構屬於複合式設計，菱形放大機構屬於其中的一階層，故實際放大倍率仍需透過有限元素分析得知。

1.2.5 複合式撓性放大機構

槓桿式放大機構的放大率取決於其槓桿長度，為了獲得更大的輸出行程，機構體積往往不可避免的增大。曲張式放大機構雖較為緊湊，但放大率有限。為此，透過串聯的複合式設計，將單一放大機構拆分成多個階段、或是結合不同種放大機構，得以滿足在有限的空間內緊湊設計需求，同時兼顧放大率的實用性。

此外，雖然理想的撓性放大機構輸出位移，應與層積式壓電致動器同為一維的平移運動。然而實際上在撓性機構形變時，仍不可避免地發生寄生運動，例如圖 1.8 所示。槓桿式放大機構的旋轉運動，以及曲張式放大機構在二維方向上的位移等，皆可能導致輸出產生偏差。透過並聯的複合式設計，將相同的放大機構對稱排列，便得以抵銷寄生運動的影響[15]。

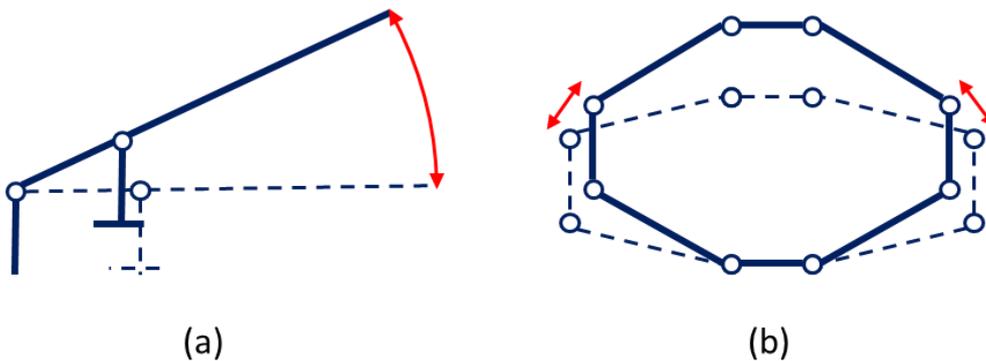


圖 1.8 (a)槓桿式放大機構與 (b)曲張式放大機構的寄生運動示意圖。

圖 1.9 為吳起雲[16]設計之巢狀式撓性放大機構，便是屬於複合式撓性放大機構的一種。該設計由三階段放大機構構成，由輸入端至輸出端依序為菱形形式放大機構、槓桿式放大機構、半橋式放大機構 (Semi-bridge type)。

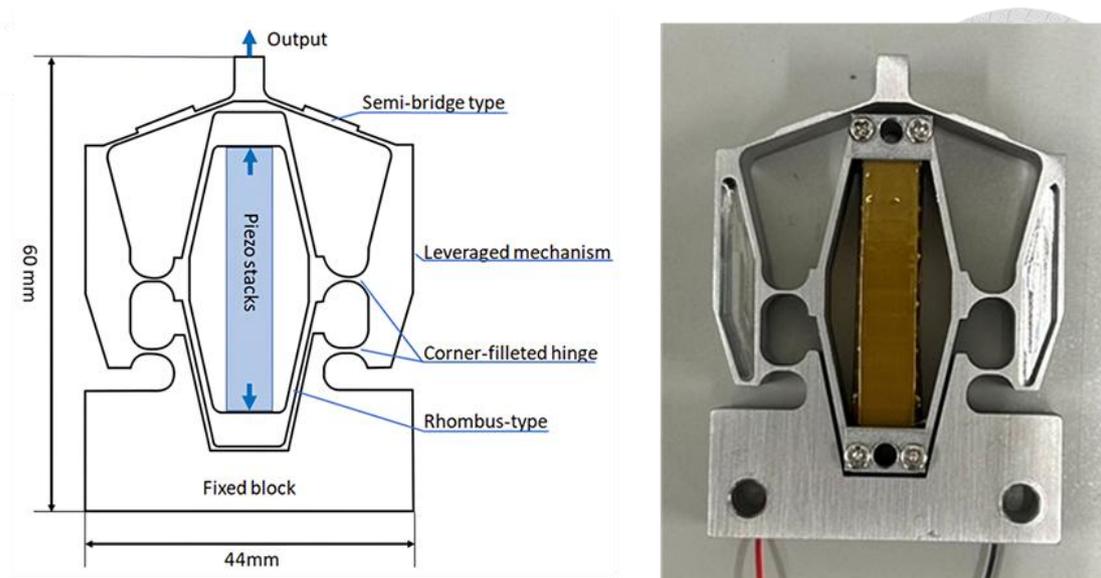


圖 1.9 吳起雲設計的巢狀式撓性放大機構[16]。

該設計為解決槓桿式放大機構空間利用率過低，以及旋轉運動造成的側向力問題。初始之槓桿式設計如圖 1.10 (a)所示。將兩槓桿式放大機構並聯，並使用半橋式結構連接兩槓桿機構的輸出端，形成二階段放大機構，如圖 1.10 (b)所示。此二階段設計雖解決側向力問題和機構並聯導致的輸出方向改變，但仍存在體積過大、共振頻率過低的問題。於是在兩槓桿機構間再加入一菱形放大機構，形成三階段放大機構，如圖 1.10 (c)。以上三階段設計充分利用機構剩餘間隙，並在維持輸出不變的同時縮短過長的槓桿，有效減少外部尺寸並提升共振頻率。

本研究提出之巢狀式撓性放大機構便是由此機構作為基礎改進而成，使用尺寸較小的層積式壓電致動器，使整體結構更為緊湊，並進一步提升放大率和共振頻率，使之得以應用在小型壓電噴射閥之驅動上。

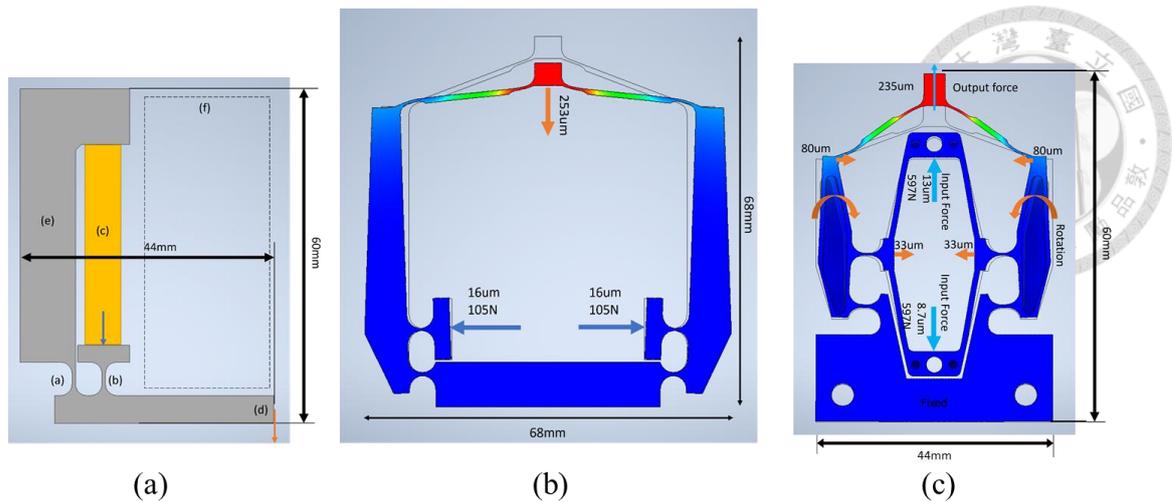


圖 1.10 吳起雲設計的巢狀式撓性放大機構演進過程，依序為 (a) 初始之槓桿式放大機構、(b) 二階段放大機構與 (c) 三階段放大機構[16]。

1.2.6 點膠閥概述

點膠閥用於將流體以受控的方式分配，需要對流體體積、定位進行精確控制，以及滿足相當高的工作頻率。此外，點膠閥需要適用各種不同黏度特性的流體，並滿足易於維護的需求，以減少生產中停機的時間[17]。

點膠閥主要可分為接觸式與非接觸式兩大類，接觸式是發展較為成熟的形式，按流體分配方式主要有圖 1.11 中的(a)時間-壓力式點膠閥(Time-pressure dispensing)、(b)螺旋泵點膠閥(Auger pump dispensing)、(c)活塞式點膠閥(Piston dispensing)三種。其中，時間-壓力式點膠閥結構簡單，但精度較低；螺旋泵點膠閥適用黏度範圍較廣，但流量控制不易；活塞式點膠閥能精確控制體積，但結構複雜且維護要求高。接觸式點膠閥的共同缺陷在於需要進行 z 軸方向位移，故效率和精度普遍較低，且機構體積較為龐大[18]。

非接觸式點膠閥又稱噴射點膠閥，如圖 1.11(d) 所示，主要依靠撞針往復衝擊，將定量的液體擊飛至距離高度 1 至 3.5 mm 的基板上。優勢在於不受基板表面起伏限制，不須進行 z 軸方向位移，如此一來工作流程和機構複雜度得以簡化，並提升工作頻率[19]。但噴射閥的缺點包含適用黏度較低，因此需要搭配加熱或冷卻元件使膠水黏度降低。此外，包含擊飛液珠形狀的不可控，以及可能發生的噴濺問題，都需要對噴嘴進行特殊設計[18]。

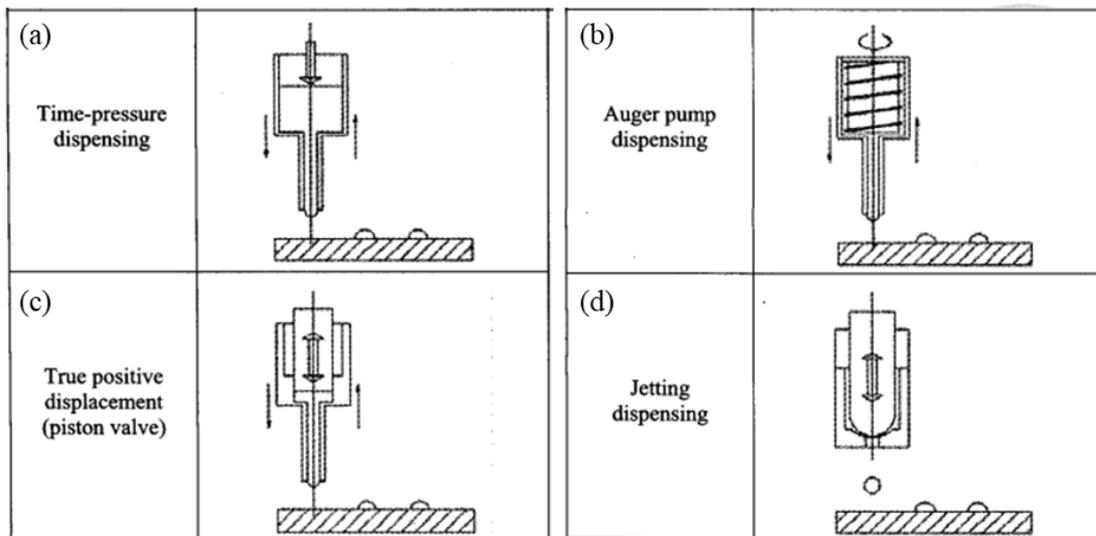


圖 1.11 (a)時間-壓力式點膠閥、(b)螺旋泵點膠閥、(c)活塞式點膠閥、(d)噴射式點膠閥示意圖[18]。

1.2.7 噴射式點膠閥設計

噴射式點膠閥也擁有不同的驅動方式，圖 1.12 為 X. Shu 等人[20]設計的氣動式噴射閥，透過電磁閥精確控制腔室內壓縮空氣的壓力，推動活塞及撞針進行往復運動，以此擊飛液體。雖然氣動式是較早成熟的噴射閥驅動方式，但其缺點在於無法在較高頻率 (大於 100 Hz) 下正常運作，且運作過程中容易產生震動和噪音。

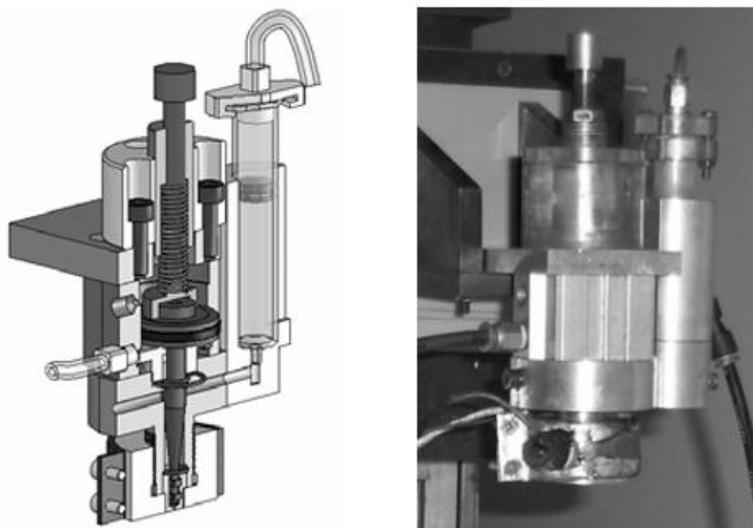


圖 1.12 X. Shu 等人設計的氣動式噴射閥[20]。

圖 1.13(a) 為 J. Jeon 等人[19]設計的轉軸槓桿式壓電噴射閥，使用兩個層積式壓電致動器推動槓桿式放大機構，將壓電行程放大並帶動撞針往復運動。由於層積式壓電致動器響應快速，且輸出位移和剛性皆相當穩定，因此能透過調整層積式壓電致動器輸入訊號，控制出膠量和工作頻率。圖 1.13(b)為此壓電噴射閥的驅動訊號形式，透過兩致動器的相互伸縮配合，控制槓桿及撞針的往復運動，此種設計結構簡單、壓電力量損失小。在抬升階段 (Rising stage)中，不須透過預壓彈簧使槓桿和撞針隨層積式壓電致動器抬升，得以減少零件數量與擊發時的能量損耗，但相對的會提升控制難度。

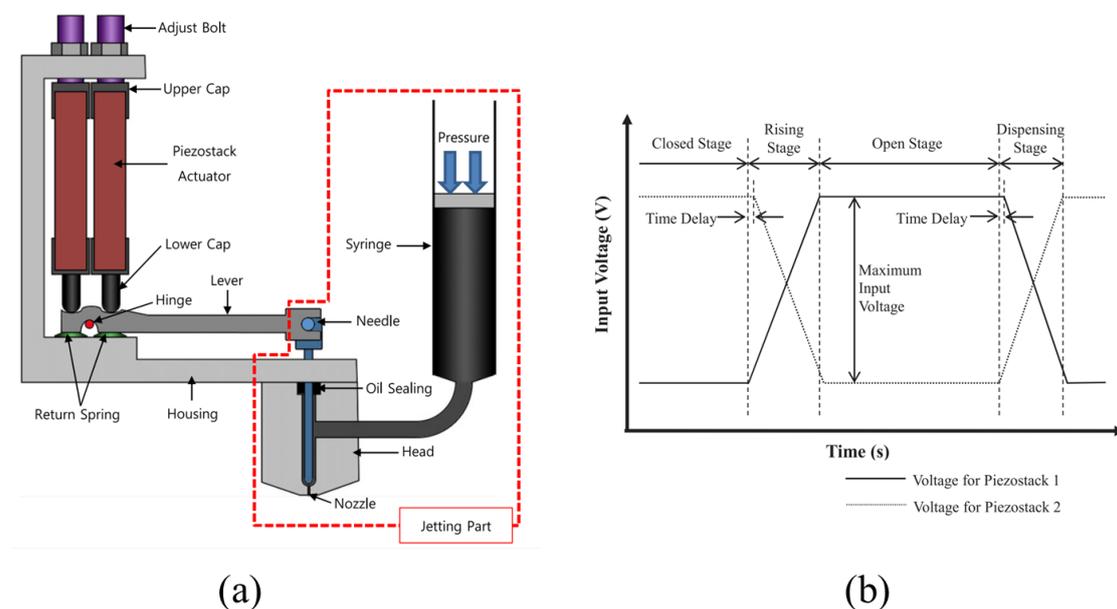


圖 1.13 (a) J. Jeon 等人設計的轉軸槓桿式壓電噴射閥與其(b)驅動訊號[19]。

其所使用的層積式壓電致動器長度為 40 mm，槓桿臂長為 51.5 mm。此類轉軸槓桿式噴射閥的缺點在於空間利用率和壽命問題。圖 1.13(a) 中可見層積式壓電致動器右方、槓桿上方仍有未使用空間；由於槓桿式放大機構為提高放大率，臂展必須相對應延長，導致體積的增大。此外，槓桿的轉軸在經過長時間工作後容易產生磨耗，也會影響噴射閥性能和壽命。

圖 1.14 為 X. Huang 等人[21]設計的橫置撓性槓桿式壓電噴射閥。此設計將兩層積式壓電致動器平行放置，並使用限位塊 (Limited block) 將其固定在撓性鉸鍊之上。當兩致動器交互伸長縮短，會使撓性鉸鍊產生彎曲形變，帶動與致動器平行的槓桿上下移動。此設計解決了一般槓桿式放大機構體積過大、空間利用率低的問題，並且撓性鉸鍊的設計在關節處也不易產生磨耗。

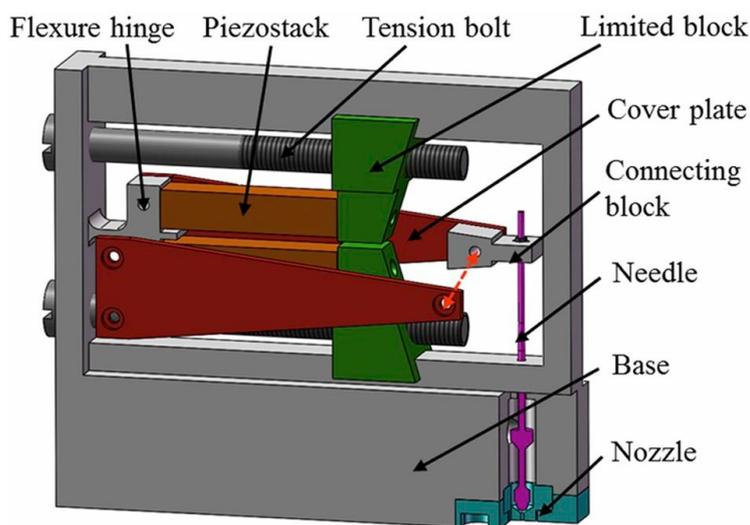


圖 1.14 X. Huang 等人設計的橫置撓性槓桿式壓電噴射閥[21]。

圖 1.15 為 S. Lu 等人[22]設計的壓電噴射閥，使用單層菱形撓性放大機構。當置於菱形放大機構中的層積式壓電致動器伸長時，菱形放大機構輸出端向上縮回，撞針隨彈簧上抬；當層積式壓電致動器收縮，菱形放大機構輸出端向下推出撞針，擊發液珠。此設計空間利用率較槓桿式高且結構簡單；因採用撓性放大機構，亦不易產生磨耗問題。

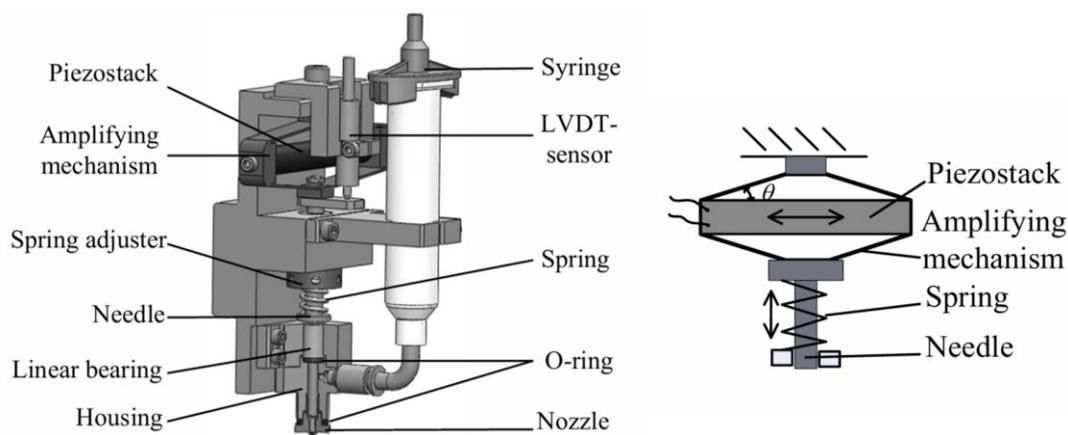


圖 1.15 S. Lu 等人設計之菱形撓性放大機構壓電噴射閥[22]。

1.2.8 商用噴射閥

當今市場上亦有許多商用噴射閥。如圖 1.16 為 Vermes 公司之 MDS 3280 Series 噴射閥，採用轉軸槓桿式形成放大機構，在壓電與槓桿間、槓桿撞針間皆使用弧面接觸，避免槓桿的旋轉運動與壓電、撞針的直線運動相互影響。其撞針與液盒為一體快拆式設計，撞針下方有圈狀彈簧支撐，提供撞針和槓桿在層積式壓電致動器收縮時，跟隨一同抬升運動的推力。

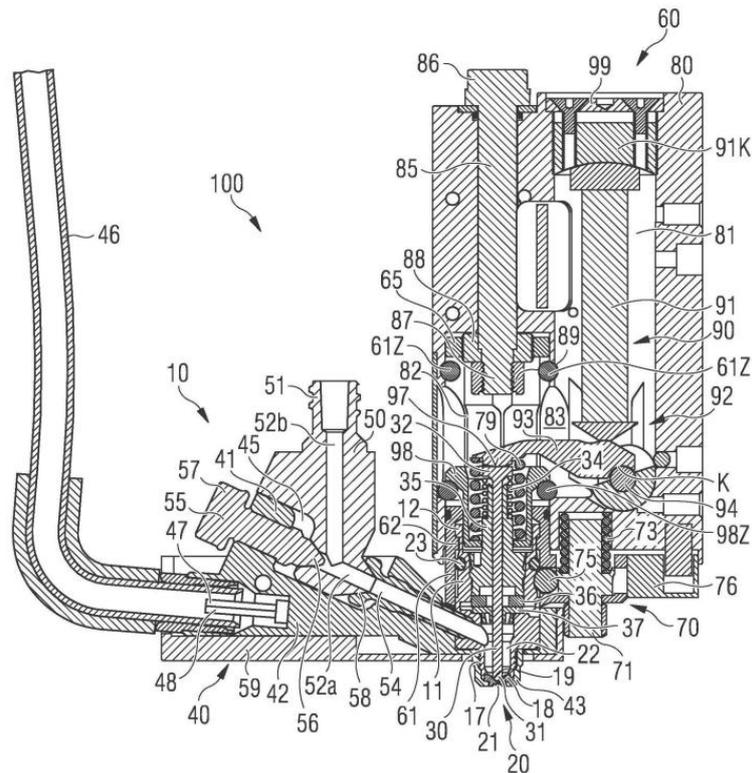


圖 1.16 Vermes 公司之 MDS 3280 Series 噴射閥[23]。

圖 1.17 為 Nordson 公司之 PICO Pulse 噴射閥，採用撓性槓桿式放大機構，具有 8 倍的放大率，較長的撓性鉸鍊有助於減小機構剛性並吸收槓桿旋轉導致的非軸向位移。放大機構輸出端有一推桿，與噴嘴撞針間使用弧面接觸，同樣也是避免槓桿旋轉產生的非軸向位移導致撞針彎曲。層積式壓電致動器兩側的 S 形彈簧用於提供預壓，使撓性放大機構隨層積式壓電致動器同步運動；撞針下方的彈簧也用於使撞針與推桿一同運動。



1.3 研究動機與目標

本研究提出一種巢狀式撓性放大機構，滿足壓電噴射閥之撞針行程所需，且共振頻率在壓電噴射閥之最高工作頻率之上，並圍繞此機構設計一款具備實用性的小型壓電噴射閥。使用有限元素分析對撓性放大機構進行模擬，並透過實際量測驗證其各項性能參數，以及進行膠水擊發測試。目標在縮小閥體體積的同時，仍保有一定性能與拆卸便捷性。

表 1.1 自製壓電噴射閥與市售噴射閥尺寸比較。

市售壓電噴射閥	放大機構形式	不含液盒之閥體尺寸 (長×寬×厚)
PICO Pulse, Nordson [24]	槓桿式撓性	50.8 mm × 82 mm × 22 mm
MDS 3280 Series, Vermes [23]	轉軸槓桿式	41.5 mm × 73 mm × 25 mm
Sjet, Marco [25]	橫置槓桿式	69 mm × 41.5 mm × 17 mm
本研究自製壓電噴射閥	巢狀式撓性	40 mm × 50 mm × 20 mm

1.4 內容簡介

本論文一共分為五個章節，本章節為緒論，簡述本研究之技術背景與參考文獻，包含層積式壓電致動器、撓性放大機構、噴射點膠閥的特性與設計等，以及本研究之目標。

第二章為原理與設計，陳述本研究採用之層積式壓電致動器、撓性放大機構和壓電噴射閥之設計與構造，並進行模擬以驗證及獲得參數。

第三章為量測系統架構與實驗儀器，規劃實驗架構、流程與對應的量測目標，實驗用於驗證前一章節之模擬結果，並簡介使用到的儀器。

第四章為實驗結果，包含實驗前的參數校正，以及實驗後所得數據之計算與探討。

第五章為結論與展望，將前一章節之結果進行總結，並提出應改進之處與未來發展的可能性。

第二章 原理與設計



2.1 巢狀式撓性放大機構

本研究提出的巢狀式撓性放大機構，以及使用的層積式壓電致動器如圖 2.1 所示。本節將對兩者特型與設計詳細說明，並進行有限元素分析及模態分析，與第三章的實驗結果相互應證。

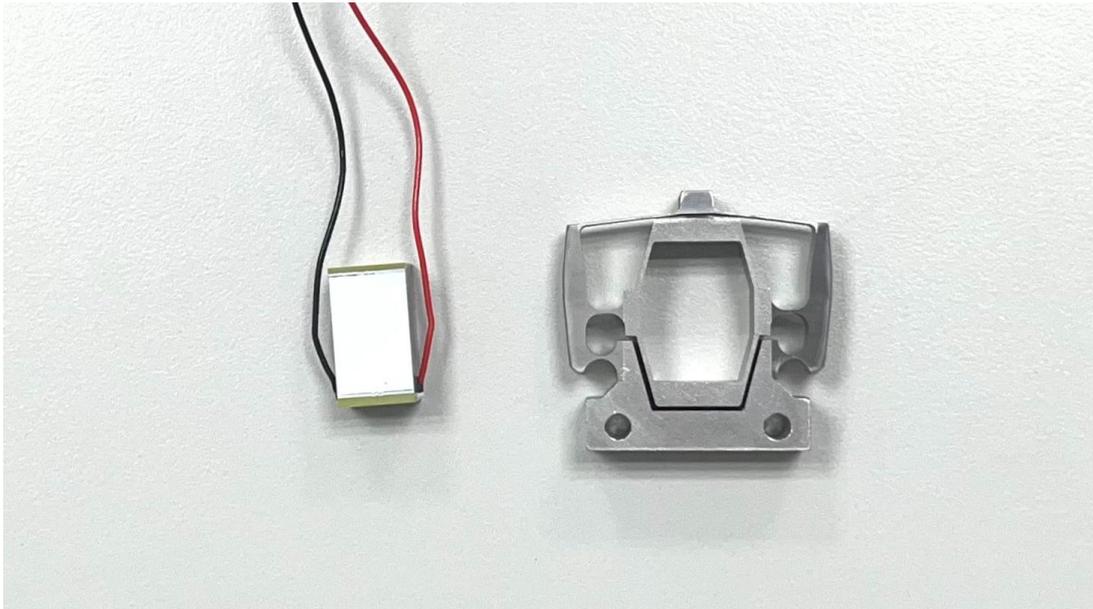


圖 2.1 本研究設計之層積式壓電致動器與巢狀式撓性放大機構。

2.1.1 層積式壓電致動器

本研究採用 Piezomechanik GmbH 生產的 PSt 150/10×10/20 層積式壓電致動器來驅動放大機構，在無電壓輸入的情況下，其長×寬×高分別為 10 mm × 10 mm × 18 mm。致動器驅動模式分為雙極模式(Semi-polor mode)和單極模式(Unipolor mode)，前者電壓訊號範圍為 -30 V 至 150 V，即行程範圍包含伸長和縮短；後者則為 0 V 至 150 V，僅有伸長行程。層積式壓電致動器在雙極模式下具有較大的位移範圍和阻擋力 (Blocking force)，但在長期使用下壽命會受到影響；由於阻擋力與操作電壓成線性關係，故單極模式阻擋力較雙極模式少 16.7%。

本研究之應用為單極模式，驅動電壓介於 0 V 至 150 V 之間。根據規格書 [附錄 A]，當自由端無負載時，層積式壓電致動器在 150 V 時有最大行程 $D_{max} = 20 \mu\text{m}$ ；而當自由端有極大負載，使輸出位移為 0 時，則有阻擋力 $F_{max} = 7000 \times 0.833 = 5833.3 \text{ N}$ 。兩極限值間即為層積式壓電致動器之工作區間，區間內層積式壓電致動器出力與位移呈線性反比關係。

2.1.2 巢狀式放大機構設計

本研究提出之巢狀式撓性放大機構，在基礎上參考了吳起雲[16]提出的放大機構設計，並將設計小型化，以適應更緊湊的安裝空間與應用。放大機構採用 304 不鏽鋼進行加工，外觀如圖 2.2 所示，尺寸為 $34.2 \text{ mm} \times 33.5 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ ，中空部位用於垂直放置層積式壓電致動器。

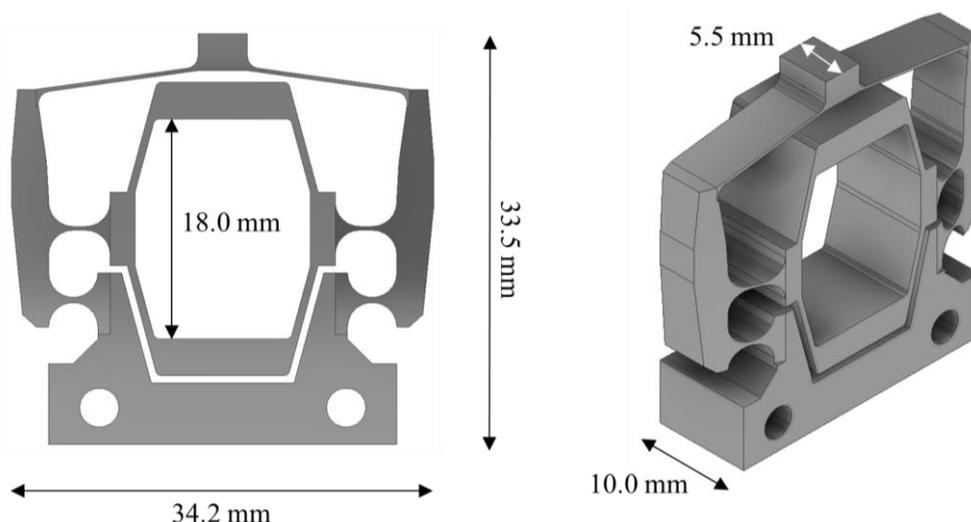


圖 2.2 本研究提出之巢狀式撓性放大機構外觀。

本巢狀式撓性放大機構由三階段的放大機構設計構成，以中心處的層積式壓電致動器為起點，由內而外分別為菱形放大機構、雙槓桿式放大機構、半菱形放大機構。當層積式壓電致動器伸長，首先會使菱形放大機構兩側向內收縮 (圖 2.3 (a))，是為第一階段放大行程。此行程帶動位於機構兩側、相互對稱的槓桿式放大機構向內彎曲 (圖 2.3 (b))，產生第二階段放大行程。接著兩槓桿式放大機構的向內位移量，使位於機構頂端的半菱形放大機構彎曲，產生向上的位移輸出 (圖 2.3 (c))，是為第三階段放大，亦為整體放大機構之位移輸出。

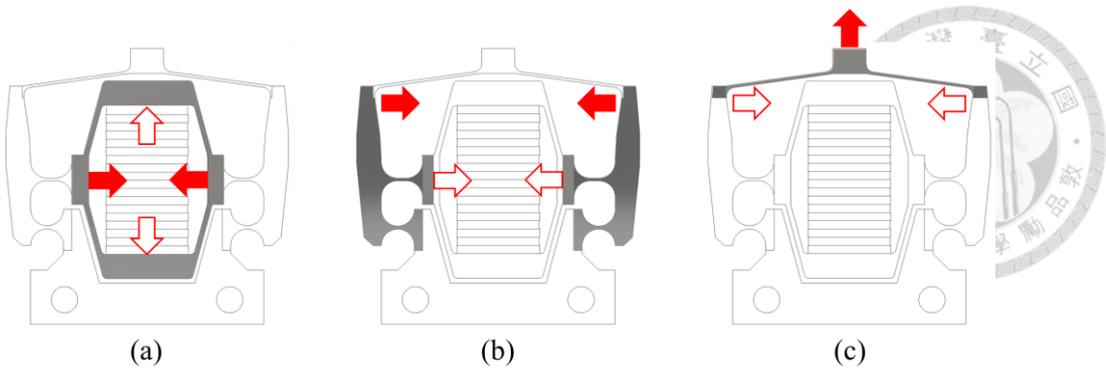


圖 2.3 巢狀式撓性放大機構各階段放大示意圖，依序為(a)第一階段、(b)第二階段與(c)第三階段放大。

第一階段的菱形放大機構，其內部用於放置層積式壓電致動器空間的高度為 18 mm，兩側斜面的厚度為 0.6 mm，透過有限元素模擬，可以得到如圖 2.4 (a) 之斜面角度之於放大率和機構剛性的關係圖：

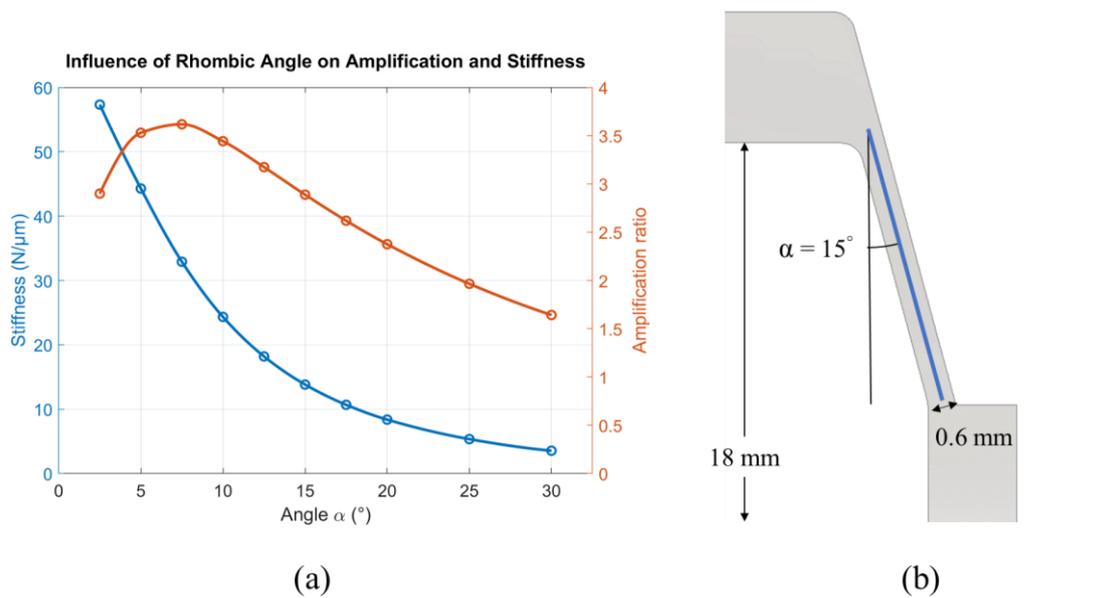


圖 2.4 (a) 菱形放大機構斜面角度與放大率和剛性關係圖與 (b) 示意圖。

圖 2.4 (a) 中，橘線與藍線分別代表菱形放大機構之放大率和機構剛性，隨斜面角度變化的趨勢。雖然斜面角度為 7.5 度時，菱形放大機構具有最高的放大倍率，但此時過高的機構剛性會導致層積式壓電致動器的行程縮短，反而減少機構輸出行程。為此，本菱形放大機構採用 15 度的斜面角度，在放大率與機構剛性間取得平衡，具有 2.89 倍的放大率理論值與 13.82 N/ μm 的彈性常數。

第二階段的雙槓桿式放大機構採對稱式設計，為獲得較高的旋轉精度，避免兩槓桿輸出端可能產生的誤差，採用半徑 2 mm 的正圓撓性鉸鍊。另外，由於此放大機構用於驅動噴射閥之撞針，輸出端僅需較小的接觸面，因此在第二階段透過斜面設計，將機構厚度由 10 mm 減至 5.5 mm，一方面能減少機構阻力，斜面設計也能防止應力集中發生。

第三階段的半菱形式放大機構與第一階段相似，斜面臂長 13.2 mm，厚度為 0.3 mm，斜面角度為 8 度。由於厚度較薄，機構剛性較低，因此能使用較小的斜面角度。然而較大的形變量可能對鉸鍊部位造成應力集中，故與第二階段連接處採用尺寸較大、半徑為 1 mm 圓角鉸鍊。

2.1.3 放大機構組裝

首先，使用雷射位移計量測層積式壓電致動器自由端懸空時的位移行程，以驗證規格書 [附錄 A] 的參數正確性。實驗輸入電壓由 0 V 至 150 V，以 10 V 為間距遞增，並記錄各電壓下穩定時的平均位移，結果如圖 2.5 所示。當層積式壓電致動器自由端懸空時，其在 150 V 最大驅動電壓時行程達 21.2 μm ，較規格書上之值 20.0 μm 多出 6%。

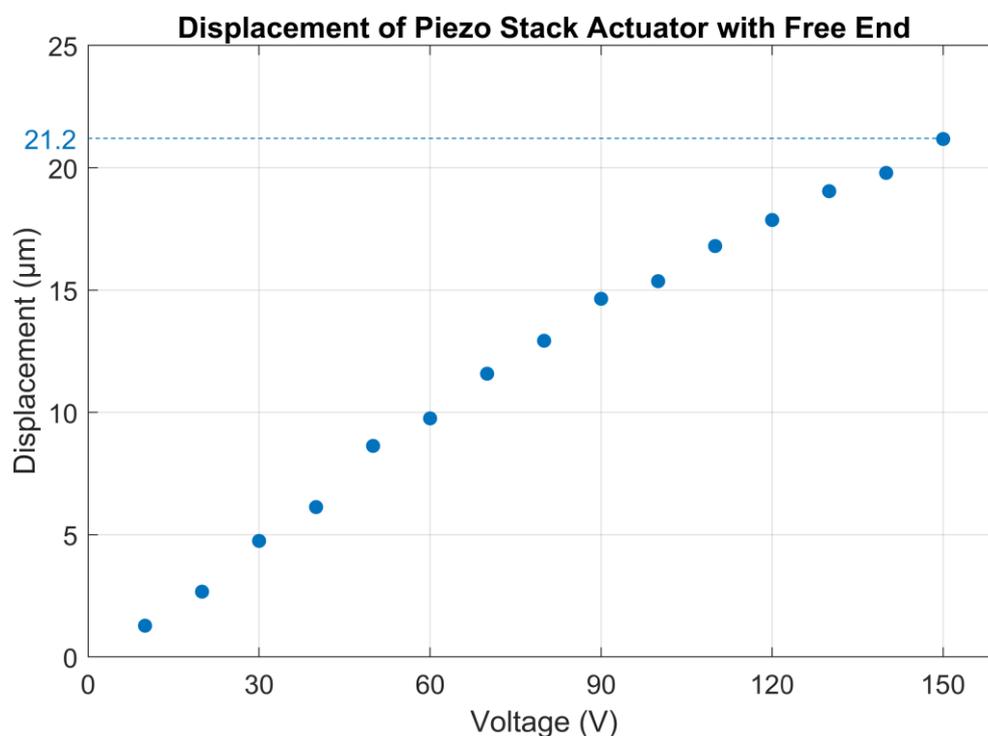


圖 2.5 層積式壓電致動器在無預壓力時的位移-驅動電壓關係圖。

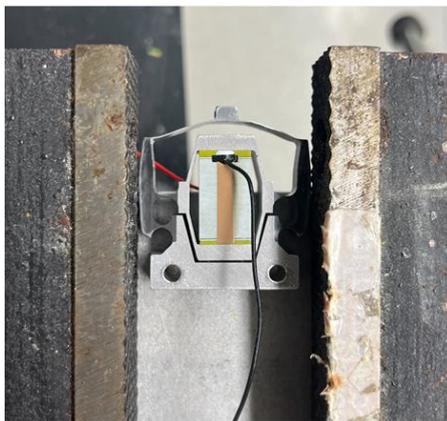
將層積式壓電致動器放入放大機構前，預先測量層積式壓電致動器與欲放入之放大機構輸入端長度(即第一階段之菱形放大機構中空之長度)，如圖 4.2 (a) 與 4.2 (b) 所示，長度分別為 18.04 mm 與 17.99 mm。接著使用虎鉗自放大機構兩側之槓桿式放大機構處夾持，並緩慢進給，使機構伸長提供致動器放入空間。同時避免因過度伸長，致使局部應力過大，進而導致機構塑性變形。過程如圖 4.2 (c) 所示。圖 4.2(d)則為放入層積式壓電致動器後，放大機構輸入端之長度，等於層積式壓電致動器長度 18.04 mm。對比圖 2.6 (b) 和 (d)，層積式壓電致動器放入放大機構後，使輸入端產生形變約 0.05 mm；此形變量會對層積式壓電致動器產生預壓力，是在進行有限元素分析時需要考慮的重要因素。



(a)



(b)



(c)



(d)

圖 2.6 (a) 層積式壓電致動器之原始長度，(b) 放大機構輸入端之中空長度，(c) 利用虎鉗放入層積式壓電致動器，以及 (d) 組裝完成後之層積式壓電致動器長度。

2.1.4 有限元素分析

透過有限元素分析，可以模擬巢狀式撓性放大機構在受力時所造成的應力與形變，進而得到輸出行程與放大率等放大機構的性能參數，作為評估設計的參考依據。本研究使用 Autodesk Inventor 軟體，對巢狀式撓性放大機構進行建模與分析，分析時的材料參數設定如表 2.1 所示。

表 2.1 放大機構材料參數設定。

材料	楊式模數	蒲松氏比	剪切係數	密度	降伏強度
304 不鏽鋼	193 GPa	0.30	8.39 GPa	8 g/cm ³	250-500 MPa

放大機構模型採用四面體元素進行網面劃分，平均元素大小設定為 0.3 mm（約為模型外包體對角線長度的 1%）。最小元素大小為 0.06 mm，網面成長係數設為 1.5。為提高曲面幾何精度，啟用曲面擬合網面元素，最大轉向角度限制為 60°。

邊界條件部分如圖 2.7 (a) 所示，在機構下方兩個鎖孔處分別設定銷約束，模擬安裝時使用螺絲固定之情形；同時在其中一側的平面設定無摩擦約束，限制法線方向上的運動，模擬將其固定於平面之上。

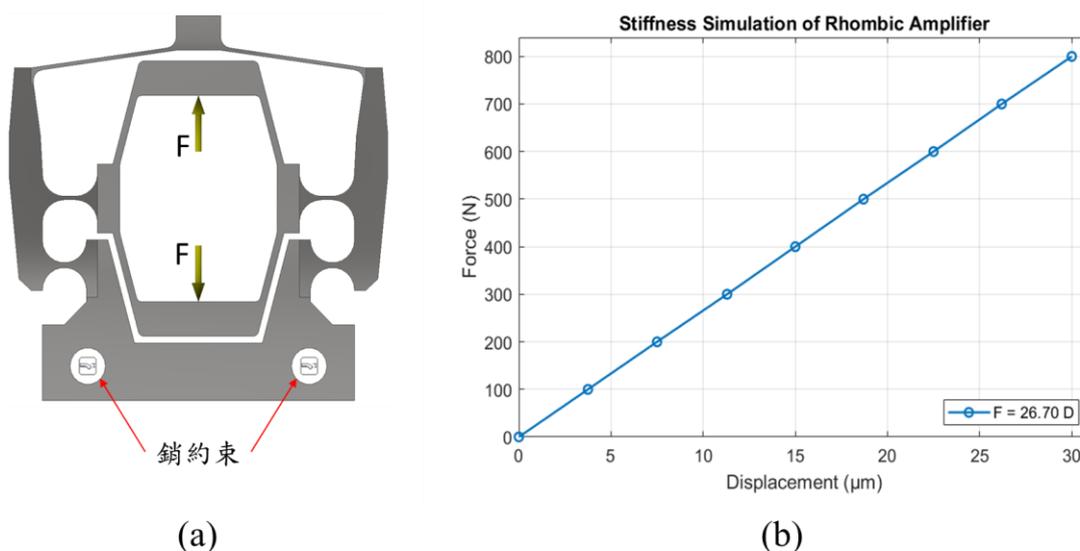


圖 2.7 模擬菱形放大機構力量輸入端的 (a) 負載與邊界條件，(b) 負載-位移關係圖。

機構建模完成後，為得知層積式壓電致動器之出力作為負載設置，須先計算致動器推力輸入端、即菱形放大機構處之彈簧常數。透過在推力輸入端設置不同的負載，模擬層積式壓電致動器的不同出力，並記錄輸入端的位移變化。如圖 2.7 (b) 所示，設定 0 至 800 牛頓的負載推力，可以得到位移變化量與推力的線性關係，其斜率 $26.70 \text{ N}/\mu\text{m}$ 是為放大機構推力輸入端之彈性常數。

將此彈性常數 $26.70 \text{ N}/\mu\text{m}$ ，結合 2.1.3 節中量測到的層積式壓電致動器放入後，對放大機構輸入端造成的形變量約為 $50 \mu\text{m}$ ，可以推算出層積式壓電致動器在放大機構中受到的預壓力約為 1335 N 。

層積式壓電致動器在固定驅動電壓的條件下，其出力與位移呈線性反比關係，因此可將其視為一等效彈簧，用以繪製負載-位移關係圖，如圖 2.8 所示。圖中橘色直線為根據規格書 [附錄 A] 以及 2.13 節的量測結果，所繪製之層積式壓電致動器於 150 V 驅動電壓下的負載-位移關係，線上任意點皆為致動器在不同負載下的工作點。其中， $D_{max} = 21.2 \mu\text{m}$ 為層積式壓電致動器在無負載情況下的最大位移； $F_{pre} = 1335 \text{ N}$ 為放大機構輸入端對層積式壓電致動器施加的預壓力； $F_{max} = 5833.3 \text{ N}$ 則為層積式壓電致動器在單極模式下的阻擋力，計算過程見 2.1.1 節。

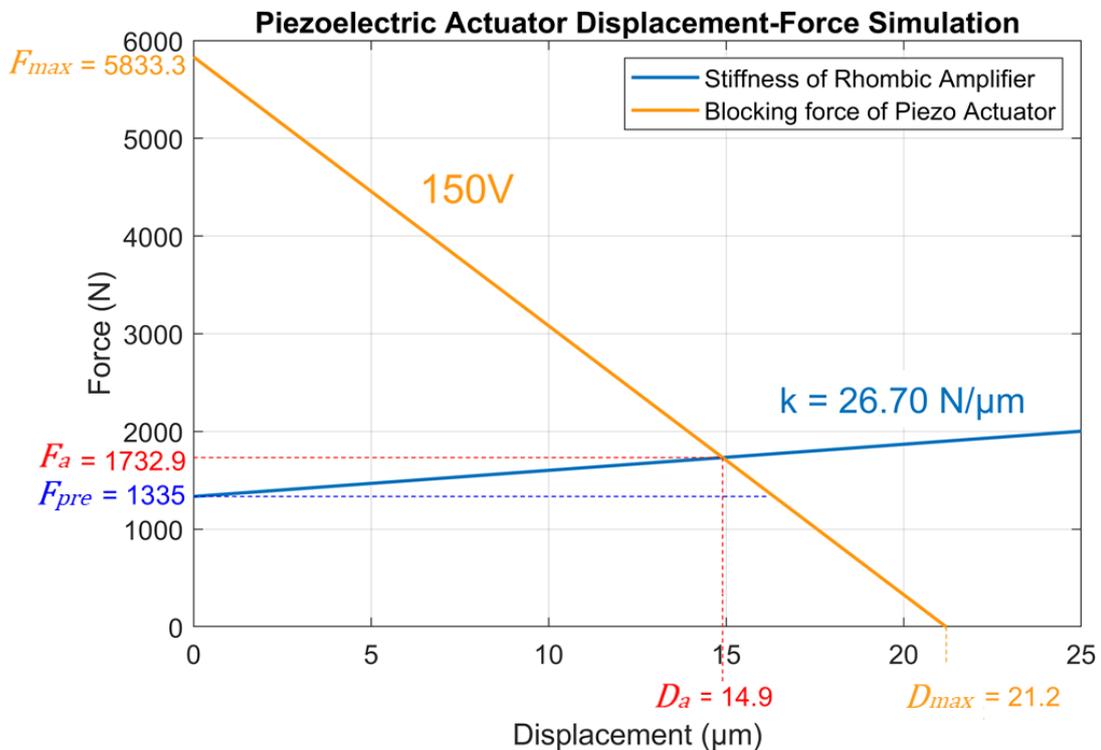


圖 2.8 層積式壓電致動器與菱形放大機構之負載-位移關係圖。

結合先前獲得的菱形放大機構處負載-位移關係 (見圖 2.7 (b))，代入成為圖 2.8 中之藍色直線，藍線與橘線的交點便是層積式壓電致動器與撓性放大機構的平衡位置。此時層積式壓電致動器位移 D_a 為 $16.35 \mu\text{m}$ ，輸出給機構之推力 F_a 為 1732.9 N 。

將層積式壓電致動器之推力 $F_a = 1732.9 \text{ N}$ ，扣除預壓力 1335 N 所抵銷的部分，實際輸出的出力為 397.9 N 。將此力作為撓性放大機構負載代入有限元素分析，可以得到巢狀式撓性放大機構在 150 V 驅動電壓下的最大位移模擬結果，如圖 2.9 所示。

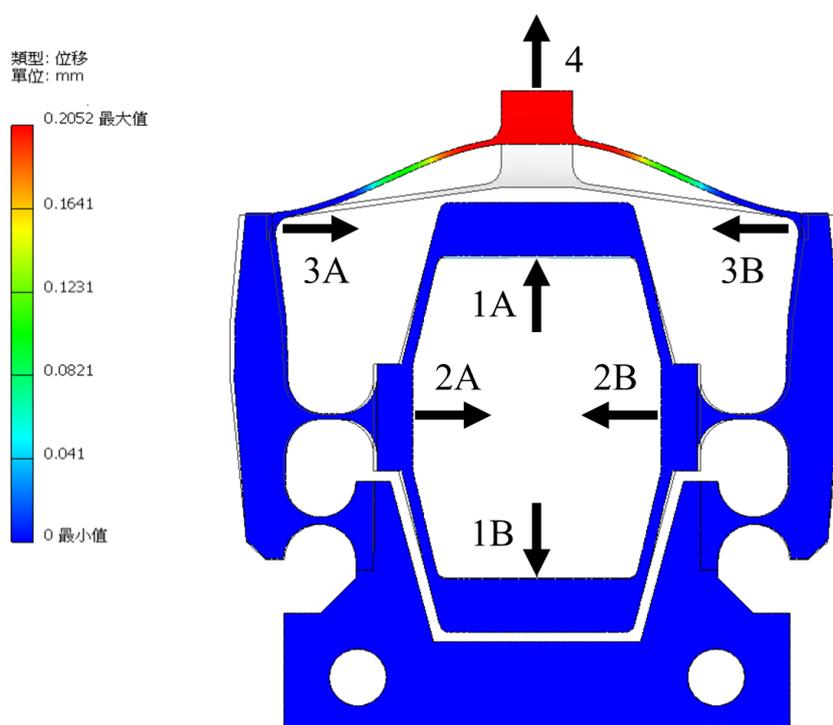


圖 2.9 放大機構於 150V 驅動電壓下之有限元素分析位移圖。

圖 2.9 中，層積式壓電致動器出力產生的向上與向下位移分別如箭頭 1A 和 1B 所示，其位移量分別是 $8.4 \mu\text{m}$ 與 $6.5 \mu\text{m}$ ，層積式壓電致動器自身總伸長量為 $14.9 \mu\text{m}$ ，與前述模擬吻合。

第一階段菱形放大機構輸出位移如箭頭 2A 和 2B 所示，輸出端位移量皆為 $14.4 \mu\text{m}$ ，第一階段總位移為 $28.8 \mu\text{m}$ ，放大率為 1.93 倍。

第二階段槓桿式放大機構輸出位移如箭頭 3A 和 3B 所示，輸出端位移量皆為 $29.2 \mu\text{m}$ ，第二階段總位移為 $58.4 \mu\text{m}$ ，放大率為 2.03 倍。

第三階段半菱形式放大機構位移如箭頭 4 所示，此位移即為巢狀式放大機構整體的總位移輸出，其位移量為 205.2 μm 。此階段放大率為 3.51 倍，而巢狀式撓性放大機構之總放大率為 13.77 倍。

表 2.2 放大機構於 150 V 驅動電壓下之有限元素分析位移結果。

	層積式壓電致動器輸出	第一階段菱形放大機構	第二階段雙槓桿式放大機構	第三階段半菱形式放大機構
位移 (μm)	14.9	28.8	58.4	205.2
放大率		1.93	2.03	3.51
總倍率		13.77		

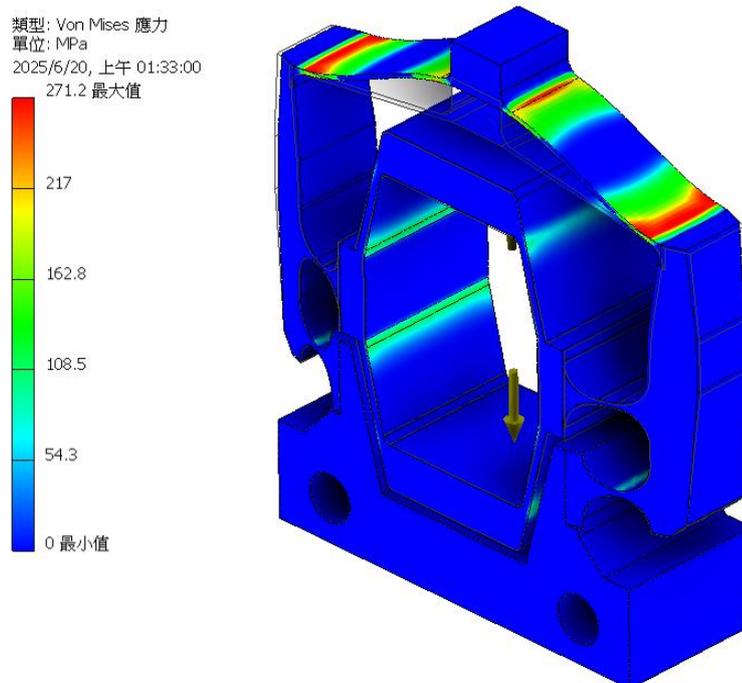


圖 2.10 巢狀式放大機構於 150 V 驅動電壓下之等效應力分布圖。

自圖 2.10 之等效應力分布圖中，可看出應力主要集中在撓性鉸鍊的位置。其中應力最大值出現在第三階段半菱形放大機構處，由於此處靠近輸出端，位移量與鉸鍊處形變量為機構各部位中最大，最高可達 271.2 MPa，須注意可能產生的塑性變形。

2.1.5 模態分析

由於壓電噴射閥一般工作頻率達數百赫茲，本研究採用之商用噴射閥控制器最高驅動頻率達 1.67 kHz，可能與放大機構的自然頻率重疊並產生共振；若於長期共振頻率附近工作，對噴射閥的穩定性和壽命都會造成負面影響。故須對放大機構進行模態分析，確認其自然頻率與噴射閥工作頻率不會互相影響。

與有限元素分析相同，本研究採用 Autodesk Inventor 軟體進行模態分析，並沿用放大機構的材料參數設定。由於層積式壓電致動器安裝於放大機構內，隨放大機構共同運動，故在進行模態分析時需考慮層積式壓電致動器的因素，以下是層積式壓電致動器之材料參數設定：

表 2.3 層積式壓電致動器材料參數設定 [附錄 A][27]。

材料	楊式模數	蒲松氏比	剪切係數	密度	降伏強度
PZT 壓電陶瓷	65 GPa	0.30	30 GPa	8.0 g/cm ³	68 MPa

此外，由於層積式壓電致動器與放大機構間沒有硬連接，僅依靠放大機構之預壓力固定，故為得知層積式壓電致動器與放大機構之間的接觸關係，需計算兩者接觸面上之法向勁度與切向勁度。其中法向勁度 k_n 為已知的放大機構輸入端彈性常數 26700 N/mm，切向勁度 k_t^{eff} 則可由摩擦係數近似法進行估算，如式(2.1)所表示：

$$k_t^{eff} \approx \alpha \cdot \mu \cdot k_n = 0.5 \cdot 0.4 \cdot 26700 = 5340 \text{ N/mm} \quad (2.1)$$

其中， α 為考慮實際滑移與能量損失的經驗係數，通常取 0.5； μ 則為接觸面之摩擦係數。將以上參數代入模態分析模擬，得到放大機構前四個共振頻率與其振動模態，結果如圖 2.11 所示。

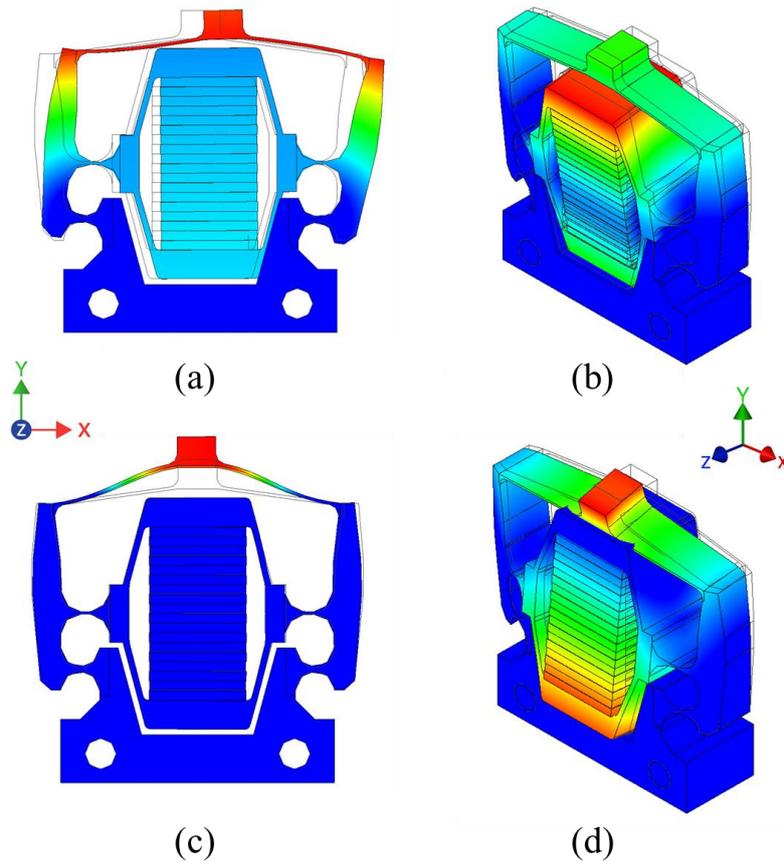


圖 2.11 巢狀式撓性放大機構 (a) 第一、(b) 第二、(c) 第三、(d) 第四共振模態。

第一共振模態發生在 900 Hz，為第二階段槓桿式放大機構沿 X 軸方向產生的不對稱擺動(圖 2.11(a))。

第二共振模態發生在 1356 Hz，為第一階段菱形放大機構以與槓桿機構連接處為中心，繞 X 軸方向產生的彎曲振動(圖 2.11(b))。

第三共振模態為主模態，發生於 1931 Hz，為第三階段槓桿式放大機構沿 Y 軸方向產生的伸縮振動，與放大機構輸出方向吻合(圖 2.11(c))。此共振頻率已超出壓電噴射閥一般工作範圍，以及本研究採用之商用壓電噴射閥驅動器之最高驅動頻率。

第四共振模態發生在 2094 Hz，為第一與第三階段放大機構以槓桿機構連接處為中心，繞 X 軸方向產生彎曲振動(圖 2.11(d))。

以上僅針對主模態頻率附近，及低於主模態頻率的共振模態進行說明；由於本研究採用之商用噴射閥驅動器最高驅動頻率僅 1.67 kHz，其餘更高頻率之共振模態已遠超出放大機構應用上之工作頻率，因此不再一一列舉討論。

2.2 噴射閥

2.2.1 噴射閥設計

本研究提出的壓電噴射閥，圍繞自製撓性壓電行程放大機構進行設計，在外型上盡可能達到緊湊、易加工為目的。自製壓電噴射閥使用不鏽鋼加工，可分為兩個部分：安裝撓性放大機構與層積式壓電致動器的閥體，以及集合膠水流道與撞針機構於一體的液盒。外觀及尺寸如圖 2.12(a)、(b) 所示，長×寬×厚分別為 69.5 mm×72.7 mm×20 mm。

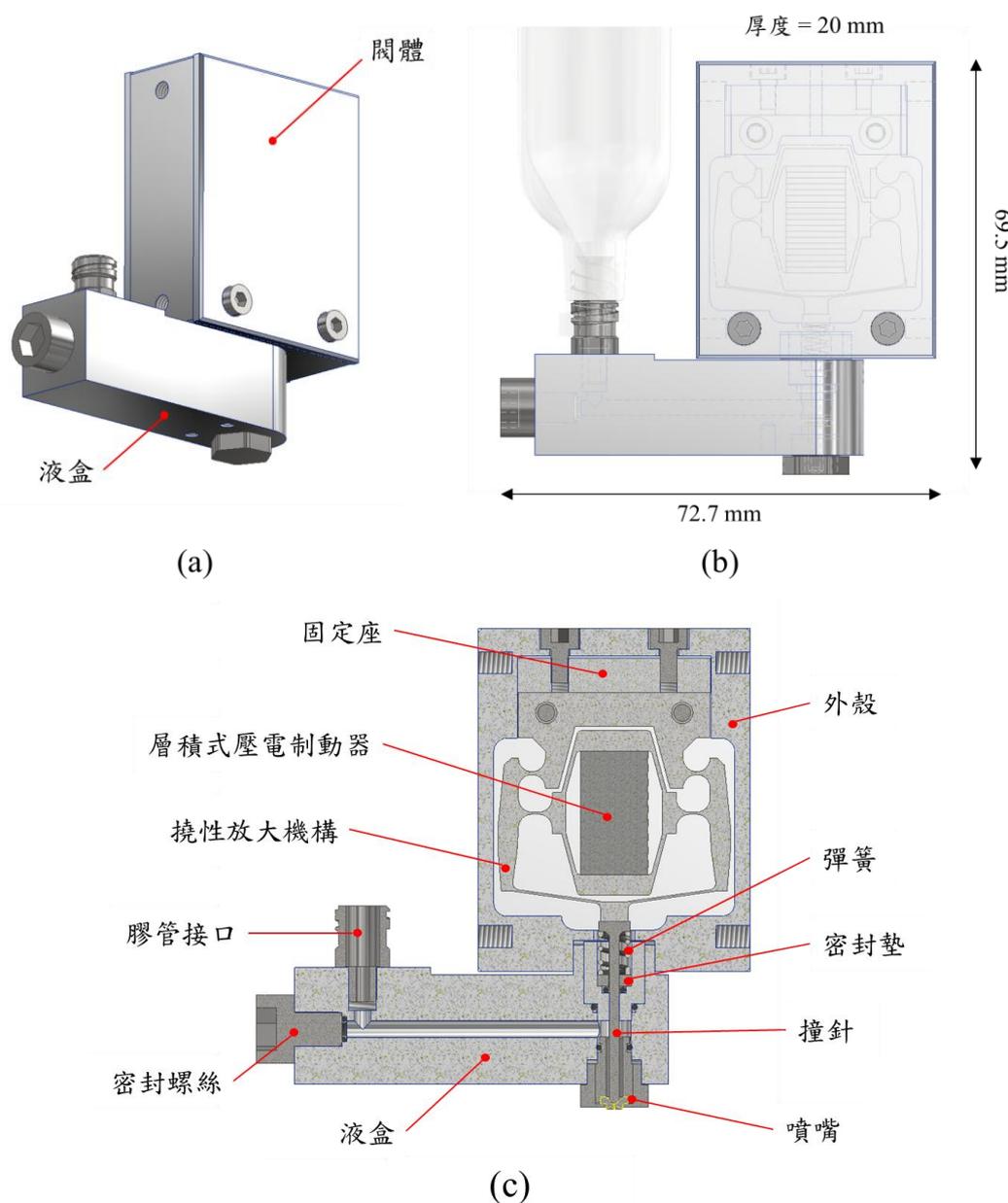


圖 2.12 自製壓電噴射閥機構之 (a) 外觀、(b) 尺寸與 (c) 機構剖面圖。

圖 2.12 (c) 為自製壓電噴射閥的剖面視圖。撓性放大機構輸出端朝下，垂直安裝於固定座上，用於放大層積式壓電致動器的行程，推動撞針運動。撞針具半球形頂端、直徑為 1.5 mm；由一自由長度 7 mm，彈簧常數 0.6 kg/mm 的壓縮彈簧支撐，並放置在液盒中。撞針與液盒間具有密封墊，在確保撞針運動順暢的同時防止膠水洩漏。撞針與放大機構輸出端之間沒有硬連接，而是透過彈簧恢復力，讓兩者在運動過程中保持貼合。噴嘴部分則採用 VERMES 製的 N11-100 平噴嘴，孔徑為 100 μm ；在未擊發時，撞針與噴嘴須保持接觸，以避免膠水滲漏。

因此，在噴射閥組裝的過程中，放大機構-撞針-噴嘴三者間的相對位置至關重要，如圖 2.13 所示。放大機構與撞針之間時刻需要保持接觸，但又不可過度壓縮彈簧行程，使撞針無法順利抬升。而撞針與噴嘴之間則須維持剛好的接觸，一旦噴嘴位置過低將使噴嘴關閉時無法有效密封，位置過高則會導致放大機構行程的損失。

故本噴射閥在閥體(放大機構)與液盒(撞針)間，以及液盒與噴嘴間，皆使用螺紋連接。螺紋得以方便調整三者間相對高度，連接部位的垂直排列也能防止三者間產生非軸向偏移。

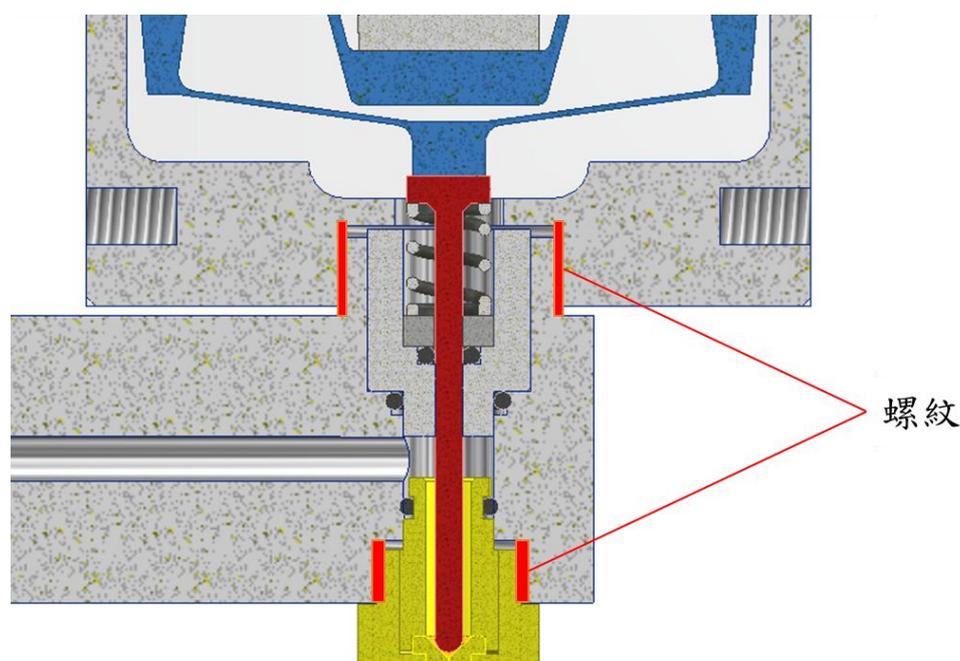


圖 2.13 放大機構(藍色)、撞針(紅色)與噴嘴(黃色)的相對位置。

2.2.2 噴射閥控制

壓電噴射閥的一個擊發週期按時序分為四個階段，分別是關閉 (Closed)、抬升 (Rising)、開啟 (Open) 和落下 (Falling)，如圖 2.14 所示。透過控制器調整四個階段的時長，結合膠罐壓力的供給，能夠控制噴射閥的出膠量，並且針對不同黏度的膠水也有各自適合的參數組合。

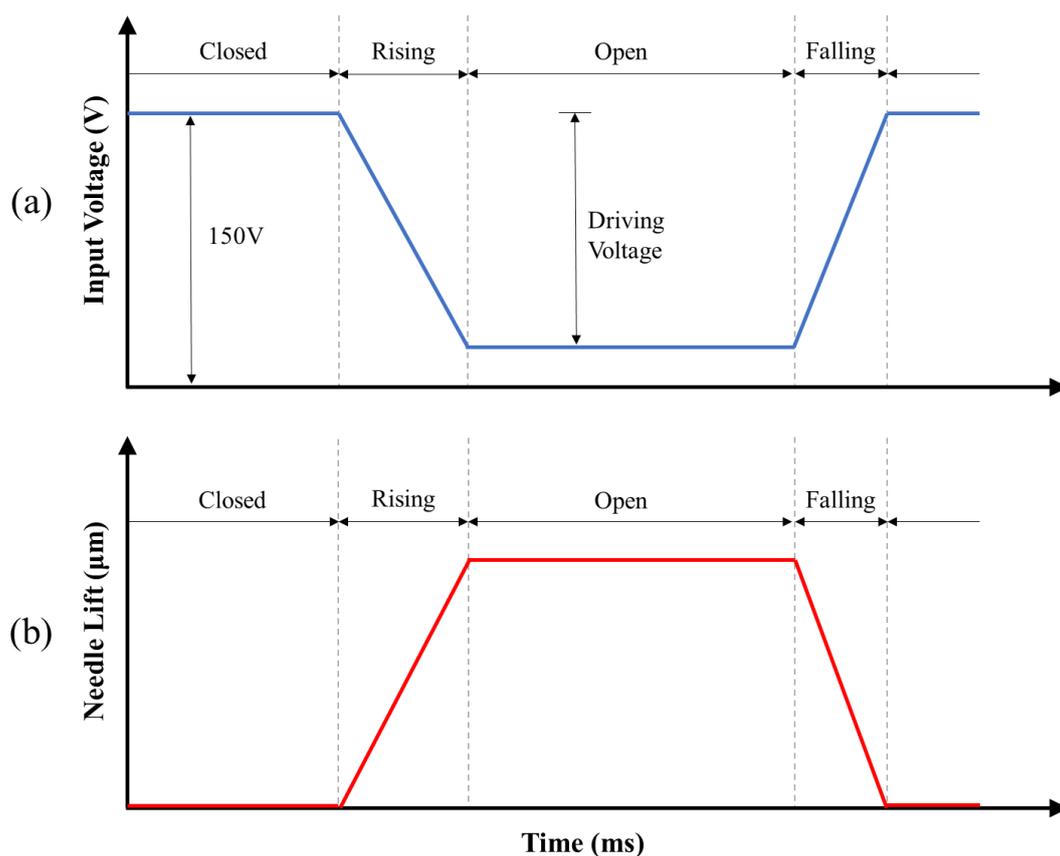


圖 2.14 噴射閥擊發週期的 (a) 輸入電壓波形以及對應之 (b) 撞針抬升高度。

關閉階段是噴射閥在未擊發時，以及擊發間隔之間保持的狀態。此階段的輸入訊號穩定維持在 150 V 的最高電壓，使層積式壓電致動器和放大機構輸出端保持伸長狀態，推動撞針至最低位置，與噴嘴接觸並使其保持密封，防止膠水滲出。

抬升階段中，輸入電壓呈線性下降，使層積式壓電致動器縮短、撞針抬升，此階段通常小於一毫秒。在壓力的作用下，膠水開始進入撞針抬升後，針尖與噴嘴間出現的空腔。

開啟階段，輸入訊號維持在一較低的穩定電壓，此處電壓與最高電壓的差即為該擊發週期的驅動電壓大小，透過調整開啟階段之電壓的大小，便能夠控制撞針的抬升高度。在此階段，撞針保持在抬升高度，膠水不斷進入並充滿針尖與噴嘴間的空腔，成為即將被擊發的液珠來源。

在落下階段，輸入電壓在數百微秒內回升至最高電壓，層積式壓電致動器隨之伸長、推動撞針快速落下撞擊噴嘴，迫使原先在空腔內之膠水自噴嘴被推出，形成固定大小的液珠，並藉由慣性飛至目標基板上。至此完成一個擊發週期。

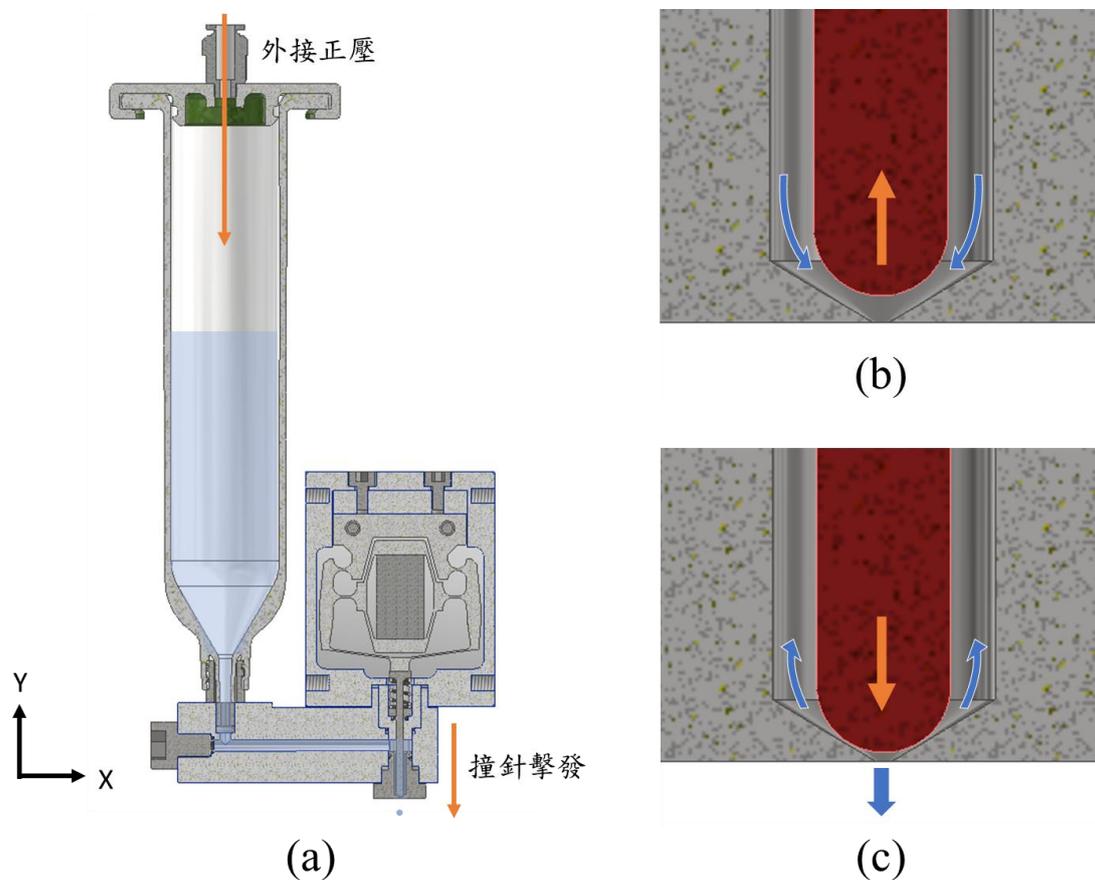


圖 2.15 (a) 膠水於噴射閥中之流向與噴嘴之 (b) 抬升與 (c) 落下示意圖。

第三章 量測系統架構與實驗儀器



3.1 實驗架構與量測系統概述

為實測本研究採用之撓性放大機構的各項表現，如行程、剛性、頻率響應等，以及本研究設計之壓電噴射閥在各擊發參數下的性能，規劃以下實驗設備與量測系統，如圖 3.1 所示。

量測系統包含使用雷射位移計觀測放大機構輸出行程，並推算其實際放大率之行程量測系統。使用荷重元量測放大機構推力，並結合其位移數據計算結構剛性之推力/剛性量測系統。透過輸出正弦振動訊號進行掃頻 (Sweep) 實驗，並觀測放大機構振盪幅度以得知其自然頻率的頻率響應量測系統。以及使用商用噴射閥控制器驅動本研究設計之壓電噴射閥，量測在不同參數與黏度下擊發的液珠尺寸，以瞭解噴射閥性能與適用範圍的液珠量測系統。

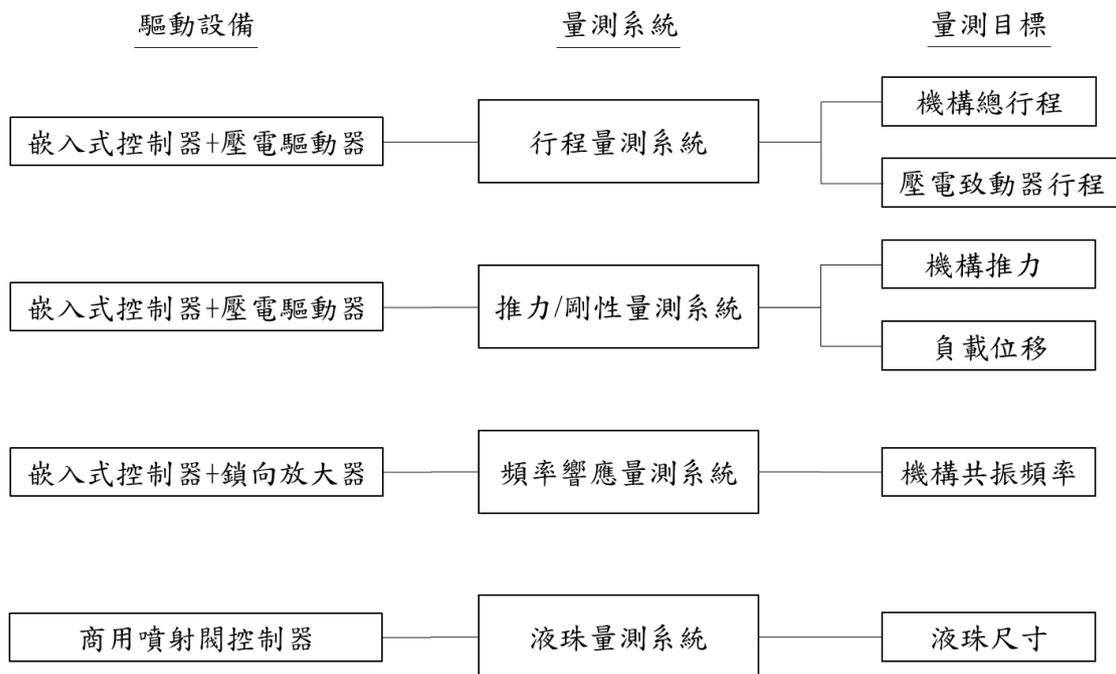


圖 3.1 量測系統使用設備與量測目標關係圖。



3.2 量測系統架構

3.2.1 行程量測系統

此系統的量測目標為巢狀式撓性放大機構的總輸出行程，以及位於放大機構內的層積式壓電致動器實際輸出行程；透過以上兩組數據可以得知放大機構的實際放大率，並與有限元素分析結果進行比較。

量測撓性放大機構時，由嵌入式控制器產生三角波訊號，頻率為 0.1 Hz，振幅為 2.5 V；設定 offset 為 1.25 V，使輸出訊號振幅位於 0 V 至 2.5 V 之間。將此訊號通過壓電驅動器，放大為振幅位於 0 V 至 150 V 間之訊號，並輸出驅動層積式壓電致動器產生位移，同時將高壓放大器輸出之觀測訊號輸入嵌入式控制器中紀錄。使用雷射位移計觀測撓性放大機構輸出端的位移變化，並透過控制器輸出相應的電壓訊號進入嵌入式控制器，並與驅動訊號結合輸出至電腦進行處理。

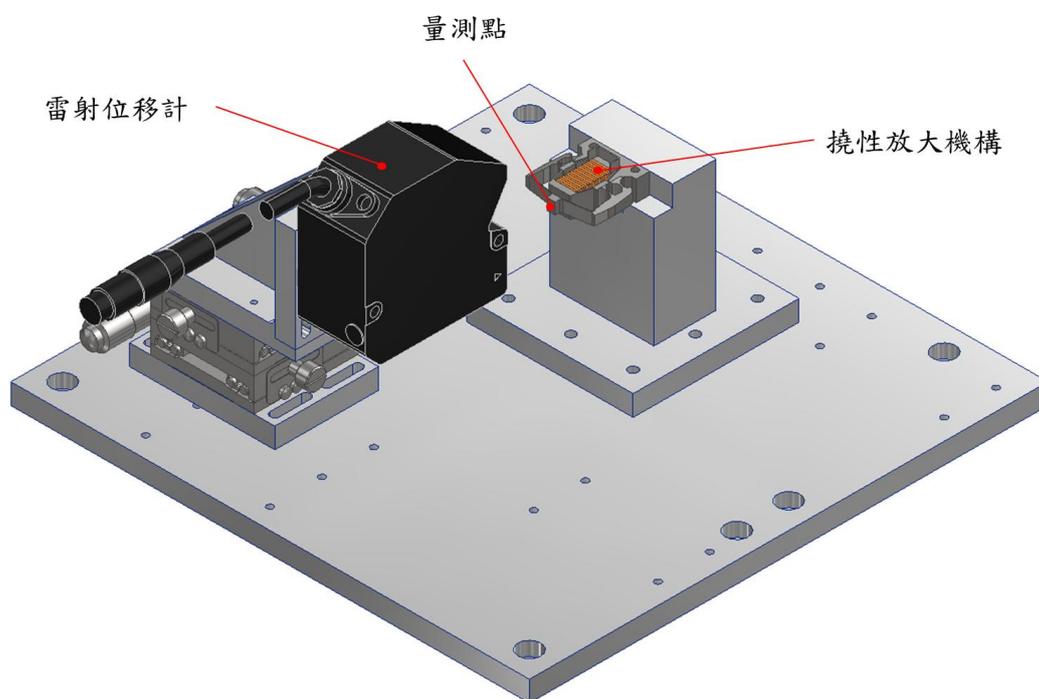


圖 3.2 行程量測系統機構圖。

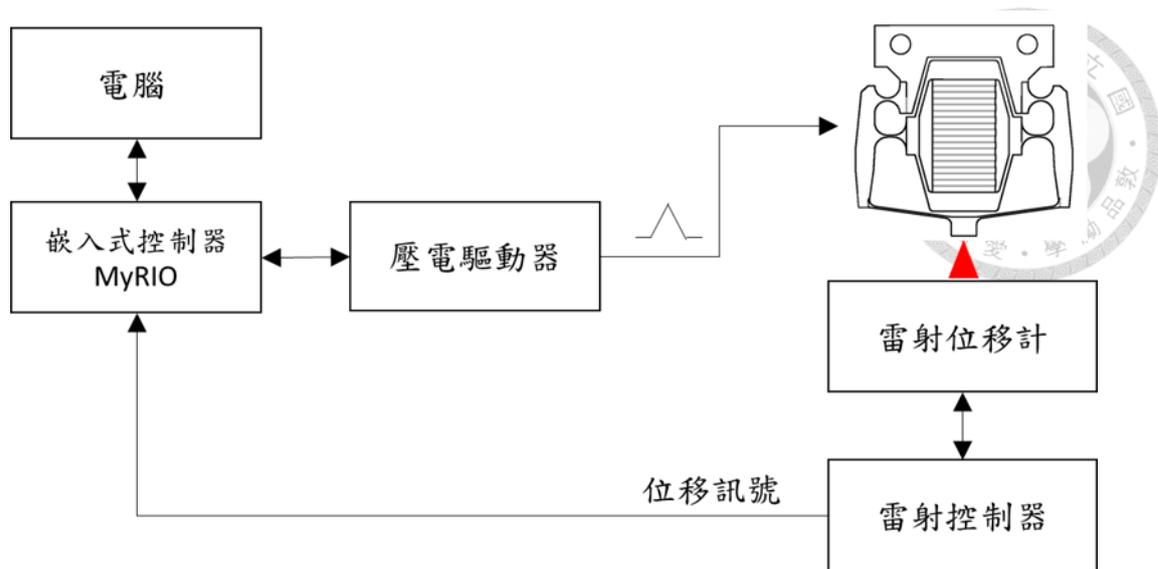


圖 3.3 行程量測系統架構圖。

3.2.2 推力量測系統

此系統的量測目標為巢狀式撓性放大機構輸出端的推力，以及輸出端在推動荷重元時的行程。結合先前量測的無負載時總行程，可以計算出放大機構剛性，其與負載和行程的關係如式(3.1)。此外，透過將輸出推力與位移數據作圖，可以進一步得知放大機構的阻擋力。

$$\text{機構剛性(N/}\mu\text{m)} = \frac{\text{負載 (N)}}{\text{無負載之行程}(\mu\text{m)} - \text{有負載之行程}(\mu\text{m)}} \quad (3.1)$$

量測時，由嵌入式控制器器產生頻率為 0.1 Hz、振幅為 2.5 V 之三角波；設定 offset 為 1.25 V 並通入壓電驅動器，使其輸出 0-150 V 之三角波訊號以驅動層積式壓電致動器。當層積式壓電致動器使撓性放大機構伸長，其輸出端會推動荷重元形變，使應變規產生電壓訊號；此訊號通過前置放大器濾波、放大後，回傳至嵌入式控制器紀錄。同時使用雷射位移計，紀錄此時負載情形下的放大機構輸出端行程；由於放大機構輸出端此時被荷重元遮擋，故使用反射片貼附於輸出端之上，使雷射位移計得以照射，如圖 3.4 所示。

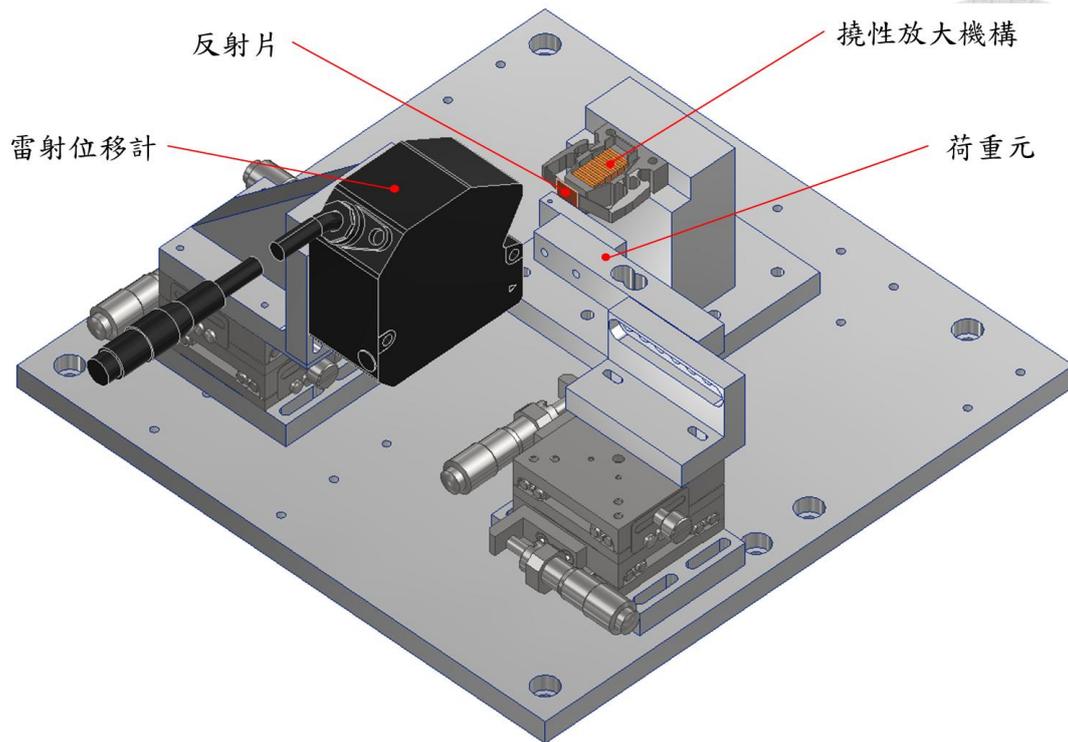


圖 3.4 推力量測系統機構圖。

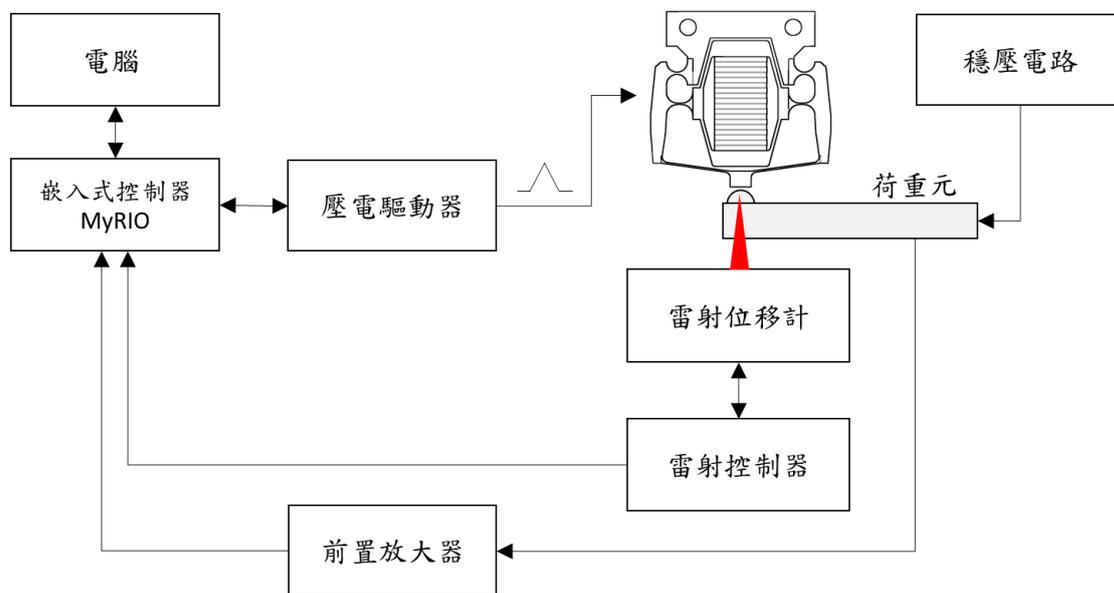


圖 3.5 推力量測系統架構圖。

3.2.3 頻率響應量測系統

為確認巢狀式撓性放大機構模態分析結果是否與實際機構相吻合，對放大機構進行掃頻實驗，實際觀測其共振頻率所在。

進行掃頻實驗時，由嵌入式控制器輸出頻率以相同間距遞增的數位訊號，由鎖相放大器接收並產生相同頻率、振幅 2.5 V 的正弦訊號驅動層積式壓電致動器。使用雷射位移計紀錄放大機構在同一頻率下的振動情形，經過前置放大器進行濾波後，輸入嵌入式控制器；透過控制器 FPGA 中的 FIFO 模塊，能以 500 kHz 的頻率接收位移訊號，由控制器上的 Real-Time Target 讀出，並擷取其中的 10000 個點計算其最大振幅，最後將結果匯入 PC 端紀錄。透過此方法，得以觀測放大機構頻率大於 50 Hz 的振動幅度。

壓電噴射閥撞針共振頻率量測的參數設定、量測方式與撓性放大機構基本相同，此時噴射閥水平固定於 XY 雙軸位移平台之上，液盒流道末端不安裝噴嘴，並搭配專門加工之平頭撞針供雷射位移計光點照射，直接量測針尖位移變化。

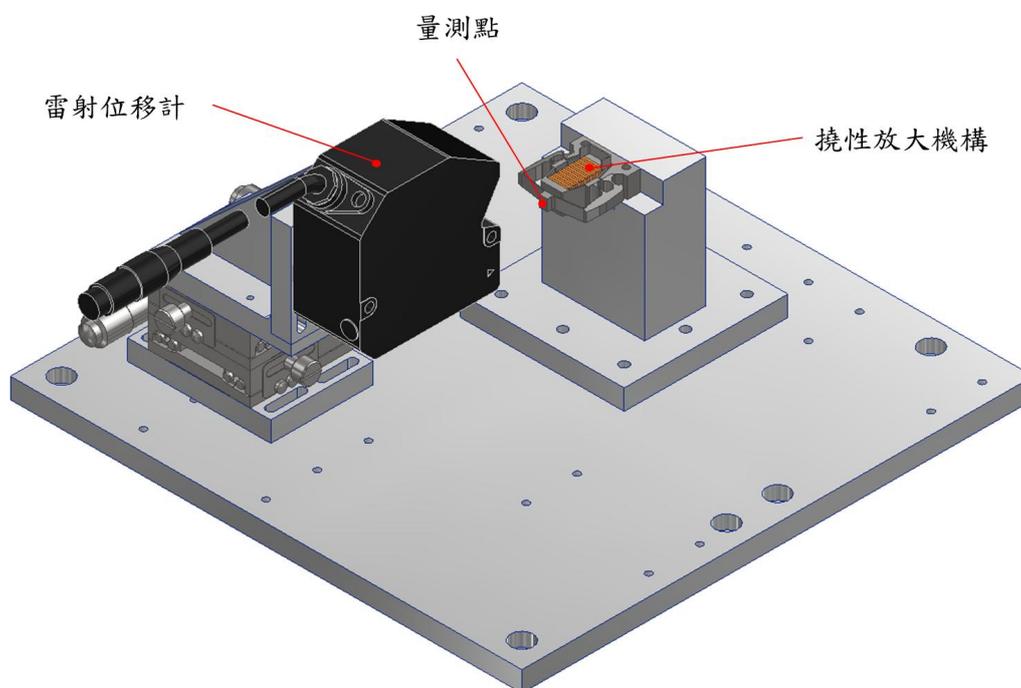


圖 3.6 頻率響應量測系統機構圖。

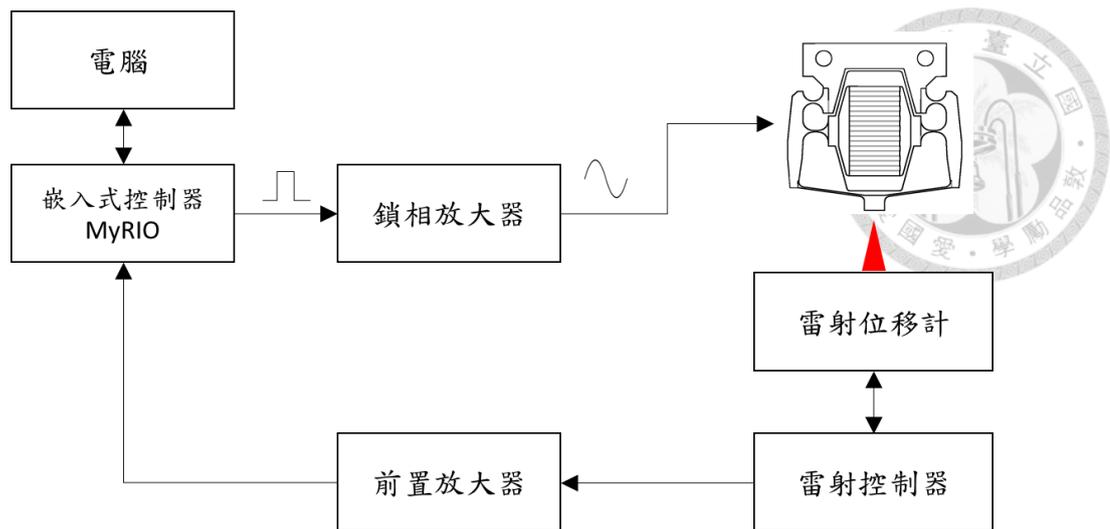


圖 3.7 頻率響應量測系統架構圖。

3.2.4 液珠量測系統

此實驗透過觀測噴射閥擊發出的液珠尺寸，瞭解噴射閥在不同情況下的工作性能，實驗變數包括撞針開啟時長、正壓壓力和膠水黏度，其餘參數設定如表 3.1 所示。

將噴射閥懸掛固定於位移平台之上，下方放置 6 吋晶圓作為基板，調整噴嘴高度至距晶圓 1 mm。透過控制器設定噴射閥以 50 ms 間距進行擊發，同時控制位移平台以 30 mm/s 的速率進行 X 軸方向往復運動，使擊發的液珠在晶圓上形成等距排列。接著平台將晶圓送至線掃描相機下方，拍攝成長度 150 mm 的長條狀影像。隨後平台回復至初始位置，將晶圓送回噴射閥噴嘴下方，並朝 Z 軸方向平移一個影像寬度，重新開始流程。

由於液珠和晶圓反光率的差異，在線掃相機拍攝的影像中會形成強烈的對比，透過影像辨識程式辨識出深色像素數量，進而計算出液珠面積大小。此實驗設置需考慮液珠受表面張力影響，使接觸角隨時間變小，導致不同時刻拍攝到的面積產生誤差；透過設定線掃描相機的拍攝速度，搭配位移平台的速度控制，確保每一顆液珠自被擊發到被拍攝的間隔時間皆相同。

表 3.1 液珠擊發實驗參數設定。

關閉時長 (Closed time)	50 ms
抬升時長 (Rising time)	0.5 ms
開啟時長 (Open time)	0.5、1、5、10、15 ms
落下時長 (Falling time)	0.1 ms
撞針抬升高度 (Needle Lift)	100 %
外接正壓	1、2 kgf/cm ²

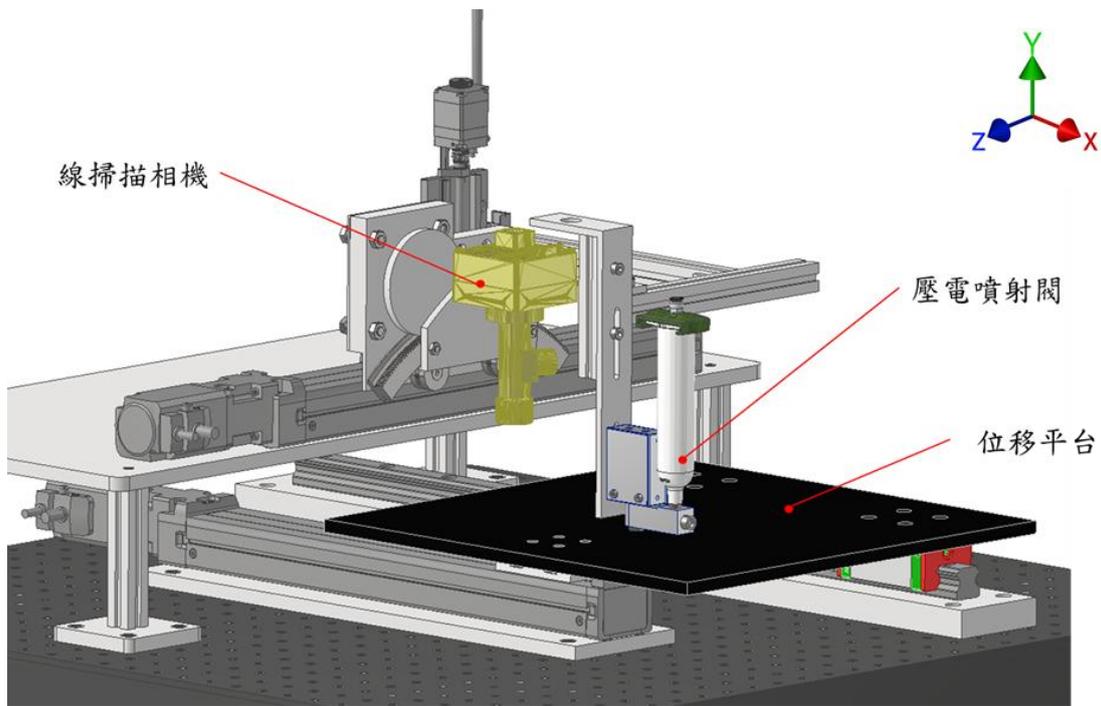


圖 3.8 液珠量測系統機構圖。

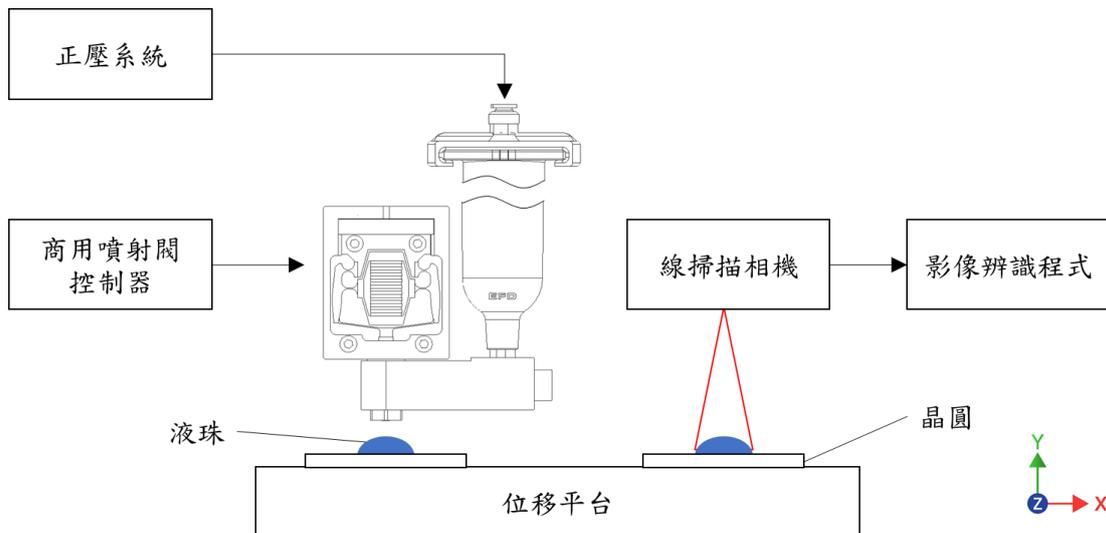


圖 3.9 液珠量測系統架構圖。

3.3 壓電驅動設備

本研究在驅動層積式壓電致動器上，因應不同量測目標與輸出訊號需求，採用三種驅動設備的組合搭配，如表 3.2 所示。

表 3.2 量測系統與相應驅動設備組合。

量測目標	驅動設備組合
行程 / 推力量測	嵌入式控制器+壓電驅動器
頻率響應量測	嵌入式控制器+鎖相放大器
液珠尺寸量測	商用噴射閥控制器

其中，行程和推力量測使用嵌入式控制器之類比輸出端，輸出頻率為 0.1 Hz 的三角波，透過壓電驅動器放大後直接驅動層積式壓電致動器。頻率響應量測則由於進行掃頻實驗，需要的頻率範圍 (~3 kHz) 超出嵌入式控制器類比輸出所能及，故使用嵌入式控制器輸出數位訊號，透過鎖相放大器轉變為相應頻率、振幅 2.5 V 的弦波訊號輸出至層積式壓電致動器。液珠尺寸量測則使用商用噴射閥控制器，進行實際點膠實驗以進行驗證。

3.3.1 嵌入式控制器

本研究使用 National Instruments 之嵌入式控制器 myRIO-1900，如圖 3.10 所示，進行驅動訊號的輸出和量測訊號的接收。



圖 3.10 嵌入式控制器 myRIO-1900。

MyRIO-1900 為一款結合 FPGA 與雙核心處理器之嵌入式控制平台，能透過電腦的 Labview 程式進行編寫和驅動，能夠獨力運作，且較一般電腦的作業系統高效且穩定。其具備多種 I/O 接口，包含類比、數位和 PWM (Pulse-Width Modulation) 等訊號之輸入與輸出，能作為 DAC (Digital to Analog Converter) 與 ADC (Analog to Digital converter) 使用。

3.3.2 壓電驅動器

本研究使用 Piezomechanik GmbH 之壓電驅動器 SVR350 bip / 3 作為驅動層積式壓電元件的高壓放大器，如圖 3.11 所示，將嵌入式控制器輸出的類比訊號轉換為驅動壓電的高壓訊號。

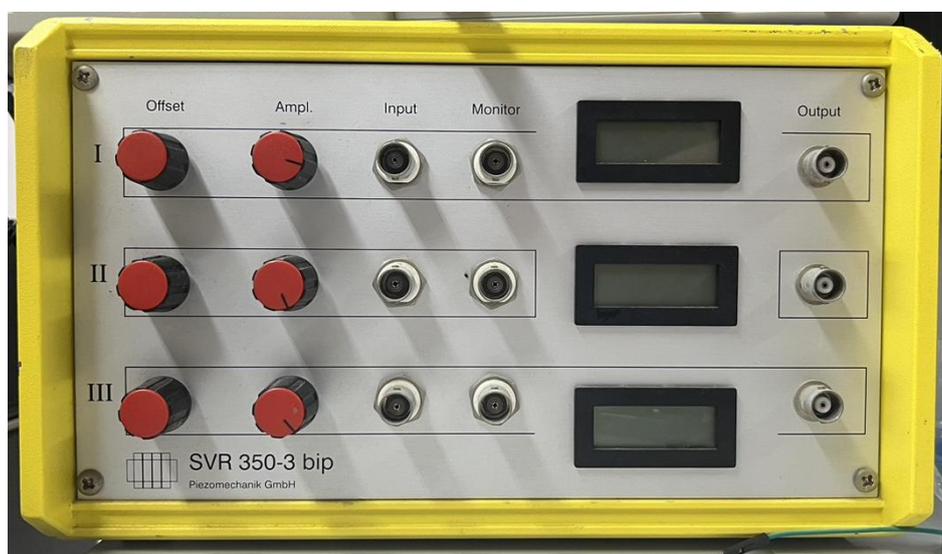


圖 3.11 壓電驅動器 SVR350 bip / 3。

壓電驅動器 SVR350 bip/3 具有三個平行的輸出檔位，輸出電壓範圍為 ± 350 V，最大增益為 70 倍；其中觀測 (Monitor) 接口輸出的是衰減 1000 倍的即時輸出 (Output) 訊號，能夠直接使用儀器或嵌入式控制器進行紀錄，而不需另外進行降壓處理 [附錄 B]。

3.3.3 鎖相放大器

本研究進行頻率響應量測時，使用 Stanford Research Systems 之鎖相放大器 SR830，如圖 3.12 所示，將嵌入式控制器輸出的數位訊號轉換為相同頻率之正弦波。

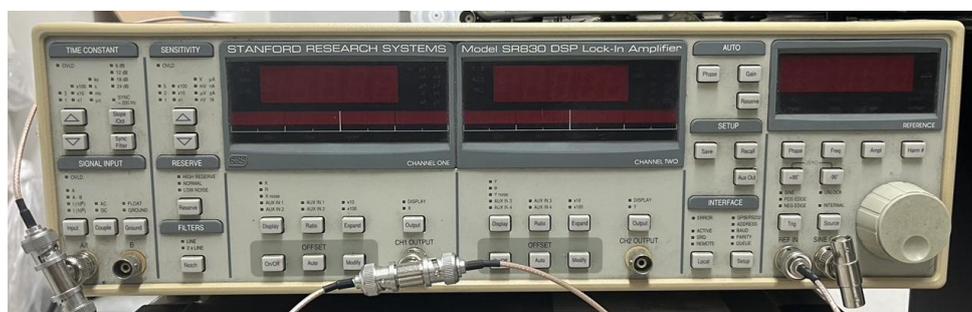


圖 3.12 鎖相放大器 SR830。

SR830 內部有精密的正弦波參考訊號產生器，可以輸出頻率介於 0.001 Hz 至 102.4 kHz、最大振幅 ± 2.5 V 的正弦訊號；在正弦輸出 (SINE OUT) 處可選擇輸出內部設定的訊號 (INTERNAL) 或是由參考訊號源 (REF IN) 輸入之訊號轉換而來的正弦訊號。

3.3.4 商用噴射閥控制器

本研究使用 VIEWEG GmbH 之噴射閥控制器 VC1245 驅動自製噴射閥，如圖 3.13 所示。



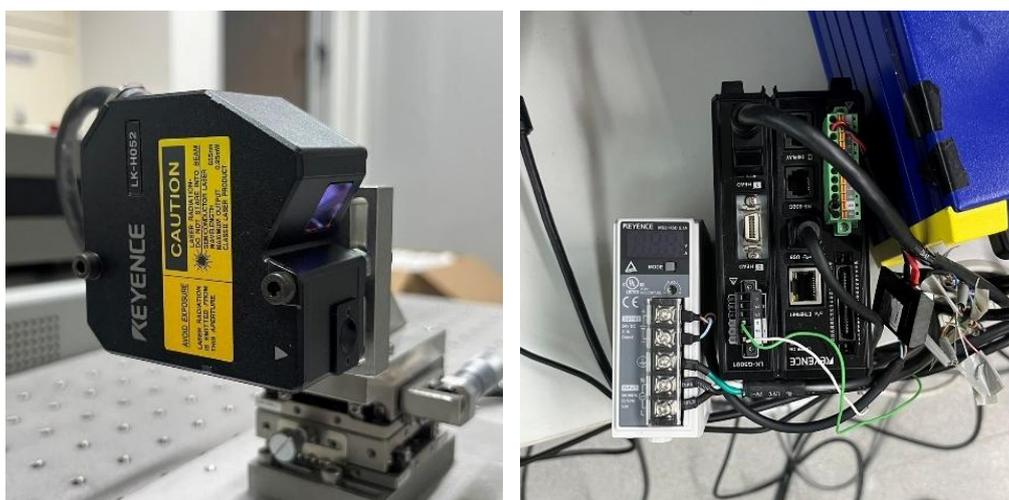
圖 3.13 商用噴射閥控制器 VC1245。

此控制器為市面常見之噴射閥控制器，輸出電壓為 150 V，擊發頻率可達 3000 Hz 以上。參數上可分別設定撞針抬升 (Rising)、開啟 (Open)、落下 (Falling)、關閉 (Delay) 時長以及擊發次數，其中抬升和落下時長分別可短至 0.24 ms 和 0.08 ms；另外可透過浮地輸出 (Floating ground) 的方式，抬高電位以調整輸出電壓，進而設定不同撞針抬升高度。

3.4 量測設備

3.4.1 雷射位移計

本研究使用 KEYENCE 公司之雷射位移計 LK-H052 與控制器 LK-G5001，如圖 3.14(a)、(b) 所示。



(a)

(b)

圖 3.14 (a) 雷射位移計 LK-H052 與 (b) 控制器 LK-G5001。

雷射位移計 LK-H052 架設在 XY 雙軸位移平台之上，其全量程 (Full scale, F.S.) 為 20 mm，重複精度為 0.025 μm ，適合量測本研究放大機構介於十數至數百微米之位移行程；而其採樣頻率最快可達 392 kHz，亦可用於正常運作狀態下 (10^3 Hz 尺度) 的機構頻率響應量測 [附錄 C]。由於雷射位移計會經過一段時間的使用後會發熱，故需考慮溫度飄移現象，計算方式如式(3.2)，並對量測結果進行補償；或是等待一定時間，使其達到穩定的工作溫度後再進行量測。

$$\text{飄移量} = 0.01\% \text{ F.S./}^\circ\text{C} \quad (3.2)$$

控制器 LK-G5001 提供電腦與雷射位移計間的通訊，可以直接將量測結果輸出至電腦儲存，或是以類比電訊號形式輸出 [附錄 D]。表 3.3 為進行各別量測系統時針對不同目標的尺度與運動模式，對雷射位移計與控制器設定的參數。

表 3.3 各量測系統設定之雷射位移計參數。

量測實驗	控制器類比輸出比例	雷射位移計採樣週期
放大機構總行程量測	0.100 mm → 1.000 V	1000 μ s
壓電柱行程量測	0.010 mm → 1.000 V	1000 μ s
放大機構剛性量測	0.100 mm → 1.000 V	1000 μ s
共振頻率量測	0.010 mm → 1.000 V	5 μ s
噴射閥撞針行程量測	0.100 mm → 1.000 V	10 μ s

3.4.2 荷重元與應變規

本研究使用 Kuongshun Electronic 之荷重元 YZC131-05KG，搭配自製穩壓電路進行推力量測，如圖 3.15 所示。

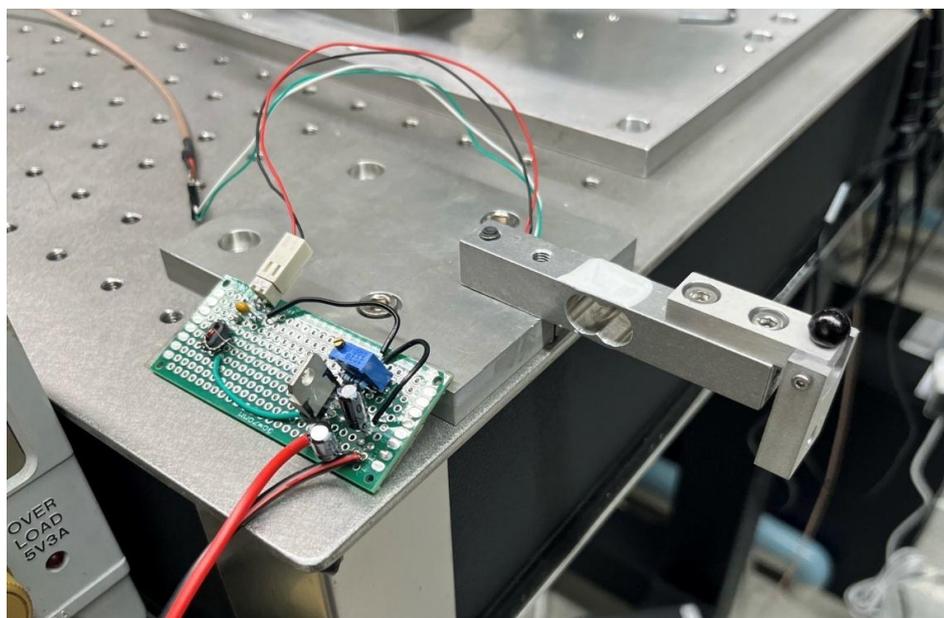


圖 3.15 荷重元 YZC131-05KG 和穩壓電路。

YZC131 為一種通用規格之荷重元，由帶有中空部分的鋁製懸臂和伏貼其上的應變規組成；當懸臂受力時，產生的形變會集中於中空部分，使伏貼其上的應變規隨之產生形變，輸出與受力呈現性關係的電壓訊號。

應變規構造如圖 3.16 所示，內部有蜿蜒形排列的銅箔作為導體；當應變規外部載體發生彎曲形變時，會使銅箔被拉伸或壓縮，進而導致其電阻率變化；電阻變化與形變的關係如式(3.3) [28]。

$$\frac{dR}{R_D} = \varepsilon(1 + 2\nu) + \frac{dQ}{Q} \quad (3.3)$$

其中 R 為銅箔之電阻， ε 為應變， ν 為蒲松氏比， Q 則為電阻率。透過量測不同部位應變規的電阻差異，便可得知外部載體的形變以及受力情形。

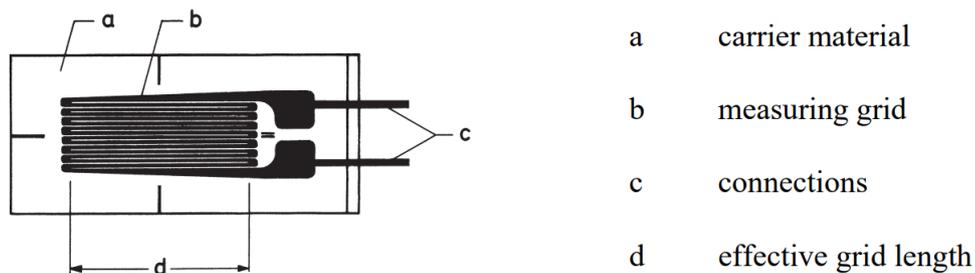


圖 3.16 單一應變規結構示意圖 [28]。

在應用上，會由四組應變規組成四方結構，相互連接形成惠斯通電橋，如圖 3.17 所示；搭配穩壓電路，得以精確的將應變規之間的電阻差異以電壓的形式輸出，並且抑制溫度與環境噪聲的影響。

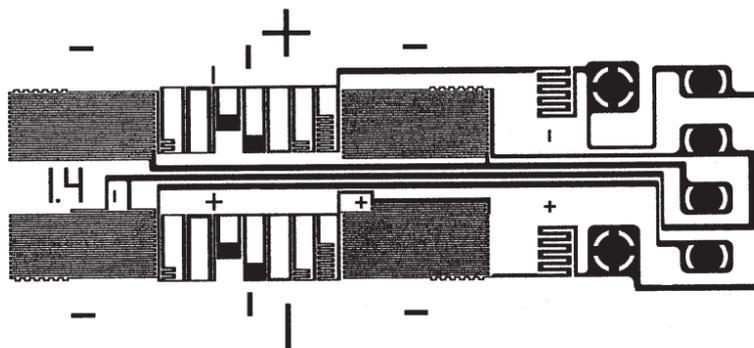


圖 3.17 由四組應變規組成的惠斯通電橋 [28]。

3.4.3 穩壓電路

由於荷重元是透過應變規間電阻變化造成的微小電壓差進行量測，因此對於輸入電壓的穩定性要求較高；在此實驗中使用自製穩壓電路作為電壓源為荷重元供電，電路配置如圖 3.18 所示，其中的核心元件是 Linear Technology 生產的 LT317A 線性電壓穩壓器，搭配 R1 及可變電阻 R2 用於調整輸出電壓；C1 與 C2、C3、L1 則分別用於輸入與輸出的雜訊濾波。

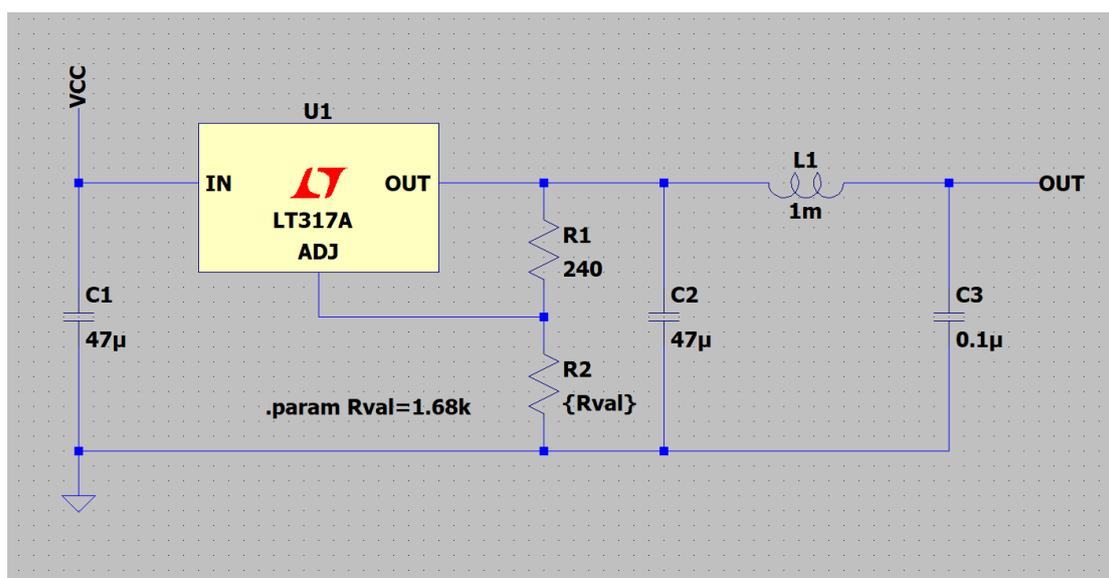


圖 3.18 穩壓電路圖。

LT317A 內部在輸出腳位 (OUT) 與調整腳位 (ADJ) 之間具有 1.25 V 的參考電壓，透過調整可變電阻 R2 的大小，調整輸出腳位與調整腳位的外接電阻 R1、R2 的比例，將輸出電壓控制在 10 V 以供荷重元輸入[29]；輸出電壓與電阻關係如式(3.4)。

$$V_{OUT} = V_{REF} \left(1 + \frac{R2}{R1} \right) + I_{ADJ} \times R2 \quad (3.4)$$

其中 V_{REF} 為參考電壓， I_{ADJ} 則僅為數十微安培，故在此處計算可忽略；經計算欲將輸出控制在 10 V，可變電阻 R2 的值應調整為 1.68 kΩ。

3.4.4 前置放大器

本研究使用 Stanford Research Systems 之前置放大器 SR560，如圖 3.19 所示，對荷重元(推力量測)和雷射位移計(頻率響應量測)輸出訊號進行濾波和放大。



圖 3.19 前置放大器 SR560。

由於荷重元輸出的電壓差僅為數毫伏，因此需透過前置放大器將訊號提升至可讀電壓大小，以供嵌入式控制器讀取；同時為保留原始訊號中的細節，因應不同量測目標設定不同的參數，主要調整目標為截止頻率 (Cutoff frequency) 以及增益 (Gain)。前者可消除高頻雜訊，但須考慮需高過輸入訊號自身頻率，否則可能失去部分細節；後者則用於提升輸入訊號電平。前置放大器參數設定如表 3.4 所示：

表 3.4 各量測系統之前置放大器參數設定。

參數	推力/剛性量測	頻率響應量測
Coupling	DC	DC
Cutoff frequency	10 Hz	10 kHz
Filter	12 dB/oct rolloff Low-pass	12 dB/oct rolloff Low-pass
Gain mode	Low noise	Low noise
Gain	500	1

3.4.5 線掃描相機

本研究使用 Hefei I-TEK 之黑白線掃描相機 PA4KGV-80KM，搭配位移平台，整體機構如圖 3.20 所示，用於拍攝液珠以供尺寸計算。

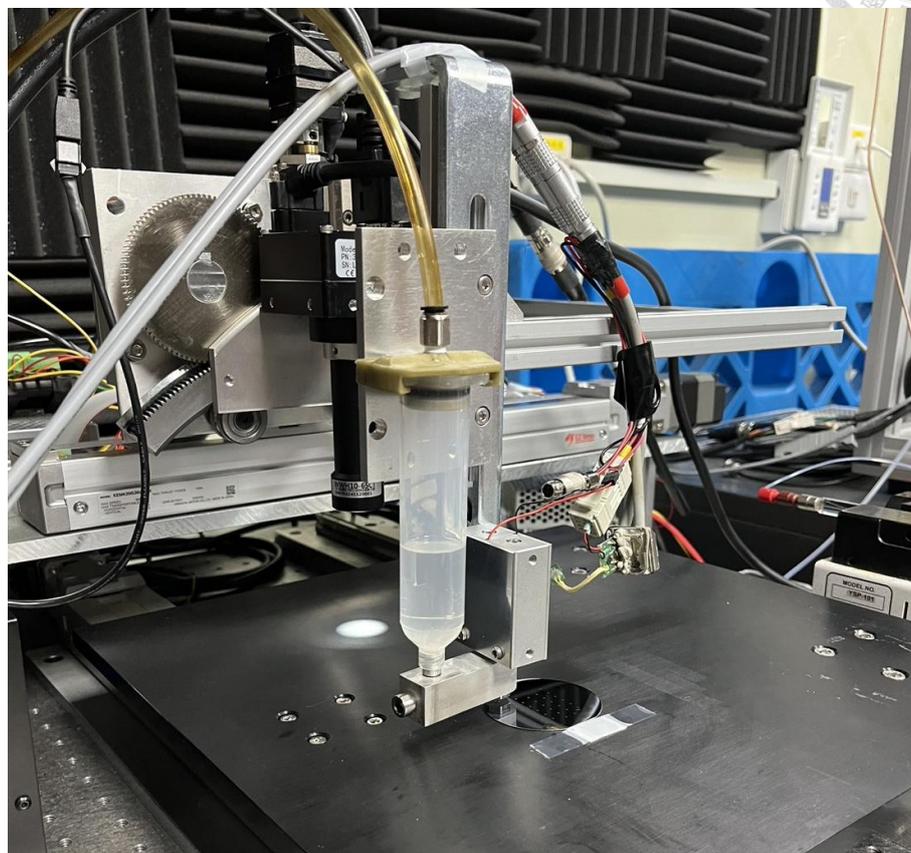


圖 3.20 線掃描相機 PA4KGV-80KM 與位移平台。

線掃描相機固定架設於位移平台上方，不隨平台移動，而是由平台將樣品送至下方供其掃描。根據規格書[附錄 E]，其分辨率為 4096×1 像素，像素大小為 $3.5 \mu\text{m} \times 3.5 \mu\text{m}$ ，單次掃描的影像寬度為 14.33 mm。掃描時採行觸發控制，配合位移平台 30 mm/s 的位移速率，使得單次掃描的影像之間能無縫拼接成完整的連貫畫面。

第四章 實驗結果



4.1 實驗前準備

4.1.1 荷重元校正

推力實驗量測實驗使用之荷重元須於實驗進行前進行校正，確認其輸出電壓與受力的關係式，供後續以量測所得數據計算撓性放大機輸出推力所需，同時也能確認輸出電壓的線性與否。

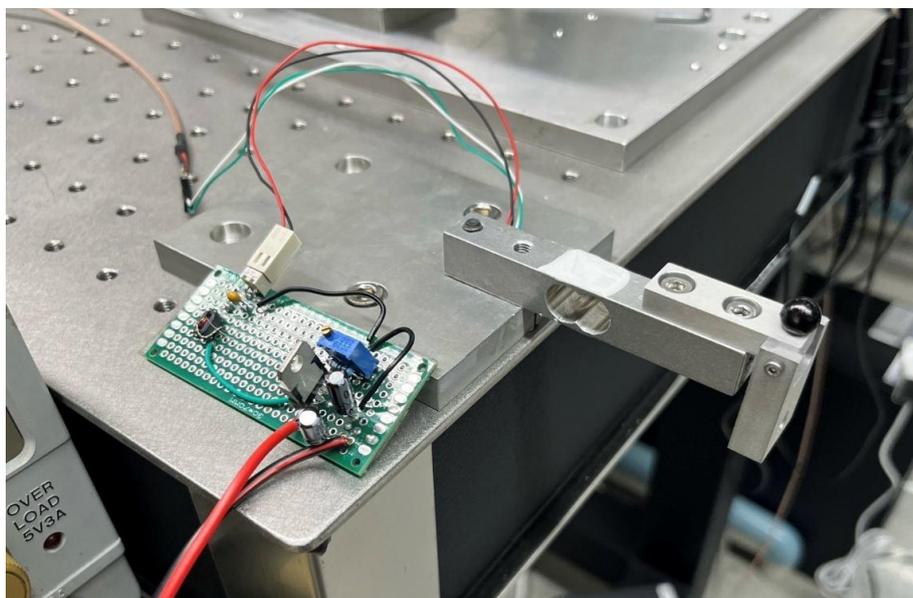


圖 4.1 荷重元校正實驗設置。

荷重元使用砝碼進行校正。校正時將荷重元固定於穩固平面邊緣，如圖 4.1 所示，於受力端懸掛不同重量的砝碼，將荷重元輸出的電壓訊號通過前置放大器進行放大，並匯入嵌入式控制器中紀錄。由於校正時的訊號沒有時變性，故前置放大器可以使用較低的截止頻率以獲得較精確的數值，前置放大器參數設定如表 4.1。

表 4.1 荷重元校正的前置放大器參數設定。

Coupling	DC
Cutoff mode	Low-pass
Cutoff frequency	0.1 Hz
Filter	12 dB/oct rolloff Low-pass
Gain mode	Low noise
Gain	500

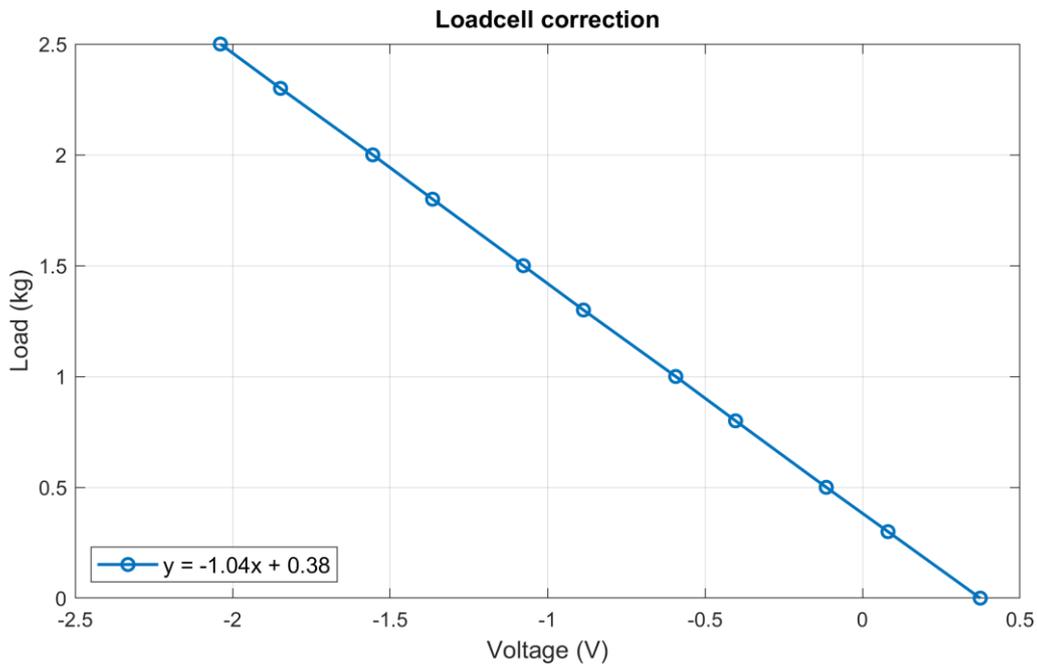


圖 4.2 荷重元之負載-電壓關係圖。

經校正實驗得到荷重元之輸出負載與電壓的關係如圖 4.2，兩者關係如式 (4.1) 所示：

$$y \text{ (kg)} = -1.0373x \text{ (V)} + 0.3838 \quad (4.1)$$

其中， x 為荷重元輸出電壓 (V)， y 為懸掛砝碼質量 (kg)。考慮懸掛砝碼進行校正時，荷重元各部件重量對受力點的綜效施力為 28.8 g，以及重力加速度為 978901.91 毫伽 (內政部國家重力基準站公布)，可以得到如式(4.2) 之荷重元輸出電壓與受力關係式。

$$\text{Load (N)} = -10.1545x \text{ (V)} + 4.0392 \quad (4.2)$$

4.1.2 矽油調配

本研究測試壓電噴射閥擊發性能時，使用帝一化工生產之 100 cP 及 60000 cP 黏度之矽油作為基底，調配不同黏度的矽油混和物作測試目標。

矽油是以聚二甲基矽氧烷 (Polydimethylsiloxane, PDMS) 為主的高分子混合物，具有良好的熱穩定性、生物相容性，常用於機械潤滑和生物醫學等領域。PDMS 是由重複的矽氧烷鍵 (Si-O) 和甲基 (CH₃) 構成的長鏈聚合物，結構通式為 (CH₃)₃SiO[(CH₃)₂SiO]_nSi(CH₃)₃，通式中重複單元的數量 n 愈多，聚合物分子量愈大，其黏度愈高[30, 31]。

由於矽油為具有不同分子量聚合物組成的混合物，其黏度與重量的比例呈非線性關係，故混合時無法使用普通的加權平均法計算；尤其當矽油彼此分子量差距愈大時，其混合物黏度偏離平均值愈遠。在調配不同黏度的矽油時，其黏度近似對數關係，如式(4.3)所示 [32]:

$$v = \frac{\log \eta_{bl} - \log \eta_1}{\log \eta_2 - \log \eta_1} \quad (4.3)$$

其中， η_{bl} 、 η_1 、 η_2 分別為混和物、低分子量及高分子量矽油的黏度， v 為高分子量矽油的體積分數 (Volume fraction)。以 1000 cP 黏度為例，使用 100 cP 及 60000 cP 之矽油調配時，所需之高黏度矽油體積分數為:

$$v_{1000} = \frac{\log 1000 - \log 100}{\log 60000 - \log 100} = \frac{3 - 2}{4.778 - 2} = 0.36 \quad (4.4)$$

下表為本研究實驗使用的目標物黏度以及所需的調配比例:

表 4.2 實驗目標物黏度及對應調配比例。

目標物黏度	100 cP 矽油	60000 cP 矽油
1000 cP	64.0 %	36.0 %
2000 cP	53.2 %	46.8 %
3000 cP	47.8 %	53.2 %

4.2 行程量測結果

透過行程量測系統測得，壓電驅動訊號與撓性放大機構輸出端的行程變化關係如圖 4.3 所示。

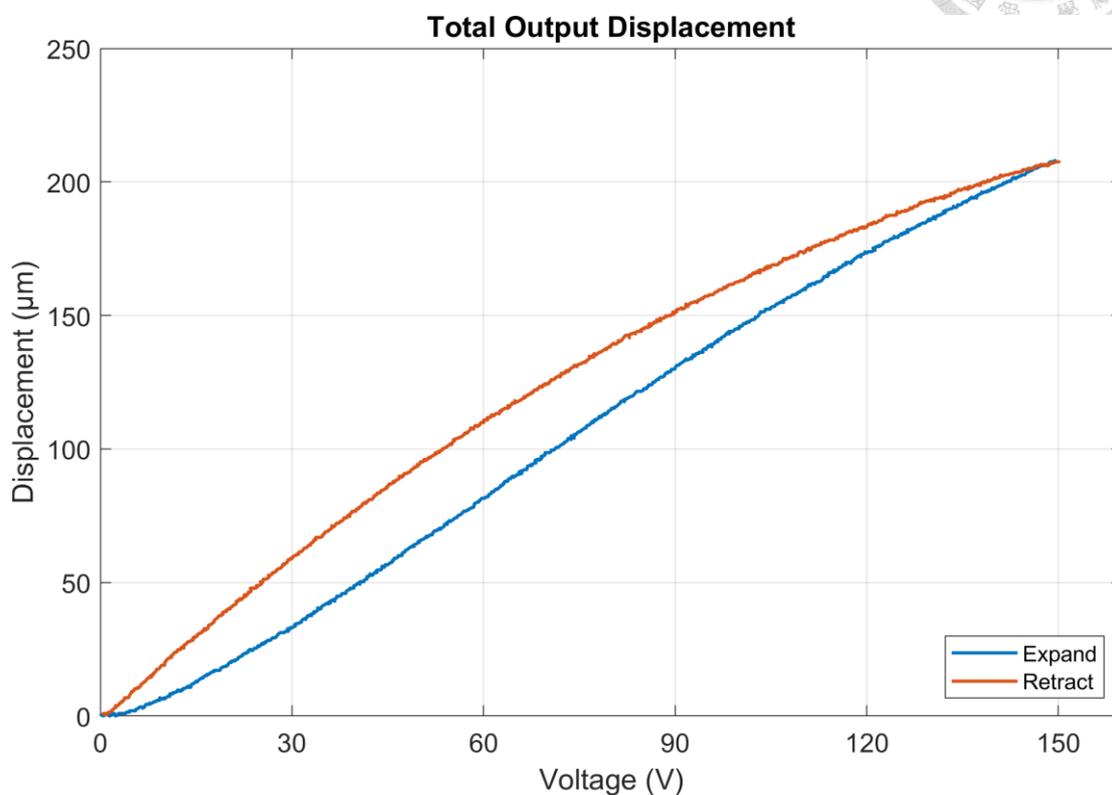


圖 4.3 撓性放大機構輸出端於 0 - 150 V 驅動訊號下的位移行程。

撓性放大機構輸出端在 150 V 電壓驅動訊號下，量測到的最大行程為 207.5 μm，其中藍色為伸長行程，橘色為縮短行程。最大行程量測結果與 2.1.4 節中，透過有限元素分析得到的模擬結果 205.2 μm 相當接近。

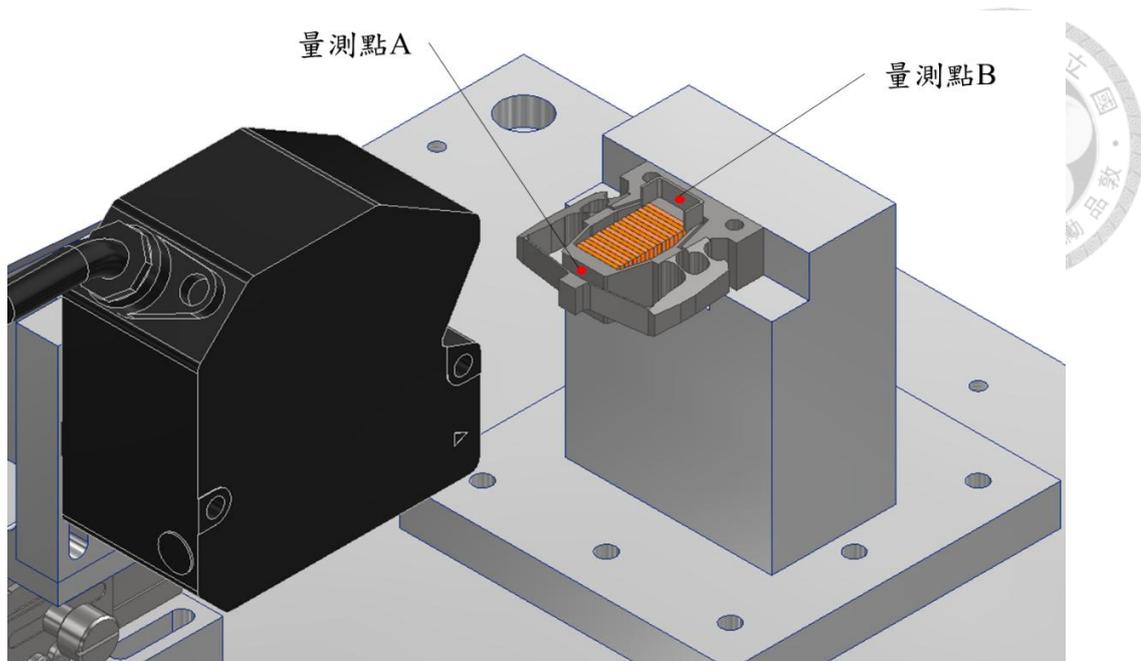


圖 4.4 針對層積式壓電致動器在撓性放大機構中的行程量測機構圖。

為得知放大機構實際放大率，尚需量測層積式壓電致動器在撓性放大機構中的行程。首先以第一階放大機構前端之平面作為量測點 A；另一側則在第一階放大機構後端，安裝與運動方向垂直之薄金屬片，作為量測點 B；整體配置如圖 4.4 所示。分別使用雷射位移計對 A、B 兩量測點進行 0-150 V 驅動訊號量測，結果分別如圖 4.5 (a)、(b) 所示，其中藍色為伸長行程，橘色為縮短行程。

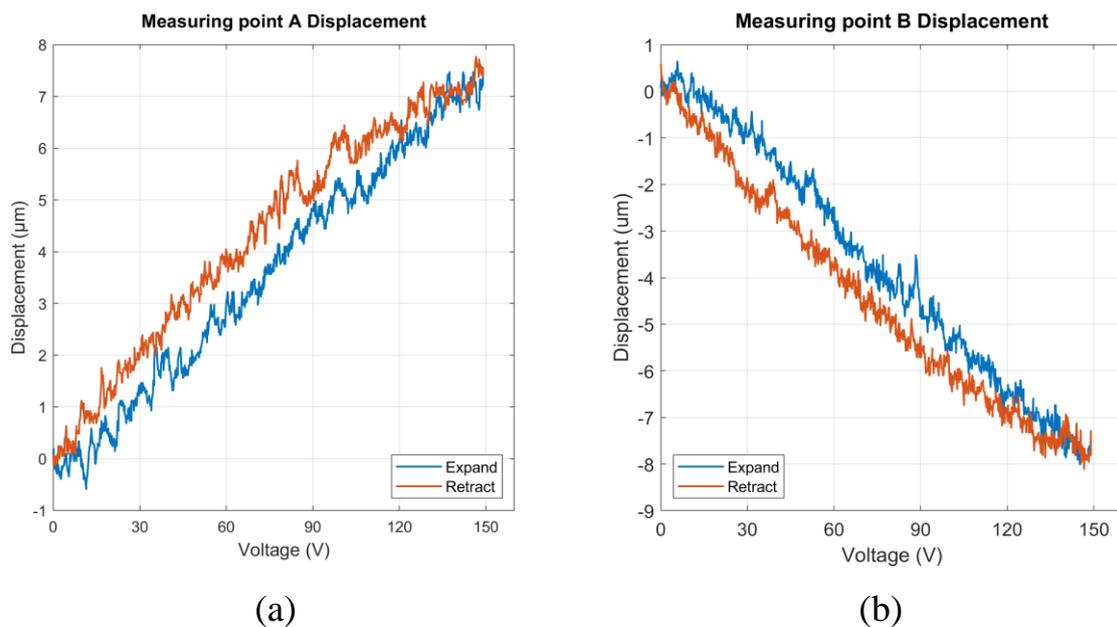


圖 4.5 層積式壓電致動器在 (a) 測量點 A 與 (b) 測量點 B 的位移行程。

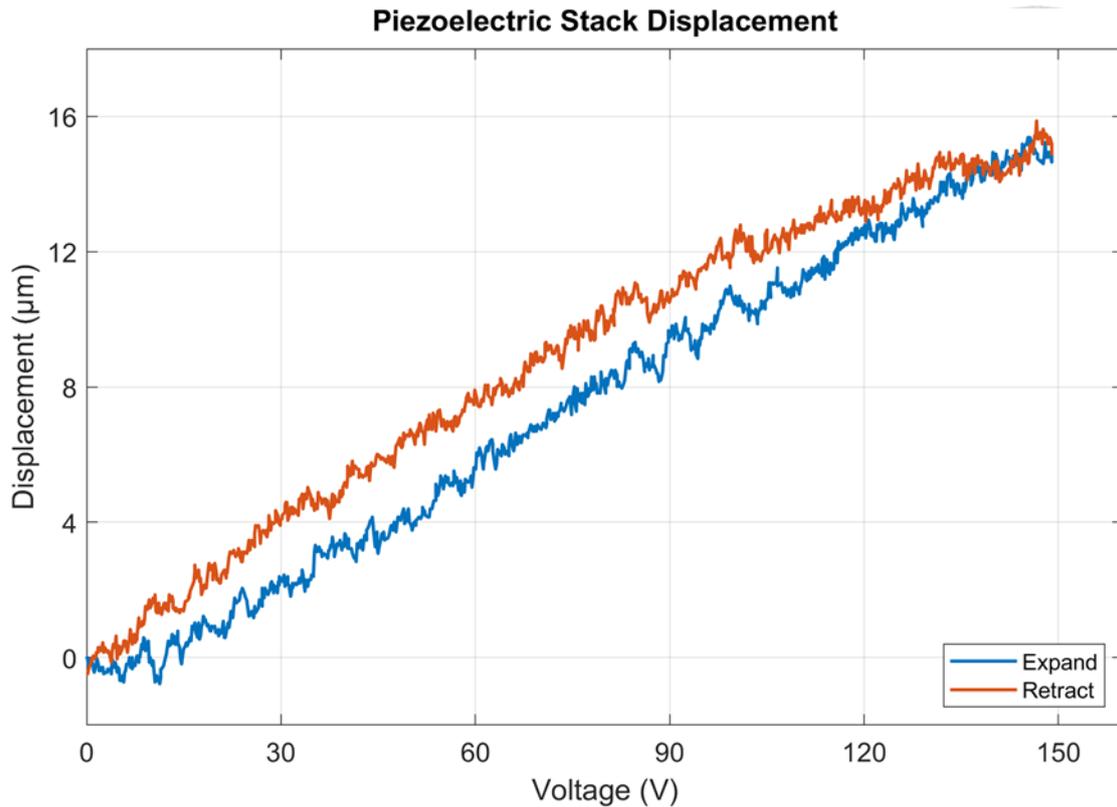


圖 4.6 層積式壓電致動器在撓性放大機構中的總位移行程。

圖 4.5 中，量測點 A 在 0-150 V 電壓下量測到的最大位移為 7.4 µm，量測點 B 的最大位移為 -7.8 µm；將兩者位移相加，可得到層積式壓電致動器在撓性放大機構中的行程，如圖 4.6 所示，最大位移為 15.2 µm，其中藍色為伸長行程，橘色為縮短行程，撓性放大機構實際放大率為：

$$\text{放大率} = \frac{\text{輸出端行程}(\mu\text{m})}{\text{壓電致動器行程}(\mu\text{m})} = \frac{207.5 \mu\text{m}}{15.2 \mu\text{m}} = 13.65 \quad (4.5)$$

量測到的實際放大率為 13.65 倍。層積式壓電致動器行程和放大率量測結果，與 2.1.4 節透過有限元素分析得到的結果 (層積式壓電致動器行程 14.9 µm、放大率 13.77 倍) 亦相當接近。

4.3 推力與剛性量測結果

透過推力/剛性量測系統測得，壓電驅動訊號與撓性放大機構輸出端的推力變化關係如圖 4.7 所示。

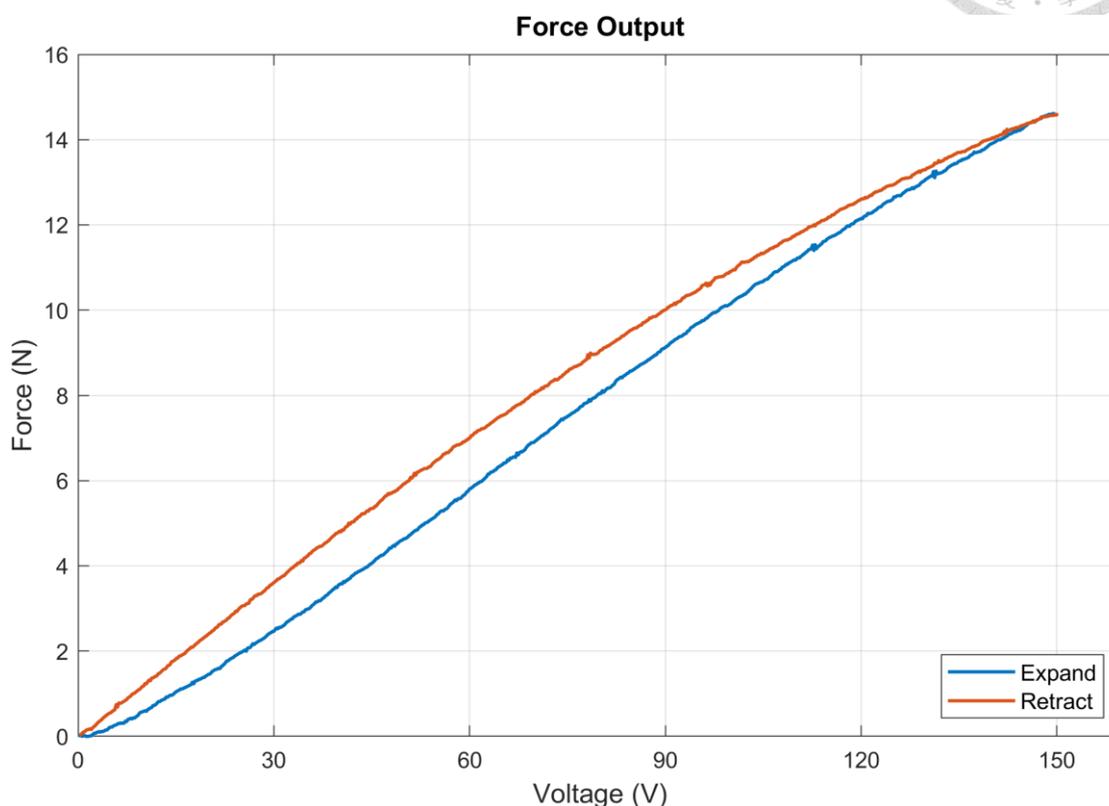


圖 4.7 撓性放大機構輸出端於 0 - 150 V 驅動訊號下的推力。

撓性放大機構在 0 - 150 V 電壓驅動訊號下，使用荷重元量測到的最大推力為 14.6 N；其中藍色為伸長時的推力，橘色為縮短時的推力。

在量測推力訊號的同時，使用雷射位移計紀錄此負載情況下，放大機構推動荷重元的位移行程，並與先前第 4.2 節測量之無負載位移行程進行比較，結果如圖 4.8，其中藍色為放大機構推動荷重元時的行程，橘色為無負載時的行程。

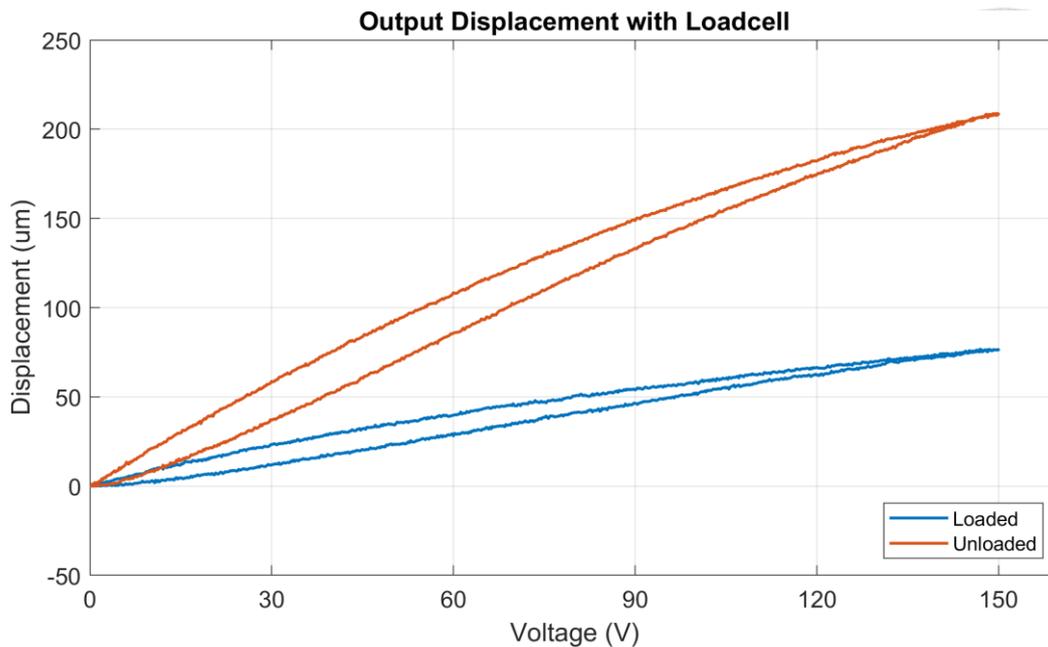


圖 4.8 負載有無之撓性放大機構的輸出端位移行程。

撓性放大機構輸出端在荷重元的負載下，於 150 V 驅動電壓的最大位移行程為 76.6 μm；相對的，在無負載的情況下，輸出端的最大位移行程則為 207.5 μm，荷重元負載造成的最大行程差異為 130.9 μm。

將有/無負載的放大機構行程差異，結合先前量測到的推力 14.6 N，可以推算出在 150 V 的驅動電壓下，機構剛性為 0.1115 N/μm，而各處數據計算得的機構剛性則如圖 4.9 所示，其中藍色為伸長行程，橘色為縮短行程。

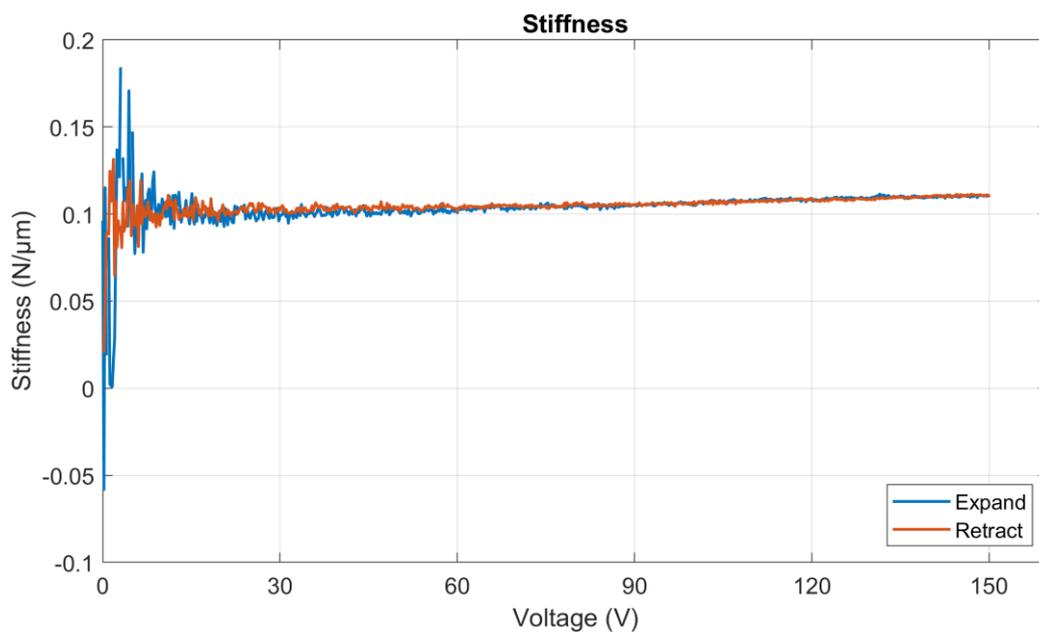


圖 4.9 撓性放大機構於 0-150V 驅動訊號下之剛性。

由於驅動電壓較小時，無論有/無負載的放大機構行程皆較小，量測與計算結果容易受雜訊影響，故圖 4.9 的低電壓處的剛性數值較為混亂；然而當電壓提升後，得到的剛性數值也隨之趨於線性，介於 $0.10 \text{ N}/\mu\text{m}$ 至 $0.11 \text{ N}/\mu\text{m}$ 之間，並隨著電壓增加，與放大機構伸長趨勢呈正相關。

另外，將撓性放大機構推動負載時量測到的輸出端位移行程與推力作圖，可以得到如圖 4.10 之圖形；其中藍色為伸長行程，橘色為縮短行程行程，兩者與推力數據近似線性關係。由於此時放大機構位移量等於荷重元之形變量，其斜率 $0.189 \text{ N}/\mu\text{m}$ 可視為為荷重元之剛性。

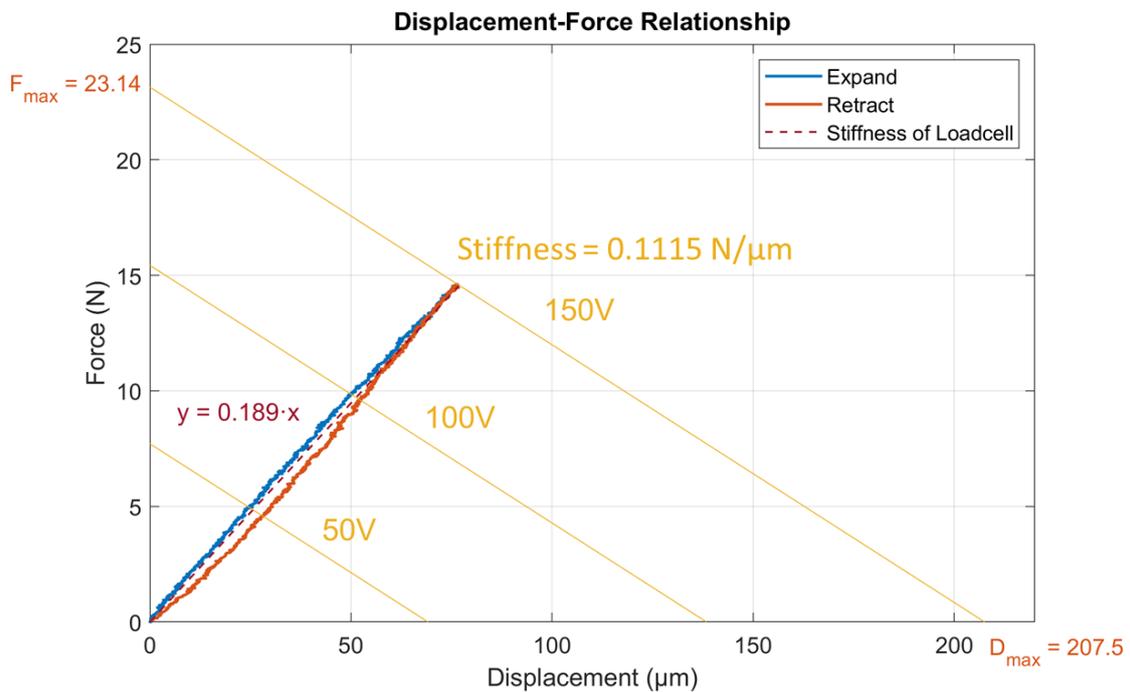


圖 4.10 撓性放大機構行程-推力關係圖。

圖 4.10 中的黃線部分，利用放大機構輸出端無負載時的最大位移，以及推動荷重元時的負載最大位移，可以推算出撓性放大機構在各驅動電壓下的位移-推力關係；其斜率為放大機構之剛性，當位移為零時的最大出力是為放大機構之阻擋力。故驅動電壓為 150 V 時，撓性放大機構有阻擋力 $F_{max} = 23.14 \text{ N}$ 。

4.4 放大機構頻率響應量測結果

透過推力/剛性量測系統測得，撓性放大機構輸出端的頻率響應振幅如圖 4.11 所示。

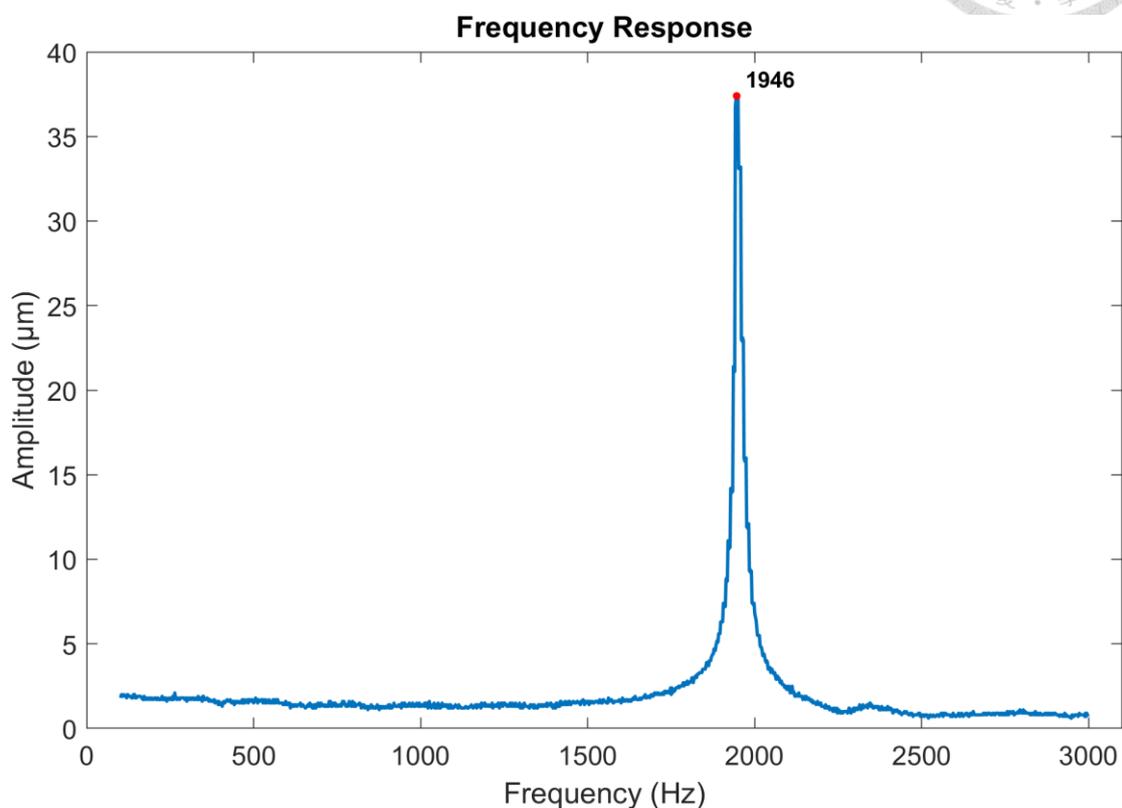


圖 4.11 撓性放大機構於 100-3000 Hz 正弦訊號驅動下之頻率響應。

放大機構輸出端在驅動訊號為 1946 Hz 時有相當明顯的響應振幅，可以判斷為巢狀式放大機構之輸出端共振主模態，其與 2.15 節透過模態分析得到之主模態 1931 Hz 相差不遠。

由於壓電噴射閥的工作頻率一般不會超過 1 kHz，且本研究使用之商用噴射閥驅動器最高驅動頻率僅為 1.67 kHz，因此巢狀式放大機構在應用上不會因共振而產生不可預期的故障或損傷。

4.5 液珠量測結果

圖 4.12 (a) 為線掃描相機拍攝影像之合併圖，展示壓電噴射閥擊發至 6 吋矽晶圓上的液珠分布情形，由左至右分別為四次連續序列的拍攝結果，每序列中之液珠依序由上至下擊發，擊發後隨即由線掃描相機進行拍攝。影像辨識程式會先將線掃相機拍攝的長條狀影像裁切成相同尺寸 (圖 4.12 (b))，確保每一張裁切後的影像皆僅包含一顆液珠。接著將影像灰階二值化，臨界灰度值設定為 65；同時濾除掉尺寸過小的髒汙，以及液珠中央因反光造成的淺色部分，生成如圖 4.12 (c) 之影像。逐一計算其中的白色像素數量，並轉換為面積，以此得到每一顆液珠的尺寸數據。

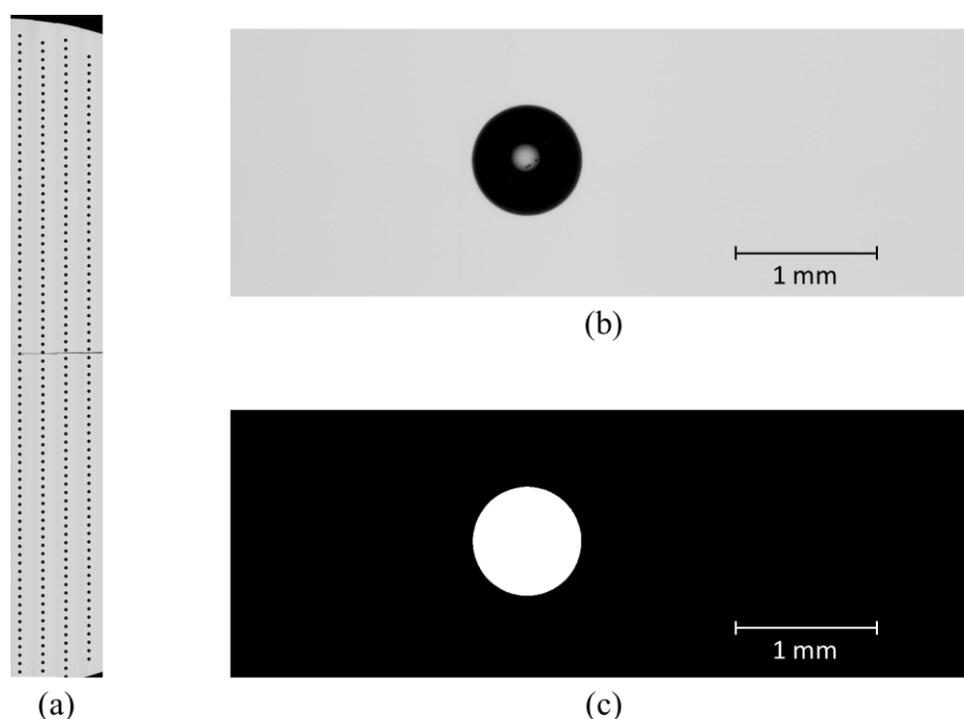


圖 4.12 (a) 線掃描相機拍攝之原始影像與 (b) 裁切後之單一液珠影像，以及 (c) 經過二質化處理後之影像。

量測過程中，為避免樣本過小造成的數據偏差，同時觀察連續擊發下液珠尺寸變化的趨勢，實驗時同一參數共進行四個長條狀影像序列的拍攝，每個序列之拍攝長度皆為 150 mm，液珠數量介於 256 至 359 之間，因開啟時長而異。同一序列中，兩次擊發之間的時間固定為 50 毫秒；進行序列擊發的同時會進行拍攝，完成後回歸原位，並平移進行下一序列的擊發並拍攝，以此類推，序列與序列間相同位置的間隔約為 20 秒。

4.5.1 連續擊發

圖 4.13 為開啟時長 (Open time) 為 15 ms、壓力 2 kgf/cm²、矽油黏度為 1000 cP 之實驗結果，圖中藍、紅、黃、紫的數據點，分別代表一至四個序列中之液珠直徑隨擊發時間順序變化的趨勢。

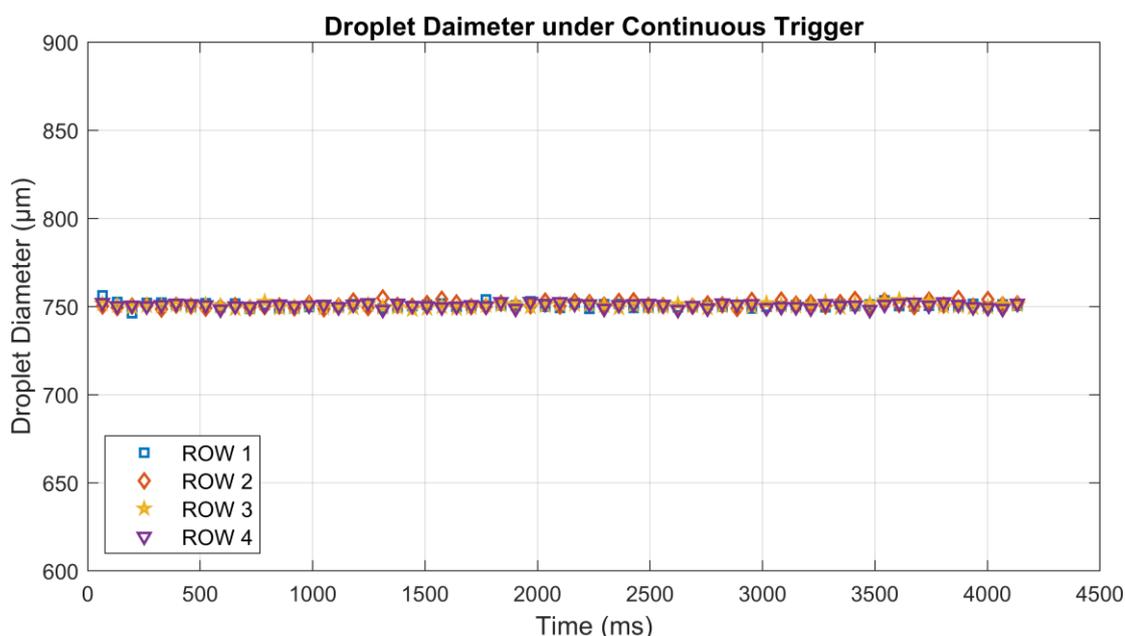


圖 4.13 單一實驗中，每序列之液珠直徑與連續擊發順序時間關係圖。

在以上相同參數的四個序列、共 265 個液珠中，平均直徑為 750.75 µm，標準差為 1.42 µm，其變異係數 (Coefficient of variation, CV) 僅為 0.19 %。顯示在此膠水黏度及參數設定下，壓電噴射閥的出膠量能夠保持相當穩定；並且不論在高頻、大量的連續擊發，或是序列之間經過較長時間停頓後，再度開始連續擊發，皆不會影響出膠量的一致性。

因此在後續實驗中，將以液珠尺寸的變異係數作為噴射閥參數是否適用的判定標準之一。

4.5.2 壓力與開啟時間差異

圖 4.14 展示的是同為 1000 cP 黏度、不同壓力供給的矽油，在各撞針開啟時長下所擊發的液珠平均尺寸及標準差；其中藍色線是壓力為 1 kgf/cm² 的結果，橘色線則為 2 kgf/cm²。而表 4.3 則為圖 4.14 中各點的液珠尺寸數據。

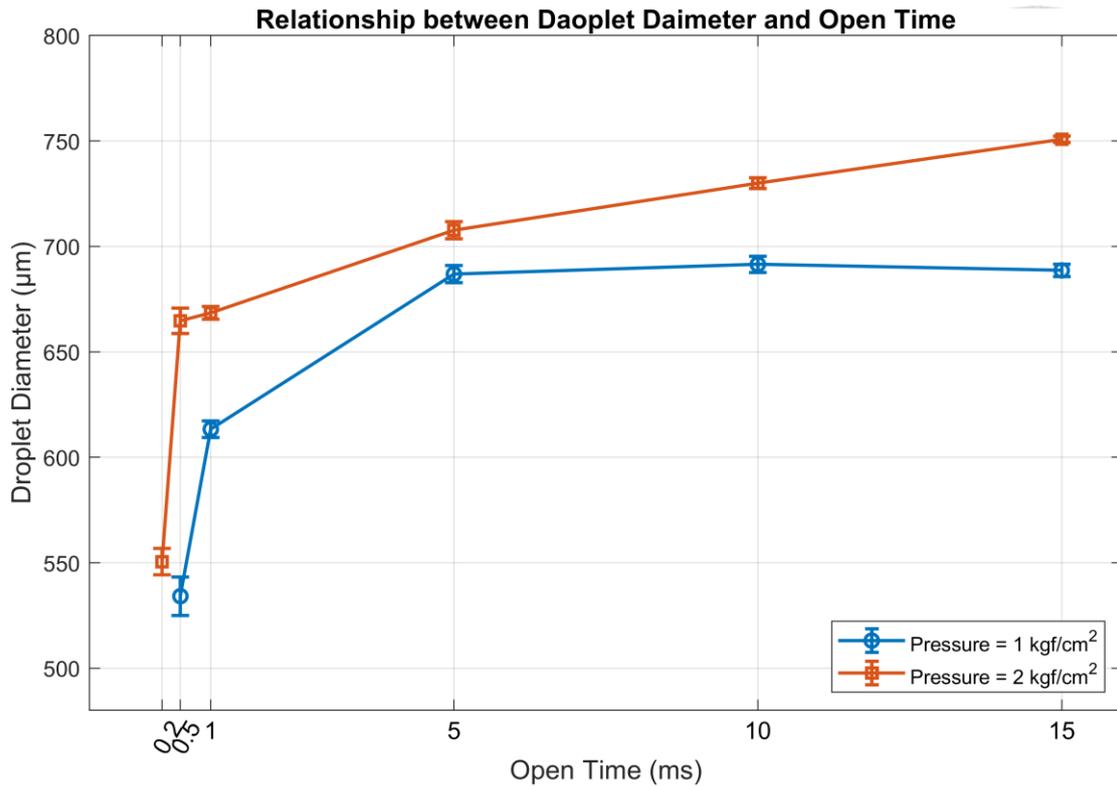


圖 4.14 不同壓力下，1000 cP 黏度矽油液珠平均直徑隨開啟時長變化之趨勢。

表 4.3 1000 cP 黏度矽油之液珠平均尺寸數據。

壓力	開啟時長 (ms)	0.2	0.5	1	5	10	15
1 kg/cm ²	液珠數量		334	325	313	294	268
	平均直徑 (µm)		534.24	613.33	686.83	691.40	688.62
	標準差 (µm)		9.09	3.98	4.10	3.84	3.00
	CV		1.70%	0.65%	0.59%	0.55%	0.44%
2 kg/cm ²	液珠數量	359	358	340	329	302	265
	平均直徑 (µm)	550.44	664.74	668.25	706.55	729.85	750.75
	標準差 (µm)	6.08	5.99	2.84	2.51	2.53	1.42
	CV	1.11%	0.90%	0.42%	0.35%	0.35%	0.19%

圖 4.14 中以藍色線代表、壓力為 1 kg/cm^2 之參數組合，在開啟時長為 0.2 毫秒時無法擊發矽油，故無此處數據；應是開啟時間過短，進入撞針與噴嘴間空隙的膠量過少，撞針落下時無法對此少量矽油有效推進，如圖 4.15 (a) 示意。而液珠尺寸在開啟時長為 0.5 毫秒至 5 毫秒區間顯著增加，超過 5 毫秒之後則趨於穩定；推測此時撞針與噴嘴間的空隙已達飽和，即使開啟時間持續增加，也無法容納更多矽油的流入，保持穩定的出膠量。另外，觀察表 4.3 中的尺寸變異係數 (CV)，也可發現液珠尺寸的偏差量在 0.5 毫秒至 5 毫秒區間呈現下降趨勢，超過 5 毫秒後則趨於穩定，同樣佐證達飽和之推測。

而以橘色線為代表、壓力為 2 kg/cm^2 之尺寸數據，在開啟時長為 0.2 毫秒至 1 毫秒區間有顯著增長，超過 1 毫秒之後則呈現較平緩的穩定增長；此逐漸穩定趨勢同樣可在表 4.3 中的尺寸變異係數 (CV) 中觀察到。由於壓力較大的緣故，在相同的開啟時間下，出膠量較壓力為 1 kg/cm^2 更多，且更容易達到穩定狀態。而開啟時間較長時呈現的平穩增長現象，推測撞針與噴嘴間的空隙同樣已達飽和，但壓力迫使額外部分矽油進入噴嘴頸部分，如圖 4.15 (b) 所示。

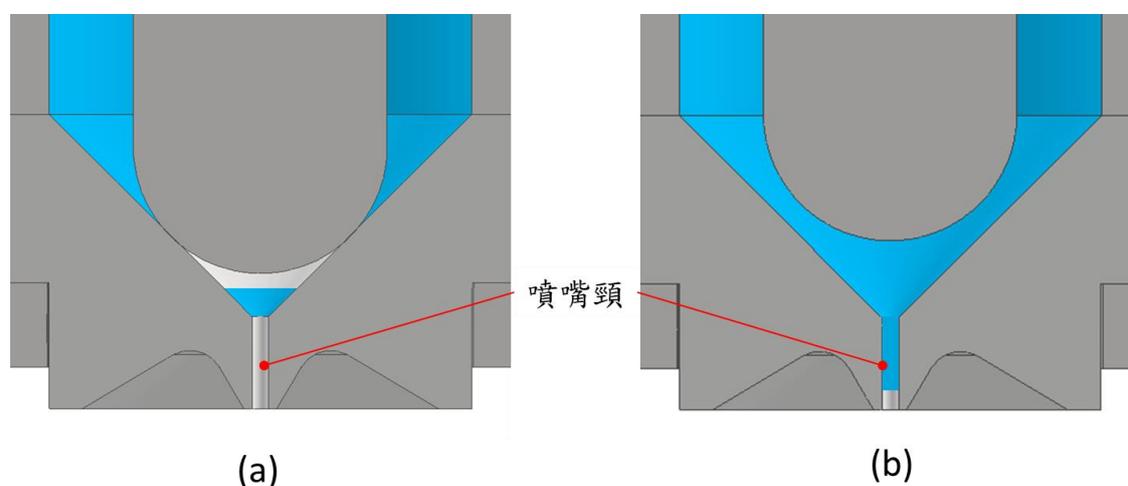


圖 4.15 噴嘴處矽油於 (a) 低壓力低開啟時長與 (b) 高壓力高開啟時長示意圖。

此現象根據泊肅葉定律 (Hagen–Poiseuille law)，當矽油等高黏度流體進入直徑僅 0.1 mm 的噴嘴頸時，體積流量會與細管兩端壓差成正比[33]。因此當壓力較小時，在開啟階段進入噴嘴頸的流量極少，不會對出膠量產生明顯影響；當壓力提升後，進入噴嘴頸處的膠量則會與開啟時長成正比增長，導致在高壓力、高開啟時長時，液珠尺寸呈平穩增長的現象。

4.5.3 黏度差異

先前實驗皆使用 1000 cP 黏度之矽油進行測試，為驗證壓電噴射閥在較高黏度膠水下的特性，改用 2000 cP 黏度之矽油重複實驗。圖 4.16 (a) 展示的是採用 2000 cP 黏度矽油，在開啟時長 (Open time) 為 5 ms、壓力 2 kgf/cm² 下之實驗結果。

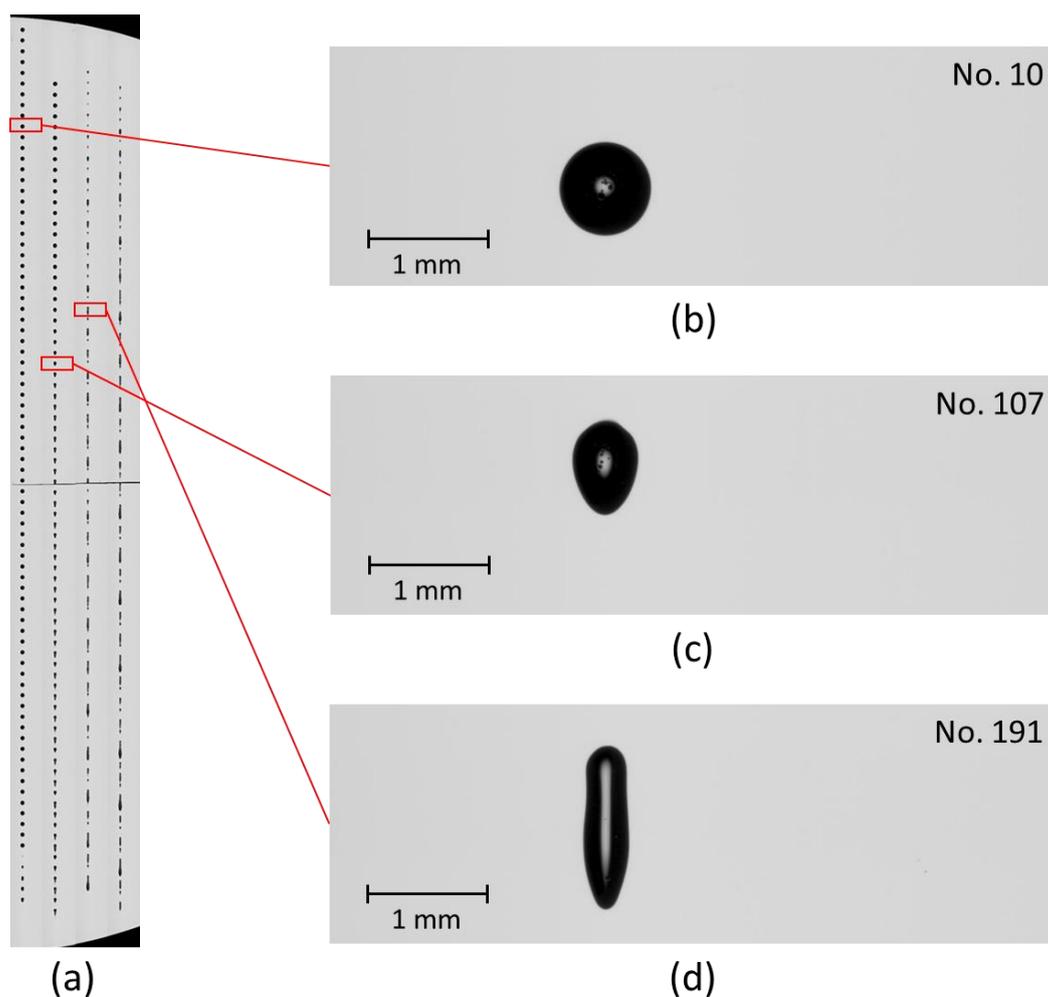


圖 4.16 (a) 2000 cP 黏度矽油實驗之原始影像與 (b) 第 10 顆、(c) 第 107 顆、以及 (d) 第 191 顆液珠之裁切影像。

由上圖可以發現，隨著擊發數量的增加，高黏度矽油液珠的外型會發生變化，此現象是由於噴射閥出力不足所導致。因矽油黏滯力的增加，部分矽油獲得的動能不足以使其順利斷裂，飛濺至目標上；反而形成液絲附著在出口，並因黏彈性作用縮回，並堆積於噴嘴處。

在開始擊發時，液珠外型仍為正常的圓形(圖 4.16 (b))；但隨著擊發數量增加，噴嘴處堆積的矽油增多，能被順利擊發的膠量變得不穩定，且更難斷裂，出現輕微的拖曳現象(圖 4.16 (c))；最終當噴嘴堆積的膠量過多，最終在擊發時直接接觸到移動中的基板，便會形成明顯的條狀液珠(圖 4.16 (d))。

當堆積於噴嘴的液體過多，便會使噴嘴完全堵塞。此時噴射閥已無法擊發液體，撞針擊發的液體完全被堆積的殘膠捕捉，在基板上形成斷續的拖曳痕跡，需要手動清潔後才可重新使用。

綜上所述，高黏度矽油的擊發困難，會導致液珠外型受影響而發生變形。因此，透過計算液珠面積和與液珠周長相同正圓面積之比值，得到液珠的真圓度 (Circularity)，能對液珠受噴嘴沾黏現象影響程度作初步的篩選。若矽油液珠外型仍為相對正圓，則受噴嘴沾黏的影響相對較小；若變形嚴重，則視為不可接受之擊發結果。透過計算各參數組合實驗中，受影響較小的液珠數量，判斷何者更適合較高黏度膠水的擊發工作。

圖 4.17 展示的是不同壓力與開啟時長下，真圓度大於 0.95 的液珠數量；其中， 1 kg/cm^2 壓力之結果以紅色顯示， 2 kg/cm^2 壓力為藍色， 3 kg/cm^2 壓力為綠色，x 軸上則為對應的開啟時長。

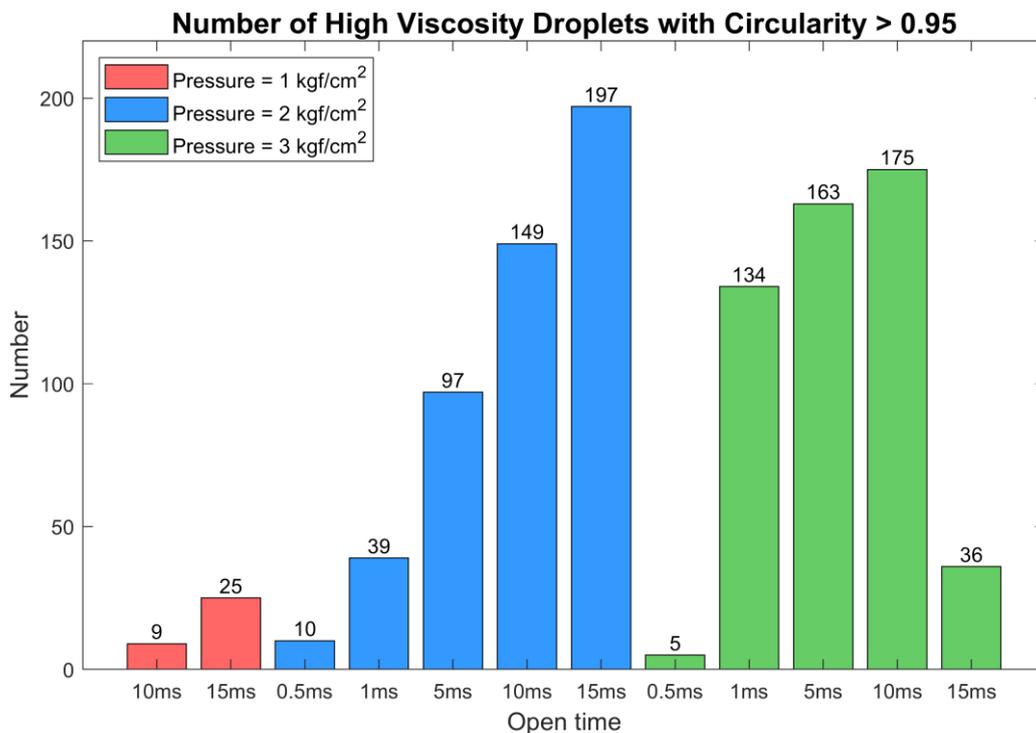


圖 4.17 2000 cP 高黏度實驗中，各參數下真圓度大於 0.95 之液珠數量。

圖 4.17 中可以觀察到，隨著壓力的增大，以及開啟時長的增加，能更容易擊發高黏度的膠水，延緩噴嘴沾黏現象的發生。但若施加過大的壓力和過長的開啟時間，則可能發生如壓力 3 kg/cm^2 、開啟時長 15 ms 數據之現象，反倒加速噴嘴沾黏現象發生。

若進一步觀察擊發序列中液珠尺寸的變化情形，如圖 4.18，顯示的是壓力為 2 kg/cm^2 、開啟時長 15 ms 之實驗結果中，真圓度大於 0.95 之液珠尺寸。其中藍色、橘色、黃色數據點，分別代表拍攝序列一至三，並且按擊發先後順序進行排列。圖中可以發現初始的液珠尺寸較大，後隨著擊發順序增加，液珠尺寸趨於穩定，並有微幅下降的趨勢，此時部分的膠量開始堆積在噴嘴處；當來到第 175 顆液珠時，噴嘴處堆積的膠量達到臨界點，使擊發的液珠尺寸出現明顯的下降，進一步加劇噴嘴堆積，並最終導致液珠的變形。

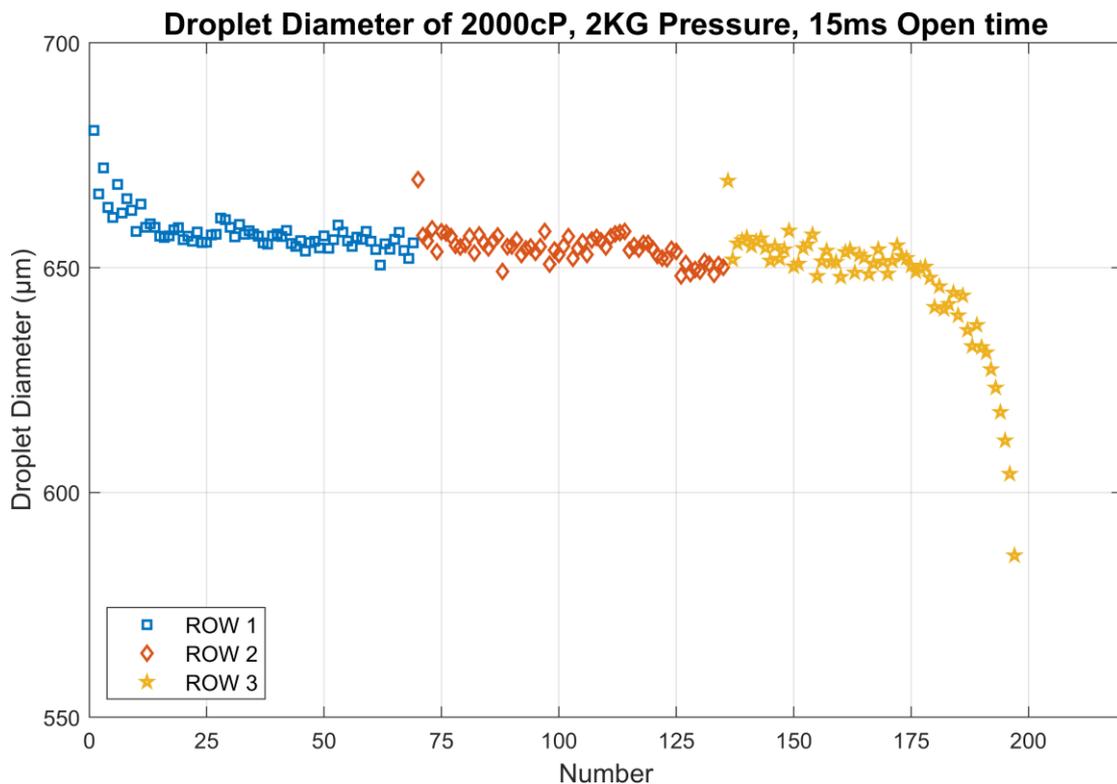


圖 4.18 2000 cP 矽油液珠於壓力 2 kg/cm^2 、開啟時長 15 ms 下的尺寸變化。

為區隔尺寸發生顯著變化的液珠，計算合格的液珠數量和其平均尺寸，使用尺寸數據的四分位數和一倍的四分位距作為上下限，用來濾除尺寸偏差過大的離群值，得到的結果如圖 4.19 所示。表 4.4 則為高黏度較適用之參數及其液珠尺寸數據。

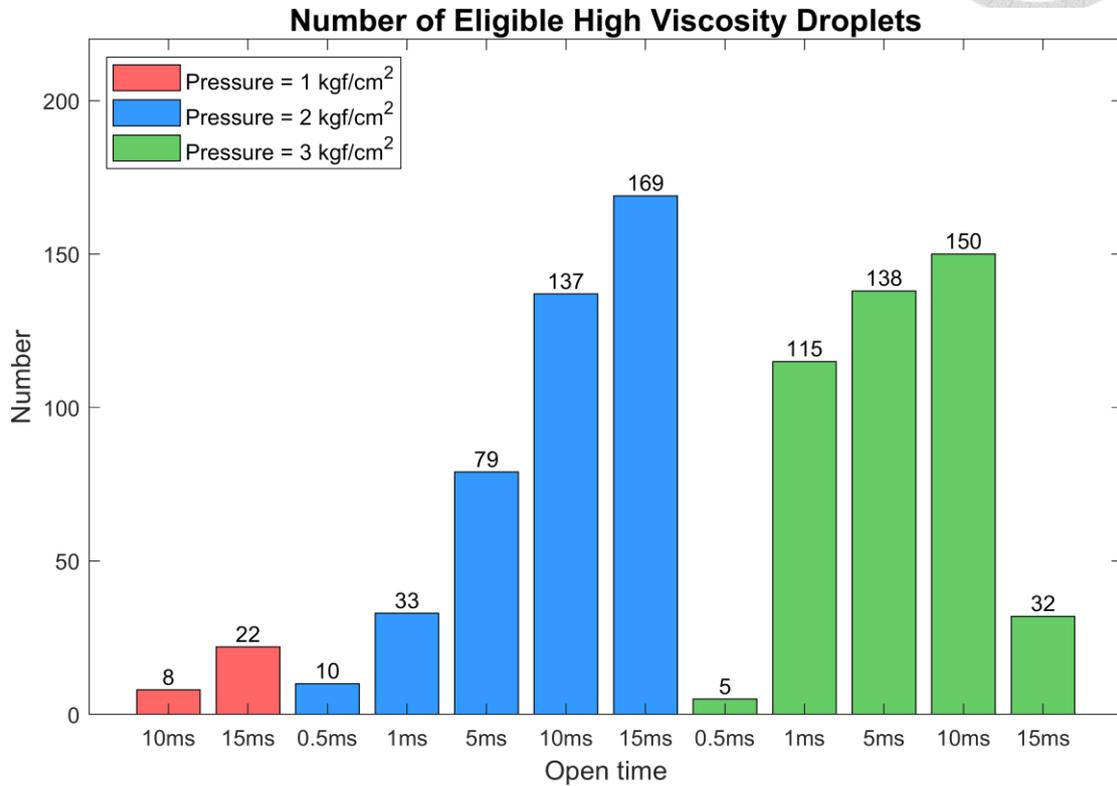


圖 4.19 2000 cP 高黏度實驗中，各參數下的合格液珠數量。

表 4.4 於 2000 cP 高黏度時較適用之參數和其量測結果。

壓力	1 kg/cm ²			2 kg/cm ²		
	5 ms	10 ms	15 ms	1 ms	5 ms	10ms
合格液珠數量	79	137	169	115	138	150
平均直徑 (μm)	628.74	637.38	654.72	619.609	641.78	676.56
標準差 (μm)	1.84	3.69	3.03	3.55	7.94	2.19
CV	0.29%	0.58%	0.46%	0.57%	1.24%	0.32%

第五章 結論與未來展望



本研究提出一種改良的巢狀式撓性放大機構，透過實驗量測其行程、推力和頻率響應等參數。後圍繞該放大機構設計一款小尺寸壓電噴射閥，並進行膠水擊發實驗，透過觀測液珠瞭解其工作特性。

本研究提出之巢狀式撓性放大機構屬於複合式撓性放大機構，其結構按階段分別由菱形式、槓桿式與半菱形式放大機構串聯組成，尺寸為 $34.2 \text{ mm} \times 33.5 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 。本放大機構透過 PSt 150/10 \times 10/20 層積式壓電致動器驅動，層積式壓電致動器放置於第一階段之菱形式放大機構中，未伸長時尺寸為 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 18 \text{ mm}$ ，於 150 V 最大驅動電壓下擁有 21.1 μm 的最大位移行程。經實測，本放大機構總放大倍率為 13.65 倍，機構剛性為 0.1115 N/ μm ，輸出端的主模態共振頻率為 1946 Hz；在層積式壓電致動器最大驅動電壓時，位移行程達 207.5 μm ，擁有最大推力 23.14 牛頓。

圍繞此放大機構設計的壓電噴射閥，結構上分為可拆卸的閥體與液盒兩部分，尺寸為 $72.7 \text{ mm} \times 69.5 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ ，較目前市售之壓電噴射閥更為緊湊，且具備快速拆卸與調整能力。透過矽油進行點膠測試，其對 1000 cP 黏度之矽油擊發情況相當穩定。在 1 kg/cm^2 及 2 kg/cm^2 壓力下，撞針開啟時長介於 0.2 ms 至 15 ms 間，連續擊發數量介於 256 至 359 之間，實驗測得的液珠尺寸之最大變異係數僅為 1.70%，當開啟時長達 1 ms 以上時，液珠尺寸之變異係數可低至 1% 以下，顯示針對此黏度之膠液擊發量具有相當高的一致性。

然而在較高的 2000 cP 黏度時卻遭遇瓶頸。經實驗測試，僅在 2 kg/cm^2 壓力下、開啟時長介於 5 ms 至 15 ms；以及 3 kg/cm^2 壓力下、開啟時長介於 1 ms 至 10 ms 兩個參數區段中擁有相對穩定的擊發表現。然而當連續擊發數量超出閾值後，則會與其餘參數區段一樣發生噴嘴沾黏現象。此現象是由於放大機構出力不足導致，當堆積在噴嘴的膠量過多，會導致擊發的出膠量嚴重衰減，甚至在基板上產生拖曳痕跡，需要手動清理後才能重新使用。



未來本研究之首要改進目標在於提高放大機構的輸出。目前巢狀式撓性放大機構的輸出行程與推力皆稍嫌不足，導致噴射閥無法順利擊發較高黏度之液體。計畫透過更換輸出更高的層積式壓電致動器，並減少放大機構的預壓力，以及在不降低共振頻率的前提下，改善放大機構之剛性，以期自源頭改善行程與推力不足的問題。其次是在液盒處增設加熱系統，透過加熱可降低部分膠水黏度，同樣能有效提升噴射閥工作範圍，並減少噴嘴沾黏現象的發生。

再者，目前的壓電噴射閥針對噴嘴及撞針位置進行微調時，需仰賴操作者的經驗；因此希望透過增設感測元件，將調整幅度可視化。如此不僅能使擊發工作前的微調工作大幅縮短，並且提升各參數的擊發膠量在不同實驗間的可重複性，乃至於將參數與對應的出膠量進行規格化，能更精確的控制所需的出膠量。

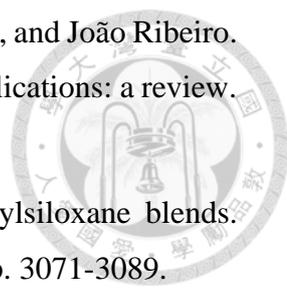
參考文獻



- [1] Bera, B. and M.D. Sarkar. 2016. Piezoelectric effect, piezotronics and piezophotonics: a review. *Imperial Journal of Interdisciplinary Research (IJIR)*, **2**(11): pp. 1407-1410.
- [2] Goldfarb, M. and N. Celanovic. 2002. Modeling piezoelectric stack actuators for control of micromanipulation. *IEEE Control Systems Magazine*. **17**(3): pp. 69-79.
- [3] Haonan Jin, Xiangyu Gao, Kaile Ren, Jinfeng Liu, Liao Qiao and Mingzi Liu. 2022. Review on piezoelectric actuators based on high-performance piezoelectric materials. *IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*. **69**(11): pp. 3057-3069.
- [4] Stewart Sherrit, Christopher M. Jones, Jack B. Aldrich, Chad Blodget, Xiaoqi Bao, Mircea Badescu and Yoseph Bar-Cohen. 2008. Multilayer piezoelectric stack actuator characterization. *Behavior and Mechanics of Multifunctional and Composite Materials*. 2008 SPIE.
- [5] Xu, W. and T. King. 1996. Flexure hinges for piezoactuator displacement amplifiers: flexibility, accuracy, and stress considerations. *Precision engineering*. **19**(1): pp. 4-10.
- [6] Nicolae Lobontiu, Jeffrey S. N. Paine, Ephraim Garcia and Michael Goldfarb. 2000. Corner-Filletted Flexure Hinges. *Journal of Mechanical Design*. **123**(3): pp. 346-352.
- [7] Stuart T. Smith, Vivek G. Badami, Jami S. Dale and Ying Xu. 1997. Elliptical flexure hinges. *Review of Scientific Instruments*. **68**(3): pp. 1474-1483.
- [8] Yong, Y.K., T.-F. Lu, and D.C. Handley. 2008. Review of circular flexure hinge design equations and derivation of empirical formulations. *Precision engineering*. **32**(2): pp. 63-70.
- [9] Mingxiang Ling, Junyi Cao, Minghua Zeng, Jing Lin and Daniel J Inman. 2016. Enhanced mathematical modeling of the displacement amplification ratio for piezoelectric compliant mechanisms. *Smart Materials and Structures*. **25**(7): p. 075022.

- [10] Y. K. Yong, S. O. R. Moheimani, B. J. Kenton and K. K. Leang. 2012. Invited Review Article: High-speed flexure-guided nanopositioning: Mechanical design and control issues. *Review of Scientific Instruments*. **83**(12). p. 121101
- [11] Wei Dong, Fangxin Chen, Futian Gao, Miao Yang, Lining Sun, Zhijiang Du, Jiong Tang and Dan Zhang. 2018. Development and analysis of a bridge-lever-type displacement amplifier based on hybrid flexure hinges. *Precision Engineering*. **54**: pp. 171-181.
- [12] Lobontiu, N. and E. Garcia. 2003. Analytical model of displacement amplification and stiffness optimization for a class of flexure-based compliant mechanisms. *Computers & Structures*. **81**(32): pp. 2797-2810.
- [13] Jinglong Chen, Chunlin Zhang, Minglong Xu, Yanyang Zi and Xinong Zhang. 2015. Rhombic micro-displacement amplifier for piezoelectric actuator and its linear and hybrid model. *Mechanical Systems and Signal Processing*. **50-51**: pp. 580-593.
- [14] Hong-Wen Ma, Shao-Ming Yao, Li-Quan Wang and Zhi Zhong. 2006. Analysis of the displacement amplification ratio of bridge-type flexure hinge. *Sensors and Actuators A: Physical*. **132**(2): pp. 730-736.
- [15] Fangxin Chen, Qianjun Zhang, Yongzhuo Gao and Wei Dong. 2020. A review on the flexure-based displacement amplification mechanisms. *IEEE Access*. **8**: pp. 205919-205937.
- [16] 吳起雲。2024。巢狀式位移放大壓電致動器之設計與開發。碩士論文。台北: 國立臺灣大學機械工程研究所。
- [17] Nguon, B. and M. Jouaneh. 2004. Design and characterization of a precision fluid dispensing valve. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. **24**: pp. 251-260.
- [18] Jianping, L. and D. Guiling. 2004. Technology development and basic theory study of fluid dispensing-a review. *Proceedings of the Sixth IEEE CPMT conference on high density microsystem design and packaging and component failure analysis (HDP'04)*. IEEE: pp. 198-205.
- [19] Juncheol Jeon, Seung-Min Hong, Minkyu Choi and Seung-Bok Choi. 2004. Design and performance evaluation of a new jetting dispenser system using two piezostack actuators. *Smart Materials and Structures*. **24**(7): p. 015020.

- [20] XiaYun Shu, HongHai Zhang, HuaYong Liu, Dan Xie and JunFeng Xiao. 2010. Experimental study on high viscosity fluid micro-droplet jetting system. *Science in China Series E: Technological Sciences* **53**: pp. 182-187.
- [21] Xiang Huang, Siying Lin, Zhenxiang Bu, Xiaolong Lin, Weijin Yi, Zhihong Lin, Peiqin Xie and Lingyun Wang. 2020. Research on nozzle and needle combination for high frequency piezostack-driven dispenser. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. **96**: p. 102453.
- [22] Shizhou Lu, Yaxin Liu, Yufeng Yao, Bo Huang and Lining Sun. 2014. Design and analysis of a piezostack driven jetting dispenser for high viscosity adhesives. *2014 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. IEEE.
- [23] Fliess, M. 2022. Dosing system with actuator unit and fluidic unit which can be coupled in a detachable manner. VERMES MICRODISPENSING GMBH: US. U.S. Patent No. 11385088B2.
- [24] Macindoe, W., D. Jones John, and B. Teece. 2016. Piezoelectric jetting system with quick release jetting valve .NORDSON CORP: US. U.S. Patent No. 11498091B2.
- [25] Reuter, M., Dosierventil und Dosierverfahren. 2019. MARCO SYSTEMANALYSE ENTW: DE. Germany Patent No. 102017121600A1.
- [26] Reuter, M., Verfahren zur Regelung einer piezoelektrischen Stellvorrichtung. 2018. MARCO SYSTEMANALYSE ENTW: DE. Germany Patent No. 19905340C2.
- [27] 林育群。2015。鋁鈦酸鉛塊材的機械性質研究。碩士論文。台中：國立中興大學機械工程研究所。
- [28] Hoffmann, K. 1989. An Introduction to Measurements using Strain Gages. Darmstadt, Germany: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH. p. 273.
- [29] Dobkin, R.C. and R.J. Widlar. 1971. Electrical regulator apparatus including a zero temperature coefficient voltage reference circuit. NATIONAL SEMICONDUCTOR CORP.: US. U.S. Patent No. 3617859A.
- [30] Currie, C. 1954. Silicone Fluids. *Industrial & Engineering Chemistry*. **46**(11): pp. 2331-2333.

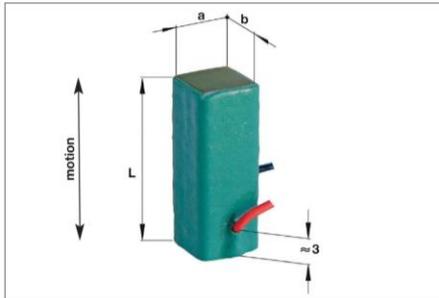
- 
- [31] Ronaldo Ariati, Flaminio Sales, Andrews Souza, Rui A. Lima, and João Ribeiro. 2021. Polydimethylsiloxane composites characterization and its applications: a review. *Polymers*. **13**(23): p. 4258.
- [32] Kataoka, T. and S. Ueda. 1967. Viscosity of polydimethylsiloxane blends. *Journal of Polymer Science Part A-1: Polymer Chemistry*. **5**(12): pp. 3071-3089.
- [33] Sutura, S.P. and R. Skalak. 1993. The history of Poiseuille's law. *Annual review of fluid mechanics*. **25**(1): pp. 1-20.

附錄



附錄 A 層積式壓電致動器(PSt 150/10×10/20, Piezomechanik GmbH) 規格表

1. Cofired monolithic solid stacks PSt 150/axb/... (osi-type)



max. Voltage range -30V/+150V

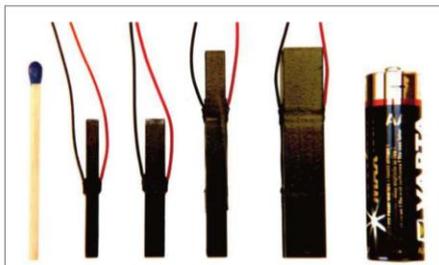
Dimensions a, b, L refer to ceramic body only,
coating not included
Length L: tolerance +/-0.1 mm

Actuator PSt with thick epoxy-coating

type osi-stack (+) U_{max} 150 V	ceramic- crosssection a x b /mm	length L ¹⁾ mm	max. stroke ²⁾ μ m	capacitance nF	resonance frequency kHz	stiffness N/ μ m	blockingforce ³⁾ N	max. load force N
PSt 150/2x3/5	2 x 3	5	6.5/5	100	150	45	300	300
PSt 150/2x3/7	2 x 3	9	13/9	170	100	25	300	300
PSt 150/2x3/20	2 x 3	18	28/20	420	50	12	300	300
PSt 150/3.5x3.5/7	3.5 x 3.5	9	13/9	350	100	50	800	800
PSt 150/3.5x3.5/20	3.5 x 3.5	18	28/20	800	50	25	800	800
PSt 150/5x5/7	5 x 5	9	13/9	800	100	120	1600	2000
PSt 150/5x5/20	5 x 5	18	28/20	1800	50	60	1600	2000
PSt 150/7x7/7	7 x 7	9	13/9	1400	100	240	3500	4000
PSt 150/7x7/20	7 x 7	18	28/20	3400	50	120	3500	4000
PSt 150/10x10/7	10 x 10	9	13/9	3000	100	500	7000	8000
PSt 150/10x10/20	10 x 10	18	28/20	6500	50	250	7000	8000
PSt 150/14x14/20	14 x 14	18	28/20	14500	47	500	15000	16000
PSt 150/25x25/20	25 x 25	18	28/20	32000	on request			

¹⁾ axis of motion ²⁾ -30V-150V // 0V-150V ³⁾ max. force for (-)30V-150V activation (blocking)

Combined longer stacks for increased stroke

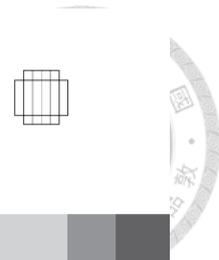


27 mm, 36 mm, 54 mm ... on request

Monolithic stacks with modified PZT ceramic
formula for

high temperature operation,
reduced capacitance values

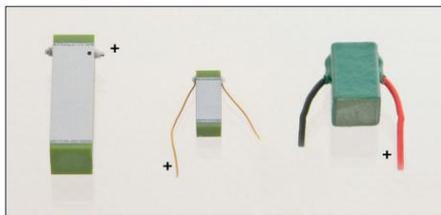
on request



Overview: main operating parameters

Piezoactuators
PSt 150, HPSt 150, PCh 150, HPCh 150
Max. Voltage ranges: -30V thru +150V

Typical operating schemes:
Unipolar range: 0V/+150V
 for high power applications
Semi-bipolar range: -30V thru +150V
 for quasistatic low power applications with enhanced stroke/blocking force



Actuator's poling

Piezo-actuators are poled components from factory
 Usually, the **positive** pole is indicated e.g. by **red insulation wires**, **dots**, **longer wire**

Strokes A/B
 Max. ratings shown in data sheet
 A, for max. semi bipolar
 B, for max. unipolar activation
 Example:
 Max. stroke: PSt 150/7/20 VS12
 A/B = 27µm/20µm

Stiffness
 Inverse compliance,
 – measured for open loop voltage control operation
 – measured with a static preload of at least of 10% of actuator's maximum load.

Blocking force/max force generation
 Means maximum force generation of an actuator.
 Depends on the applied voltage variation.
 Stated values refer to maximum semi-bipolar operation.
 Maximum uni-polar operation gives about 30% lower values

Resonant frequency
 – Refers to axial mode
 – Defined for one side fixed piezo-element (other modes like planar diameter not taken into)

Capacitances
 – Measured at low field excitation at room temperature
 – Manufacturing tolerances up to +/- 20%
 – Capacitance can depend on high field excitation and temperature

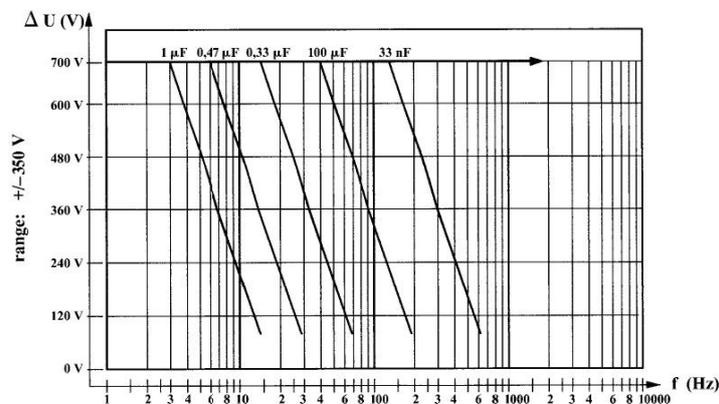
附錄 B 壓電驅動器 (SVR350 bip/3, Piezomechanik GmbH) 規格表

SVR 350 bip/1 (single channel) SVR 350 bip/3 (3 independent channels)

Voltage range:
-350 V thru +350 V

Manual setting of DC-Offset
(superimposed to external signal)

Variable attenuation



Input:

Signal: +/-5 V (+/-10 V with attenuation)
Impedance: 5 kOhms
Connector: BNC

Additional features of 3 channel SVR 350bip/3 amplifier:

Monitor BNC output per channel:
shows 1:1000 piezo voltage
LC-Display per channel

Output:

Connector: BNC
Voltage total: -350 V thru +350 V
DC-Offset range: -350 V thru +350 V
Gain: 70 (without attenuation)
Max. current: 15 mA
Noise: 1 mVpp (for 1 μFarad load)
Display: LCD
Dimensions W x D x H (mm):
single channel: 165 x 200 x 65
3-channels: 260 x 320 x 155
Weight:
single channel: 1.75 kg
3-channels: 4.7 kg

附錄 C 雷射位移計(LK-H052, KEYENCE)規格表



精細物體量測 (小光點型)

型號	LK-H008	LK-H020	LK-H022	LK-H050	LK-H052	LK-H080	LK-H082	LK-H150	LK-H152
安裝模式	鏡面反射	擴散反射	擴散反射	擴散反射	擴散反射	擴散反射	擴散反射	擴散反射	擴散反射
參考距離	8 mm	20 mm	20 mm	50 mm	50 mm	80 mm	80 mm	150 mm	150 mm
量測範圍 *1	±0.5 mm	±3 mm	±3 mm	±10 mm	±10 mm	±18 mm	±18 mm	±40 mm	±40 mm
紅色半導體雷射									
波長	655 nm	650 nm	650 nm	650 nm	650 nm	655 nm	650 nm	655 nm	650 nm
雷射分類	IEC 60825-1 等級 1	等級 3R	等級 2	等級 3R	等級 2	等級 3R	等級 2	等級 3R	等級 2
輸出	FDA (CDRH) 21CFR Part 1040.10 等級 II	等級 IIIa	等級 II	等級 IIIa	等級 II	等級 IIIa	等級 II	等級 IIIa	等級 II
輸出	0.3 mW	4.8 mW	0.95 mW	4.8 mW	0.95 mW	4.8 mW	0.95 mW	4.8 mW	0.95 mW
光點直徑 (在參考距離時)	ø20 µm	ø25 µm		ø50 µm		ø70 µm		ø120 µm	
線性度 *2	±0.05% F.S. (F.S.=1 mm)	±0.02% F.S. (F.S.=6 mm)		±0.02% F.S. (F.S.=20 mm)		±0.02% F.S. (F.S.=36 mm)		±0.02% F.S. (F.S.=80 mm)	
重複精度 *3	0.005 µm (0.001 µm)	0.02 µm (0.01 µm)		0.025 µm		0.1 µm		0.25 µm	
取樣速率	2.55/5/10/20/50/100/200/500/1000 µs (可選擇9種級別)								
溫度特性	0.02% F.S./°C (F.S.=1 mm)	0.01% F.S./°C (F.S.=6 mm)		0.01% F.S./°C (F.S.=20 mm)		0.01% F.S./°C (F.S.=36 mm)		0.01% F.S./°C (F.S.=80 mm)	
外觀防護等級	IP67								
環境抗耐性	周圍亮度								白熾燈或螢光燈：最大 10000 lux
周圍溫度	0 至 +50°C *4	0 至 +50°C						0 至 +50°C *4	
相對濕度	35 至 85% RH (無冷凝)								
振動	10 至 55 Hz, 1.5 mm 雙振幅, X、Y、Z 方向各 2 小時								
材料	鋁鎂合金								
重量	約 240 g	約 230 g		約 260 g		約 280 g		約 300 g	

*1 取樣週期在 20 µs 以上的量測範圍。 *2 該值是指 KEYENCE 標準目標物 (僅用於 LK-H008 的白熾燈或螢光燈或帶有金屬鏡面的工件) 在正常量測模式下的量測值。
 *3 該值是指 KEYENCE 標準目標物 (僅用於 LK-H008 的白熾燈或螢光燈或帶有金屬鏡面的工件) 在量測平均值時為 10304 的參考距離下的量測值。括弧內的值是在量測平均值時為 65536 且取樣週期為 200 µs 時的典型量測值。
 *4 當周圍溫度上升至 40°C 以上時, 必須安裝在金屬板上。

附錄 D 雷射位移計控制器(LK-G5001, KEYENCE)規格表

主模組 / 感測頭擴充模組

型號	單模組型 獨立型	LK-G5001V		LK-G5001PV		LK-HA100	
		LK-G5001/LK-HD500		LK-G5001P/LK-HD500			
指示器		主控制器				感測頭擴充模組	
感測頭相容性		相容					
可連接感測頭數		2				1	
顯示器 (LK-HD500)	最小顯示單元	0.001 μm					
	顯示範圍	±999.999 μm 至 ±9999.99 mm (7 種級別可選)				N/A	
	顯示週期	約 10 次 / 秒					
顯示器介面	顯示器連接埠	可連接顯示器模組 (LK-HD500) 或 專用觸控面板 (LK-HD1001)				N/A	
	LED 指示器	雷射開啟				電源、穩定亮起、明亮、暗淡	
接線板	類比電壓輸出	±10 V 輸出, 輸出阻抗: 100 Ω					
	類比電流輸出	4 至 20 mA, 最大負載阻抗: 350 Ω					
	類比輸出數	2				1	
	定時輸入 ^{**}	無電壓輸入		電壓輸入			
	重設 1 輸入 ^{**}						
	自動歸零 1 輸入 ^{**}	無電壓輸入		電壓輸入			
	雷射控制輸入 ^{**}						
	雷射過程輸入	無電壓輸入				N/A	
	警報輸出						
	一般比較器輸出	NPN 集開極輸出		PNP 集開極輸出			
擴充連接器	定時輸入	無電壓輸入		電壓輸入			
	重設輸入						
	自動歸零輸入	無電壓輸入		電壓輸入			
	程式切換輸入						
	二進位選擇輸入					N/A	
	警報輸出						
	比較器輸出	NPN 集開極輸出		PNP 集開極輸出			
	二進位輸出						
RS-232C 介面	速率: 9600 至 115200 bps 資料長度: 8 比特 停止位長度: 1 比特 奇偶性: 無 / 偶 / 奇				N/A		
USB 介面	與 USB2.0 高速版相容 ^{**3}						
乙太網介面 ^{**4}	100Base-TX/10Base-T						
EtherNet/IP [™] 介面 ^{**5}	循環 (隱式) 通訊 (Implicit 訊息) 顯式訊息通訊 (Explicit 訊息) / UCMM 及 Class3 連接數 32 支援符合性測試 Version.CT14				N/A		
PLC 連接	三菱電機 (株) 製造 支援 MELSEC iQ-R 系列、iQ-F 系列、Q 系列、L 系列、FX 系列 不可與 EtherNet/IP [™] 、CC-Link、DeviceNet [™] 同時使用						
感測頭擴充模組連接器	可以向一個主控制器連接多達 10 個感測頭擴充模組						
擴充模組連接器	可連接 CC-Link 模組 (LK-CC100) 或 DeviceNet [™] 模組 (LK-DN100)				N/A		
電源	電源電壓	24 VDC ±10%				24 VDC ±10% (由控制器提供)	
	最大電流消耗	裝有 1 個感測頭時為 0.6 A 以下 / 裝有 12 個感測頭時為 3.5 A 以下					
環境抗耐性	環境溫度	當連接了一個以下的感測頭擴充模組時: 0 至 50°C 當連接了兩個以上的感測頭擴充模組時: 0 至 40°C					
	相對濕度	35 至 85%RH (無凝露)					
重量	約 600 g				約 300 g		

^{**1} 該輸入可應用於所有集成輸出埠。

^{**2} 當連接了雷射等級 3B 的感測頭時, 必須使用操作開關作為此終極輸入。當當操作開關設為開時, 才能發射雷射。

(選擇一前當當操作開關設為開時才能取消的鍵。)當連接了雷射等級 2/3R 的感測頭時, 雷射在終極打開時開啟, 在終極短路時關閉。

^{**3} 當連接了支援 USB 1.1 或 USB 2.0 Full speed 的個人電腦時, 資料更新週期和其他操作可能變慢。

^{**4} 乙太網連接僅能向個人電腦或本地連接埠進行一對一的連接, 包括僅進行個人電腦和 LK-G5000 系列模組的連接。

• NPN 集開極輸出額定值: 最大 50 mA (最大 40 V), 殘餘電壓: 最大 0.5 V

• PNP 集開極輸出額定值: 最大 50 mA (最大 30 V), 殘餘電壓: 最大 0.5 V

• 串接輸入額定值: 電壓開閉 (ON) 時: 最大 1 V, 電流開閉 (OFF) 時: 最大 0.6 mA

• 電壓輸入額定值: 最大輸入額定值: 26.4 V, 電壓開閉 (ON) 時: 10.2 V, 電流開閉 (OFF) 時: 0.6 mA

• LK-G5000 系列的部分輸入 / 輸出電路內部共通。請注意電壓 / 外部設備之間的電位差並不會導致

內部共通電位的電位差。有關詳情, 請參考用戶手冊的 "配線注意事項"。

^{**5} 安裝 CC-Link 模組、DeviceNet[™] 模組時無法使用 EtherNet/IP[™] 介面。

EtherNet/IP[™] 可支援最新的控制盤。關於支援的時期, 請就近向營業處洽詢。

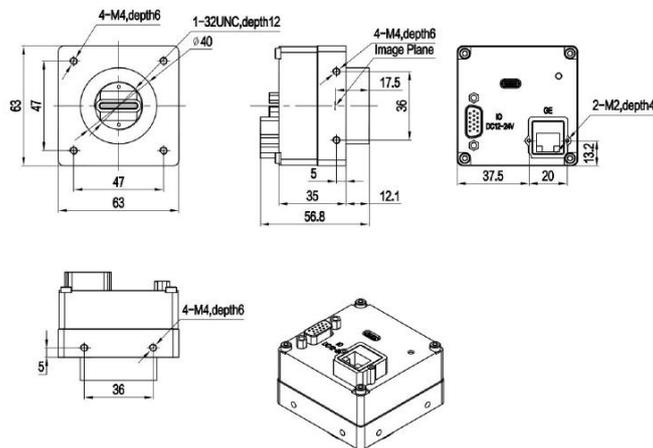
附錄 E 線掃描相機 (PA4KGV-80KM, 埃科光電) 規格表

埃科光電

产品规格

型号	PA4KGV-80KM
名称	4K 网口黑白线扫描相机
传感器类型	Global Shutter CMOS
图像模式	黑白
光学尺寸	14.33 mm
分辨率	4096 * 1
像素大小	3.5 μm * 3.5 μm
最大线速度	30kHz (80kHz with SAccel™)
像素位宽	8 bit
动态范围	≥54 dB
数据率	123 MB/s
触发模式	自由运行 / 行触发控制 / 帧触发控制
曝光控制	时间设置 / 外部脉宽控制
曝光时间	2.5 μs - 1s (步长: 0.1 μs)
增益范围	1/2/4/8x (模拟增益) 0.001-8.000x (数字增益)
数据接口	GigE Vision
镜头接口	C Mount
电源接口	HD15 (Female)
电源规格	DC12-24V (±10%) 0.5A
功耗	3.4 W
外壳尺寸	63.0mm (W) x 63.0mm (H) x 56.8mm (D)
运行温度	0-65°C
储存温度	-20-75°C

机械尺寸



合肥埃科光电科技股份有限公司

<http://www.i-tek.cn>

+86-0551-62622939

market@i-tek.cn