

國立臺灣大學工學院機械工程學系

碩士論文

Department of Mechanical Engineering

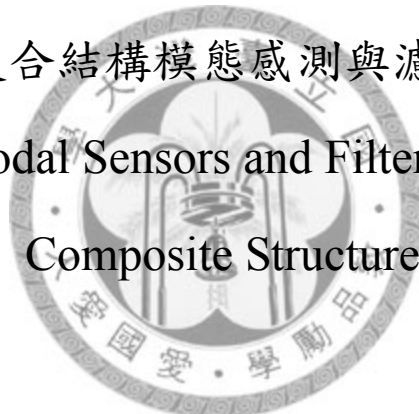
College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

壓電複合結構模態感測與濾除之研究

Research of Modal Sensors and Filters of Piezoelectric
Composite Structures



李智航

Chih-Hang Li

指導教授：周元昉 博士

Advisor: Yuan-Fang Chou, Ph.D.

中華民國 98 年 1 月

January, 2009

壓電複合結構模態感測與濾除之研究

中文摘要

本文使用最佳化方法來設計壓電複合結構之模態感測器。通常儀器所量測到的信號為所有模態的信號的加總，然而透過不斷的修正電極形狀來使所要感測的模態之信號遠大於其餘模態的信號。先利用有限元素法分析軟體 ANSYS 分析出全部鋪滿接地電位的電極之系統模態，再利用本文所提不影響系統模態的切割方法切割出所需的電極形狀，而所需電極形狀配合系統模態振形透過 MATLAB 進行形狀之最佳化設計，並利用信號後處理來感測特定模態，此時只針對某幾個特定模態來設計。反之，亦可以達到濾除某特定模態之信號。

為驗證本文所提方法的可行性，以鋁板黏貼壓電片為例，利用微影製程定義出最佳電極的形狀，使用衝擊槌來激振試片，將電流信號轉電壓信號並作運算，再將信號輸入頻譜分析儀，結果確能達到模態感測器與模態濾除器的效果。

關鍵字：壓電複合結構、最佳化、模態感測、模態濾除

Abstract

Chih-Hang Li, M.S., National Taiwan University, January, 2009

Research of Modal Sensors and Filters of Piezoelectric Composite Structures

Major Professor: Yuan-Fang Chou

Piezoelectric modal sensors can be created using the orthogonal property of eigenfunctions. Sensors have been designed for use with 1-D flexural structures by shaping electrode patterns proportional to modal strains. However, it is not easy to apply the same concept to general structures due to the difficulty in implementing the location weight needed for signals. Therefore, a nonlinear optimization scheme is proposed in this paper to design modal filters for general structures. For any given electrode pattern, the signal contributed from each mode is found by integrating the corresponding free surface charges on the sensing electrode. A modal filter is obtained by modifying the electrode pattern to achieve the desired relative signal strength for different modes. Sensors capable of capturing or filtering out the signal generated by a specific mode can be developed. A PZT coated aluminum plate is used as an example. Mode shapes are found with finite element analysis. Design of both a mode-pass and mode-reject filter is demonstrated. This method also works for three-dimensional structures, as only free surface charges are involved in the operation of modal filters.

Key words : Piezoelectric Composite Structures, sensor, filter, optimization

目 錄

中文摘要	i
Abstract.....	ii
目 錄	iii
表目錄.....	vi
圖目錄.....	xxv
符號表.....	xxxvi
第一章 緒論	1
1.1 前言	1
1.2 文獻回顧	1
1.3 本文內容	3
第二章 模態感測器之設計	4
2.1 壓電體之模態分析	4
2.2 壓電系統之邊界條件	6
2.3 模態感測之設計	8
第三章 實例分析與討論	11
3.1 有限元素分析	11
3.2 單功用感測電極與分析結果	12
3.2.1 第一模態感測	13
3.2.2 第二模態感測	15
3.2.3 第三模態感測	16
3.2.4 第四模態感測	17
3.2.5 第五模態感測	17
3.2.6 第一模態濾除	17

3.2.7	第二模態濾除	18
3.2.8	第三模態濾除	19
3.2.9	第四模態濾除	20
3.2.10	第五模態濾除	20
3.3	多功能感測電極與分析結果	20
3.3.1	第一、二和五模態濾除	20
3.3.2	第三模態感測與濾除	22
3.3.3	第四模態感測與濾除	23
3.3.4	第五模態感測與濾除	24
第四章	實驗與討論	26
4.1	試片製造	26
4.1.1	定義電極形狀	26
4.1.2	黏貼壓電片	27
4.1.3	量測電路	28
4.2	量測架構	29
4.2.1	雷射都卜勒儀感測位移速度	29
4.2.2	感測器與濾波器效果檢測	29
4.3	量測結果	30
4.3.1	第一模態感測器與第一模態濾除器	30
4.3.2	第二模態感測器與第二模態濾除器	32
4.3.3	第三模態感測器與第三模態濾除器	33
4.3.4	第四模態感測器與第四模態濾除器	33
4.3.5	第五模態感測器與第五模態濾除器	34
4.3.6	多功能第一、二和五模態濾除器	35
4.3.7	多功能第三模態感測與濾除器	36

4.3.8	多功能第四模態感測與濾除器	37
4.3.9	多功能第五模態感測與濾除器	37
4.3.10	結果討論	38
第五章	結論與建議	40
參考文獻	.....	41
附表	.....	43
附圖	.....	100
附錄 A	.....	153
附錄 B	.....	154
附錄 C	.....	155



表目錄

表 3.1 壓電複合結構前五模態之自然頻率	43
表 3.2 第一模態感測最佳化結果	43
表 3.3 第二模態感測最佳化結果	44
表 3.4 第三模態感測最佳化結果	44
表 3.5 第四模態感測最佳化結果	45
表 3.6 第五模態感測最佳化結果	45
表 3.7 第一模態濾除最佳化結果	46
表 3.8 第二模態濾除最佳化結果	46
表 3.9 第三模態濾除最佳化結果	47
表 3.10 第四模態濾除最佳化結果	47
表 3.11 第五模態濾除最佳化結果	48
表 3.12 第一、二和五模態濾除最佳化結果	48
表 3.13 第三模態感測與濾除最佳化結果	49
表 3.14 第四模態感測與濾除最佳化結果	49
表 3.15 第五模態感測與濾除最佳化結果	50
表 4.1 固定端($x=0$)至各波峰和節點之距離	50
表 4.2 敲擊點標號	50
表 4.3 垂直敲擊角落 (G_z)雷射量測第一模態感測器之共振頻率和 dB 值	51
表 4.4 側向敲擊角落 (G_y)雷射量測第一模態感測器之共振頻率和 dB 值	51

表 4.5 敲擊各點，第一模態感測器信號之 dB 值	51
表 4.6 第一模態感測器，垂直敲擊 G_z 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差	52
表 4.7 第一模態感測器，側向敲擊 G_y 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差	52
表 4.8 垂直敲擊角落 (G_z)雷射量測第一模態濾除器之共振頻率和 dB 值	53
表 4.9 側向敲擊角落 (G_y)雷射量測第一模態濾除器之共振頻率和 dB 值	53
表 4.10 敲擊各點，第一個模態濾除器信號之 dB 值	53
表 4.11 第一模態濾除器，垂直敲擊 G_z 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差	54
表 4.12 第一模態濾除器，側向敲擊 G_y 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差	55
表 4.13 敲擊各點，第一模態感測與濾除器信號之 dB 差	55
表 4.14 垂直敲擊角落 (G_z)雷射量測第二模態感測器之共振頻率和 dB 值	56
表 4.15 側向敲擊角落 (G_y)雷射量測第二模態感測器之共振頻率和 dB 值	56
表 4.16 敲擊各點，第二模態感測器信號之 dB 值	56
表 4.17 第二模態感測器，垂直敲擊 G_z 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差	57
表 4.18 第二模態感測器，側向敲擊 G_y 點雷射與敲擊各點感測器信號之	

dB 差	58
表 4.19 垂直敲擊角落 (G_z)雷射量測第二模態濾除器之共振頻率和 dB 值	58
表 4.20 側向敲擊角落 (G_y)雷射量測第二模態濾除器之共振頻率和 dB 值	59
表 4.21 敲擊各點，第二模態濾除器信號之 dB 值	59
表 4.22 第二模態濾除器，垂直敲擊 G_z 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差	59
表 4.23 第二模態濾除器，側向敲擊 G_y 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差	60
表 4.24 敲擊各點，第二模態感測與濾除器信號之 dB 差	61
表 4.25 垂直敲擊角落 (G_z)雷射量測第三模態感測器之共振頻率和 dB 值	61
表 4.26 側向敲擊角落 (G_y)雷射量測第三模態感測器之共振頻率和 dB 值	62
表 4.27 敲擊各點，第三模態濾除器信號之 dB 值	62
表 4.28 第三模態感測器，垂直敲擊 G_z 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差	62
表 4.29 第三模態感測器，側向敲擊 G_y 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差	63
表 4.30 垂直敲擊角落 (G_z)雷射量測第三模態濾除器之共振頻率和 dB 值	64
表 4.31 側向敲擊角落 (G_y)雷射量測第三模態濾除器之共振頻率和 dB	

值	64
表 4.32 敲擊各點，第三模態濾除器信號之 dB 值	64
表 4.33 第三模態濾除器，垂直敲擊 G_z 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差	65
表 4.34 第三模態濾除器，側向敲擊 G_y 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差	65
表 4.35 敲擊各點，第三模態感測與濾除器信號之 dB 差	66
表 4.36 垂直敲擊角落 (G_z) 雷射量測第四模態感測器之共振頻率和 dB 值	67
表 4.37 側向敲擊角落 (G_y) 雷射量測第四模態感測器之共振頻率和 dB 值	67
表 4.38 敲擊各點，第四模態感測器信號之 dB 值	67
表 4.39 第四模態感測器，垂直敲擊 G_z 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差	68
表 4.40 第四模態感測器，側向敲擊 G_y 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差	68
表 4.41 垂直敲擊角落 (G_z) 雷射量測第四模態濾除器之共振頻率和 dB 值	69
表 4.42 側向敲擊角落 (G_y) 雷射量測第四模態濾除器之共振頻率和 dB 值	69
表 4.43 敲擊各點，第四模態感測器信號之 dB 值	70
表 4.44 第四模態濾除器，垂直敲擊 G_z 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差	70

表 4.45 第四模態濾除器，側向敲擊 G_y 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差	71
表 4.46 敲擊各點，第四模態感測與濾除器信號之 dB 差.....	71
表 4.47 垂直敲擊角落 (G_z)雷射量測第五模態感測器之共振頻率和 dB 值	72
表 4.48 側向敲擊角落 (G_y)雷射量測第五模態感測器之共振頻率和 dB 值	72
表 4.49 敲擊各點，第五模態感測器信號之 dB 值	72
表 4.50 第五模態感測器，垂直敲擊 G_z 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差	73
表 4.51 第五模態感測器，側向敲擊 G_y 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差	74
表 4.52 垂直敲擊角落 (G_z)雷射量測第五模態濾除器之共振頻率和 dB 值	74
表 4.53 側向敲擊角落 (G_y)雷射量測第五模態濾除器之共振頻率和 dB 值	75
表 4.54 敲擊各點，第五模態濾除器信號之 dB 值	75
表 4.55 第五模態濾除器，垂直敲擊 G_z 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差	75
表 4.56 第五模態濾除器，側向敲擊 G_y 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差	76
表 4.57 敲擊各點，第五模態感測與濾除器信號之 dB 差.....	77
表 4.58 垂直敲擊角落 (G_z)雷射量測多功能第一、二和五模態濾除器之	

共振頻率和 dB 值	77
表 4.59 側向敲擊角落 (G_y)雷射量測多功能第一、二和五模態濾除器之 共振頻率和 dB 值	78
表 4.60 敲擊各點，第一模態濾除器信號之 dB 值	78
表 4.61 第一模態濾除器，垂直敲擊 G_z 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差	78
表 4.62 第一模態濾除器，側向敲擊 G_y 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差	79
表 4.63 敲擊各點，第二模態濾除器信號之 dB 值	80
表 4.64 第二模態濾除器，垂直敲擊 G_z 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差	80
表 4.65 第二模態濾除器，側向敲擊 G_y 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差	81
表 4.66 敲擊各點，第五模態濾除器信號之 dB 值	82
表 4.67 第五模態濾除器，垂直敲擊 G_z 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差	82
表 4.68 第五模態濾除器，側向敲擊 G_y 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差	83
表 4.69 垂直敲擊角落 (G_z)雷射量測多功能第三模態感測與濾除器之共 振頻率和 dB 值	84
表 4.70 側向敲擊角落 (G_y)雷射量測多功能第三模態感測與濾除器之共 振頻率和 dB 值	84
表 4.71 敲擊各點，第三模態感測器信號之 dB 值	84

表 4.72 第三模態感測器，垂直敲擊 G_z 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差	85
表 4.73 第三模態感測器，側向敲擊 G_y 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差	85
表 4.74 敲擊各點，第三模態濾除器信號之 dB 值	86
表 4.75 第三模態濾除器，垂直敲擊 G_z 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差	87
表 4.76 第三模態濾除器，側向敲擊 G_y 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差	87
表 4.77 敲擊各點，第三模態感測與濾除器信號之 dB 差	88
表 4.78 垂直敲擊角落 (G_z)雷射量測多功能第四模態感測與濾除器之共振頻率和 dB 值	89
表 4.79 側向敲擊角落 (G_y)雷射量測多功能第四模態感測與濾除器之共振頻率和 dB 值	89
表 4.80 敲擊各點，第四模態感測器信號之 dB 值	89
表 4.81 第四模態感測器，垂直敲擊 G_z 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差	90
表 4.82 第四模態感測器，側向敲擊 G_y 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差	90
表 4.83 敲擊各點，第四模態濾除器信號之 dB 值	91
表 4.84 第四模態濾除器，垂直敲擊 G_z 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差	92
表 4.85 第四模態濾除器，側向敲擊 G_y 點雷射與敲擊各點感測器信號之	

dB 差	93
表 4.86 敲擊各點，第四模態感測與濾除器信號之 dB 差	93
表 4.87 垂直敲擊角落 (G_z)雷射量測多功能第五模態感測與濾除器之共振頻率和 dB 值	94
表 4.88 側向敲擊角落 (G_y)雷射量測多功能第五模態感測與濾除器之共振頻率和 dB 值	94
表 4.89 敲擊各點，第五模態感測器信號之 dB 值	94
表 4.90 第五模態感測器，垂直敲擊 G_z 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差	95
表 4.91 第五模態感測器，側向敲擊 G_y 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差	96
表 4.92 敲擊各點，第五模態濾除器信號之 dB 值	96
表 4.93 第五模態濾除器，垂直敲擊 G_z 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差	97
表 4.94 第五模態濾除器，側向敲擊 G_y 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差	98
表 4.95 敲擊各點，第五模態感測與濾除器信號之 dB 差	98

圖目錄

圖 1.1 信號處理感測不同模態	100
圖 2.1 使用切割線設計多個感測電極	101
圖 3.1 壓電複合結構示意與座標系統	102
圖 3.2 壓電結構第一位移模態	102
圖 3.3 壓電結構第二位移模態	103
圖 3.4 壓電結構第三位移模態	103
圖 3.5 壓電結構第四位移模態	104
圖 3.6 壓電結構第五位移模態	104
圖 3.7 第一模態電位移 z 分量	105
圖 3.8 第二模態電位移 z 分量	105
圖 3.9 第三模態電位移 z 分量	106
圖 3.10 第四模態電位移 z 分量	106
圖 3.11 第五模態電位移 z 分量	107
圖 3.12 感測電極形狀設計	107
圖 3.13 A 款電極	108
圖 3.14 跨阻抗放大器	108
圖 3.15 差動放大器	109
圖 3.16 連接信號線示意圖	109
圖 3.17 第一模態感測之初始與最佳化電極邊界(藍色虛線為初始邊界,紅色實線為最佳邊界).....	110

圖 3. 18 第二模態感測之初始與最佳化電極邊界(藍色虛線為初始邊界,紅色實線為最佳邊界).....	110
圖 3. 19 B 款電極	111
圖 3. 20 第三模態感測之初始與最佳化電極邊界(藍色虛線為初始邊界,紅色實線為最佳邊界).....	111
圖 3. 21 第四模態感測之初始與最佳化電極邊界(藍色虛線為初始邊界,紅色實線為最佳邊界).....	112
圖 3. 22 第五模態感測之初始與最佳化電極邊界(藍色虛線為初始邊界,紅色實線為最佳邊界).....	112
圖 3. 23 C 款電極	113
圖 3. 24 第一模態濾除之初始與最佳化電極邊界(藍色虛線為初始邊界,紅色實線為最佳邊界).....	113
圖 3. 25 D 款電極.....	114
圖 3. 26 第二模態濾除之初始與最佳化電極邊界(藍色虛線為初始邊界,紅色實線為最佳邊界).....	114
圖 3. 27 E 款電極.....	115
圖 3. 28 第三模態濾除之初始與最佳化電極邊界(藍色虛線為初始邊界,紅色實線為最佳邊界).....	115
圖 3. 29 第四模態濾除之初始與最佳化電極邊界(藍色虛線為初始邊界,紅色實線為最佳邊界).....	116
圖 3. 30 第五模態濾除之初始與最佳化電極邊界(藍色虛線為初始邊界,紅色實線為最佳邊界).....	116
圖 3. 31 第一二五模態濾除電極之示意圖	117
圖 3. 32 第一二五模態濾除之初始與最佳化電極邊界(藍色虛線為初始邊界,紅色實線為最佳邊界).....	117

圖 3.33 第三模態感測與濾除電極之示意圖	118
圖 3.34 第三模態感測與濾除之初始與最佳化電極邊界(藍色虛線為初始 邊界，紅色實線為最佳邊界).....	118
圖 3.35 第四模態感測與濾除電極之示意圖	119
圖 3.36 第四模態感測與濾除之初始與最佳化電極邊界(藍色虛線為初始 邊界，紅色實線為最佳邊界).....	119
圖 3.37 第五模態感測與濾除電極之示意圖	120
圖 3.38 第五模態感測與濾除之初始與最佳化電極邊界圖(藍色虛線為初 始邊界，紅色實線為最佳邊界).....	120



符號表

T	:	應力
S	:	應變
D	:	電位移
E	:	電場
c^E	:	定電場下的彈性係數
e	:	壓電係數
ε^S	:	定應變下的介電係數
u	:	質點位移
φ	:	電位
b	:	微體力
ρ	:	密度
L	:	線性運算子
$E,$:	
P	:	
D	:	
T	:	
B	:	
ω	:	自然頻率
S_σ	:	指定電荷邊界
S_φ	:	指定電位邊界



S_s : 金屬感測電極邊

S_T : 指定曳引力邊界

S_u : 指定位移邊界

n_i : 單位法方向

Y : 導納

$\hat{\mathbf{t}}$: 指定曳引力

$\hat{\mathbf{u}}$: 指定位移

$\hat{\sigma}_f$: 指定表面自由電荷密度

$\hat{\phi}$: 指定電位

\mathbf{U} : 位移場

ϕ : 電位場

I : 電流

V : 電壓

Q : 電荷量

α_0 : 設計變數

α_m :

β_n :

S_{S_1} : 部分感測電極

S_{S_2} :

S_{S_3} :



S_{S_4} :

R_f : 負回授電阻

K : 差動放大增益

g : 目標函數

$f(x)$: 電極形狀函數



第一章 緒論

1.1 前言

振動現象是機械結構系統常遭遇的問題之一。大部分結構系統都不希望有振動發生，振動會造成結構疲勞而破壞。因此如何消除或減少振動正是當前的課題。為解決此一問題，通常利用感測器擷取結構振動所產生的信號，並回授到致動器控制結構達到減震的效果。本文為利用壓電材料具有位移場與電場耦合之特性，設計二維模態感測器模態。感測器是利用電極形狀設計與利用信號後處理來感測所需感測模態的反應，濾除其餘模態的信號。相反地，也可以達到濾除某特定模態之信號，而達到濾波的效果。如果能夠對每一個模態振動作控制，對於抑制系統振動以及增進系統頻寬是非常重要的。而如何準確的完成感測某一模態或一組模態正是此篇論文的研究目的。



1.2 文獻回顧

壓電材料之應用範圍相當廣泛，其具有機械能與電磁能耦合的複雜特性，難以求得其解析解，在過去的文獻中，許多學者應用有限元素方法分析得到系統的模態特性，並且利用此模型設計出模態感測器及致動器，可應用於模態感測、控制及減振等方面。以下來回顧一些前人的研究成果。

在 1990 年，由 C.-K. Lee 和 F. C. Moon^[1]提出透過電極形狀之設計，來感測某一個特定的模態，直接利用二維平板的模態作為其系統的模態，並未考慮電極形狀及量測儀器的輸入阻抗對於系統模態的影響，因為電極形狀會影響系統模態，忽略電極形狀的影響會使得設計出來的模態感測器有所偏差。

1991 年，Robert L. Clark 等人^[2]考慮一維簡支樑，在不同位置貼上壓電致動器，以激發出各種不同的模態，但其實驗結果無法確實分離各種模態，有其他模態混

入情形發生，並且信號相差不到十倍。

1994 年，H. S. Tzou 和 H. Q. Fu^{[3][4]} 在壓電平板上鋪上長方形狀之電極，並探討各種狀況之電極情況對控制之影響，其中並無設計電極形狀之概念，單純以改變長方形電極之大小位置來討論，並得出對一完整覆蓋之電極，無法有效控制反對稱模態之振動行為。

1997 年，Chang-Qing Chen 和 Ya-Peng Shen^[5] 在物體上劃分許多長方形範圍區塊，並選擇性地在其上貼上壓電片，利用有限元素分析並推導得到各個壓電片之電荷感測式，利用信號後處理加權各個壓電片之輸出，選擇一組增益，使其輸出總合為一特定模態之信號。

1999 年，Dongchang Sun 和 Dajun Wang^[6] 在二維平板上分成許多區域貼上壓電片並鋪上電極，例如有 $M*N$ 個電極，則相對應就有 $M*N$ 條電荷感測式，可解出前 $M*N$ 個模態，並忽略 $M*N+1$ 之後高頻的模態，此方法利用信號後處理來達到感測目的，並非考慮電極形狀來達到目標。同年，M. I. Friswell^[7] 藉由設計電極形狀來達到感測一維簡支樑之模態，討論各種不同電極鋪設範圍，利用最佳化理論，得到感測特定模態之電極之形狀與壓電材料之極化方向，文中提出可在同一壓電片劃分出多個區域的電極分別感測不同模態。

2001 年，Hartono Sumali 和 Karsten Meissner 等^[8] 在一維樑上分成多個區域貼上鋪有電極的壓電片，推導出電荷量感測式。以信號後處理的方式，將各壓電片的輸出信號加權後加總輸出，選擇不同組增益，感測不同的模態，如

圖 1.1 所示。同年，Dongchang Sun 和 Liyong Tong^[9] 於二維平板上分成許多區域貼上數片壓電片，推導出壓電片電極的電荷感測式，透過最佳化方法尋求最理想的壓電片的尺寸及黏貼位置，將各電極信號加總以感測特定模態。同年，Dongchang Sun 和 Liyong Tong^[10] 接續文獻[9]之做法應用在薄殼結構上。

2008 年，Alberto Donoso 和 Jose´ Carlos Bellido^[11] 於薄圓板上覆蓋壓電材料，在軸對稱的邊界條件下，推導出電荷感測式，並利用最佳化理論，得

到最佳壓電材料之極化方向輪廓，來感測特定模態。

以上文獻皆未考慮壓電材料的質量和勁度效應對於結構模態之影響，直接以主結構之模態作為系統的模態，忽略壓電材料造成感測器效果與預期有所偏差。本論文所設計的壓電複合結構模態感測器，透過有限元素法分析出含有壓電層的結構模態，再藉此設計模態感測器，並不會因為覆蓋壓電材料後造成結構模態的改變而影響感測器的效果。

1.3 本文內容

本文主要目的是在設計模態感測器，並配合後續之訊號處理，來感測或濾除某特定模態。應用有限元素分析軟體 ANSYS，分析一壓電複合結構之模態，並透過數值分析軟體 MATLAB 執行電極形狀之最佳化。

本文之內容分為下列幾部分：

第二章為主要說明壓電材料之特性與其模態分析，並說明利用模態正交特性感測器只能應用在特殊限制下。並介紹電流模態感測器設計原理。

第三章是利用有限元素分析軟體 ANSYS 分析一壓電結構之共振頻率與其模態。並藉由數值分析軟體 MATLAB 求得最佳電極形狀，來感測或濾除特定模態。

第四章是以第三章的設計方式以及微機電製程製作模態感測器與濾波器。並呈現信號量測之結果。

第五章則是結論與建議。

第二章 模態感測器之設計

首先，我們由壓電材料本構方程式出發，再配合力平衡及電平衡方程式，得到一組振動模態，包含位移模態及電位模態。推導物體在滿足自然邊界條件下，其模態間必須滿足的正交特性，說明無法利用此正交特性來設計感測電極之形狀。並說明本文如何透過感測電極的鋪設來設計模態感測器。

2.1 壓電體之模態分析

壓電材料之本構方程式為

$$T_{ij} = c_{ijkl}^E S_{kl} - e_{kij} E_k \quad (2.1)$$

$$D_i = e_{ikl} S_{kl} + \varepsilon_{ij}^S E_j \quad (2.2)$$

其中 T_{ij} 為應力， S_{kl} 為應變， D_i 表示電位移函數， E_k 表示電場，而 c_{ijkl}^E 、 e_{kij} 、 ε_{ij}^S 分別表示物體的固定電場之彈性係數、壓電係數與固定應變之介電係數。

當物體變形量甚小時，我們可以把應變表示成線性應變，應變與位移 u_i 關係如下所示

$$S_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (2.3)$$

電場與電位 φ 關係為

$$E_k = -\varphi_{,k} \quad (2.4)$$

並且考慮物體的力平衡方程式如下

$$T_{ij,j} + b_i = \rho \ddot{u}_i \quad (2.5)$$

其中 b_i 為微體力， ρ 為密度，且考慮在相同頻率下，電磁波的波長較彈性波波長

大許多，可視為準靜態，則物體另外須滿足一靜電荷平衡方程式如下

$$D_{i,i} = 0 \quad (2.6)$$

將(2.1)、(2.2)帶入(2.5)及(2.6)式，並配合線性應變式(2.3)和電場與電位關係式(2.4)可得

$$c_{ijkl}^E u_{k,lj} + e_{kij} \varphi_{,kl} + b_i = \rho \ddot{u}_i \quad (2.7)$$

$$e_{ikl} u_{k,li} - \varepsilon_{ij}^S \varphi_{,ij} = 0 \quad (2.8)$$

定義線性運算子 $\mathbf{L}, \mathbf{E}, \mathbf{P}, \mathbf{D}$

$$\mathbf{L}\mathbf{u} = \frac{\partial}{\partial x_j} (c_{ijkl}^E u_{k,l}) \hat{\mathbf{e}}_i \quad (2.9)$$

$$\mathbf{E}\varphi = \frac{\partial}{\partial x_i} (e_{kil} \varphi_{,k}) \hat{\mathbf{e}}_i \quad (2.10)$$

$$\mathbf{P}\mathbf{u} = \frac{\partial}{\partial x_i} (e_{ikl} u_{k,l}) \quad (2.11)$$

$$\mathbf{D}\varphi = -\frac{\partial}{\partial x_j} (\varepsilon_{ij}^S \varphi_{,i}) \quad (2.12)$$

利用(2.9)至(2.12)可以將(2.7)、(2.8)式表示成

$$\begin{bmatrix} \mathbf{L} & \mathbf{E} \\ \mathbf{P} & \mathbf{D} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u} \\ \varphi \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} -\rho \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{u}} \\ \ddot{\varphi} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \mathbf{b} \\ 0 \end{Bmatrix} = \mathbf{0} \quad (2.13)$$

即為

$$\mathbf{A} \begin{Bmatrix} \mathbf{u} \\ \varphi \end{Bmatrix} + \mathbf{M} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{u}} \\ \ddot{\varphi} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \mathbf{b} \\ 0 \end{Bmatrix} = \mathbf{0} \quad (2.14)$$

其中 \mathbf{M} 和線性運算子 \mathbf{A} 定義為

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} -\rho \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{L} & \mathbf{E} \\ \mathbf{P} & \mathbf{D} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

物體運動行為須滿足(2.14)式。

2.2 壓電系統之邊界條件

系統的邊界可由指定電荷邊界 S_σ 、指定電位邊界 S_ϕ 和金屬感測電極邊界 S_s 所組成

$$S = S_\sigma \cup S_\phi \cup S_s \quad (2.17)$$

亦可分為指定曳引力邊界 S_T 和指定位移邊界 S_u ，表示如下

$$S = S_T \cup S_u \quad (2.18)$$

定義線性運算子 **T** 和 **B**

$$\mathbf{T}(\mathbf{u}, \varphi) = (c_{ijkl}^E u_{l,k} + e_{kij} \varphi_{,k}) n_j \mathbf{e}_i \quad (2.19)$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{u}, \varphi) = (e_{ikl} u_{k,l} - \varepsilon_{ij}^S \varphi_{,j}) n_i \quad (2.20)$$

其中 n_i 為表面單位法方向。位移和電位須滿足邊界條件

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{B}(\mathbf{u}, \varphi) = \hat{\sigma}_f \text{ on } S_\sigma \\ \varphi = \hat{\phi} \text{ on } S_\phi \\ \frac{d}{dt} \int_{S_s} \mathbf{B}(\mathbf{u}, \varphi) dS = YV \text{ and } \varphi = \varphi(t) \text{ on } S_s \end{array} \right. \quad (2.21)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{T}(\mathbf{u}, \varphi) = \hat{\mathbf{t}} \text{ on } S_T \\ \mathbf{u} = \hat{\mathbf{u}} \text{ on } S_u \end{array} \right. \quad (2.22)$$

其中 V 為感測電極之電壓， Y 為量測儀器的輸入導納，而 $\hat{\mathbf{t}}, \hat{\mathbf{u}}, \hat{\sigma}_f$ 和 $\hat{\phi}$ 分別為指定曳引力，指定位移，指定表面自由電荷密度與指定電位。使用導納無窮大的量測儀器來測量感測電極之電流信號 YV ，反之使用導納趨近於零的量測儀器來測量感測電極之電壓信號 V 。

對應於(2.14)式之特徵值問題為

$$\mathbf{A}\Phi - \omega^2\mathbf{M}\Phi = 0 \quad (2.23)$$

其中 ω 為自然頻率，特徵函數 Φ 為位移場 \mathbf{U} 與電位場 ϕ 所組成，表示如下：

$$\Phi = \begin{Bmatrix} \mathbf{U} \\ \phi \end{Bmatrix} \quad (2.24)$$

若量測儀器之導納趨近於零，則相應的邊界條件為：

$$\begin{cases} \mathbf{B}(\mathbf{U}, \phi) = 0 & \text{on } S_\sigma \\ \phi = 0 & \text{on } S_\phi \\ i\omega \int_{S_s} \mathbf{B}(\mathbf{U}, \phi) dS = 0 \text{ and } \phi = \text{const.} & \text{on } S_s \end{cases} \quad (2.25)$$

$$\begin{cases} \mathbf{T}(\mathbf{U}, \phi) = \mathbf{0} & \text{on } S_T \\ \mathbf{U} = \mathbf{0} & \text{on } S_u \end{cases} \quad (2.26)$$

若量測儀器之導納趨近於無窮大，則相應的邊界條件為：

$$\begin{cases} \mathbf{B}(\mathbf{U}, \phi) = 0 & \text{on } S_\sigma \\ \phi = 0 & \text{on } S_\phi \\ \phi = 0 & \text{on } S_s \end{cases} \quad (2.27)$$

$$\begin{cases} \mathbf{T}(\mathbf{U}, \phi) = \mathbf{0} & \text{on } S_T \\ \mathbf{U} = \mathbf{0} & \text{on } S_u \end{cases} \quad (2.28)$$

由式(2.25)、(2.26)與(2.27)、(2.28)呈現出量測電壓或電流信號，使用不同的量測儀器其輸入阻抗將改變系統的邊界條件，系統的模態也會不同。

令二特徵函數

$$\mathbf{f} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F} \\ \eta \end{Bmatrix} \quad (2.29)$$

$$\mathbf{g} = \begin{Bmatrix} \mathbf{G} \\ \zeta \end{Bmatrix} \quad (2.30)$$

基於材料對稱性：

$$c_{ijkl}^E = c_{jikl}^E = c_{klij}^E = c_{klji}^E \quad (2.31)$$

$$e_{kij} = e_{kji} \quad (2.32)$$

$$\varepsilon_{ij}^S = \varepsilon_{ji}^S \quad (2.33)$$

可推導出下列關係式(附錄 A)

$$\int_D (\mathbf{f} \cdot \mathbf{A}\mathbf{g} - \mathbf{g} \cdot \mathbf{A}\mathbf{f}) d\mathbf{x} = \int_{S_r+S_u} [\mathbf{F} \cdot \mathbf{T}(\mathbf{G}, \zeta) - \mathbf{G} \cdot \mathbf{T}(\mathbf{F}, \eta)] dS + \int_{S_\sigma+S_\phi+S_\zeta} [\eta \mathbf{B}(\mathbf{G}, \zeta) - \zeta \mathbf{B}(\mathbf{F}, \eta)] dS \quad (2.34)$$

將兩種不同系統的邊界條件式(2.25)、(2.26)或(2.27)、(2.28)分別代入上式，等號右邊皆為零，這意味這兩個不同的系統皆為自伴隨系統(self-adjoint system)，且可推導出特徵函數 Φ_r 具有正交性質(附錄 B)：

$$\int_D \Phi_r \cdot \mathbf{M} \Phi_s d\mathbf{x} = \delta_{rs} M_r \quad (2.35)$$

$$\int_D \Phi_r \cdot \mathbf{A} \Phi_s d\mathbf{x} = -\delta_{rs} M_r \omega_r^2 \quad (2.36)$$

其中 ω_r 和 M_r 分別為第 r 個模態之自然頻率和模態質量(modal mass)。由(2.35)和(2.36)式可知壓電複合結構各模態間的正交性質為對全區域做體積分而成立。因為輸出的信號來源為感測電極所收集到的自由電荷，是對部分表面做面積分，正交性質無法應用於電極形狀之設計。因此理論上無法利用正交特性來設計形狀模態感測器。

2.3 模態感測之設計

壓電體之運動可利用其模態做為基底函數來疊加表示如下

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{u} \\ \varphi \end{Bmatrix} = \sum_r q_r(t) \Phi_r(\mathbf{x}) \quad (2.37)$$

壓電體的變形將產生電信號，可利用量測儀器測得。使用低輸入阻抗儀器來量測感測電極上的電流信號，電流為感測電極收集到的總自由電荷對時間的導數，電流感測式表示如下

$$I(t) = \frac{d}{dt} \int_{S_s} \mathbf{B}(\mathbf{u}, \varphi) dS \quad (2.38)$$

將(2.37)代入(2.38)式可得

$$I(t) = \sum_r \dot{q}_r(t) \int_{S_s} \mathbf{B}(\mathbf{U}_r, \phi_r) dS \quad (2.39)$$

使用高輸入阻抗儀器來量測感測電極之電壓信號，電壓感測式表示如下：

$$V(t) = \frac{1}{Y} \frac{d}{dt} \int_{S_s} \mathbf{B}(\mathbf{u}, \varphi) dS \quad (2.40)$$

將(2.37)代入(2.40)式可得

$$V(t) = \frac{1}{Y} \sum_r \dot{q}_r(t) \int_{S_s} \mathbf{B}(\mathbf{U}_r, \phi_r) dS \quad (2.41)$$

(2.39)與(2.41)提供了形狀模態濾波器的設計方向，無論是量電流或量電壓信號，只要設計一個電極形狀使收集到第 n 個模態之電荷量為零，即為

$$\int_{S_s} \mathbf{B}(\mathbf{U}_n, \phi_n) dS = 0 \quad (2.42)$$

則第 n 個模態之信號被濾除。量測得的信號為除第 n 個模態之外所有模態信號之和，使用儀器量測得的電流信號

$$I(t) = \sum_k \dot{q}_k(t) \int_{S_s} \mathbf{B}(\mathbf{U}_k, \phi_k) dS, \quad n \notin k \quad (2.43)$$

而電壓信號為

$$V(t) = \frac{1}{Y} \sum_k \dot{q}_k(t) \int_{S_s} \mathbf{B}(\mathbf{U}_k, \phi_k) dS, \quad n \notin k \quad (2.44)$$

即可達成濾波器之設計。若設計第 m 個模態感測器，即只感測第 m 個模態信號，則設計一個電極形狀使得其餘模態的電荷量為零，即

$$\int_{S_s} \mathbf{B}(\mathbf{U}_p, \phi_p) dS = 0, \quad \forall p \neq m \quad (2.45)$$

來完成感測器之設計。量測得的信號僅有第 m 個模態信號，使用儀器量測得的電流信號

$$I(t) = \dot{q}_m(t) \int_{S_s} \mathbf{B}(\mathbf{U}_m, \phi_m) dS \quad (2.46)$$

而電壓信號為

$$V(t) = \frac{1}{Y} \dot{q}_m(t) \int_{S_s} \mathbf{B}(\mathbf{U}_m, \phi_m) dS \quad (2.47)$$

由(2.45)式知，要濾除第 m 個模態以外的所有模態信號是難以達成的。但實際上，振動信號其頻率是有範圍的，感測一模態只須考慮濾除在一定範圍內其餘的模態。所以利用此方法來設計模態感測器是可行的。

使用電壓信號量測之模態感測器，量測感測電極輸出的電壓值，量測儀器的輸入阻抗為無限大。在決定好電極形狀後，每個部分電極分別設等電位，並設定系統的其餘邊界條件後，求取該系統的模態解。模態解對應在感測電極上的電壓值即為該模態相對的信號大小。如果恰好所要感測的模態有信號外，其餘模態的信號為零，則此電極形狀即為想要的模態感測器設計。但是一般情況並不會如此恰好，假使其餘模態有信號，就須要再改變電極形狀，但一旦改變之後，系統的模態就會因為邊界條件改變而改變。那就必須再重新分析新系統的模態解，經過迭代後，直到除了須要感測的模態有信號外，其餘模態沒有信號就可得到正確的模態感測器。因為須要透過不斷的迭代來修正電極形狀，所以這並不是一個很好的方法。

本論文使用電流信號量測之模態感測器，即量測感測電極輸出的電流值，當量測儀器輸入阻抗為零時，這個系統的感測電極邊界條件為電壓邊界條件 $\phi=0$ 。採用朱家輝(2002)^[12]提出的方式，如圖 2.1 表面佈滿電極的設計，假設中間切割線之線寬很小，其影響可忽略不計。利用設計切割線的方式，可以將電極分成多個部分，每個部分分別量測不同的信號。由於電性邊界條件並不因為分隔線設計感測電極形狀而有所改變，所以系統的模態並不會因為設計感測電極形狀而和原先所分析的系統模態有所不同。設計的流程就變成先分析全部鋪滿電極且電極電位為零的系統模態解，再來設計感測電極的形狀。使用電壓信號量測並不能採用切割線方式設計，因為切開來的電極分別為等電位與全電極為等電位的邊界條件有所不同，系統模態就會改變。

第三章 實例分析與討論

為設計電流模態感測器，使用有限元素套裝軟體 ANSYS，來模擬一壓電複合結構的振動位移模態，以及電位移模態用來計算各個模態之電荷量。另一方面，利用有限元素分析的結果，透過數值分析軟體 MATLAB 來執行電極形狀最佳化的數值問題，藉此得到最佳的感測電極形狀。

但是 ANSYS SOLID 5 元素無法輸出電流信號，只能給每個節點的電位移值，另外利用高斯數值積分法計算總電荷量。

3.1 有限元素分析

考慮一壓電複合結構為一塊長 120mm 寬 30mm 厚 2mm 之鋁板上黏貼一片長度 $L = 46\text{mm}$ 寬度 $w = 30\text{mm}$ 厚度 $t = 511\mu\text{m}$ 之壓電片，如圖 2.1 所示，座標設定 x - y 平面為鋁板與壓電片之介面而 z 軸指向上。壓電片長度範圍為 $x = 0$ 到 $x = 46\text{mm}$ ，鋁板固定端與壓電片間隔 2mm 。由於此問題不易求得解析解，因此將利用有限元素分析軟體 ANSYS，得到節點相對應之數值解。模擬所使用的元素為 SOLID 5，此元素具分析 3D 行為並有彈力、電磁力和溫度的耦合特性，可以用來分析壓電複合結構的振動行為。

鋁板左端 ($x = -2\text{mm}$) 為固定端，設定左端的 x 、 y 、 z 三個方向之位移皆為零。鋁板電位設為零。假設在壓電板上表面所鍍的金屬電極很薄，忽略其力學效應。本文所設計的為電流模態感測器，因此壓電片上面的電性邊界條件設電位為零。壓電材料為 PZT-FT3，鋁板為鋁合金 6061 材質，材料常數見附錄 C。鋁合金之壓電耦合係數設為零，相對介電係數設為 10^9 。鋁板和壓電片皆使用 SOLID 5 元素來分析。壓電片之元素長寬高為 $0.5\text{mm} \times 0.5\text{mm} \times 0.255\text{mm}$ ，鋁板之元素長寬高為 $0.5\text{mm} \times 0.5\text{mm} \times 0.4\text{mm}$ ，共有 83040 個元素。

感測電極收集到第 r 個模態之電荷量 Q_r 表示如下

$$Q_r = \int_{S_s} \mathbf{B}(\mathbf{U}_r, \phi_r) dS = \int_{S_s} (D_3)_r dS \quad (3.1)$$

其中 $(D_3)_r$ 代表第 r 個模態相應於壓電片上表面電位移之 z 分量，(3.1) 式稱為電荷感測式，此積分式利用高斯求積式做計算。每個模態正規化於單位模態質量。

分析求解前五模態。第一、二、五模態其位移場對稱於 x - z 平面，第三、四模態之位移場為反對稱情形，如圖 3.2 至圖 3.6，電位移之 z 分量如圖 3.7 至圖 3.11 所示，表 3.1 列出結構之前五個自然頻率值。

3.2 單功用感測電極與分析結果

本文所設計的模態感測與模態濾除器，方法建立於感測電極所收集到某些模態的表面自由電荷量為零，利用最佳化方法來設計此電極的幾何形狀。目的為改變壓電片上感測電極 S_s 的形狀，如圖 3.12，來達到感測或濾除某一振動模態，所以可以選擇一組基底函數，來組合表示出電極形狀邊界函數 $f(x)$ ，如下所示

$$f(x) = \alpha_0 + \sum_{m=1}^2 \alpha_m \cos \frac{2m\pi x}{L} + \sum_{n=1}^2 \beta_n \sin \frac{2n\pi x}{L} \quad (3.2)$$

其中 α_0, α_m 和 β_n 為設計變數。

利用最佳化方法尋找在滿足限制條件下使目標函數有極小值之最佳設計變數 α_0, α_m 和 β_n ，並且得到最佳感測或濾除之電極形狀。執行最佳化的數值問題前須定義所要執行的目標函數與限制條件。設計感測特定模態電極時，目標函數式可定義如下

$$g = \frac{\sum_i Q_i}{Q_p} \quad (3.3)$$

其中 p 代表該特定模態， i 為其它模態，且限定感測特定模態之電荷量如下

$$Q_p \geq 50 \quad (3.4)$$

若設計濾除特定模態電極，目標函數可直接將(3.3)式取倒數表示如下

$$g = \frac{Q_p}{\sum_i Q_i} \quad (3.5)$$

欲濾除的特定模態之電荷量限制條件為

$$Q_p \leq 50 \quad (3.6)$$

為了分別感測或濾除這五個模態之信號，藉由電極形狀的規劃與信號後處理，設計了五款不同的電極來因應各需求。

3.2.1 第一模態感測

第一模態在壓電片上面之 z 方向電位移分佈如圖 3.2 所示，對稱於 x-z 平面且全為同號。為了達成第一模態感測器之設計，必須同時濾除掉其餘四個模態的信號，較為困難。這裡使用 A 款電極來設計第一模態感測電極，A 款電極是由對稱於 x-z 平面的兩條曲線 $f(x)$ 和 $-f(x)$ 將電極劃分成三個部分電極 S_{S_1} ， S_{S_2} 及 S_{S_3} ，如圖 3.13 所示，利用信號後處理將感測電極 S_{S_1} 與 S_{S_3} 收集到的信號減去感測電極 S_{S_2} 收集到的信號得到想要的信號。

由於本文採用的是電流信號模態感測器，必須使用零阻抗的信號量測電路來量測電流信號，可以利用 OP 的負回授電路設計，來使得輸入端的電位維持在零電位，這在 OP 電路設計中稱作虛擬接地(virtual ground)。由於是電流信號，為了之後做處理方便，要轉成高阻抗的電壓信號，需要一個稱做跨阻抗放大器 (transimpedance amplifier) 的電路，這個電路的標準型式如圖 3.14。輸出的電壓信號 $V(t)$ 與電流 $i(t)$ 關係式為

$$V(t) = -R_f i(t) \quad (3.7)$$

其中 R_f 稱為負回授電阻。利用電線連接感測電極 S_{S_1} 與 S_{S_3} 並接到跨阻抗放大器將其電流信號 i_a 轉換成電壓信號 V_a ，而感測電極 S_{S_2} 直接接到另一個跨阻抗放大器

將其電流信號 i_b 轉換成電壓信號 V_b ，再利用差動放大器將兩電壓信號 V_a 和 V_b 做相減，如圖 3.15 所示，最後輸出的電壓信號 V_o 為

$$V_o = A_a V_a + A_b V_b \quad (3.8)$$

其中 $A_a = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4}\right)$ ， $A_b = \left(-\frac{R_2}{R_1}\right)$ 。

當 $R_1 = R_3 = R$ 且 $R_2 = R_4 = KR$ ，則(3.8)式寫成

$$V_o = K(V_b - V_a) \quad (3.9)$$

利用(3.7)式可將(3.9)式整理得

$$V_o = KR_f(i_a - i_b) \quad (3.10)$$

K 稱為差動放大增益，最後輸出電壓信號為感測電極 S_{S_1} 與 S_{S_3} 的電流值減去感測電極 S_{S_2} 的電流值再乘上增益 KR_f ，此電路一般稱為平衡差動放大器

$$(|A_a| = |A_b| = K)。$$

由於感測電極形狀為對稱，將消除反對稱模態所貢獻之電荷量，可利用於對稱模態之感測設計，以簡化問題。電荷感測式(3.1)可表示如下

$$Q_r = \left| \int_{S_{S_1}} (D_3)_r dS - \int_{S_{S_2}} (D_3)_r dS + \int_{S_{S_3}} (D_3)_r dS \right| \quad (3.11)$$

即

$$Q_r = \left| \int_0^L \int_{|f(x)|}^{\frac{w}{2}} (D_3)_r dy dx - \int_0^L \int_{-|f(x)|}^{|f(x)|} (D_3)_r dy dx + \int_0^L \int_{-\frac{w}{2}}^{-|f(x)|} (D_3)_r dy dx \right| \quad (3.12)$$

為確保電極形狀邊界不過於靠近壓電片邊緣造成斷路，限制曲線 $f(x)$ 與壓電片邊緣至少有 1mm 以上的距離，每款電極均有形狀限制條件如下

$$-14 \leq f(x) \leq 14 \quad (3.13)$$

實作時量測用的信號線將從壓電片左端接出，如圖 3.16，為避免感測電極 S_{s_2} 接線處過窄，限制接線處之寬度大於等於 10mm ，加入電極形狀限制條件如下

$$|f(0)| \geq 5 \quad (3.14)$$

由於對稱電極將消除反對稱模態之電荷量，只要再規劃出電極形狀來濾掉第二與第五模態的電荷量，即可完成第一模態感測器的設計。第一模態感測 ($p=1, i \in (2,5)$) 之目標函數可由(3.3)式簡化為

$$g = \frac{Q_2 + Q_5}{Q_1} \quad (3.15)$$

配合數值分析軟體 Matlab 使用拉格郎治-牛頓法(Lagrange-Newton method)來執行最佳化，求解在滿足電極形狀限制條件(3.13)和(3.14)式以及電荷量限制條件

$Q_1 \geq 50$ 式下，目標函數(3.15)式有極小值時之最佳化結果如表 3.2，初始設計變數為任意設定。由結果知，若不考慮更高頻模態的貢獻，第二、五模態相對第一模態電荷量約差五十萬倍以上，所以將只感測到第一模態。其最佳電極形狀如圖 3.17。

3.2.2 第二模態感測

第二模態在壓電片上面之 z 方向電位移對稱於 $x-z$ 平面，其分佈如圖 3.8 所示。採用 A 款電極來設計第二模態感測電極。由於對稱電極將消除反對稱模態之電荷量，所以第二模態感測 ($p=2, i \in (1,5)$) 之目標函數為以下所表示

$$g = \frac{Q_1 + Q_5}{Q_2} \quad (3.16)$$

問題簡化成利用 C 款電極設計，濾除第一與第五模態之信號即可。求解在滿足電極形狀限制條件(3.13)和(3.14)式以及電荷量限制條件 $Q_2 \geq 50$ 式下，目標函數(3.16)

式有極小值時之最佳化結果如表 3.3。其最佳電極形狀如圖 3.18。

3.2.3 第三模態感測

第三模態在壓電片上面之 z 方向的電位移值反對稱於 x-z 平面，如圖 3.9 所示。利用 B 款電極來設計第三模態感測電極，B 款電極是由對稱於 x-z 平面的兩條曲線 $f(x)$ 和 $-f(x)$ 與直線 $y=0$ 將電極劃分成四個部分電極，皆為感測電極，如圖 3.19 所示，信號為感測電極 S_{S_1} 與 S_{S_3} 所收集到的信號減去感測電極 S_{S_2} 與 S_{S_4} 所收集到的信號。B 款電極為反對稱電極，將消除對稱模態所貢獻之電荷量，可利用於反對稱模態之感測設計，以簡化問題。

可將電荷感測式(3.1)改寫成

$$Q_r = \left| \int_{S_{S_1}} (D_3)_r dS - \int_{S_{S_2}} (D_3)_r dS + \int_{S_{S_3}} (D_3)_r dS - \int_{S_{S_4}} (D_3)_r dS \right| \quad (3.17)$$

即為

$$Q_r = \left| \int_0^L \int_{|f(x)|}^{\frac{w}{2}} (D_3)_r dy dx - \int_0^L \int_0^{|f(x)|} (D_3)_r dy dx + \int_0^L \int_{-|f(x)|}^0 (D_3)_r dy dx - \int_0^L \int_{-\frac{w}{2}}^{-|f(x)|} (D_3)_r dy dx \right| \quad (3.18)$$

為避免感測電極 S_{S_2} 與 S_{S_3} 信號線接線處過窄，限制接線處之寬度大於 5mm，加入電極形狀限制條件

$$|f(0)| \geq 5 \quad (3.19)$$

反對稱電極將消除對稱模態之電荷量，第三模態感測($p=3, i=4$)之目標函數可表示為

$$g = \frac{Q_4}{Q_3} \quad (3.20)$$

利用 E 款電極設計反對稱模態感測器可大為簡化問題，只須再規劃出電極形狀濾除另一個反對稱模態信號即可。求解在滿足電極形狀限制條件(3.13)和(3.19)式以

及電荷量限制條件 $Q_3 \geq 50$ 式下，目標函數(3.20)式有極小值時之最佳化結果如表

3.4。其最佳電極形狀如圖 3.20。

3.2.4 第四模態感測

第四模態其在壓電片上層之 z 方向電位移反對稱於 $x-z$ 平面，其分佈如圖 3.10 所示。採用 B 款電極來設計第四模態感測電極。由於反對稱電極將消除對稱模態之電荷量，所以第四模態感測($p=4, i=3$)之目標函數可表示為

$$g = \frac{Q_3}{Q_4} \quad (3.21)$$

利用 E 款的設計，尋找出一電極形狀濾除第四個模態信號即可。求解在滿足電極形狀限制條件(3.13)、(3.19)式以及電荷量限制條件 $Q_4 \geq 50$ 式下，目標函數式(3.21)有極小值時之最佳化結果如表 3.5。其最佳電極形狀如圖 3.21。

3.2.5 第五模態感測

第五模態其在壓電片上層之 z 方向電位移對稱於 $x-z$ 平面，其分佈如圖 3.11 所示。採用 A 款電極來設計第五模態感測電極。由於對稱電極將消除反對稱模態之電荷量，所以第五模態感測($p=5, i \in (1,2)$)之目標函數可表示為

$$g = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_5} \quad (3.22)$$

求解在滿足電極形狀限制條件(3.13)和(3.14)式以及電荷量限制條件 $Q_5 \geq 50$ 式下，目標函數(3.22)式有極小值時之最佳化結果如表 3.6。其最佳電極形狀如圖 3.22。

3.2.6 第一模態濾除

由於第一模態的電位移值全為同號，無法單用電極形狀的設計來將其信號濾除，必須藉由信號後處理來將第一模態信號濾除($p=1, i \in (2,3,4,5)$)，使用 C 款電極來設計最佳電極，C 款電極利用曲線 $f(x)$ 將電極劃分成上下兩部分電極，如圖

3.23 所示，上下方電極為非對稱形狀之感測電極。利用信號後處理將感測電極 S_{S_1} 收集到的信號與感測電極 S_{S_2} 收集到的信號做相減而得到想要的信號。而其電荷感測式(3.1)改寫如下

$$Q_r = \left| \int_{S_{S_1}} (D_3)_r dS - \int_{S_{S_2}} (D_3)_r dS \right| \quad (3.23)$$

即為

$$Q_r = \left| \int_0^L \int_{f(x)}^{\frac{w}{2}} (D_3)_r dy dx - \int_0^L \int_{-\frac{w}{2}}^{f(x)} (D_3)_r dy dx \right| \quad (3.24)$$

目標函數表示如下

$$g = \frac{Q_1}{Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5} \quad (3.25)$$

求解在滿足電極形狀限制條件(3.13)式以及電荷量限制條件 $Q_1 \leq 50$ 式下，目標函數(3.25)式有極小值時之最佳化結果如表 3.7。由結果知，第一模態的電荷量相較於其餘四個模態皆小於千萬倍以上，所以將只感測到其餘四個模態，不感測第一模態。其最佳電極形狀如圖 3.24。

3.2.7 第二模態濾除

第二模態濾除 ($p=2, i \in (1,3,4,5)$) 採用 D 款電極來設計最佳電極，D 款電極利用一條曲線 $f(x)$ 將壓電片上電極劃分成上下兩部分，如圖 3.25 所示，上方電極為感測電極 S_S 。可將電荷感測式(3.1)改寫如下

$$Q_r = \left| \int_0^L \int_{f(x)}^{\frac{w}{2}} (D_3)_r dy dx \right| \quad (3.26)$$

目標函數表示如下

$$g = \frac{Q_2}{Q_1 + Q_3 + Q_4 + Q_5} \quad (3.27)$$

求解在滿足電極形狀限制條件(3.13)式以及電荷量限制條件 $Q_2 \leq 50$ 式下，目標函數(3.27)式有極小值時之最佳化結果如表 3.8。其最佳電極形狀如圖 3.26。

3.2.8 第三模態濾除

第三模態濾除($p=3, i \in (1,2,4,5)$)採用 E 款電極來設計最佳電極，E 款電極是由對稱於 x-z 平面的兩條曲線 $f(x)$ 和 $-f(x)$ 與直線 $y=0$ 將電極劃分成四個部分，其中三塊為感測電極，如圖 3.27 所示。信號為感測電極 S_{S_1} 與 S_{S_3} 所收集到的信號再減去感測電極 S_{S_2} 所收集到的信號。將電荷感測式(3.1)表示如下

$$Q_r = \left| \int_{S_{S_1}} (D_3)_r dS - \int_{S_{S_2}} (D_3)_r dS + \int_{S_{S_3}} (D_3)_r dS \right| \quad (3.28)$$

即為

$$Q_r = \left| \int_0^L \int_{|f(x)|}^{\frac{w}{2}} (D_3)_r dy dx - \int_0^L \int_0^{|f(x)|} (D_3)_r dy dx + \int_0^L \int_{-|f(x)|}^0 (D_3)_r dy dx + \right| \quad (3.29)$$

為避免感測電極 S_{S_2} 與 S_{S_3} 信號線接線處過窄，限制接線處之寬度大於等於 5mm，

加入電極形狀限制條件

$$|f(0)| \geq 5 \quad (3.30)$$

目標函數表示如下

$$g = \frac{Q_3}{Q_1 + Q_2 + Q_4 + Q_5} \quad (3.31)$$

求解在滿足電極形狀限制條件(3.13)和(3.30)式以及電荷量限制條件 $Q_3 \leq 50$ 式下，目標函數(3.31)式有極小值時之最佳化結果如表 3.9。其最佳電極形狀如圖 3.28。

3.2.9 第四模態濾除

第四模態濾除($p=4, i \in (1,2,3,5)$)採用 E 款電極，目標函數表示如下

$$g = \frac{Q_4}{Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_5} \quad (3.32)$$

求解在滿足電極形狀限制條件(3.13)和(3.30)式以及電荷量限制條件 $Q_4 \leq 50$ 式下，目標函數(3.32)式有極小值時之最佳化結果如表 3.10。其最佳電極形狀如圖 3.29。

3.2.10 第五模態濾除

第五模態($p=5, i \in (1,2,3,4)$)採用 D 款電極來濾除，目標函數表示如下

$$g = \frac{Q_5}{Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4} \quad (3.33)$$

求解在滿足電極形狀限制條件(3.13)式以及電荷量限制條件 $Q_5 \leq 50$ 式下，目標函數(3.33)式有極小值時之最佳化結果如表 3.11。其最佳電極形狀如圖 3.30。

3.3 多功能感測電極與分析結果

上一節所呈現的是單一功用的感測電極，僅能感測或濾除某個特定模態的信號。這本節中透過四個實例來介紹如何設計多功用的電極，在壓電片上電極切割出多個部分電極，分別濾除某一模態之信號，或藉由信號後處理將這些電極所收集到的信號作不同運算，來達到設計一片壓電片可作為某個模態之感測器或為該模態之濾除器。

3.3.1 第一、二和五模態濾除

利用曲線 $f(x)$ 將壓電片上電極切割成上下兩個部份感測電極，設計電極 S_{s_1} 來濾除第二模態而電極 S_{s_2} 來濾除第五模態，而利用信號後處理將電極 S_{s_1} 和 S_{s_2} 信號

相減來濾除第一模態之信號，如圖 3.31 所示。感測電極 S_{S_1} 所收集到的電荷量 $Q_r^{S_{S_1}}$

$$Q_r^{S_{S_1}} = \left| \int_{S_{S_1}} (D_3)_r dS \right| = \left| \int_0^L \int_{f(x)}^{\frac{w}{2}} (D_3)_r dy dx \right| \quad (3.34)$$

感測電極 S_{S_2} 收集到的電荷量 $Q_r^{S_{S_2}}$ 為

$$Q_r^{S_{S_2}} = \left| \int_{S_{S_2}} (D_3)_r dS \right| = \left| \int_0^L \int_{-\frac{w}{2}}^{f(x)} (D_3)_r dy dx \right| \quad (3.35)$$

感測電極 S_S 所收集到的電荷量 $Q_r^{S_S}$ 為電極 S_{S_1} 和 S_{S_2} 電荷相減之絕對值，表示如下

$$Q_r^{S_S} = \left| \int_{S_{S_1}} (D_3)_r dS - \int_{S_{S_2}} (D_3)_r dS \right| \quad (3.36)$$

即為

$$Q_r^{S_S} = \left| \int_0^L \int_{f(x)}^{\frac{w}{2}} (D_3)_r dy dx - \int_0^L \int_{-\frac{w}{2}}^{f(x)} (D_3)_r dy dx \right| \quad (3.37)$$

定義三個目標函數如下所示

$$g_r^2 = \frac{Q_2^{S_{S_1}}}{Q_1^{S_{S_1}} + Q_3^{S_{S_1}} + Q_4^{S_{S_1}} + Q_5^{S_{S_1}}} \quad (3.38)$$

$$g_r^5 = \frac{Q_5^{S_{S_2}}}{Q_1^{S_{S_2}} + Q_2^{S_{S_2}} + Q_3^{S_{S_2}} + Q_4^{S_{S_2}}} \quad (3.39)$$

$$g_r^1 = \frac{Q_1^{S_S}}{Q_2^{S_S} + Q_3^{S_S} + Q_4^{S_S} + Q_5^{S_S}} \quad (3.40)$$

其中 g_r^2 代表濾除第二模態的目標函數， g_r^5 為濾除第五模態的目標函數， g_r^1 為濾除第一模態的目標函數。電荷量限制條件為

$$Q_2^{S_{S_1}} \leq 50 \quad (3.41)$$

$$Q_5^{S_{S_2}} \leq 50 \quad (3.42)$$

$$Q_1^{S_S} \leq 50 \quad (3.43)$$

在滿足電極形狀限制條件(3.13)式和電荷量限制條件(3.41)至(3.43)式之下，求解目標函數(3.38)至(3.40)式有極小值時之最佳設計變數 α_0, α_m 和 β_m 值，並且得到最佳感測電極之形狀。最佳化結果如表 3.12。其最佳電極形狀如圖 3.32。僅透過一條切割線就設計出濾除第一、二、五模態的電極形狀。

3.3.2 第三模態感測與濾除

透過分隔線 $f(x)$ 、 $-f(x)$ 和 $y=0$ 將上電極切割成四個部分，如圖 3.33 所示。

電極 S_{S_1} 與 S_{S_3} 所收集到的信號再減去電極 S_{S_2} 與 S_{S_4} 所收集到的信號，利用這樣的組合電極 S_{S_S} 來感測第三模態。而電極 S_{S_1} 與 S_{S_3} 所收集到的信號再減去感測電極 S_{S_2} 所收集到的信號，利用這樣的組合電極 S_{S_r} 來濾除第三模態之信號。電極 S_{S_S} 所收集到的電荷量 $Q_r^{S_{S_S}}$

$$Q_r^{S_{S_S}} = \left| \int_{S_{S_1}} (D_3)_r dS - \int_{S_{S_2}} (D_3)_r dS + \int_{S_{S_3}} (D_3)_r dS - \int_{S_{S_4}} (D_3)_r dS \right| \quad (3.44)$$

即為

$$Q_r^{S_{S_S}} = \left| \int_0^L \int_{|f(x)|}^{\frac{w}{2}} (D_3)_r dy dx - \int_0^L \int_0^{|f(x)|} (D_3)_r dy dx + \int_0^L \int_{-|f(x)|}^0 (D_3)_r dy dx - \int_0^L \int_{-\frac{w}{2}}^{-|f(x)|} (D_3)_r dy dx \right| \quad (3.45)$$

電極 S_{S_r} 收集到的電荷量 $Q_r^{S_{S_r}}$ 為

$$Q_r^{S_{S_r}} = \left| \int_{S_{S_1}} (D_3)_r dS - \int_{S_{S_2}} (D_3)_r dS + \int_{S_{S_3}} (D_3)_r dS \right| \quad (3.46)$$

即為

$$Q_r^{S_{S_r}} = \left| \int_0^L \int_{|f(x)|}^w (D_3)_r dy dx - \int_0^L \int_0^{|f(x)|} (D_3)_r dy dx + \int_0^L \int_{-|f(x)|}^0 (D_3)_r dy dx \right| \quad (3.47)$$

定義兩個目標函數如下所示

$$g_s^3 = \frac{Q_4^{S_{S_s}}}{Q_3^{S_{S_s}}} \quad (3.48)$$

$$g_r^3 = \frac{Q_3^{S_{S_r}}}{Q_1^{S_{S_r}} + Q_2^{S_{S_r}} + Q_4^{S_{S_r}} + Q_5^{S_{S_r}}} \quad (3.49)$$

其中 g_s^3 代表感測第三模態的目標函數， g_r^3 為濾除第三模態的目標函數。電荷量限制條件為

$$Q_3^{S_{S_s}} \geq 50 \quad (3.50)$$

$$Q_3^{S_{S_r}} \leq 50 \quad (3.51)$$

在滿足電極形狀限制條件(3.13)和(3.19)式以及電荷量限制條件(3.50)和(3.51)式之下，求解目標函數(3.48)和(3.49)式有極小值時之最佳設計變數 α_0 ， α_m 和 β_n 值，並且得到最佳感測電極之形狀。最佳化結果如表 3.13。其最佳電極形狀如圖 3.34。

3.3.3 第四模態感測與濾除

第四模態感測與濾除採用第三模態感測與濾除同一個設計，如圖 3.35 所示。

定義兩個目標函數如下所示

$$g_s^4 = \frac{Q_3^{S_{S_s}}}{Q_4^{S_{S_s}}} \quad (3.52)$$

$$g_r^4 = \frac{Q_4^{S_{S_r}}}{Q_1^{S_{S_r}} + Q_2^{S_{S_r}} + Q_3^{S_{S_r}} + Q_5^{S_{S_r}}} \quad (3.53)$$

其中 g_s^4 代表感測第四模態的目標函數， g_r^4 為濾除第四模態的目標函數。電荷量限制條件為

$$Q_4^{S_{S_s}} \geq 50 \quad (3.54)$$

$$Q_4^{S_{S_r}} \leq 50 \quad (3.55)$$

在滿足電極形狀限制條件(3.13)和(3.19)式以及電荷量限制條件(3.54)和(3.55)式之下，求解目標函數(3.52)和(3.53)式有極小值時之最佳設計變數 α_0 ， α_m 和 β_n 值，並且得到最佳感測電極之形狀。最佳化結果如表 3.14。其最佳電極形狀如圖 3.36。

3.3.4 第五模態感測與濾除

分隔線 $f(x)$ 和 $-f(x)$ 將上電極切割成三個部分，如圖 3.37。電極 S_{S_1} 與 S_{S_3} 收集到的信號減去電極 S_{S_2} 收集到的信號，這樣的組合電極 S_{S_s} 來感測第五模態。而組合電極 S_{S_r} 為電極 S_{S_1} 與 S_{S_2} 信號相減來濾除第五模態。電極 S_{S_s} 之電荷感測式為

$$Q_r^{S_{S_s}} = \left| \int_{S_{S_1}} (D_3)_r dS - \int_{S_{S_2}} (D_3)_r dS + \int_{S_{S_3}} (D_3)_r dS \right| \quad (3.56)$$

即為

$$Q_r^{S_{S_s}} = \left| \int_0^L \int_{|f(x)|}^{\frac{w}{2}} (D_3)_r dy dx - \int_0^L \int_{-|f(x)|}^{|f(x)|} (D_3)_r dy dx + \int_0^L \int_{-\frac{w}{2}}^{-|f(x)|} (D_3)_r dy dx \right| \quad (3.57)$$

電極 S_{S_r} 之電荷感測式為

$$Q_r^{S_{S_r}} = \left| \int_{S_{S_1}} (D_3)_r dS - \int_{S_{S_2}} (D_3)_r dS \right| \quad (3.58)$$

即為

$$Q_r^{S_{S_r}} = \left| \int_0^L \int_{|f(x)|}^{\frac{w}{2}} (D_3)_r dy dx - \int_0^L \int_{-|f(x)|}^{|f(x)|} (D_3)_r dy dx \right| \quad (3.59)$$

定義兩個目標函數如下所示

$$g_s^5 = \frac{Q_1^{S_{S_s}} + Q_2^{S_{S_s}}}{Q_5^{S_{S_s}}} \quad (3.60)$$

$$g_r^5 = \frac{Q_5^{S_{S_r}}}{Q_1^{S_{S_r}} + Q_2^{S_{S_r}} + Q_3^{S_{S_r}} + Q_4^{S_{S_r}}} \quad (3.61)$$

其中 g_s^5 代表感測第五模態的目標函數， g_r^5 為濾除第五模態的目標函數。電荷量限制條件為

$$Q_5^{S_{S_s}} \geq 50 \quad (3.62)$$

$$Q_5^{S_{S_r}} \leq 50 \quad (3.63)$$

在滿足電極形狀限制條件(3.13)和(3.14)式以及電荷量限制條件(3.62)和(3.63)式之下，求解目標函數(3.60)和(3.61)式有極小值時之最佳化結果如表 3.15。其最佳電極形狀如圖 3.38。



第四章 實驗與討論

為了檢驗之前的推論是否正確，實際製造試片來驗證。實驗結構之壓電複合懸臂平板為長 120mm 寬 30mm 厚 2mm 之鋁板上黏貼長 46mm 寬 30mm 厚 $511\mu\text{m}$ 之壓電片。壓電片上感測電極之形狀利用微機電製程顯影製作，實現電極形狀，達到感測或濾除特定模態之目標。

4.1 試片製造

先定義出壓電片上電極形狀，再將壓電片黏貼在鋁結構上。

4.1.1 定義電極形狀

壓電試片上必須定義出電極形狀，利用黃光製程將電極蝕刻出切割線將最佳電極圖案呈現出來。製作流程如圖 4.1 所示，製作程序如下：

步驟零：PZT 試片之準備

1. 採用長 48mm 寬 32mm 鍍有厚度 $6\mu\text{m}$ 的銀金屬層之 PZT 壓電片，總厚度為 $511\mu\text{m}$ 。

步驟一：PZT 試片清洗

1. 將 PZT 試片放入丙酮中浸泡，並利用超音波振動輔助去除油污。
2. 放入 IPA 中去除丙酮。
3. 以純水沖洗一分鐘。
4. 將清洗完之試片置於 Hot Plate 上以 90°C 烘烤 10 分鐘，以去除表面水分。

步驟二：旋轉塗佈光阻

1. 均勻塗佈正光阻 AZ4620 厚度約 $6\mu\text{m}$ 於壓電片。
2. 上光阻後，將試片置於 Hot Plate 上以 90°C 軟烤 5 分鐘。

步驟三：光罩圖形轉移

3. 以光罩曝光顯影定義出圖形。
4. 以 105°C 硬烤光阻 10 分鐘。

步驟四：蝕刻銀金屬層

以氨水：雙氧水：甲醇=1：1：4 的比例，並放入試片，濕蝕刻未被光阻保護之銀(Ag)。

步驟五：清洗試片。

步驟六：將試片裁切成長 46mm 寬 30mm 的矩形形狀，如圖 4.2。

4.1.2 黏貼壓電片

製作鋁結構如圖 4.3，其三視圖為圖 4.4，鋁板製作厚度尺寸誤差於 5 條 (0.05mm) 之內。利用滾網法將定義好的電極形狀的壓電片黏貼到鋁板上，流程如下：

步驟零：事前準備

1. 工具準備：紗布、墊紙、滾筒和三秒膠，如圖 4.5，2mm 厚的鐵氟龍條、三塊鐵氟龍塊、數片鐵氟龍片和銅錠。
2. 膠帶固定鋁板，如圖 4.6。
3. 固定好 2mm 厚的鐵氟龍條，如，圖 4.7。

步驟一：上膠於壓電片

1. 塗適量的三秒膠於鋪有墊紙的紗布上，如圖 4.8。
2. 利用滾筒將三秒膠滾均勻。
3. 將塗有三秒膠的紗布覆蓋於壓電片背後，如圖 4.9。
4. 滾動滾筒將膠均勻地塗於壓電片上。

步驟二：黏貼壓電片於鋁板上

1. 將上好膠的壓電片放於鋁板上。

2. 利用鐵氟龍塊迅速地調整壓電片位置。
3. 手指輕壓壓電片三十秒，使得壓電片與鋁板有緊密接觸，如圖 4. 10。
4. 將銅錠壓在墊有鐵氟龍片的壓電片上，如圖 4. 11。
5. 將固定用的 2mm 厚鐵氟龍條與鐵氟龍塊移開。
6. 等待膠乾，如圖 4. 12。

4.1.3 量測電路

利用線徑 $30\mu\text{m}$ 的漆包線，將壓電片上各個電極之信號從靠近固定端的一端接出。作法為先把漆包線線頭的漆去除後放於銀電極上，再點上銀膠將漆包線與電極黏接。等待銀膠乾後將漆包線另一端焊接於端子上，若有需要連接的電極則將其漆包線焊接於同一個端子上。最後將同軸線的內線焊接於端子上將信號接出，而同軸線的外網部分必須接地。

信號處理電路

如 3.2. 節所介紹，本文利用信號後處理設計出感測器與濾波器須透過跨阻抗放大器電路將電流信號轉成電壓信號，再利用差動放大電路作信號減法運算，來達到所需的效果。設計電路如圖 4. 13，由兩個負回授電阻皆為 $1\text{k}\Omega$ 的跨阻抗放大器與一個差動放大增益 $K=3$ 的差動放大電路所組成。焊接電路照片如圖 4. 14。A、B、C 和 E 款電極所設計的感測器與濾波器須作信號相減，分別將電極上所收集的兩電流信號輸入 a、b 端經跨阻抗放大器後放大轉為電壓信號，再透過平衡差動放大器減法運算後，信號放大三倍由輸出端 e 輸出，即整個電路的放大增益 $KR_f = 3\text{k}$ ，輸出端 e 所輸出的電壓振幅為輸入 a、b 兩電流信號之振幅相減後再放大三千倍。而 D 款電極由電極上收集的電流信號從 a 端輸入後，由 c 端輸出電壓信號。

為了保護信號不受外部雜訊影響，將信號處理電路放入盒內，以鋁箔紙包裹盒子，並鑽數個孔洞以利信號線的配置，如圖 4. 15。

4.2 量測架構

本實驗是以虎鉗夾持鋁結構，使用衝擊槌激振試片，雷射都卜勒儀做為量測質點振動速度的工具，平衡差動放大器作信號處理，使用 HP-3562A 頻譜分析儀計算頻率響應函數。儀器照片如圖 4.16 和圖 4.17。量測工作主要為進行試片受外部激振後質點的速度反應，以及透過放大器運算後的信號這兩部分頻譜分析。

4.2.1 雷射都卜勒儀感測位移速度

使用衝擊槌敲擊試片一點，將衝擊信號接到頻譜分析儀的 channel 1，並透過都卜勒儀量測試片的振動速度信號接到頻譜分析儀的 channel 2。就可利用頻譜分析儀計算輸入的衝擊信號到輸出的振動速度信號之頻率響應。雷射都卜勒儀將感測懸臂平板自由端質點振動速度的物理量轉換為電壓量，頻譜分析儀再分析所測得的電壓量，觀察試片受激振後質點振動頻率與振幅之關係，橫軸為頻率以線性表示，單位為 Hz；縱軸為電壓量之振幅以對數表示，單位為 dB。

在設計感測器與濾波器時僅考慮前五模態，經由有限元素軟體計算出壓電結構第五模態之自然頻率為 2006.9 Hz，因此設定頻譜分析的頻率範圍為 0 至 2500 Hz，而橫軸解析度為 801 條，故頻率解析度為 3.125 Hz。

雷射的紅外光束垂直對準懸臂平板自由端的角落，可偵測到彎曲位移模態的第一、第二和第五模態，以及扭轉位移模態的第三模態，而對於屬於橫振位移模態的第四模態則有較弱的感測效果。衝擊槌激振方式有兩種，同樣為敲擊懸臂平板自由端之角落，但一為垂直敲擊，二為側向水平敲擊，可激發橫振模態。每點量測皆敲擊十次後取其平均值作為量測結果。透過雷射感測與頻譜分析儀計算，可測得實作出的壓電懸臂平板結構之自然頻率，以及使用兩種不同激振方法時，各個模態振動振幅之比較量。

4.2.2 感測器與濾波器效果檢測

將衝擊槌信號接到頻譜分析儀的 channel 1，而壓電輸出電極接到信號處理電

路後，將信號接到頻譜分析儀的 channel 2。利用頻譜分析儀計算衝擊信號到信號處理電路輸出的信號的頻率響應，即可知道所設計的模態感測器或濾除器是否可行。

不同的激振方式，系統將有不一樣的響應。例如敲擊某一模態的位移波峰，系統將以該模態振形作振動；若敲擊某一模態的位移節點，該模態振動將不會出現，因此不同的衝擊槌敲擊點將會影響頻譜分析之結果。整理有限元素軟體分析結果，將平板背面亦即敲擊面之振動模態位移波峰和節點繪出，並在平板邊緣處標註固定端($x=0$)至各波峰和節點之距離，距離如圖 4.18 表 4.1 所示。利用簽字筆將各點位置點於試片背後。在這七個特殊的位置外，也點出自由端之角落，用意為垂直敲擊角落可激發出彎曲模態與扭轉模態，藉此觀察所設計的模態感測或濾除器之效果。由於垂直敲擊平板並不會激發橫振模態，故側向水平敲擊角落，以觀察橫振模態之反應。

在這部份的量測共規劃敲擊九個點，以觀察系統不同響應，並判斷所設計的模態感測或濾除器是否有效。做好事前規劃後再進行量測，每點量測皆敲擊十次後取其平均值作為量測結果。

4.3 量測結果

將上一節所介紹的不同衝擊槌敲擊位置和方向給予以編號如圖 4.19 並整理為表 4.2。

4.3.1 第一模態感測器與第一模態濾除器

首先量測衝擊槌敲擊第一模態感測器懸臂平板自由端的角落，雷射都卜勒儀垂直對準平板角落時，質點位移速度之頻譜響應。垂直敲擊 (G_z)和側向敲擊平板角落(G_y)，雷射感測之頻譜分析結果如圖 4.20 表 4.3 與表 4.4，由圖可知垂直敲擊平板無法激發屬於橫振模態的第四模態；且由於雷射光束是垂直對準平板，

所以即使側向敲擊平板激發橫振模態，雷射感測橫振模態的能量並不強。

再來量測敲擊平板，所設計的第一模態感測器信號之頻譜響應。垂直敲擊第五模態之波峰(A)，感測信號之頻譜響應如圖 4. 21；垂直敲擊第二模態之波峰(B)，頻譜響應如圖 4. 22；垂直敲擊第五模態之節點(C)，頻譜響應如圖 4. 23；垂直敲擊第五模態之波峰(D)，頻譜響應如圖 4. 24；垂直敲擊第二模態之節點(E)，頻譜響應如圖 4. 25；垂直敲擊第五模態之節點(F)，頻譜響應如圖 4. 26；垂直敲擊角落(G_z)，頻譜響應如圖 4. 27；垂直敲擊第三模態之節點(H)，頻譜響應如圖 4. 28；側向敲擊角落(G_y)，頻譜響應如圖 4. 29，將敲擊各點之感測信號整理成表 4. 5。由圖可知敲擊模態之波峰，該模態信號較強；敲擊模態之節點，該模態信號則有較弱的反應。將垂直敲擊平板角落(G_z)雷射量測信號 dB 值減去敲擊各點之感測器信號 dB 值，整理成表 4. 6。將側向敲擊平板角落(G_y)雷射量測信號 dB 值減去敲擊各點之感測器信號 dB 值，整理成表 4. 7。

為了使同一模態的感測器與濾除器之共振頻率相近，將模態感測壓電片與模態濾除壓電片黏貼於同一塊鋁板上，以利比較所設計的感測器與濾除器是否有效。在量測模態感測器後，將試片浸泡於丙酮中，以超音波振動輔助使壓電片與鋁板脫離，再將模態濾除的壓電片貼於原為模態感測器的鋁板上，最後接上線路完成濾除試片之製作。

垂直敲擊 (G_z)和側向敲擊第一模態濾除器平板角落(G_y)，雷射量測之頻譜分析結果如圖 4. 30，表 4. 8 與表 4. 9。敲擊各點之濾除器信號整理成表 4. 10，其中垂直敲擊角落(G_z)，頻譜響應如圖 4. 31。將垂直敲擊平板角落(G_z)雷射量測信號 dB 值減去敲擊各點之濾除器信號 dB 值，整理成表 4. 11。將側向敲擊平板角落(G_y)雷射量測信號 dB 值減去敲擊各點之濾除器信號 dB 值，整理成表 4. 12。

將敲擊各點之第一模態感測器信號 dB 值減去第一模態濾除器信號 dB 值，整理成表 4.13，表中第一模態感測與濾除之 dB 差皆大於其他模態。以垂直敲擊平板角落(G_Z)而言，第一模態 dB 差為 40.79，而其他模態 dB 差最高的第五模態僅為 10.66，由此可見我們所設計的第一模態感測與濾除器是有效果的。

4.3.2 第二模態感測器與第二模態濾除器

垂直敲擊 (G_Z)和側向敲擊第二模態感測器平板角落(G_y)，雷射感測之頻譜分析結果如圖 4.32，表 4.14 與表 4.15。將敲擊各點之感測器信號整理成表 4.16，其中垂直敲擊角落(G_Z)，頻譜響應如圖 4.33。將垂直敲擊平板角落(G_Z)雷射量測信號 dB 值減去敲擊各點之感測器信號 dB 值，整理成表 4.17。將側向敲擊平板角落(G_y)雷射量測信號 dB 值減去敲擊各點之感測器信號 dB 值，整理成表 4.18。

垂直敲擊 (G_Z)和側向敲擊第二模態濾除器平板角落(G_y)，雷射感測之頻譜分析結果如圖 4.32，表 4.19 與表 4.20。將敲擊各點之感測器信號整理成表 4.21，其中垂直敲擊角落(G_Z)，頻譜響應如圖 4.33。將垂直敲擊平板角落(G_Z)雷射量測信號 dB 值減去敲擊各點之感測器信號 dB 值，整理成表 4.22。將側向敲擊平板角落(G_y)雷射量測信號 dB 值減去敲擊各點之感測器信號 dB 值，整理成表 4.23。

將敲擊各點之第二模態感測器信號 dB 值減去第一模態濾除器信號 dB 值，整理成表 4.24，表中第二感測與濾除之 dB 差皆大於其他模態。以垂直敲擊平板角落(G_Z)，而言第二模態 dB 差為 29.13，而其他模態 dB 差最高的第五模態為 23.29，由此可見我們所設計的第二模態感測與濾除器是有效果的。

4.3.3 第三模態感測器與第三模態濾除器

垂直敲擊 (G_z)和側向敲擊第三模態感測器平板角落(G_y)，雷射感測之頻譜分析結果如圖 4.36，表 4.25 與表 4.26。將敲擊各點之感測器信號整理成表 4.27，其中垂直敲擊角落(G_z)，頻譜響應如圖 4.37。將垂直敲擊平板角落(G_z)雷射量測信號 dB 值減去敲擊各點之感測器信號 dB 值，整理成表 4.28。將側向敲擊平板角落(G_y)雷射量測信號 dB 值減去敲擊各點之感測器信號 dB 值，整理成表 4.29。

垂直敲擊 (G_z)和側向敲擊第三模態濾除器平板角落(G_y)，雷射感測之頻譜分析結果如圖 4.38，表 4.30 與表 4.31。將敲擊各點之感測器信號整理成表 4.32，其中垂直敲擊角落(G_z)，頻譜響應如圖 4.39。將垂直敲擊平板角落(G_z)雷射量測信號 dB 值減去敲擊各點之感測器信號 dB 值，整理成表 4.33。將側向敲擊平板角落(G_y)雷射量測信號 dB 值減去敲擊各點之感測器信號 dB 值，整理成表 4.34。

將敲擊各點之第三模態感測器信號 dB 值減去第三模態濾除器信號 dB 值，整理成表 4.35。表中第三感測與濾除之 dB 差皆大於其他模態。以垂直敲擊平板角落(G_z)，而言第三模態 dB 差為 19.18，而其他模態 dB 差最高的第四模態僅為 -8.73，由此可見我們所設計的第三模態感測與濾除器是可行的。

4.3.4 第四模態感測器與第四模態濾除器

垂直敲擊 (G_z)和側向敲擊第四模態感測器平板角落(G_y)，雷射感測之頻譜分析結果如圖 4.40，表 4.36 與表 4.37。將敲擊各點之感測器信號整理成表 4.

38，其中垂直敲擊角落(G_Z)，頻譜響應如圖 4.41。將垂直敲擊平板角落(G_Z)雷射量測信號 dB 值減去敲擊各點之感測器信號 dB 值，整理成表 4.39。將側向敲擊平板角落(G_y)雷射量測信號 dB 值減去敲擊各點之感測器信號 dB 值，整理成表 4.40。

垂直敲擊 (G_Z)和側向敲擊第四模態濾除器平板角落(G_y)，雷射感測之頻譜分析結果如圖 4.42，表 4.41 與表 4.42。將敲擊各點之感測器信號整理成表 4.43，其中垂直敲擊角落(G_Z)，頻譜響應如圖 4.43。將垂直敲擊平板角落(G_Z)雷射量測信號 dB 值減去敲擊各點之感測器信號 dB 值，整理成表 4.44。將側向敲擊平板角落(G_y)雷射量測信號 dB 值減去敲擊各點之感測器信號 dB 值，整理成表 4.45。

將敲擊各點之第四模態感測器信號 dB 值減去第四模態濾除器信號 dB 值，整理成表 4.46。表中第四感測與濾除之 dB 差皆大於其他模態。以垂直敲擊平板角落(G_Z)，而言第四模態 dB 差為 8.28，而其他模態 dB 差最高的第二模態僅為-8.48，由此可見我們所設計的第四模態感測與濾除器是可行的。

4.3.5 第五模態感測器與第五模態濾除器

垂直敲擊 (G_Z)和側向敲擊第五模態感測器平板角落(G_y)，雷射感測之頻譜分析結果如圖 4.44，表 4.47 與表 4.48。將敲擊各點之感測器信號整理成表 4.49，其中垂直敲擊角落(G_Z)，頻譜響應如圖 4.45。將垂直敲擊平板角落(G_Z)雷射量測信號 dB 值減去敲擊各點之感測器信號 dB 值，整理成表 4.50。將側向敲擊平板角落(G_y)雷射量測信號 dB 值減去敲擊各點之感測器信號 dB 值，整理成表 4.

51。

垂直敲擊 (G_z)和側向敲擊第五模態濾除器平板角落(G_y)，雷射感測之頻譜分析結果如圖 4.46，表 4.52 與表 4.53。將敲擊各點之感測器信號整理成表 4.54，其中垂直敲擊角落(G_z)，頻譜響應如圖 4.47。將垂直敲擊平板角落(G_z)雷射量測信號 dB 值減去敲擊各點之感測器信號 dB 值，整理成表 4.55。將側向敲擊平板角落(G_y)雷射量測信號 dB 值減去敲擊各點之感測器信號 dB 值，整理成表 4.56。

將敲擊各點之第五模態感測器信號 dB 值減去第五模態濾除器信號 dB 值，整理成表 4.57。表中第五感測與濾除之 dB 差皆大於其他模態。以垂直敲擊平板角落(G_z)，而言第五模態 dB 差為 55.75，而其他模態 dB 差最高的第一模態僅為 3.73，由此可見我們所設計的第五模態感測與濾除器是可行的。

在 3.3 節介紹透過作信號後處理將電極信號不同運算，來達到壓電片可作為某個模態之感測器或為該模態之濾除器或多模態濾除器。接下來就介紹其量測結果。

4.3.6 多功能第一、二和五模態濾除器

垂直敲擊 (G_z)和側向敲擊多功能第一、二和五模態濾除器平板角落(G_y)，雷射量測之頻譜分析結果如圖 4.48，表 4.58 與表 4.59。首先將電路接成濾除第一模態的形式並量測信號。將敲擊各點之濾除器信號整理成表 4.60，其中垂直敲擊角落(G_z)，頻譜響應如圖 4.49。將垂直敲擊平板角落(G_z)雷射量測信號 dB 值減去敲擊各點之感測器信號 dB 值，整理成表 4.61。將側向敲擊平板角落(G_y)雷射量測信號 dB 值減去敲擊各點之感測器信號 dB 值，整理成表 4.62。

接著將電路接成濾除第二模態的形式並量測信號。將敲擊各點之濾除器信號整理成表 4.63，其中垂直敲擊角落(G_z)，頻譜響應如圖 4.50。將垂直敲擊平板

角落(G_z)雷射量測信號 dB 值減去敲擊各點之感測器信號 dB 值，整理成表 4.64。

將側向敲擊平板角落(G_y)雷射量測信號 dB 值減去敲擊各點之感測器信號 dB 值，整理成表 4.65 表 4.66。

最後將電路接成濾除第五模態的形式並量測信號。將敲擊各點之濾除器信號整理成，其中垂直敲擊角落(G_z)，頻譜響應如圖 4.51。將垂直敲擊平板角落(G_z)雷射量測信號 dB 值減去敲擊各點之感測器信號 dB 值，整理成表 4.67。將側向敲擊平板角落(G_y)雷射量測信號 dB 值減去敲擊各點之感測器信號 dB 值，整理成表 4.68。

4.3.7 多功能第三模態感測與濾除器

垂直敲擊 (G_z)和側向敲擊多功能第三模態感測與濾除器平板角落(G_y)，雷射量測之頻譜分析結果如圖 4.52，表 4.69 與表 4.70。將電路接成感測第三模態的形式並量測信號。將敲擊各點之感測器信號整理成表 4.71，其中垂直敲擊角落(G_z)，頻譜響應如圖 4.53。將垂直敲擊平板角落(G_z)雷射量測信號 dB 值減去敲擊各點之感測器信號 dB 值，整理成表 4.72。將側向敲擊平板角落(G_y)雷射量測信號 dB 值減去敲擊各點之感測器信號 dB 值，整理成表 4.73。

將電路接成濾除第三模態的形式並量測信號。將敲擊各點之感測器信號整理成表 4.74，其中垂直敲擊角落(G_z)，頻譜響應如圖 4.54。將垂直敲擊平板角落(G_z)雷射量測信號 dB 值減去敲擊各點之感測器信號 dB 值，整理成表 4.75。將側向敲擊平板角落(G_y)雷射量測信號 dB 值減去敲擊各點之感測器信號 dB 值，整理成表 4.76。

將敲擊各點之第三模態感測器信號 dB 值減去第三模態濾除器信號 dB 值，整

理成表 4.77。表中第三感測與濾除之 dB 差皆大於其他模態。以垂直敲擊平板角落(G_Z)，而言第三模態 dB 差為 28.69，而其他模態 dB 差最高的第四模態僅為 -2.938，由此可見我們將第三模態感測與濾除器設計於同一塊壓電結構是可行的。

4.3.8 多功能第四模態感測與濾除器

垂直敲擊 (G_Z)和側向敲擊多功能第四模態感測與濾除器平板角落(G_y)，雷射量測之頻譜分析結果如圖 4.55，表 4.78 與表 4.79。將電路接成感測第四模態的形式並量測信號。將敲擊各點之感測器信號整理成表 4.80，其中垂直敲擊角落(G_Z)，頻譜響應如圖 4.56。將垂直敲擊平板角落(G_Z)雷射量測信號 dB 值減去敲擊各點之感測器信號 dB 值，整理成表 4.81。將側向敲擊平板角落(G_y)雷射量測信號 dB 值減去敲擊各點之感測器信號 dB 值，整理成表 4.82。

將電路接成濾除第四模態的形式並量測信號。將敲擊各點之感測器信號整理成，其中垂直敲擊角落(G_Z)，頻譜響應如圖 4.57。將垂直敲擊平板角落(G_Z)雷射量測信號 dB 值減去敲擊各點之感測器信號 dB 值，整理成表 4.84。將側向敲擊平板角落(G_y)雷射量測信號 dB 值減去敲擊各點之感測器信號 dB 值，整理成表 4.85。

將敲擊各點之第四模態感測器信號 dB 值減去第四模態濾除器信號 dB 值，整理成表 4.86。表中第四感測與濾除之 dB 差皆大於其他模態。以垂直敲擊平板角落(G_Z)，而言第四模態 dB 差為 19.53，而其他模態 dB 差最高的第五模態僅為 -17.07，由此可見我們將第四模態感測與濾除器設計於同一塊壓電結構是可行的。

4.3.9 多功能第五模態感測與濾除器

垂直敲擊 (G_Z)和側向敲擊多功能第五模態感測與濾除器平板角落(G_y)，雷

射量測之頻譜分析結果如圖 4.58，表 4.87 與表 4.88。將電路接成感測第五模態的形式並量測信號。將敲擊各點之感測器信號整理成表 4.89，其中垂直敲擊角落(G_z)，頻譜響應如圖 4.59。將垂直敲擊平板角落(G_z)雷射量測信號 dB 值減去敲擊各點之感測器信號 dB 值，整理成表 4.90。將側向敲擊平板角落(G_y)雷射量測信號 dB 值減去敲擊各點之感測器信號 dB 值，整理成表 4.91。

將電路接成濾除第五模態的形式並量測信號。將敲擊各點之感測器信號整理成表 4.92，其中垂直敲擊角落(G_z)，頻譜響應如圖 4.60。將垂直敲擊平板角落(G_z)雷射量測信號 dB 值減去敲擊各點之感測器信號 dB 值，整理成表 4.93。將側向敲擊平板角落(G_y)雷射量測信號 dB 值減去敲擊各點之感測器信號 dB 值，整理成表 4.94。

將敲擊各點之第五模態感測器信號 dB 值減去第五模態濾除器信號 dB 值，整理成表 4.95。表中第五感測與濾除之 dB 差皆大於其他模態。以垂直敲擊平板角落(G_z)，而言第五模態 dB 差為 37.41，而其他模態 dB 差最高的第四模態僅為 -3.17，由此可見我們將第五模態感測與濾除器設計於同一塊壓電結構是可行的。

4.3.10 結果討論

本文第三章透過最佳化所設計的感測器或濾除器，感測到的模態與被濾除的模態其電荷量相差有十萬倍以上，而本章實驗量測結果，感測與濾除器無法達到此種效果，雖然感測模態的信號大都強於被濾除模態的信號，但有些試片其感測與被濾除模態之信號差不到 20dB，即信號差不到十倍。將某模態感測器與該模態感測器信號相減得其 dB 差，該模態的 dB 差皆大於其他模態，這代表所設計的模態感測器與濾除器是有效的。

而造成效果未如預期的可能原因有：

1. 虎鉗夾持鋁結構模擬固定端不夠真實。雖然以虎鉗緊緊夾持鋁板有著很大的勁

度與慣性，但仍然不是真正的固定端。

2. 鋁結構製作有誤差，實際量測平板厚度其平均值為 1.988mm ，最大誤差達 0.053mm 。

這與有限元素軟體分析本文所設計的懸臂平板結構有些差異，使得真實振動時的電位移模態與軟體分析的結果不同，造成原本該濾除的模態之電荷量無法消除。

3. 鋁板與壓電片並非真正結合一起。利用滾網法將壓電片黏貼於鋁板上，雖然用肉眼觀察壓電片與鋁板有緊密的黏合在一起，但仍然與有限元素軟體分析設定其間為結合一起有所不同，造成量測結果不是很理想。



第五章 結論與建議

綜合前面各章節所討論的內容，茲將結論與建議歸納如下：

1. 對於對稱結構，可利用對稱感測電極設計對稱模態感測器，或利用反對稱感測電極設計反對稱模態感測器，將可大為降低最佳化設計難度。
2. 透過最佳化方法得到電極形狀並配合信號後處理所設計出的感測器與濾除器，實驗證明是有效果的。
3. 設計電流模態感測器過程中僅需求解一次系統模態解，使得設計流程較電壓模態感測器簡化。
4. 本文除了設計單功能感測器之外，提出可在一壓電片上設計出多功能模態感測器，實驗證明此方法是可行的。
5. 本文所使用的信號後處理電路為平衡差動放大器($|A_a| = |A_b| = K$)，若將增益值 A_a 和 $|A_b|$ 做為設計變數，利用最佳化得到最佳感測電極形狀與放大電路中各區塊電極信號之增益值，透過不同的處理電路來感測不同模態的信號，來設計出更多功能的感測器。
6. 如果要設計一個模態感測器，可利用本文所提供的方法，利用分隔線方式設計電流信號模態感測器，先藉由有限元素法分析軟體分析出電極電位為零之系統的模態，再配合系統模態振型做感測電極形狀的最佳化，並利用信號後處理來感測特定模態，可簡化壓電模態感測器設計的程序。

參考文獻

- [1] C. -K. Lee and F. C. Moon , “Modal Sensors/Actuators” , *ASME J. Appl. Mech.* , Vol. 57 , pp. 434-441 , 1990.
- [2] Robert L. Clark , Chris R. Fuller , and Al Wicks , “Characterization of Multiple Piezoelectric Actuators for Structural Excitation” , *J. Acoust. Soc. Am.* , Vol. 90 , No. 1 , pp. 346-357 , July 1991.
- [3] H. S. Tzou and H. Q. Fu , “A Study of Segmentation of Distributed Piezoelectric Sensors and Actuators, Part I : Theoretical Analysis” , *Journal of Sound and Vibration* , Vol. 172 , No. 2 , pp. 247-259 , 1994.
- [4] H. S. Tzou and H. Q. Fu , “A Study of Segmentation of Distributed Piezoelectric Sensors and Actuators, Part II : Parametric Study and Active Vibration Controls” , *Journal of Sound and Vibration* , Vol. 172 , No. 2 , pp. 261-275 , 1994.
- [5] Chang-Qing Chen and Ya-Peng Shen , “Optimal Control of Active Structures with Piezoelectric Modal Sensors and Actuators” , *Smart Mater. Struct.* , Vol. 6 , pp. 406-409 , 1997.
- [6] Dongchang Sun and Dajun Wang , “Distributed Piezoelectric Element Method for Vibration Control of Smart Plates” , *AIAA Journal* , Vol. 37 , No. 11 , pp. 1459-1463 , November 1999.
- [7] M. I. Friswell , “Partial and Segmented Modal Sensors for Beam Structures” , *Journal of Vibration and Control* , Vol. 5 , pp. 619-637 , 1999.
- [8] Hartono Sumali , Karsten Meissner and Harley H. Cudney , “A Piezoelectric Array for Sensing Vibration Modal Coordinates” , *Sensors and Actuators A* , Vol. 93 , pp. 123-131 , 2001.
- [9] Dongchang Sun and Liyong Tong , “Vibration Control of Plates Using Discretely Distributed Piezoelectric Quasi-Modal Actuators / Sensors” , *AIAA Journal* , Vol. 39 , No. 9 , pp. 1766-1772 , September 2001.
- [10] Dongchang Sun and Liyong Tong , “Modal Control of Smart Shells by Optimized Discretely Distributed Piezoelectric Transducers” , *International Journal of Solids and Structures* , Vol. 38 , pp.3281-3299 , 2001.
- [11] Alberto Donoso and Jose’ Carlos Bellido , “Distributed piezoelectric modal sensors

for circular plates” , *Journal of Sound and Vibration* , Vol. 319 , pp.50-57 , 2009.

- [12] 朱家輝，模態感測器之量測與信號處理，國立台灣大學機械工程研究所碩士論文，中華民國九十一年六月。



附表

表 3.1 壓電複合結構前五模態之自然頻率

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
自然頻率 (Hz)	145.89	733.25	1052.3	1739.6	2006.9

表 3.2 第一模態感測最佳化結果

	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5
原本	121.65	3.2038			0.69181
執行後	120.84	2.0840e-4			2.4507e-7
	α_0	α_1	β_1	α_2	β_2
起始值	-5.3681	5.7425	-1.9234	3.0843	0.2059
終值	8.3349	4.5504	-1.4995	-2.7119	-0.6150

表 3.3 第二模態感測最佳化結果

	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5
原本	0.4228	106.18			2.5780
執行後	8.7232e-6	199.99			2.9076e-5
	α_0	α_1	β_1	α_2	β_2
起始值	-0.2304	-10.2648	-2.8228	3.7312	1.6982
終值	-0.4298	-4.7638	-9.4411	-0.0047	4.1213

表 3.4 第三模態感測最佳化結果

	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5
原本			643.88	6475.8	
執行後			129.06	4.1192e-5	
	α_0	α_1	β_1	α_2	β_2
起始值	3	2	2	-0.01	-1
終值	10.5970	-0.7203	-0.1304	-0.5396	-2.7373

表 3.5 第四模態感測最佳化結果

	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5
原本			643.88	6475.8	
執行後			2.2920e-4	4308.6	
	α_0	α_1	β_1	α_2	β_2
起始值	3	2	2	-0.01	-1
終值	5.2602	3.9237	3.4102	0.6822	0.9666

表 3.6 第五模態感測最佳化結果

	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5
原本	315.55	90.07			2165.1
執行後	1.0343e-4	1.3022e-5			772.08
	α_0	α_1	β_1	α_2	β_2
起始值	4	1	4	-4	-4
終值	7.3639	-3.0861	1.1107	2.5781	-1.9404

表 3.7 第一模態濾除最佳化結果

	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5
原本	93.533	41.597	792.04	6849.7	538.44
執行後	3.7661e-5	414.70	827.73	6910.7	1437.9
	α_0	α_1	β_1	α_2	β_2
起始值	-1	-2	3	1	-4
終值	0.2866	0.9052	-4.6128	-0.7354	2.6127

表 3.8 第二模態濾除最佳化結果

	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5
原本	643.93	1028.1	388.17	3526.8	2211.0
執行後	362.43	2.087e-5	233.77	2777.6	3384.4
	α_0	α_1	β_1	α_2	β_2
起始值	-1	-0.01	-2	-3	-2
終值	4.4401	1.7032	5.8162	-2.7582	2.0499

表 3.9 第三模態濾除最佳化結果

	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5
原本	479.69	627.09	388.34	3275.8	2093.6
執行後	367.66	276.96	1.3783e-5	1933.3	2467.5
	α_0	α_1	β_1	α_2	β_2
起始值	-1	-2	2	2	-2
終值	-3.3978	-4.3418	0.5264	1.6182	-4.3241

表 3.10 第四模態濾除最佳化結果

	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5
原本	348.67	519.09	211.74	1853.5	1321.4
執行後	249.23	378.41	26.145	7.5531e-6	902.66
	α_0	α_1	β_1	α_2	β_2
起始值	6	0.01	-2	1	1
終值	8.4799	-0.0917	-2.1204	1.2378	1.6147

表 3.11 第五模態濾除最佳化結果

	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5
原本	700.79	861.03	367.13	3390.8	3274.2
執行後	516.84	1218.8	295.74	2836.9	6.2564e-5
	α_0	α_1	β_1	α_2	β_2
起始值	-3	-1	2	-3	-2
終值	3.0157	-5.2144	-5.1765	-3.7835	-4.5998

表 3.12 第一、二和五模態濾除最佳化結果

	$Q_1^{S_{s_1}}$	$Q_2^{S_{s_1}}$	$Q_3^{S_{s_1}}$	$Q_4^{S_{s_1}}$	$Q_5^{S_{s_1}}$
原本	427.41	599.27	376.2	3288.5	1866.8
執行後	584.16	1.3189e-5	313.09	2577.7	5189.7
	$Q_1^{S_{s_2}}$	$Q_2^{S_{s_2}}$	$Q_3^{S_{s_2}}$	$Q_4^{S_{s_2}}$	$Q_5^{S_{s_2}}$
原本	740.94	945.5	375.95	3288.2	3322.9
執行後	584.16	1544.8	313.12	2577.8	3.9095e-7
	$Q_1^{S_s}$	$Q_2^{S_s}$	$Q_3^{S_s}$	$Q_4^{S_s}$	$Q_5^{S_s}$
原本	313.54	346.23	752.15	6576.7	1456.1
執行後	1.9051e-5	1544.8	626.21	5155.5	5189.7
	α_0	α_1	β_1	α_2	β_2
起始值	4	2	-2	-3	2
終值	-2.1144	-1.6161	11.4893	-2.0122	2.3789

表 3.13 第三模態感測與濾除最佳化結果

	$Q_1^{S_{S_s}}$	$Q_2^{S_{S_s}}$	$Q_3^{S_{S_s}}$	$Q_4^{S_{S_s}}$	$Q_5^{S_{S_s}}$
原本			649.87	5748.8	
執行後			284.93	4.0558e-5	
	$Q_1^{S_{S_r}}$	$Q_2^{S_{S_r}}$	$Q_3^{S_{S_r}}$	$Q_4^{S_{S_r}}$	$Q_5^{S_{S_r}}$
原本	407.58	570.01	273.67	2460.2	1733.3
執行後	180.56	299.14	1.5669e-4	1851.2	345.46
	α_0	α_1	β_1	α_2	β_2
起始值	4	2	-2	-3	2
終值	10.2661	-3.2008	-0.2997	-1.0860	-0.6293

表 3.14 第四模態感測與濾除最佳化結果

	$Q_1^{S_{S_s}}$	$Q_2^{S_{S_s}}$	$Q_3^{S_{S_s}}$	$Q_4^{S_{S_s}}$	$Q_5^{S_{S_s}}$
原本			548.63	4889.8	
執行後			7.8703e-6	2468.4	
	$Q_1^{S_{S_r}}$	$Q_2^{S_{S_r}}$	$Q_3^{S_{S_r}}$	$Q_4^{S_{S_r}}$	$Q_5^{S_{S_r}}$
原本	349.49	506.41	197.78	1816.1	1371.7
執行後	253.41	264.32	213.69	1.8476e-4	1443.6
	α_0	α_1	β_1	α_2	β_2
起始值	6	0.01	-2	0.01	2
終值	8.2377	1.3982	-1.0023	0.4906	3.0972

表 3.15 第五模態感測與濾除最佳化結果

	$Q_1^{S_{S_s}}$	$Q_2^{S_{S_s}}$	$Q_3^{S_{S_s}}$	$Q_4^{S_{S_s}}$	$Q_5^{S_{S_s}}$
原本	754.58	1364.3			1480.6
執行後	2.2236e-5	1.6829e-2			1730.1
	$Q_1^{S_{S_r}}$	$Q_2^{S_{S_r}}$	$Q_3^{S_{S_r}}$	$Q_4^{S_{S_r}}$	$Q_5^{S_{S_r}}$
原本	273.82	636.96	423.07	3490.7	187.11
執行後	292.11	386.2	178.27	2508.3	3.2775e-2
	α_0	α_1	β_1	α_2	β_2
起始值	-2	1	3	1	-3
終值	-7.4642	-6.9209	1.4969	1.3711	0.2288

表 4.1 固定端($x=0$)至各波峰和節點之距離

	第五模態之波峰	第二模態之波峰	第五模態之節點	第五模態之波峰	第二模態之節點	第五模態之節點	第三模態之節點
與固定端距離 (mm)	34.3	56.3	59.4	83.4	96.0	103	120

表 4.2 敲擊點標號

	第五模態	第二模態	第五模態	第五模態	第二模態	第五模態	垂直敲擊	第三模態	側向敲擊
--	------	------	------	------	------	------	------	------	------

	之波 峰	之波 峰	之節 點	之波 峰	之節 點	之節 點	角落	之節 點	角落
標號	A	B	C	D	E	F	G_z	H	G_y

表 4.3 垂直敲擊角落 (G_z)雷射量測第一模態感測器之共振頻率和 dB 值

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
頻率(Hz)	146.9	721.9	1047	1641	1991
dB	74.62	72.73	77.15	36.8	76.81

表 4.4 側向敲擊角落 (G_y)雷射量測第一模態感測器之共振頻率和 dB 值

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
頻率(Hz)	146.9	721.9	1047	1641	1991
dB	60.31	59.6	63.24	39.73	64.91

表 4.5 敲擊各點，第一模態感測器信號之 dB 值

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB	13.56	13.48	12.94	-13.09	23.71
B 點, dB	18.63	14.35	13.17	-10.48	7.132
C 點, dB	18.13	6.908	12.67	-18.02	2.25
D 點, dB	22.22	4.083	15.03	-10.61	19.39
E 點, dB	24.58	-12.27	14.64	-9.636	17.46
F 點, dB	23.13	11.78	15.33	-14.91	-11.93
G_z 點, dB	22.97	-3.584	14.33	-8.473	16.81
H 點, dB	24.24	11.48	-8.545	-26.34	19.49

G_y 點, dB	15.33	-3.189	9.349	24.98	9.582
-------------	-------	--------	-------	-------	-------

表 4.6 第一模態感測器，垂直敲擊 G_z 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB 差	61.04	59.14	64.09	49.81	53.01
B 點, dB 差	55.97	58.27	63.86	47.2	69.588
C 點, dB 差	56.47	65.712	64.36	54.74	74.47
D 點, dB 差	52.38	68.537	62	47.33	57.33
E 點, dB 差	50.02	84.89	62.39	46.356	59.26
F 點, dB 差	51.47	60.84	61.7	51.63	88.65
G_z 點, dB 差	51.63	76.204	62.7	45.193	59.91
H 點, dB 差	50.36	61.14	85.575	63.06	57.23
G_y 點, dB 差	59.27	75.809	67.681	11.74	67.138

表 4.7 第一模態感測器，側向敲擊 G_y 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB 差	46.68	45.76	50.89	52.49	40.87

B 點, dB 差	41.61	44.89	50.66	49.88	57.448
C 點, dB 差	42.11	52.332	51.16	57.42	62.33
D 點, dB 差	38.02	55.157	48.8	50.01	45.19
E 點, dB 差	35.66	71.51	49.19	49.036	47.12
F 點, dB 差	37.11	47.46	48.5	54.31	76.51
G _z 點, dB 差	37.27	62.824	49.5	47.873	47.77
H 點, dB 差	36	47.76	72.375	65.74	45.09
G _y 點, dB 差	44.91	62.429	54.481	14.42	54.998

表 4.8 垂直敲擊角落 (G_z) 雷射量測第一模態濾除器之共振頻率和 dB 值

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
頻率(Hz)	146.9	721.9	1047	1641	1994
dB	74.6	72.62	77.03	36.71	71.43

表 4.9 側向敲擊角落 (G_y) 雷射量測第一模態濾除器之共振頻率和 dB 值

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
頻率(Hz)	146.9	721.9	1047	1641	1994
dB	58.21	57.04	62.08	37.01	57.99

表 4.10 敲擊各點，第一個模態濾除器信號之 dB 值

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB	-57.04	-17.25	4.875	5.069	4.032
B 點, dB	-27.09	-12.39	11.16	4.524	-20.19
C 點, dB	-18.66	-14.16	16.15	6.998	-16.77
D 點, dB	-23.05	-14.2	14.5	11.25	5.659
E 點, dB	-18.98	-14.18	16.17	4.048	-15.87
F 點, dB	-27.02	-12.33	11.61	2.377	-22.72
G _z 點, dB	-17.82	-10.03	16.71	10.63	6.151
H 點, dB	-18.13	-11.49	-20.77	10.13	8.079
G _y 點, dB	-31.35	-14.19	3.868	30.29	-4.343

表 4.11 第一模態濾除器，垂直敲擊G_z點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB 差	131.64	89.87	72.155	31.641	67.398
B 點, dB 差	101.69	85.01	65.87	32.186	91.62
C 點, dB 差	93.26	86.78	60.88	29.712	88.2
D 點, dB 差	97.65	86.82	62.53	25.46	65.771
E 點, dB 差	93.58	86.8	60.86	32.662	87.3
F 點, dB 差	101.62	84.95	65.42	34.333	94.15
G _z 點, dB 差	92.42	82.65	60.32	26.08	65.279

H 點, dB 差	92.73	84.11	97.8	26.58	63.351
G _y 點, dB 差	105.95	86.81	73.162	6.42	75.773

表 4.12 第一模態濾除器，側向敲擊 G_y 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB 差	115.25	74.29	57.205	31.941	53.958
B 點, dB 差	85.3	69.43	50.92	32.486	78.18
C 點, dB 差	76.87	71.2	45.93	30.012	74.76
D 點, dB 差	81.26	71.24	47.58	25.76	52.331
E 點, dB 差	77.19	71.22	45.91	32.962	73.86
F 點, dB 差	85.23	69.37	50.47	34.633	80.71
G _z 點, dB 差	76.03	67.07	45.37	26.38	51.839
H 點, dB 差	76.34	68.53	82.85	26.88	49.911
G _y 點, dB 差	89.56	71.23	58.212	6.72	62.333

表 4.13 敲擊各點，第一模態感測與濾除器信號之 dB 差

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
--	------	------	------	------	------

A 點, dB 差	70.6	30.73	8.065	-18.159	19.678
B 點, dB 差	45.72	26.74	2.01	-15.004	27.322
C 點, dB 差	36.79	21.068	-3.48	-25.018	19.02
D 點, dB 差	45.27	18.283	0.53	-21.86	13.731
E 點, dB 差	43.56	1.91	-1.53	-13.684	33.33
F 點, dB 差	50.15	24.11	3.72	-17.287	10.79
G _z 點, dB 差	40.79	6.446	-2.38	-19.103	10.66
H 點, dB 差	42.37	22.97	12.225	-36.47	11.411
G _y 點, dB 差	46.68	11.001	5.481	-5.31	13.925

表 4.14 垂直敲擊角落 (G_z) 雷射量測第二模態感測器之共振頻率和 dB 值

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
頻率(Hz)	146.9	718.8	1053	1669	1988
dB	73.09	71.16	77.25	36.23	69.52

表 4.15 側向敲擊角落 (G_y) 雷射量測第二模態感測器之共振頻率和 dB 值

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
頻率(Hz)	146.9	718.8	1053	1669	1988
dB	56.39	55.62	62.72	30.4	57.35

表 4.16 敲擊各點，第二模態感測器信號之 dB 值

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB	14.27	18.83	0.8196	8.229	42.32
B 點, dB	19.65	21.39	0.4994	-11.77	28.42
C 點, dB	19.88	21.16	1.096	-3.236	3.171
D 點, dB	26.05	13.75	5.163	9.604	44.08
E 點, dB	27.87	6.791	5.462	2.189	37.76
F 點, dB	20.42	21.43	1.145	-1.807	-11.87
G _z 點, dB	30.28	23.01	13.74	9.638	44.34
H 點, dB	31.02	24.63	-0.9639	13.67	47.77
G _y 點, dB	11.47	5.185	-7.566	11.21	30.04

表 4.17 第二模態感測器，垂直敲擊G_z點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB 差	58.82	52.33	76.4304	28.001	27.2
B 點, dB 差	53.44	49.77	76.7506	48	41.1
C 點, dB 差	53.21	50	76.154	39.466	66.349
D 點, dB 差	47.04	57.41	72.087	26.626	25.44
E 點, dB 差	45.22	64.369	71.788	34.041	31.76
F 點, dB 差	52.67	49.73	76.105	38.037	81.39
G _z 點, dB 差	42.81	48.15	63.51	26.592	25.18

H 點, dB 差	42.07	46.53	78.2139	22.56	21.75
G _y 點, dB 差	61.62	65.975	84.816	25.02	39.48

表 4.18 第二模態感測器，側向敲擊 G_y 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB 差	42.12	36.79	61.9004	22.171	15.03
B 點, dB 差	36.74	34.23	62.2206	42.17	28.93
C 點, dB 差	36.51	34.46	61.624	33.636	54.179
D 點, dB 差	30.34	41.87	57.557	20.796	13.27
E 點, dB 差	28.52	48.829	57.258	28.211	19.59
F 點, dB 差	35.97	34.19	61.575	32.207	69.22
G _z 點, dB 差	26.11	32.61	48.98	20.762	13.01
H 點, dB 差	25.37	30.99	63.6839	16.73	9.58
G _y 點, dB 差	44.92	50.435	70.286	19.19	27.31

表 4.19 垂直敲擊角落 (G_z) 雷射量測第二模態濾除器之共振頻率和 dB 值

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
--	------	------	------	------	------

頻率(Hz)	146.9	718.8	1053	1669	1988
dB	73.5	71.63	78.51	36.38	75.68

表 4.20 側向敲擊角落 (G_y) 雷射量測第二模態濾除器之共振頻率和 dB 值

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
頻率(Hz)	146.9	718.8	1053	1669	1988
dB	56.72	55.87	62.82	28.42	62.33

表 4.21 敲擊各點，第二模態濾除器信號之 dB 值

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB	21.08	-6.45	0.05664	7.384	33.97
B 點, dB	20.89	7.22	8.096	4.063	25.64
C 點, dB	14.64	-3.428	2.518	12.14	17.56
D 點, dB	14.56	-9.343	-0.3384	-10.84	24.83
E 點, Db	19.33	-19.39	1.875	0.5066	27.84
F 點, dB	13.34	-7.322	-0.2959	8.066	7.55
G_z 點, dB	17.71	-6.124	5.187	-5.73	21.05
H 點, dB	12.09	-4.387	-13.5	-2.271	32.21
G_y 點, dB	4.057	-4.492	0.2393	18.37	12.36

表 4.22 第二模態濾除器，垂直敲擊 G_z 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB 差	52.42	78.08	78.45336	28.996	41.71

B 點, dB 差	52.61	64.41	70.414	32.317	50.04
C 點, dB 差	58.86	75.058	75.992	24.24	58.12
D 點, dB 差	58.94	80.973	78.8484	47.22	50.85
E 點, dB 差	54.17	91.02	76.635	35.8734	47.84
F 點, dB 差	60.16	78.952	78.8059	28.314	68.13
G 點, dB 差	55.79	77.754	73.323	42.11	54.63
H 點, dB 差	61.41	76.017	92.01	38.651	43.47
I 點, dB 差	69.443	76.122	78.2707	18.01	63.32

表 4.23 第二模態濾除器，側向敲擊 G_y 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB 差	35.31	62.07	62.66336	21.126	28.36
B 點, dB 差	35.5	48.4	54.624	24.447	36.69
C 點, dB 差	41.75	59.048	60.202	16.37	44.77
D 點, dB 差	41.83	64.963	63.0584	39.35	37.5
E 點, dB 差	37.06	75.01	60.845	28.0034	34.49
F 點, dB 差	43.05	62.942	63.0159	20.444	54.78
G 點, dB	38.68	61.744	57.533	34.24	41.28

差					
H 點, dB 差	44.3	60.007	76.22	30.781	30.12
I 點, dB 差	52.333	60.112	62.4807	10.14	49.97

表 4.24 敲擊各點，第二模態感測與濾除器信號之 dB 差

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB 差	-6.81	25.28	0.76296	0.845	8.35
B 點, dB 差	-1.24	14.17	-7.5966	-15.833	2.78
C 點, dB 差	5.24	24.588	-1.422	-15.376	-14.389
D 點, dB 差	11.49	23.093	5.5014	20.444	19.25
E 點, dB 差	8.54	26.181	3.587	1.6824	9.92
F 點, dB 差	7.08	28.752	1.4409	-9.873	-19.42
G _z 點, dB 差	12.57	29.134	8.553	15.368	23.29
H 點, dB 差	18.93	29.017	12.5361	15.941	15.56
G _y 點, dB 差	7.413	9.677	-7.8053	-7.16	17.68

表 4.25 垂直敲擊角落 (G_z) 雷射量測第三模態感測器之共振頻率和 dB 值

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
頻率(Hz)	140.6	700	1013	1628	1919
dB	60.29	58.59	59.48	18.64	61.06

表 4.26 側向敲擊角落 (G_y) 雷射量測第三模態感測器之共振頻率和 dB 值

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
頻率(Hz)	140.6	700	1013	1628	1919
dB	54.93	52.84	52.89	21.55	54.74

表 4.27 敲擊各點，第三模態濾除器信號之 dB 值

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB	-4.981	6.201	15.26	-6.381	4.82
B 點, dB	0.6232	10.74	22.4	-3.125	5.331
C 點, dB	-6.924	2.59	14.67	-9.34	-22.68
D 點, dB	-3.528	2.928	18.76	-2.3	6.427
E 點, dB	3.459	0.4415	14.51	5.009	0.2768
F 點, dB	3.332	9.461	18.14	9.003	3.707
G_z 點, dB	-2.531	2.084	16.88	-4.984	6.857
H 點, dB	-5.769	7.949	14.44	-4.314	9.061
G_y 點, dB	-7.756	-4.53	9.233	15.79	-1.882

表 4.28 第三模態感測器，垂直敲擊 G_z 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB 差	65.271	52.389	44.22	25.021	56.24
B 點, dB 差	59.6668	47.85	37.08	21.765	55.729
C 點, dB 差	67.214	56	44.81	27.98	83.74

D 點, dB 差	63.818	55.662	40.72	20.94	54.633
E 點, dB 差	56.831	58.1485	44.97	13.631	60.7832
F 點, dB 差	56.958	49.129	41.34	9.637	57.353
G _Z 點, dB 差	62.821	56.506	42.6	23.624	54.203
H 點, dB 差	66.059	50.641	45.04	22.954	51.999
G _y 點, dB 差	68.046	63.12	50.247	2.85	62.942

表 4.29 第三模態感測器，側向敲擊 G_y 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB 差	59.911	46.639	37.63	27.931	49.92
B 點, dB 差	54.3068	42.1	30.49	24.675	49.409
C 點, dB 差	61.854	50.25	38.22	30.89	77.42
D 點, dB 差	58.458	49.912	34.13	23.85	48.313
E 點, dB 差	51.471	52.3985	38.38	16.541	54.4632
F 點, dB 差	51.598	43.379	34.75	12.547	51.033
G _Z 點, dB 差	57.461	50.756	36.01	26.534	47.883

H 點, dB 差	60.699	44.891	38.45	25.864	45.679
G _y 點, dB 差	62.686	57.37	43.657	5.76	56.622

表 4.30 垂直敲擊角落 (G_z)雷射量測第三模態濾除器之共振頻率和 dB 值

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
頻率(Hz)	140.6	700	1016	1628	1922
dB	58.83	56.84	61.72	17.61	55.43

表 4.31 側向敲擊角落 (G_y)雷射量測第三模態濾除器之共振頻率和 dB 值

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
頻率(Hz)	140.6	700	1016	1628	1922
dB	48.21	46.12	51.73	19.27	44.84

表 4.32 敲擊各點，第三模態濾除器信號之 dB 值

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB	-1.014	15.51	-9.12	-12.35	21.4
B 點, dB	8.054	18.63	-11.5	-7.702	10.68
C 點, dB	6.705	18.7	-10.78	-10.51	-0.278
D 點, dB	12.09	11.28	-7.546	-2.564	22.79
E 點, dB	15.82	5.08	-13.81	0.4502	2.646
F 點, dB	16	13.12	-16.34	-1.376	-0.4563
G _z 點, dB	17.49	21.76	-2.295	3.749	26.27

H 點, dB	17.92	21.84	-17.5	-4.833	26.28
G _y 點, dB	-14.04	-13.08	-21.35	16.21	-8.581

表 4.33 第三模態濾除器，垂直敲擊 G_z 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB 差	59.844	41.33	70.84	29.96	34.03
B 點, dB 差	50.776	38.21	73.22	25.312	44.75
C 點, dB 差	52.125	38.14	72.5	28.12	55.708
D 點, dB 差	46.74	45.56	69.266	20.174	32.64
E 點, dB 差	43.01	51.76	75.53	17.1598	52.784
F 點, dB 差	42.83	43.72	78.06	18.986	55.8863
G _z 點, dB 差	41.34	35.08	64.015	13.861	29.16
H 點, dB 差	40.91	35	79.22	22.443	29.15
G _y 點, dB 差	72.87	69.92	83.07	1.4	64.011

表 4.34 第三模態濾除器，側向敲擊 G_y 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
--	------	------	------	------	------

A 點, dB 差	49.224	30.61	60.85	31.62	23.44
B 點, dB 差	40.156	27.49	63.23	26.972	34.16
C 點, dB 差	41.505	27.42	62.51	29.78	45.118
D 點, dB 差	36.12	34.84	59.276	21.834	22.05
E 點, dB 差	32.39	41.04	65.54	18.8198	42.194
F 點, dB 差	32.21	33	68.07	20.646	45.2963
G _z 點, dB 差	30.72	24.36	54.025	15.521	18.57
H 點, dB 差	30.29	24.28	69.23	24.103	18.56
G _y 點, dB 差	62.25	59.2	73.08	3.06	53.421

表 4.35 敲擊各點，第三模態感測與濾除器信號之 dB 差

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB 差	-3.967	-9.309	24.38	5.969	-16.58
B 點, dB 差	-7.4308	-7.89	33.9	4.577	-5.349
C 點, dB 差	-13.629	-16.11	25.45	1.17	-22.402
D 點, dB 差	-15.618	-8.352	26.306	0.264	-16.363
E 點, dB 差	-12.361	-4.6385	28.32	4.5588	-2.3692
F 點, dB 差	-12.668	-3.659	34.48	10.379	4.1633
G _z 點, dB	-20.021	-19.676	19.175	-8.733	-19.413

差					
H 點, dB 差	-23.689	-13.891	31.94	0.519	-17.219
G _y 點, dB 差	6.284	8.55	30.583	-0.42	6.699

表 4.36 垂直敲擊角落 (G_z)雷射量測第四模態感測器之共振頻率和 dB 值

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
頻率(Hz)	131.3	687.5	996.9	1575	1938
dB	58.25	56.57	61.18	23.23	55.09

表 4.37 側向敲擊角落 (G_y)雷射量測第四模態感測器之共振頻率和 dB 值

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
頻率(Hz)	131.3	687.5	996.9	1575	1938
dB	42.92	41.32	46.2	24.74	40.29

表 4.38 敲擊各點，第四模態感測器信號之 dB 值

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB	-7.303	12.64	0.5825	2.621	9.026
B 點, dB	-0.2291	15.82	5.199	3.204	-7.941
C 點, dB	0.984	15.88	6.573	6.71	-6.956
D 點, dB	5.151	10.7	8.51	8.285	10.76
E 點, dB	7.722	-30.79	9.293	5.06	8.274
F 點, dB	8.685	7.68	10.08	3.67	-0.7137

G_z 點, dB	-7.858	5.63	2.766	4.599	2.809
H 點, dB	13.31	17.54	-14.77	11.7	12.65
G_y 點, dB	-24.32	-6.695	-5.203	17.7	-1.636

表 4.39 第四模態感測器，垂直敲擊 G_z 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB 差	65.553	43.93	60.5975	20.609	46.064
B 點, dB 差	58.4791	40.75	55.981	20.026	63.031
C 點, dB 差	57.266	40.69	54.607	16.52	62.046
D 點, dB 差	53.099	45.87	52.67	14.945	44.33
E 點, dB 差	50.528	87.36	51.887	18.17	46.816
F 點, dB 差	49.565	48.89	51.1	19.56	55.8037
G_z 點, dB 差	66.108	50.94	58.414	18.631	52.281
H 點, dB 差	44.94	39.03	75.95	11.53	42.44
G_y 點, dB 差	82.57	63.265	66.383	5.53	56.726

表 4.40 第四模態感測器，側向敲擊 G_y 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態

A 點, dB 差	50.223	28.68	45.6175	22.119	31.264
B 點, dB 差	43.1491	25.5	41.001	21.536	48.231
C 點, dB 差	41.936	25.44	39.627	18.03	47.246
D 點, dB 差	37.769	30.62	37.69	16.455	29.53
E 點, dB 差	35.198	72.11	36.907	19.68	32.016
F 點, dB 差	34.235	33.64	36.12	21.07	41.0037
G _z 點, dB 差	50.778	35.69	43.434	20.141	37.481
H 點, dB 差	29.61	23.78	60.97	13.04	27.64
G _y 點, dB 差	67.24	48.015	51.403	7.04	41.926

表 4.41 垂直敲擊角落 (G_z)雷射量測第四模態濾除器之共振頻率和 dB 值

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
頻率(Hz)	131.3	687.5	1000	1575	1934
dB	58.41	56.78	63.55	22.8	57.64

表 4.42 側向敲擊角落 (G_y)雷射量測第四模態濾除器之共振頻率和 dB 值

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
頻率(Hz)	131.3	687.5	1000	1575	1934
dB	42.18	41.15	50.55	24.14	44.58

表 4.43 敲擊各點，第四模態感測器信號之 dB 值

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB	8.542	16.23	9.845	-4.615	25.35
B 點, dB	9.469	22.36	11.1	-8.602	3.874
C 點, dB	6.012	17.38	6.33	-11.82	-7.665
D 點, dB	5.711	8.423	5.771	-11.21	18.11
E 點, dB	7.956	-4.966	11.72	-11.45	9.37
F 點, dB	15.11	17.44	10.86	-86.14	7.656
G _z 點, dB	17.09	14.11	15.4	-3.676	11.82
H 點, dB	12.86	17.71	-12.9	-8.739	14.36
G _y 點, dB	7.697	7.318	5.801	13.35	4.339

表 4.44 第四模態濾除器，垂直敲擊 G_z 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB 差	49.868	40.55	53.705	27.415	32.29
B 點, dB 差	48.941	34.42	52.45	31.402	53.766
C 點, dB 差	52.398	39.4	57.22	34.62	65.305
D 點, dB 差	52.699	48.357	57.779	34.01	39.53
E 點, dB 差	50.454	61.746	51.83	34.25	48.27
F 點, dB 差	43.3	39.34	52.69	108.94	49.984
G _z 點, dB	41.32	42.67	48.15	26.476	45.82

差					
H 點, dB 差	45.55	39.07	76.45	31.539	43.28
G _y 點, dB 差	50.713	49.462	57.749	9.45	53.301

表 4.45 第四模態濾除器，側向敲擊 G_y 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB 差	33.638	24.92	40.705	28.755	19.23
B 點, dB 差	32.711	18.79	39.45	32.742	40.706
C 點, dB 差	36.168	23.77	44.22	35.96	52.245
D 點, dB 差	36.469	32.727	44.779	35.35	26.47
E 點, dB 差	34.224	46.116	38.83	35.59	35.21
F 點, dB 差	27.07	23.71	39.69	110.28	36.924
G _z 點, dB 差	25.09	27.04	35.15	27.816	32.76
H 點, dB 差	29.32	23.44	63.45	32.879	30.22
G _y 點, dB 差	34.483	33.832	44.749	10.79	40.241

表 4.46 敲擊各點，第四模態感測與濾除器信號之 dB 差

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB 差	-15.845	-3.59	-9.2625	7.236	-16.324
B 點, dB 差	-9.6981	-6.54	-5.901	11.806	-11.815
C 點, dB 差	-5.028	-1.5	0.243	18.53	0.709
D 點, dB 差	-0.56	2.277	2.739	19.495	-7.35
E 點, dB 差	-0.234	-25.824	-2.427	16.51	-1.096
F 點, dB 差	-6.425	-9.76	-0.78	89.81	-8.3697
G _z 點, dB 差	-24.948	-8.48	-12.634	8.275	-9.011
H 點, dB 差	0.45	-0.17	-1.87	20.439	-1.71
G _y 點, dB 差	-32.017	-14.013	-11.004	4.35	-5.975

表 4.47 垂直敲擊角落 (G_z)雷射量測第五模態感測器之共振頻率和 dB 值

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
頻率(Hz)	143.8	703.1	1034	1634	1944
dB	60.3	57.99	61.72	17.09	57.08

表 4.48 側向敲擊角落 (G_y)雷射量測第五模態感測器之共振頻率和 dB 值

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
頻率(Hz)	143.8	703.1	1034	1634	1944
dB	43.43	42.26	46.19	20.23	40.53

表 4.49 敲擊各點，第五模態感測器信號之 dB 值

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB	8.808	20.9	-1.098	3.818	52.27
B 點, dB	15.9	24.63	-4.456	-4.727	41.34
C 點, dB	17.44	24.51	-4.333	4.749	26.61
D 點, dB	22.96	17.23	-1.496	9.191	53.7
E 點, dB	24.49	-6.542	-0.6284	6.606	50.38
F 點, dB	26.47	21.66	0.5773	3.621	41.36
G _z 點, dB	27.95	27.59	1.016	8.34	56.44
H 點, dB	27.85	27.52	-10.47	5.704	56.91
G _y 點, dB	5.908	7.456	-15.44	19.59	41.11

表 4.50 第五模態感測器，垂直敲擊 G_z 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB 差	51.492	37.09	62.818	13.272	4.81
B 點, dB 差	44.4	33.36	66.176	21.817	15.74
C 點, dB 差	42.86	33.48	66.053	12.341	30.47
D 點, dB 差	37.34	40.76	63.216	7.899	3.38
E 點, dB 差	35.81	64.532	62.3484	10.484	6.7
F 點, dB 差	33.83	36.33	61.1427	13.469	15.72
G _z 點, dB 差	32.35	30.4	60.704	8.75	0.64

H 點, dB 差	32.45	30.47	72.19	11.386	0.17
G _y 點, dB 差	54.392	50.534	77.16	-2.5	15.97

表 4.51 第五模態感測器，側向敲擊 G_y 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB 差	34.622	21.36	47.288	16.412	-11.74
B 點, dB 差	27.53	17.63	50.646	24.957	-0.81
C 點, dB 差	25.99	17.75	50.523	15.481	13.92
D 點, dB 差	20.47	25.03	47.686	11.039	-13.17
E 點, dB 差	18.94	48.802	46.8184	13.624	-9.85
F 點, dB 差	16.96	20.6	45.6127	16.609	-0.83
G _z 點, dB 差	15.48	14.67	45.174	11.89	-15.91
H 點, dB 差	15.58	14.74	56.66	14.526	-16.38
G _y 點, dB 差	37.522	34.804	61.63	0.64	-0.58

表 4.52 垂直敲擊角落 (G_z) 雷射量測第五模態濾除器之共振頻率和 dB 值

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
--	------	------	------	------	------

頻率(Hz)	143.8	703.1	1041	1634	1947
dB	58.39	57.31	63.19	18.05	56.79

表 4.53 側向敲擊角落 (G_y) 雷射量測第五模態濾除器之共振頻率和 dB 值

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
頻率(Hz)	143.8	703.1	1041	1634	1947
dB	40.71	40.31	46.72	21.5	42.35

表 4.54 敲擊各點，第五模態濾除器信號之 dB 值

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB	15.64	23.7	5.131	3.508	2.997
B 點, dB	19.98	25.81	15.63	8.308	0.4809
C 點, dB	17.91	23.75	19.49	2.374	-12.9
D 點, dB	19.27	20.6	18.02	5.872	4.763
E 點, dB	26.57	11.03	18.29	14.26	3.779
F 點, dB	22.83	22.32	20.23	9.772	-11.68
G_z 點, dB	24.22	25.37	14.88	12.99	0.6915
H 點, dB	23.31	19.75	-4.679	9.087	-2.402
G_y 點, dB	19.15	13.79	14.76	32.53	-2.948

表 4.55 第五模態濾除器，垂直敲擊 G_z 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB 差	42.75	33.61	58.059	14.542	53.793

B 點, dB 差	38.41	31.5	47.56	9.742	56.3091
C 點, dB 差	40.48	33.56	43.7	15.676	69.69
D 點, dB 差	39.12	36.71	45.17	12.178	52.027
E 點, dB 差	31.82	46.28	44.9	3.79	53.011
F 點, dB 差	35.56	34.99	42.96	8.278	68.47
G _z 點, dB 差	34.17	31.94	48.31	5.06	56.0985
H 點, dB 差	35.08	37.56	67.869	8.963	59.192
G _y 點, dB 差	39.24	43.52	48.43	-14.48	59.738

表 4.56 第五模態濾除器，側向敲擊 G_y 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB 差	25.07	16.61	41.589	17.992	39.353
B 點, dB 差	20.73	14.5	31.09	13.192	41.8691
C 點, dB 差	22.8	16.56	27.23	19.126	55.25
D 點, dB 差	21.44	19.71	28.7	15.628	37.587
E 點, dB 差	14.14	29.28	28.43	7.24	38.571
F 點, dB 差	17.88	17.99	26.49	11.728	54.03

G_z 點, dB 差	16.49	14.94	31.84	8.51	41.6585
H 點, dB 差	17.4	20.56	51.399	12.413	44.752
G_y 點, dB 差	21.56	26.52	31.96	-11.03	45.298

表 4.57 敲擊各點，第五模態感測與濾除器信號之 dB 差

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB 差	-6.832	-2.8	-6.229	0.31	49.273
B 點, dB 差	-4.08	-1.18	-20.086	-13.035	40.8591
C 點, dB 差	-0.47	0.76	-23.823	2.375	39.51
D 點, dB 差	3.69	-3.37	-19.516	3.319	48.937
E 點, dB 差	-2.08	-17.572	-18.9184	-7.654	46.601
F 點, dB 差	3.64	-0.66	-19.6527	-6.151	53.04
G_z 點, dB 差	3.73	2.22	-13.864	-4.65	55.7485
H 點, dB 差	4.54	7.77	-5.791	-3.383	59.312
G_y 點, dB 差	-13.242	-6.334	-30.2	-12.94	44.058

表 4.58 垂直敲擊角落 (G_z) 雷射量測多功能第一、二和五模態濾除器之共振頻率
和 dB 值

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
--	------	------	------	------	------

頻率(Hz)	146.9	712.5	1041	1650	1966
dB	58.41	55.87	62.43	23.44	54.36

表 4.59 側向敲擊角落 (G_y) 雷射量測多功能第一、二和五模態濾除器之共振頻率
和 dB 值

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
頻率(Hz)	146.9	712.5	1041	1650	1966
dB	41.06	38.75	46.54	30.03	36.42

表 4.60 敲擊各點，第一模態濾除器信號之 dB 值

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB	-16.2	17.71	5.997	7.386	25.78
B 點, dB	-10.84	21.27	10.74	4.721	18.71
C 點, dB	-8.496	21.7	11.62	5.481	-5.867
D 點, dB	-7.609	17	14.86	6.862	27.67
E 點, dB	-1.93	-8.325	16.91	13.86	24.42
F 點, dB	-4.326	14.68	17.45	12.51	8.426
G_z 點, dB	1.29	22.31	18.03	2.621	26.73
H 點, dB	0.2828	23.71	-2.22	7.868	29.63
G_y 點, dB	-27.51	7.779	5.501	29.11	19.18

表 4.61 第一模態濾除器，垂直敲擊 G_z 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
--	------	------	------	------	------

A 點, dB 差	74.61	38.16	56.433	16.054	28.58
B 點, dB 差	69.25	34.6	51.69	18.719	35.65
C 點, dB 差	66.906	34.17	50.81	17.959	60.227
D 點, dB 差	66.019	38.87	47.57	16.578	26.69
E 點, dB 差	60.34	64.195	45.52	9.58	29.94
F 點, dB 差	62.736	41.19	44.98	10.93	45.934
G _z 點, dB 差	57.12	33.56	44.4	20.819	27.63
H 點, dB 差	58.1272	32.16	64.65	15.572	24.73
G _y 點, dB 差	85.92	48.091	56.929	-5.67	35.18

表 4.62 第一模態濾除器，側向敲擊 G_y 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB 差	57.26	21.04	40.543	22.644	10.64
B 點, dB 差	51.9	17.48	35.8	25.309	17.71
C 點, dB 差	49.556	17.05	34.92	24.549	42.287
D 點, dB 差	48.669	21.75	31.68	23.168	8.75
E 點, dB 差	42.99	47.075	29.63	16.17	12

F 點, dB 差	45.386	24.07	29.09	17.52	27.994
G _z 點, dB 差	39.77	16.44	28.51	27.409	9.69
H 點, dB 差	40.7772	15.04	48.76	22.162	6.79
G _y 點, dB 差	68.57	30.971	41.039	0.92	17.24

表 4.63 敲擊各點，第二模態濾除器信號之 dB 值

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB	12.67	7.374	8.549	8.591	39.72
B 點, dB	12.58	10.56	9.504	-7.655	24.95
C 點, dB	15.17	4.142	10.81	-4.033	-2.702
D 點, dB	18.29	4.314	13.67	5.666	40.88
E 點, dB	20.48	-8.943	15.21	-0.4213	37.58
F 點, dB	21.93	-0.778	16.21	3.519	0.916
G _z 點, dB	23.19	9.84	18.19	16.35	42.31
H 點, dB	22.72	12.11	2.205	12.73	42.33
G _y 點, dB	5.349	-12.86	3.791	18.77	23.64

表 4.64 第二模態濾除器，垂直敲擊 G_z 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB 差	45.74	48.496	53.881	14.849	14.64

B 點, dB 差	45.83	45.31	52.926	31.095	29.41
C 點, dB 差	43.24	51.728	51.62	27.473	57.062
D 點, dB 差	40.12	51.556	48.76	17.774	13.48
E 點, dB 差	37.93	64.813	47.22	23.8613	16.78
F 點, dB 差	36.48	56.648	46.22	19.921	53.444
G _z 點, dB 差	35.22	46.03	44.24	7.09	12.05
H 點, dB 差	35.69	43.76	60.225	10.71	12.03
G _y 點, dB 差	53.061	68.73	58.639	4.67	30.72

表 4.65 第二模態濾除器，側向敲擊 G_y 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB 差	28.39	31.376	37.991	21.439	-3.3
B 點, dB 差	28.48	28.19	37.036	37.685	11.47
C 點, dB 差	25.89	34.608	35.73	34.063	39.122
D 點, dB 差	22.77	34.436	32.87	24.364	-4.46
E 點, dB 差	20.58	47.693	31.33	30.4513	-1.16
F 點, dB 差	19.13	39.528	30.33	26.511	35.504

G_z 點, dB 差	17.87	28.91	28.35	13.68	-5.89
H 點, dB 差	18.34	26.64	44.335	17.3	-5.91
G_y 點, dB 差	35.711	51.61	42.749	11.26	12.78

表 4.66 敲擊各點，第五模態濾除器信號之 dB 值

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB	5.104	21.6	10.57	14.26	14.9
B 點, dB	13.28	25.88	15.62	14.18	3.242
C 點, dB	14.43	26.04	16.75	13.24	-12.33
D 點, dB	19.81	18.97	20.01	17.46	17.27
E 點, dB	21.78	11.09	21.19	19.7	9.004
F 點, dB	22.56	20.39	19.98	18.29	-2.119
G_z 點, dB	33.01	32.46	25.27	13.42	13.65
H 點, dB	23.73	27.84	-6.067	21.67	12.33
G_y 點, dB	19.05	17.08	11.53	36.04	4.006

表 4.67 第五模態濾除器，垂直敲擊 G_z 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB 差	53.306	34.27	51.86	9.18	39.46
B 點, dB 差	45.13	29.99	46.81	9.26	51.118

C 點, dB 差	43.98	29.83	45.68	10.2	66.69
D 點, dB 差	38.6	36.9	42.42	5.98	37.09
E 點, dB 差	36.63	44.78	41.24	3.74	45.356
F 點, dB 差	35.85	35.48	42.45	5.15	56.479
G_z 點, dB 差	25.4	23.41	37.16	10.02	40.71
H 點, dB 差	34.68	28.03	68.497	1.77	42.03
G_y 點, dB 差	39.36	38.79	50.9	-12.6	50.354

表 4.68 第五模態濾除器，側向敲擊 G_y 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB 差	35.956	17.15	35.97	15.77	21.52
B 點, dB 差	27.78	12.87	30.92	15.85	33.178
C 點, dB 差	26.63	12.71	29.79	16.79	48.75
D 點, dB 差	21.25	19.78	26.53	12.57	19.15
E 點, dB 差	19.28	27.66	25.35	10.33	27.416
F 點, dB 差	18.5	18.36	26.56	11.74	38.539
G_z 點, dB	8.05	6.29	21.27	16.61	22.77

差					
H 點, dB 差	17.33	10.91	52.607	8.36	24.09
G _y 點, dB 差	22.01	21.67	35.01	-6.01	32.414

表 4.69 垂直敲擊角落 (G_z) 雷射量測多功能第三模態感測與濾除器之共振頻率和 dB 值

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
頻率(Hz)	140.6	700	1041	1628	1944
dB	58.36	55.9	62.15	23.5	53.7

表 4.70 側向敲擊角落 (G_y) 雷射量測多功能第三模態感測與濾除器之共振頻率和 dB 值

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
頻率(Hz)	140.6	700	1041	1628	1944
dB	47.5	45.82	52.49	21.83	44.74

表 4.71 敲擊各點，第三模態感測器信號之 dB 值

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB	-7.471	4.982	6.136	-23	21.98
B 點, dB	10.86	24.09	28.38	16.16	16.26
C 點, dB	15.05	21.22	28.87	21.64	18.62
D 點, dB	2.045	-1.176	11.94	2.079	16.56

E 點, dB	9.383	8.328	17.43	9.477	5.509
F 點, dB	17.72	15.36	23.93	13.76	16.95
G _z 點, dB	1.21	-7.087	14.3	5.134	9.205
H 點, dB	-2.685	7.3	-0.5901	-5.258	10.09
G _y 點, dB	-25.88	-5.01	8.626	25.78	7.805

表 4.72 第三模態感測器，垂直敲擊G_z點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB 差	65.831	50.918	56.014	46.5	31.72
B 點, dB 差	47.5	31.81	33.77	7.34	37.44
C 點, dB 差	43.31	34.68	33.28	1.86	35.08
D 點, dB 差	56.315	57.076	50.21	21.421	37.14
E 點, dB 差	48.977	47.572	44.72	14.023	48.191
F 點, dB 差	40.64	40.54	38.22	9.74	36.75
G _z 點, dB 差	57.15	62.987	47.85	18.366	44.495
H 點, dB 差	61.045	48.6	62.7401	28.758	43.61
G _y 點, dB 差	84.24	60.91	53.524	-2.28	45.895

表 4.73 第三模態感測器，側向敲擊G_y點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB 差	54.971	40.838	46.354	44.83	22.76
B 點, dB 差	36.64	21.73	24.11	5.67	28.48
C 點, dB 差	32.45	24.6	23.62	0.19	26.12
D 點, dB 差	45.455	46.996	40.55	19.751	28.18
E 點, dB 差	38.117	37.492	35.06	12.353	39.231
F 點, dB 差	29.78	30.46	28.56	8.07	27.79
G _z 點, dB 差	46.29	52.907	38.19	16.696	35.535
H 點, dB 差	50.185	38.52	53.0801	27.088	34.65
G _y 點, dB 差	73.38	50.83	43.864	-3.95	36.935

表 4.74 敲擊各點，第三模態濾除器信號之 dB 值

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB	2.5	7.538	-19.9	0.08997	18.69
B 點, dB	1.444	11.89	-14.43	0.5843	5.166
C 點, dB	16.19	16.47	-12.71	7.466	11.24
D 點, dB	14.24	7.127	-10.7	9.838	20.6
E 點, dB	22.94	-2.77	-8.482	11.62	35.33
F 點, dB	4.465	1.611	-17.21	7.042	2.705

G_z 點, dB	7.656	5.339	-14.39	8.072	13.44
H 點, dB	-5.036	10.48	-14.7	6.777	22.56
G_y 點, dB	7.85	2.993	-25.23	27.53	28.07

表 4.75 第三模態濾除器，垂直敲擊 G_z 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB 差	55.86	48.362	82.05	23.41003	35.01
B 點, dB 差	56.916	44.01	76.58	22.9157	48.534
C 點, dB 差	42.17	39.43	74.86	16.034	42.46
D 點, dB 差	44.12	48.773	72.85	13.662	33.1
E 點, dB 差	35.42	58.67	70.632	11.88	18.37
F 點, dB 差	53.895	54.289	79.36	16.458	50.995
G_z 點, dB 差	50.704	50.561	76.54	15.428	40.26
H 點, dB 差	63.396	45.42	76.85	16.723	31.14
G_y 點, dB 差	50.51	52.907	87.38	-4.03	25.63

表 4.76 第三模態濾除器，側向敲擊 G_y 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態

A 點, dB 差	45	38.282	72.39	21.74003	26.05
B 點, dB 差	46.056	33.93	66.92	21.2457	39.574
C 點, dB 差	31.31	29.35	65.2	14.364	33.5
D 點, dB 差	33.26	38.693	63.19	11.992	24.14
E 點, dB 差	24.56	48.59	60.972	10.21	9.41
F 點, dB 差	43.035	44.209	69.7	14.788	42.035
G _z 點, dB 差	39.844	40.481	66.88	13.758	31.3
H 點, dB 差	52.536	35.34	67.19	15.053	22.18
G _y 點, dB 差	39.65	42.827	77.72	-5.7	16.67

表 4.77 敲擊各點，第三模態感測與濾除器信號之 dB 差

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB 差	-9.971	-2.556	26.036	-23.09	3.29
B 點, dB 差	9.416	12.2	42.81	15.5757	11.094
C 點, dB 差	-1.14	4.75	41.58	14.174	7.38
D 點, dB 差	-12.195	-8.303	22.64	-7.759	-4.04
E 點, dB 差	-13.557	11.098	25.912	-2.143	-29.821
F 點, dB 差	13.255	13.749	41.14	6.718	14.245
G _z 點, dB	-6.446	-12.426	28.69	-2.938	-4.235

差					
H 點, dB 差	2.351	-3.18	14.1099	-12.035	-12.47
G _y 點, dB 差	-33.73	-8.003	33.856	-1.75	-20.265

表 4.78 垂直敲擊角落 (G_z) 雷射量測多功能第四模態感測與濾除器之共振頻率和 dB 值

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
頻率(Hz)	137.5	690.6	1003	1619	1881
dB	71.37	69.55	78.29	31.52	66.91

表 4.79 側向敲擊角落 (G_y) 雷射量測多功能第四模態感測與濾除器之共振頻率和 dB 值

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
頻率(Hz)	137.5	690.6	1003	1619	1881
dB	53.71	51.97	60.64	31.94	54.72

表 4.80 敲擊各點，第四模態感測器信號之 dB 值

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB	-6.621	-7.776	-2.727	10.71	14.99
B 點, dB	18.63	8.808	19.52	20.53	18.48
C 點, dB	9.294	-3.393	15.18	11.99	11.14
D 點, dB	4.796	-11.8	3.717	7.976	14.2

E 點, dB	12.64	-8.953	17.76	14.25	18.38
F 點, dB	9.269	-12.69	14.69	14.78	18.38
G _z 點, dB	-0.4585	-7.499	-10.43	9.934	8.571
H 點, dB	-0.6243	-7.816	-16.4	3.52	5.515
G _y 點, dB	-15.29	-5.852	-13.8	17.25	2.821

表 4. 81 第四模態感測器，垂直敲擊 G_z 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB 差	77.991	77.326	81.017	20.81	51.92
B 點, dB 差	52.74	60.742	58.77	10.99	48.43
C 點, dB 差	62.076	72.943	63.11	19.53	55.77
D 點, dB 差	66.574	81.35	74.573	23.544	52.71
E 點, dB 差	58.73	78.503	60.53	17.27	48.53
F 點, dB 差	62.101	82.24	63.6	16.74	48.53
G _z 點, dB 差	71.8285	77.049	88.72	21.586	58.339
H 點, dB 差	71.9943	77.366	94.69	28	61.395
G _y 點, dB 差	86.66	75.402	92.09	14.27	64.089

表 4. 82 第四模態感測器，側向敲擊 G_y 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB 差	60.331	59.746	63.367	21.23	39.73
B 點, dB 差	35.08	43.162	41.12	11.41	36.24
C 點, dB 差	44.416	55.363	45.46	19.95	43.58
D 點, dB 差	48.914	63.77	56.923	23.964	40.52
E 點, dB 差	41.07	60.923	42.88	17.69	36.34
F 點, dB 差	44.441	64.66	45.95	17.16	36.34
G _z 點, dB 差	54.1685	59.469	71.07	22.006	46.149
H 點, dB 差	54.3343	59.786	77.04	28.42	49.205
G _y 點, dB 差	69	57.822	74.44	14.69	51.899

表 4.83 敲擊各點，第四模態濾除器信號之 dB 值

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB	-0.07669	16.34	-0.09143	-11.61	21.81
B 點, dB	7.484	20.72	4.417	-25.09	16.88
C 點, dB	9.024	21.22	5.202	-19.6	9.313
D 點, dB	15.73	13.92	10.29	-10.14	24.69
E 點, dB	17.16	4.665	11.24	-13.83	19.54

F 點, dB	18.46	15.74	11.28	-10.61	-5.749
G _Z 點, dB	19.9	22.91	12.16	-9.596	25.64
H 點, dB	19.46	22.54	-12.64	-10.41	25.14
G _y 點, dB	3.675	8.026	-4.028	6.053	14.68

表 4.84 第四模態濾除器，垂直敲擊 G_Z 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB 差	71.44669	53.21	78.38143	43.13	45.1
B 點, dB 差	63.886	48.83	73.873	56.61	50.03
C 點, dB 差	62.346	48.33	73.088	51.12	57.597
D 點, dB 差	55.64	55.63	68	41.66	42.22
E 點, dB 差	54.21	64.885	67.05	45.35	47.37
F 點, dB 差	52.91	53.81	67.01	42.13	72.659
G _Z 點, dB 差	51.47	46.64	66.13	41.116	41.27
H 點, dB 差	51.91	47.01	90.93	41.93	41.77
G _y 點, dB 差	67.695	61.524	82.318	25.467	52.23

表 4.85 第四模態濾除器，側向敲擊 G_y 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB 差	53.78669	35.63	60.73143	43.55	32.91
B 點, dB 差	46.226	31.25	56.223	57.03	37.84
C 點, dB 差	44.686	30.75	55.438	51.54	45.407
D 點, dB 差	37.98	38.05	50.35	42.08	30.03
E 點, dB 差	36.55	47.305	49.4	45.77	35.18
F 點, dB 差	35.25	36.23	49.36	42.55	60.469
G_z 點, dB 差	33.81	29.06	48.48	41.536	29.08
H 點, dB 差	34.25	29.43	73.28	42.35	29.58
G_y 點, dB 差	50.035	43.944	64.668	25.887	40.04

表 4.86 敲擊各點，第四模態感測與濾除器信號之 dB 差

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB 差	-6.54431	-24.116	-2.63557	22.32	-6.82
B 點, dB 差	11.146	-11.912	15.103	45.62	1.6
C 點, dB 差	0.27	-24.613	9.978	31.59	1.827
D 點, dB 差	-10.934	-25.72	-6.573	18.116	-10.49

E 點, dB 差	-4.52	-13.618	6.52	28.08	-1.16
F 點, dB 差	-9.191	-28.43	3.41	25.39	24.129
G _z 點, dB 差	-20.3585	-30.409	-22.59	19.53	-17.069
H 點, dB 差	-20.0843	-30.356	-3.76	13.93	-19.625
G _y 點, dB 差	-18.965	-13.878	-9.772	11.197	-11.859

表 4.87 垂直敲擊角落 (G_z)雷射量測多功能第五模態感測與濾除器之共振頻率和

dB 值

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
頻率(Hz)	146.9	712.5	1041	1653	1966
dB	58.89	56.65	63.28	19.56	56

表 4.88 側向敲擊角落 (G_y)雷射量測多功能第五模態感測與濾除器之共振頻率和

dB 值

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
頻率(Hz)	146.9	712.5	1041	1653	1966
dB	41.32	40.53	48.75	29.83	42.5

表 4.89 敲擊各點，第五模態感測器信號之 dB 值

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB	-6.599	18.37	7.022	7.218	31.7

B 點, dB	13.19	25.95	15.55	11	31.78
C 點, dB	-1.17	21.14	11.57	9.622	15.09
D 點, dB	5.507	17.19	14.97	10.17	32.33
E 點, dB	4.806	-3.244	16.19	14.06	24.2
F 點, dB	-0.3307	21.52	11.59	5.725	13.63
G _z 點, dB	5.834	12.43	10.06	11.2	26.76
H 點, dB	2.086	9.993	-10.07	11.92	29.78
G _y 點, dB	2.674	4.972	4.19	22.34	33.54

表 4.90 第五模態感測器，垂直敲擊 G_z 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB 差	65.489	38.28	56.258	12.342	24.3
B 點, dB 差	45.7	30.7	47.73	8.56	24.22
C 點, dB 差	60.06	35.51	51.71	9.938	40.91
D 點, dB 差	53.383	39.46	48.31	9.39	23.67
E 點, dB 差	54.084	59.894	47.09	5.5	31.8
F 點, dB 差	59.2207	35.13	51.69	13.835	42.37
G _z 點, dB 差	53.056	44.22	53.22	8.36	29.24
H 點, dB 差	56.804	46.657	73.35	7.64	26.22

G_y 點, dB 差	56.216	51.678	59.09	-2.78	22.46
------------------	--------	--------	-------	-------	-------

表 4.91 第五模態感測器，側向敲擊 G_y 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB 差	47.919	22.16	41.728	22.612	10.8
B 點, dB 差	28.13	14.58	33.2	18.83	10.72
C 點, dB 差	42.49	19.39	37.18	20.208	27.41
D 點, dB 差	35.813	23.34	33.78	19.66	10.17
E 點, dB 差	36.514	43.774	32.56	15.77	18.3
F 點, dB 差	41.6507	19.01	37.16	24.105	28.87
G_z 點, dB 差	35.486	28.1	38.69	18.63	15.74
H 點, dB 差	39.234	30.537	58.82	17.91	12.72
G_y 點, dB 差	38.646	35.558	44.56	7.49	8.96

表 4.92 敲擊各點，第五模態濾除器信號之 dB 值

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB	5.515	14.85	16.84	9.71	7.781

B 點, dB	33.69	35.25	16.85	5.763	14.26
C 點, dB	19.48	28.05	15.08	31.34	9.888
D 點, dB	0.3512	21.67	11.86	5.595	-3.807
E 點, dB	-4.944	1.505	3.099	-7.216	27.78
F 點, dB	26.54	22.66	9.531	21.68	10.33
G _z 點, dB	14.45	26.08	16.63	14.37	-10.65
H 點, dB	11.44	15.64	-9.861	15.76	5.571
G _y 點, dB	16.36	24.24	11.94	30.64	8.05

表 4.93 第五模態濾除器，垂直敲擊 G_z 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB 差	53.375	41.8	46.44	9.85	48.219
B 點, dB 差	25.2	21.4	46.43	13.797	41.74
C 點, dB 差	39.41	28.6	48.2	-11.78	46.112
D 點, dB 差	-88.01	-655.85	-977.72	-1633.44	-1910
E 點, dB 差	63.834	55.145	60.181	26.776	28.22
F 點, dB 差	32.35	33.99	53.749	-2.12	45.67
G _z 點, dB 差	44.44	30.57	46.65	5.19	66.65
H 點, dB 差	47.45	41.01	73.141	3.8	50.429
G _y 點, dB	42.53	32.41	51.34	-11.08	47.95

差					
---	--	--	--	--	--

表 4.94 第五模態濾除器，側向敲擊 G_y 點雷射與敲擊各點感測器信號之 dB 差

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB 差	35.805	25.68	31.91	20.12	34.719
B 點, dB 差	7.63	5.28	31.9	24.067	28.24
C 點, dB 差	21.84	12.48	33.67	-1.51	32.612
D 點, dB 差	-105.58	-671.97	-992.25	-1623.17	-1923.5
E 點, dB 差	46.264	39.025	45.651	37.046	14.72
F 點, dB 差	14.78	17.87	39.219	8.15	32.17
G_z 點, dB 差	26.87	14.45	32.12	15.46	53.15
H 點, dB 差	29.88	24.89	58.611	14.07	36.929
G_y 點, dB 差	24.96	16.29	36.81	-0.81	34.45

表 4.95 敲擊各點，第五模態感測與濾除器信號之 dB 差

	第一模態	第二模態	第三模態	第四模態	第五模態
A 點, dB 差	-12.114	3.52	-9.818	-2.492	23.919
B 點, dB 差	-20.5	-9.3	-1.3	5.237	17.52

C 點, dB 差	-20.65	-6.91	-3.51	-21.718	5.202
D 點, dB 差	5.1558	-4.48	3.11	4.575	36.137
E 點, dB 差	9.75	-4.749	13.091	21.276	-3.58
F 點, dB 差	-26.8707	-1.14	2.059	-15.955	3.3
G _z 點, dB 差	-8.616	-13.65	-6.57	-3.17	37.41
H 點, dB 差	-9.354	-5.647	-0.209	-3.84	24.209
G _y 點, dB 差	-13.686	-19.268	-7.75	-8.3	25.49



附圖

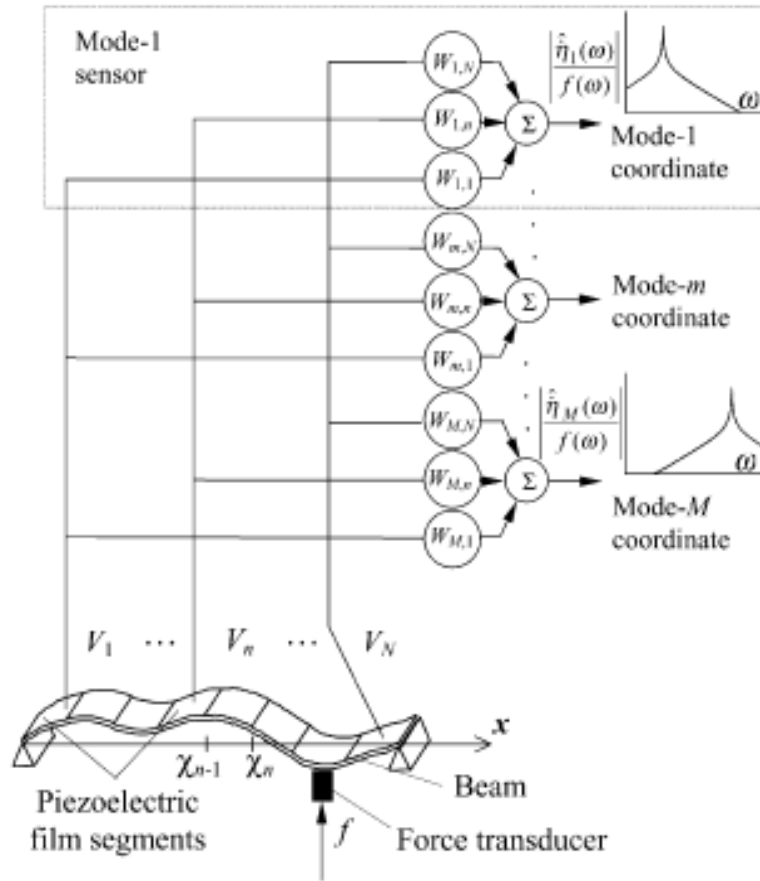
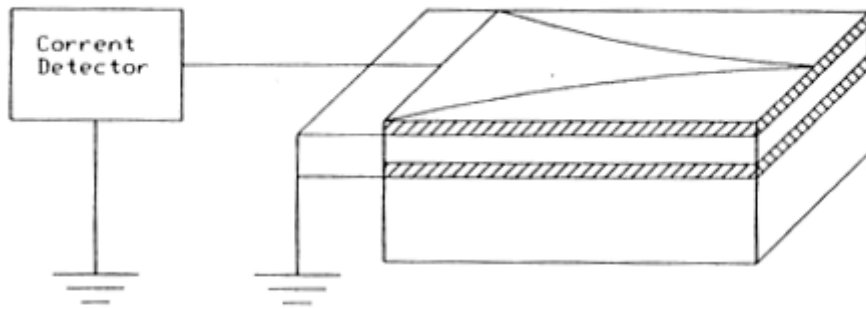


Fig. 5. Spatial filters as modal sensors.

圖 1.1 信號處理感測不同模態



註：上電極為完整鋪滿，但是中間有兩條線無電極，可將電極分隔成三塊，互不相通。中間一塊為訊號量測用，經由一個輸入阻抗為零的電流量測器量測信號。而其餘兩塊電極直接接地。

圖 2.1 使用切割線設計多個感測電極



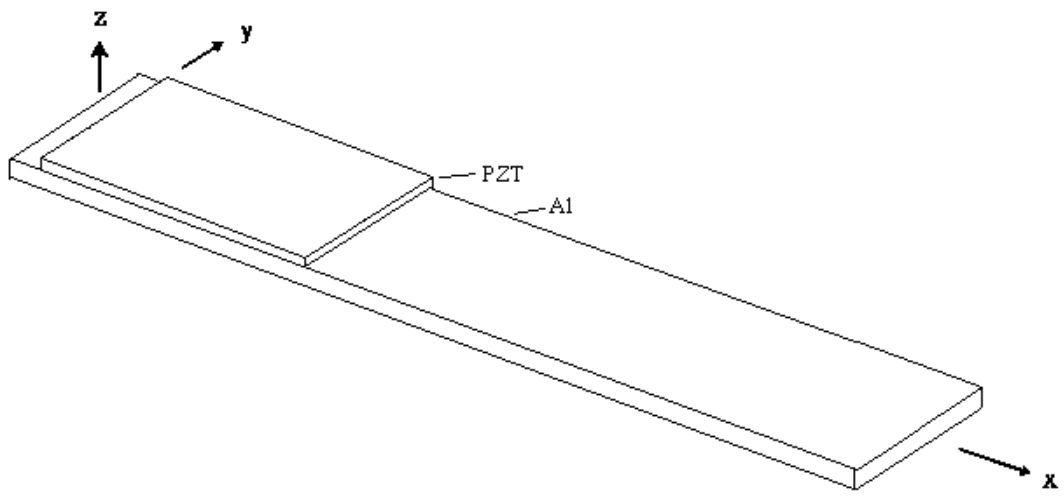


圖 3.1 壓電複合結構示意與座標系統

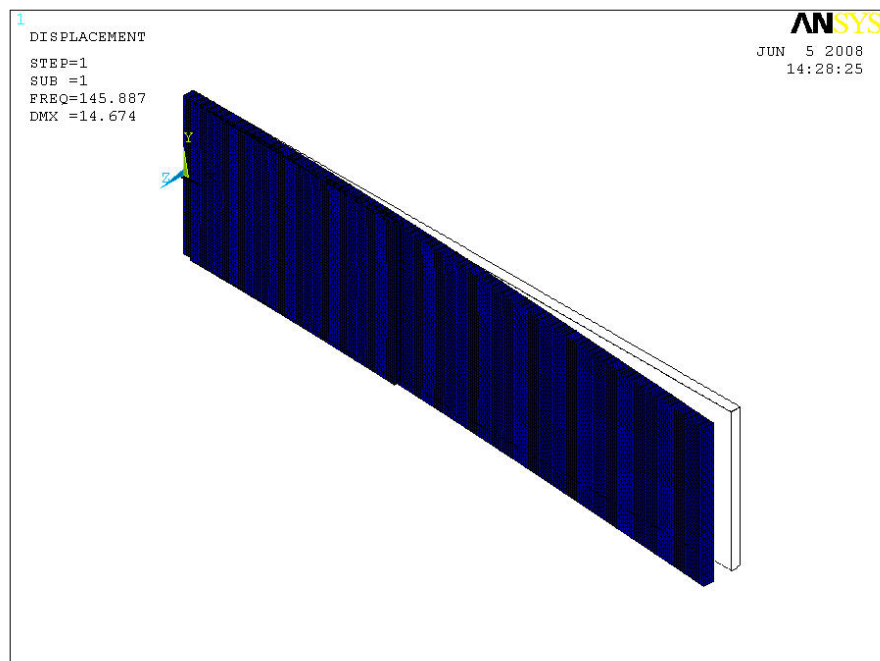


圖 3.2 壓電結構第一位移模態

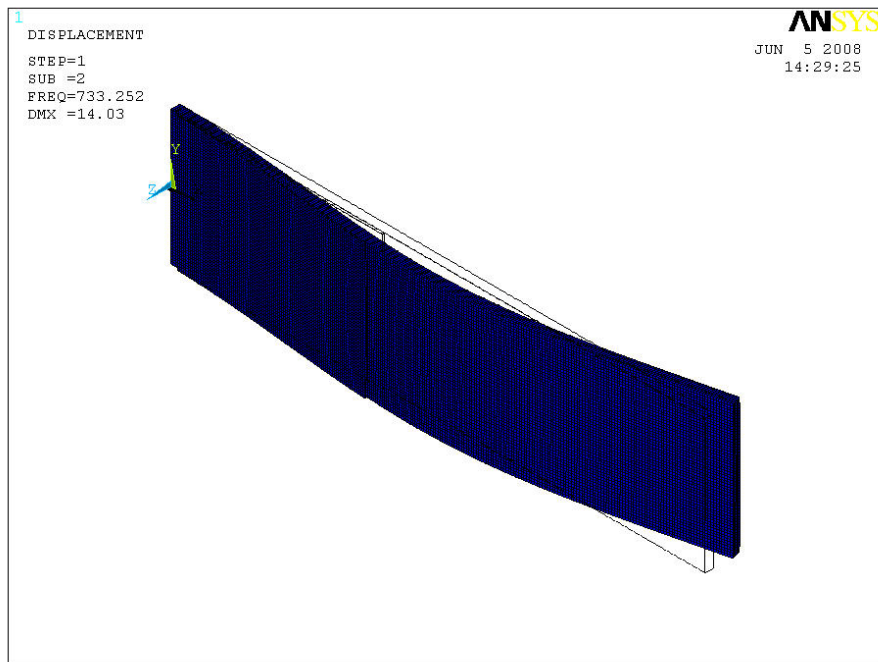


圖 3.3 壓電結構第二位移模態

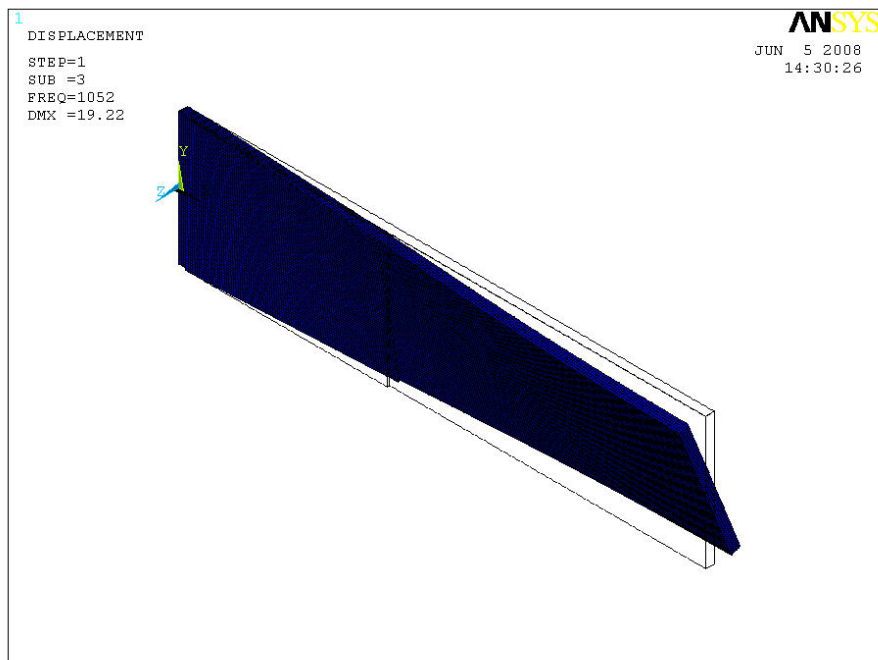


圖 3.4 壓電結構第三位移模態

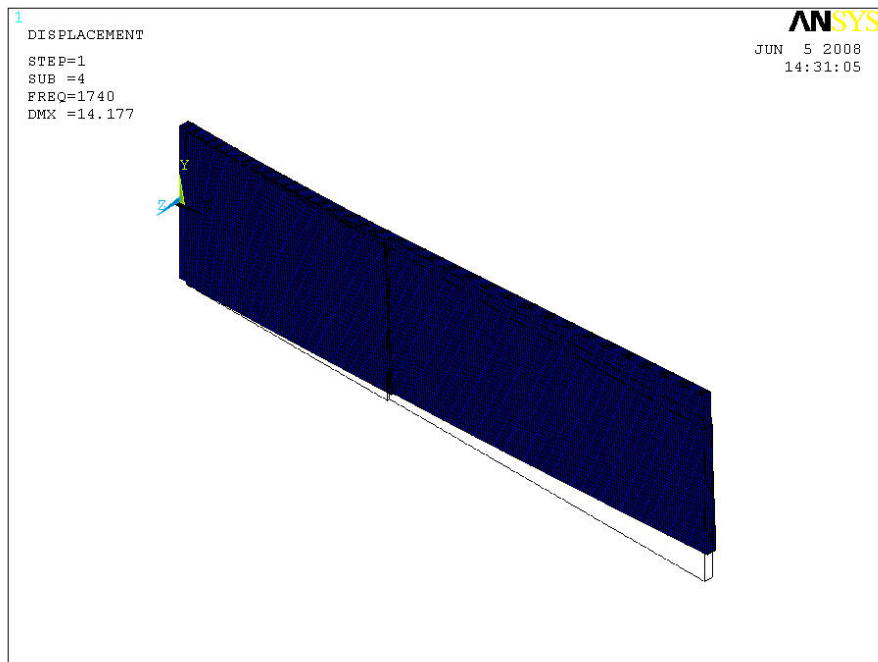


圖 3.5 壓電結構第四位移模態

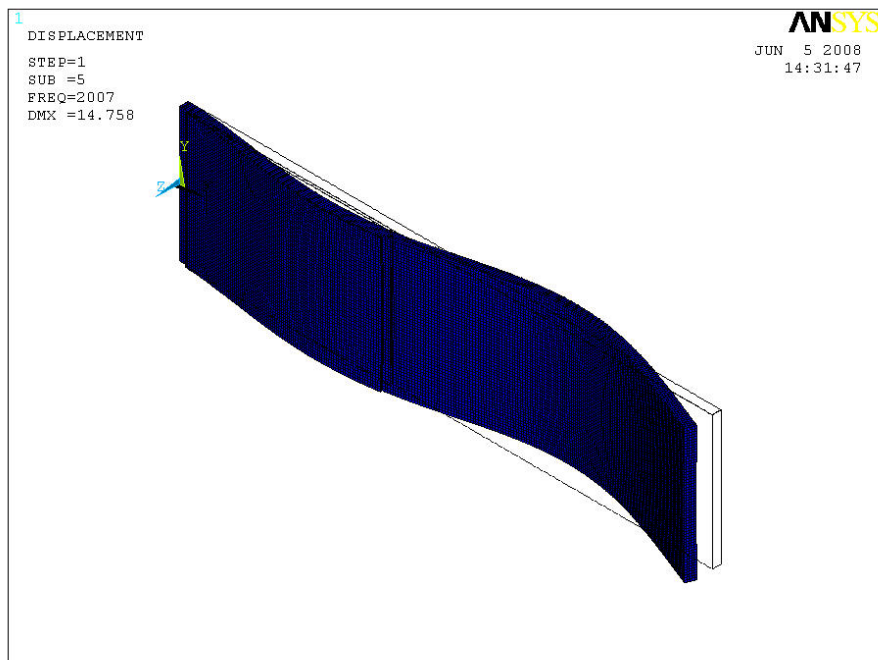


圖 3.6 壓電結構第五位移模態

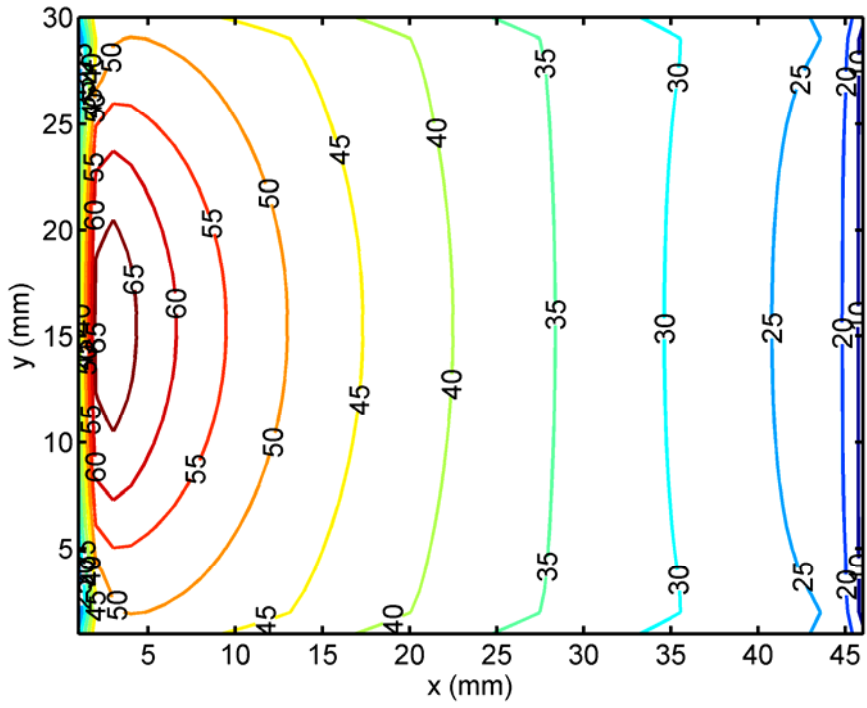


圖 3.7 第一模態電位移 z 分量

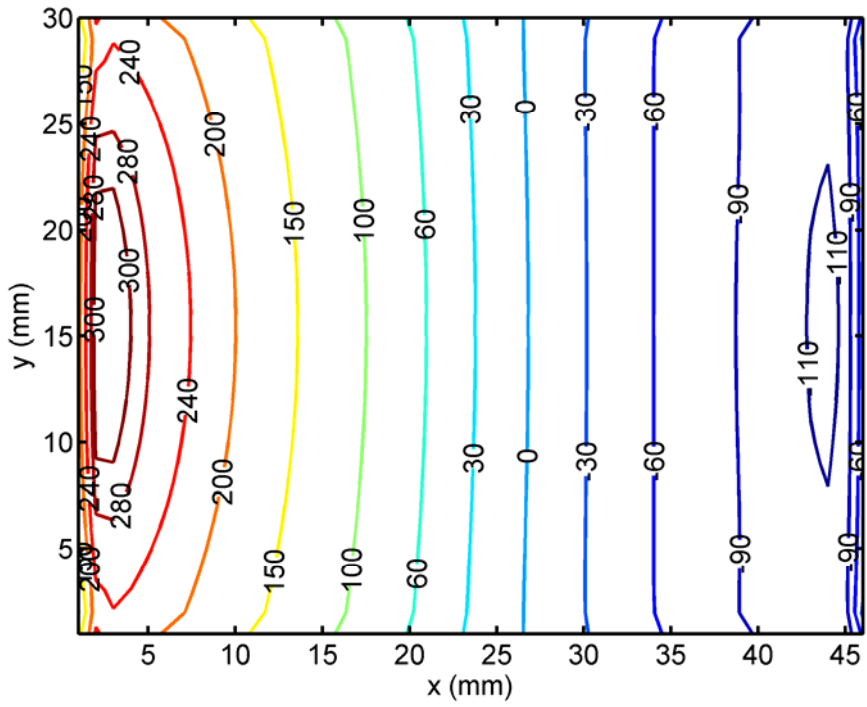


圖 3.8 第二模態電位移 z 分量

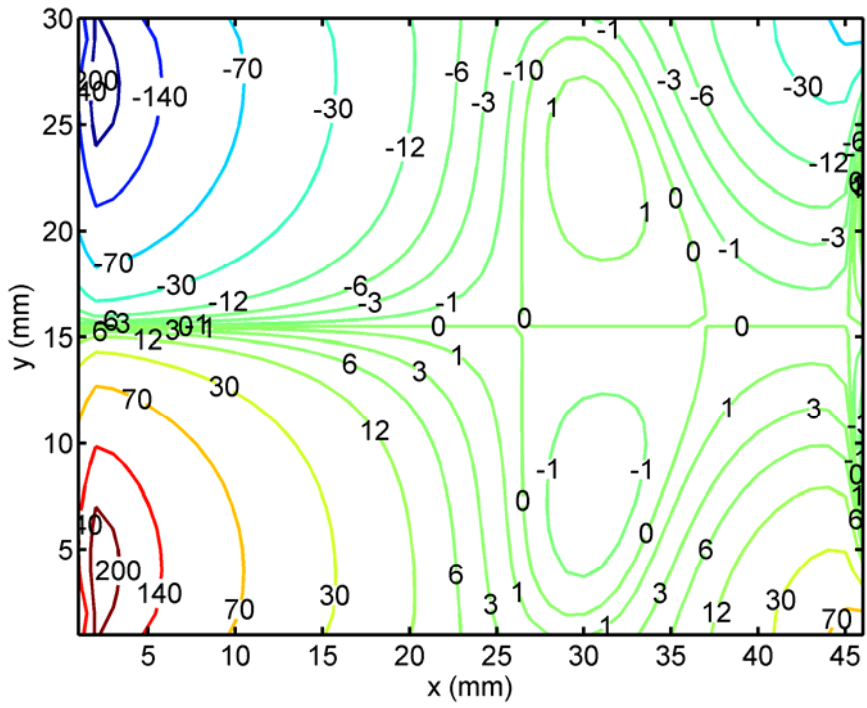


圖 3.9 第三模態電位移 z 分量

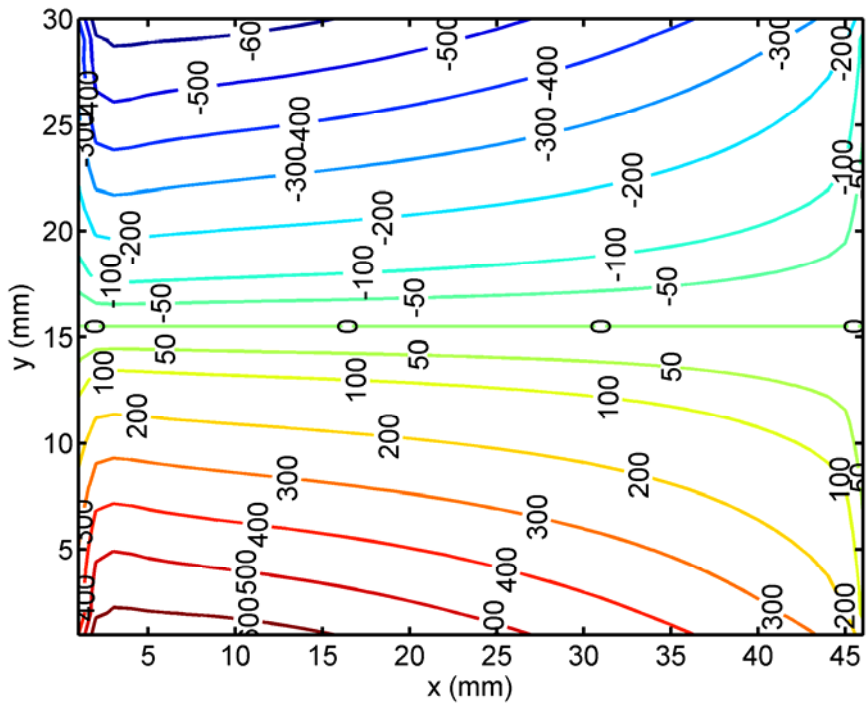


圖 3.10 第四模態電位移 z 分量

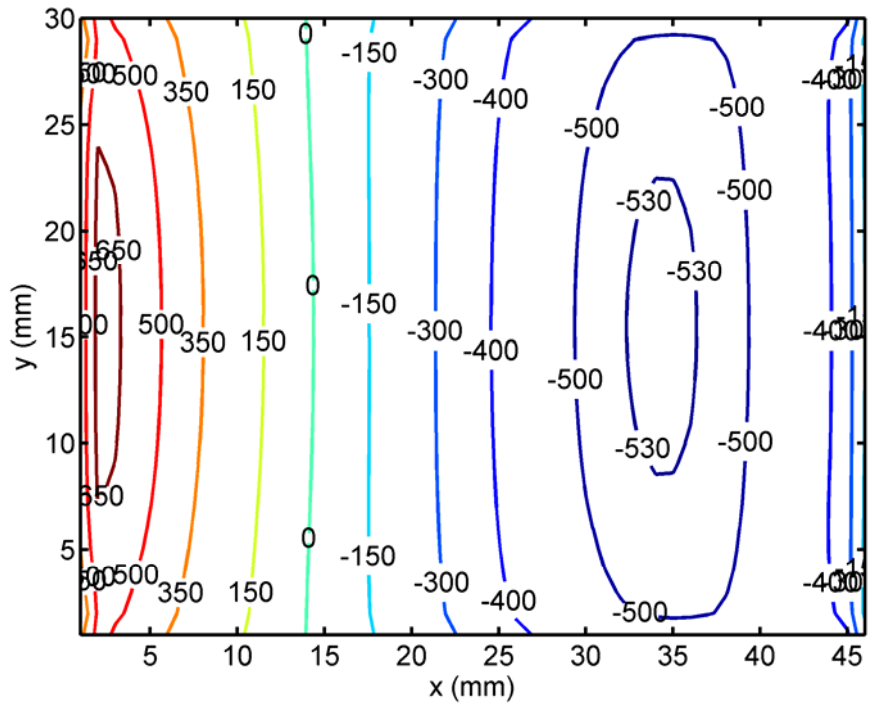


圖 3.11 第五模態電位移 z 分量

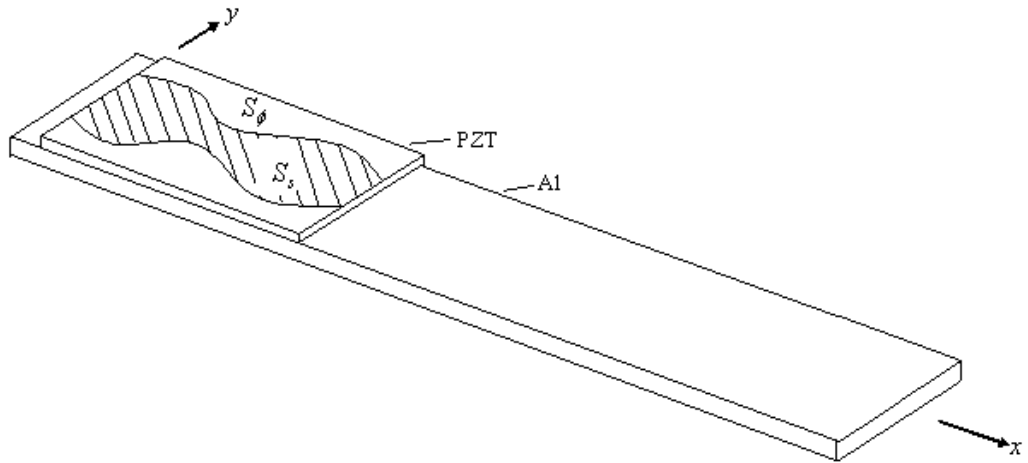


圖 3.12 感測電極形狀設計

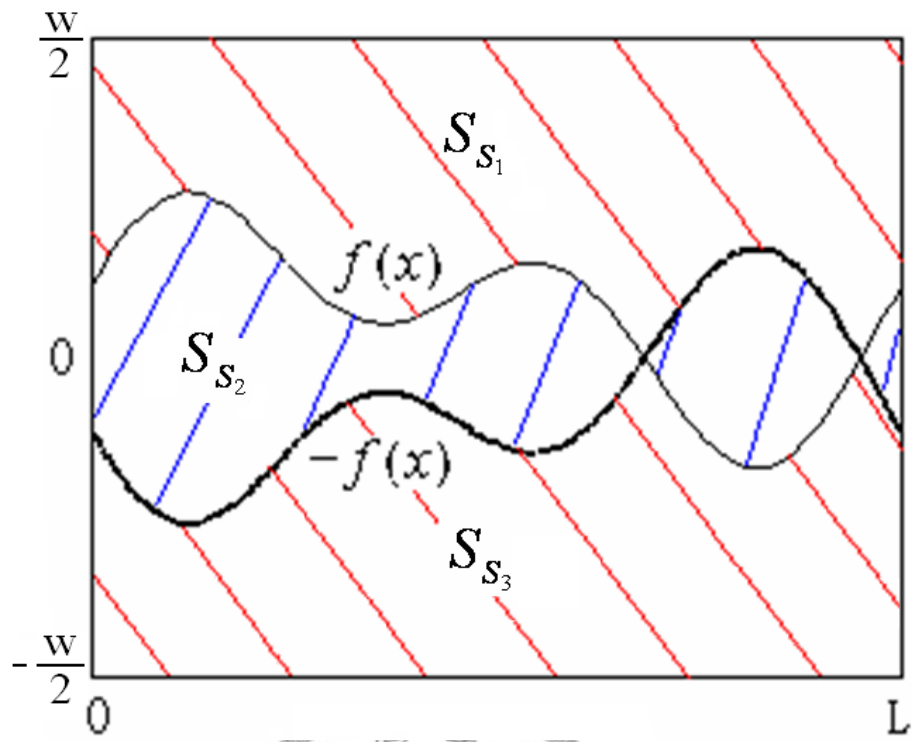


圖 3.13 A 款電極

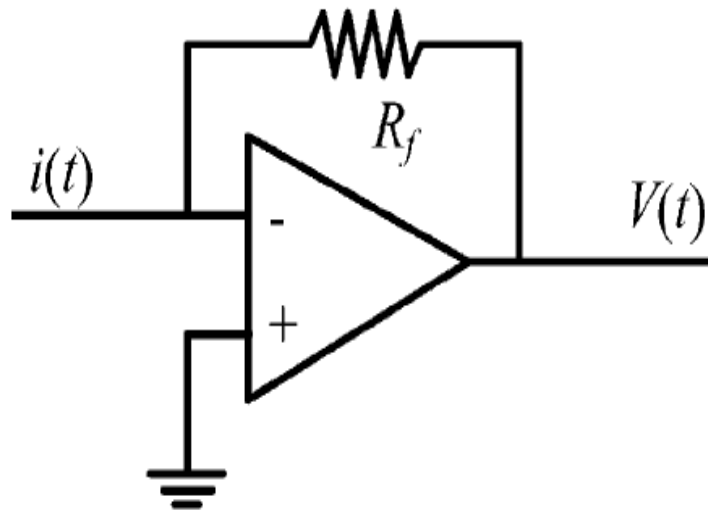


圖 3.14 跨阻抗放大器

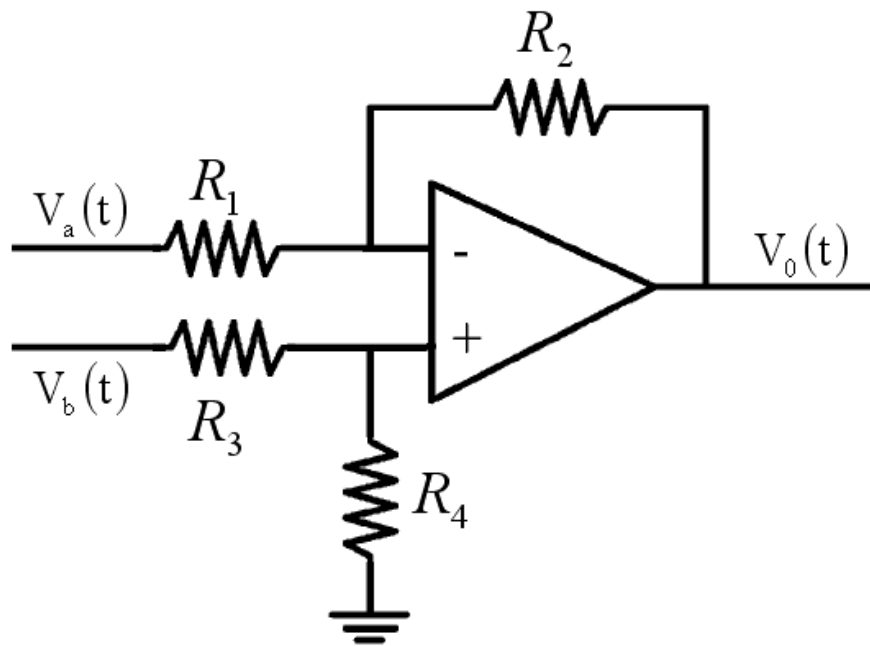


圖 3.15 差動放大器

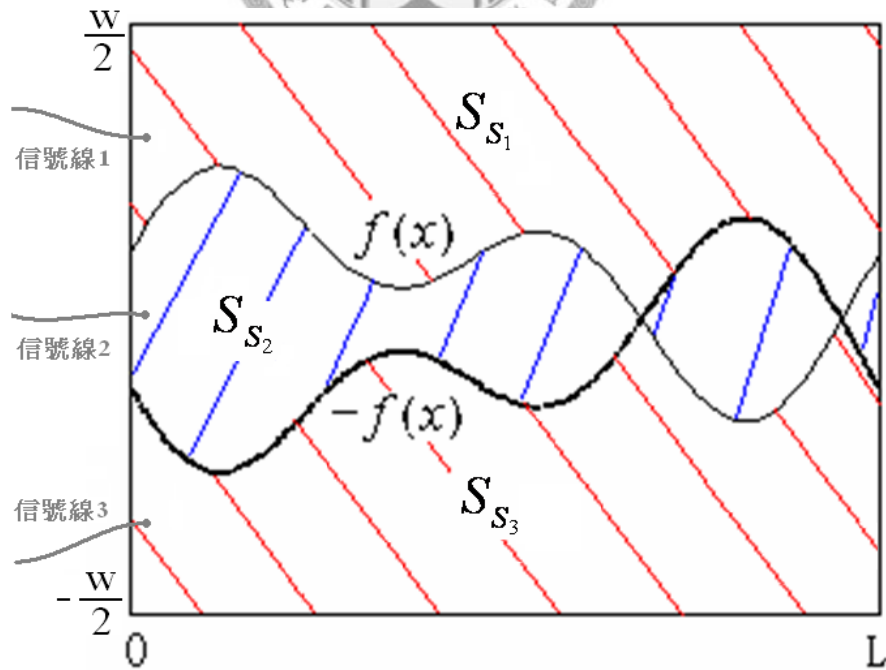


圖 3.16 連接信號線示意圖

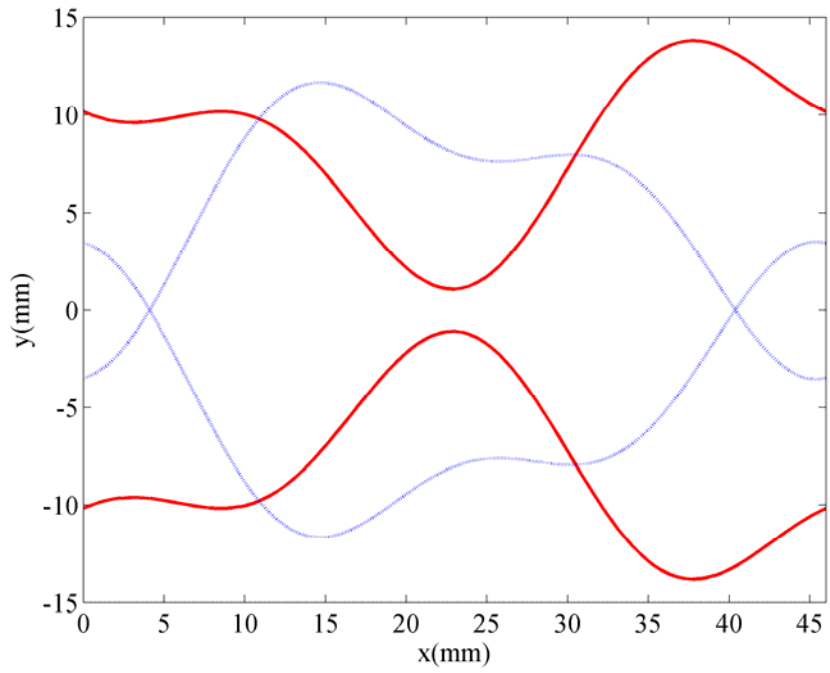


圖 3.17 第一模態感測之初始與最佳化電極邊界(藍色虛線為初始邊界,紅色實線為最佳邊界)

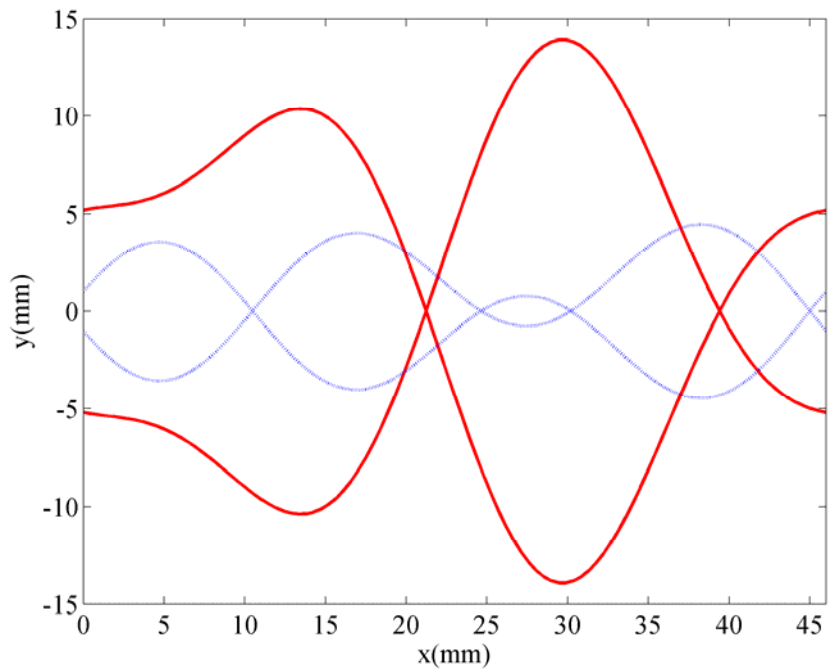


圖 3.18 第二模態感測之初始與最佳化電極邊界(藍色虛線為初始邊界,紅色實線為最佳邊界)

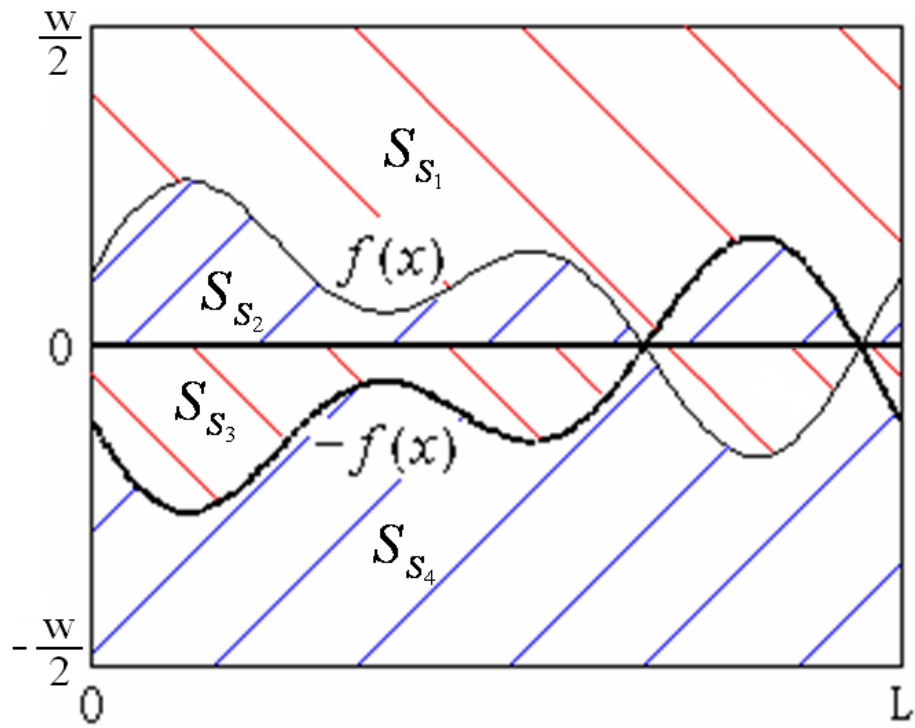


圖 3.19 B 款電極

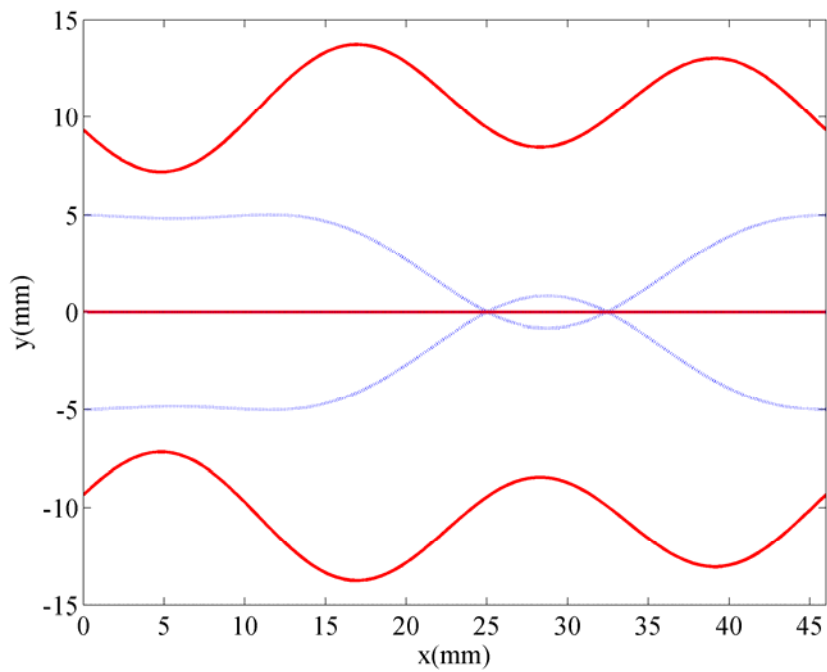


圖 3.20 第三模態感測之初始與最佳化電極邊界(藍色虛線為初始邊界,紅色實線為最佳邊界)

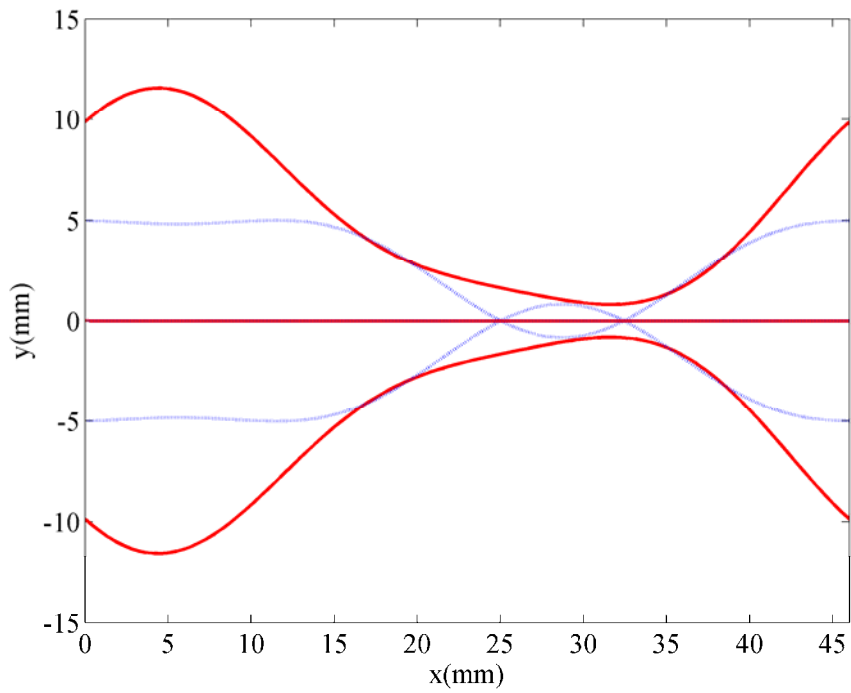


圖 3.21 第四模態感測之初始與最佳化電極邊界(藍色虛線為初始邊界,紅色實線為最佳邊界)

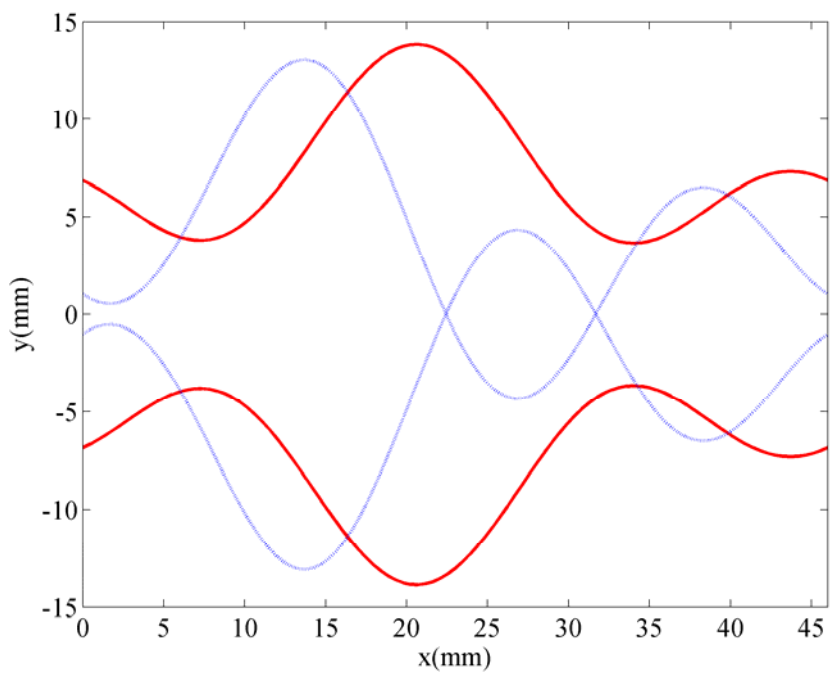


圖 3.22 第五模態感測之初始與最佳化電極邊界(藍色虛線為初始邊界,紅色實線為最佳邊界)

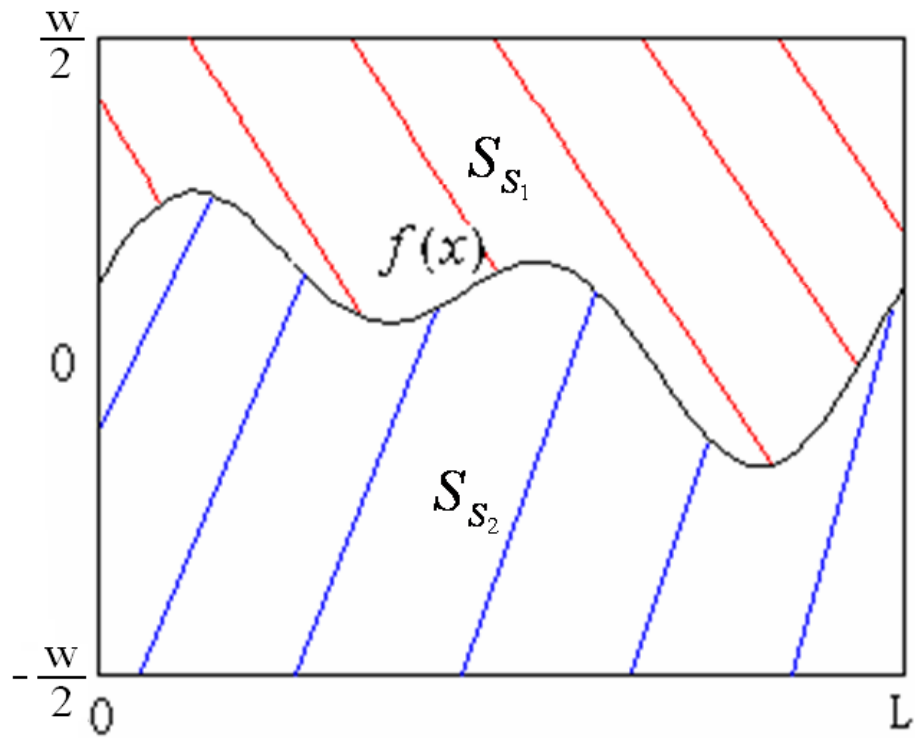


圖 3.23 C 款電極

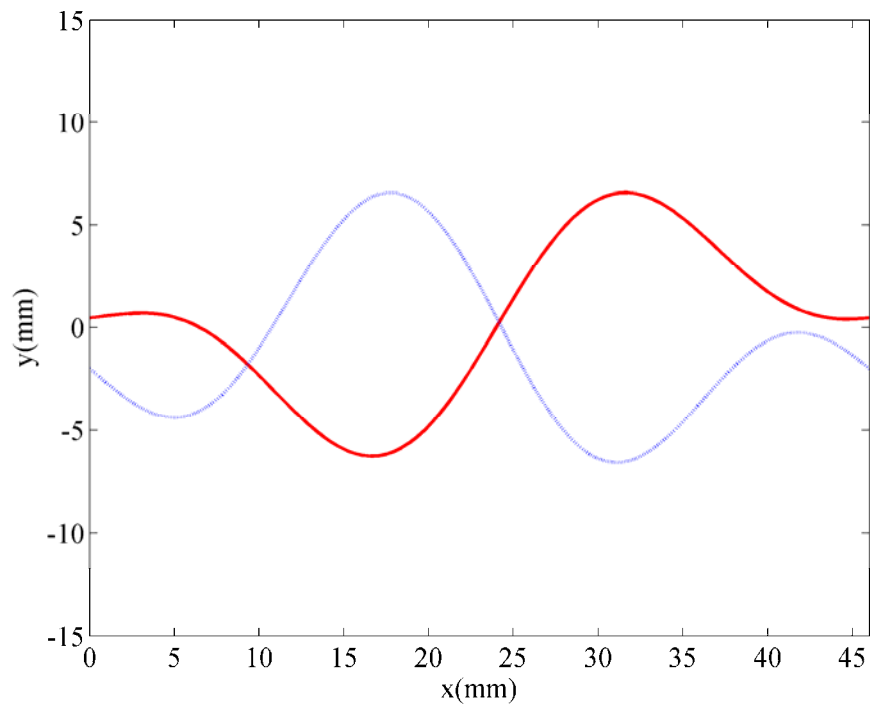


圖 3.24 第一模態濾除之初始與最佳化電極邊界(藍色虛線為初始邊界, 紅色實線為最佳邊界)

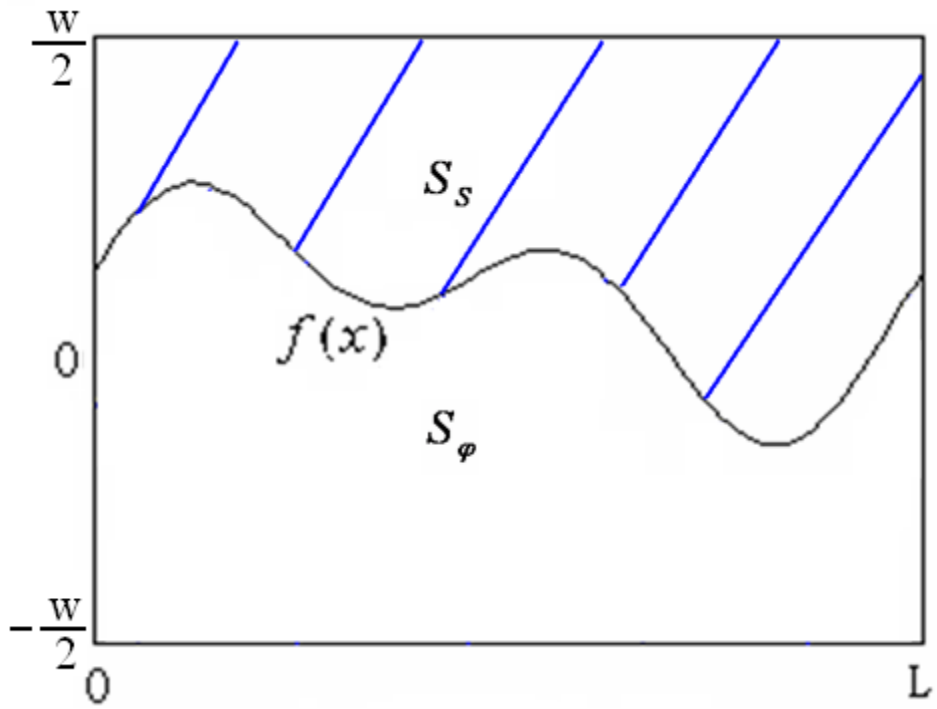


圖 3.25 D 款電極

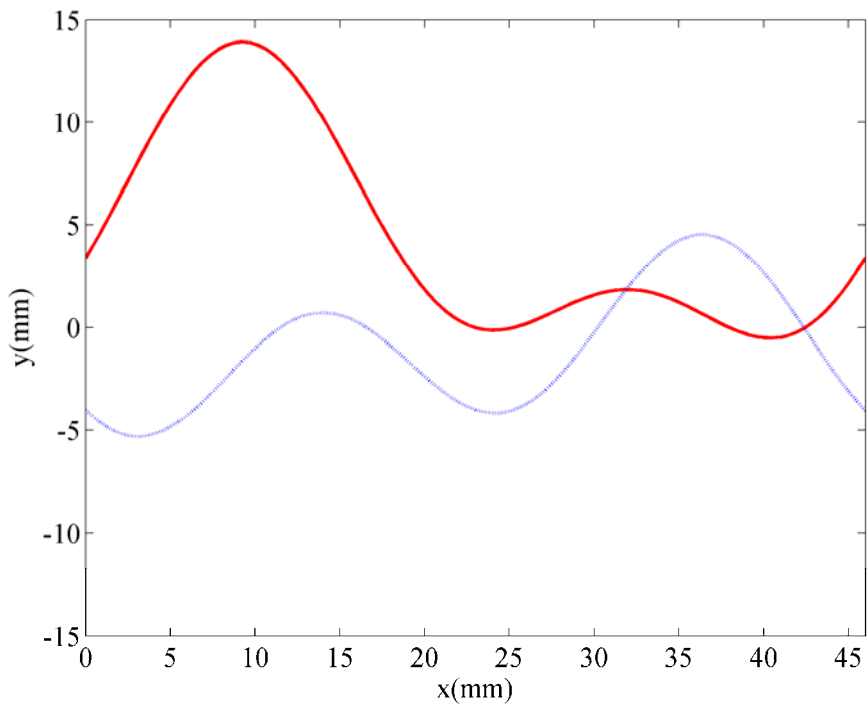


圖 3.26 第二模態濾除之初始與最佳化電極邊界(藍色虛線為初始邊界,紅色實線為最佳邊界)

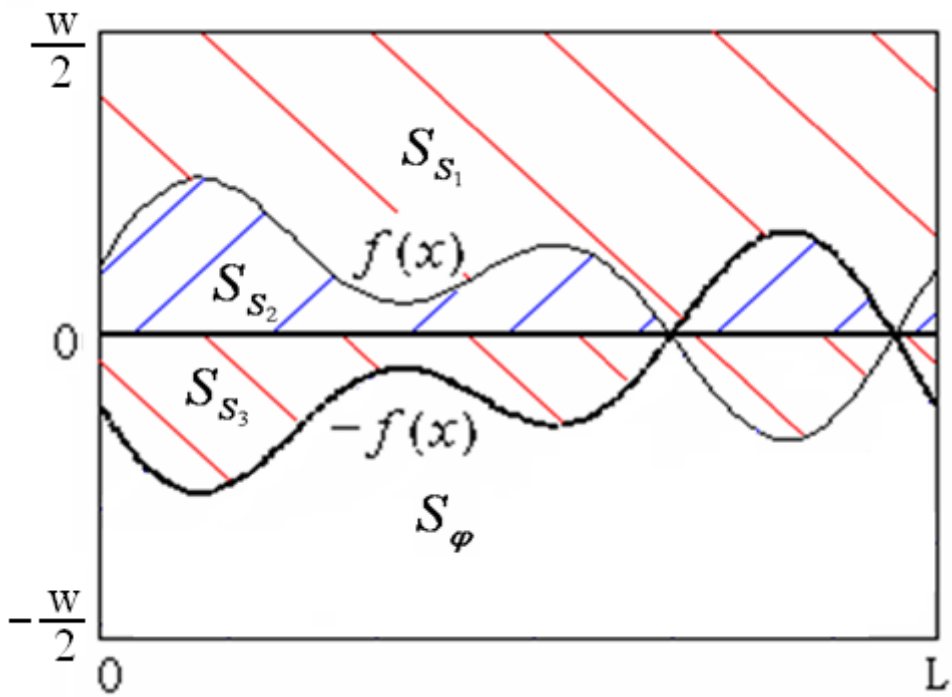


圖 3.27 E 款電極

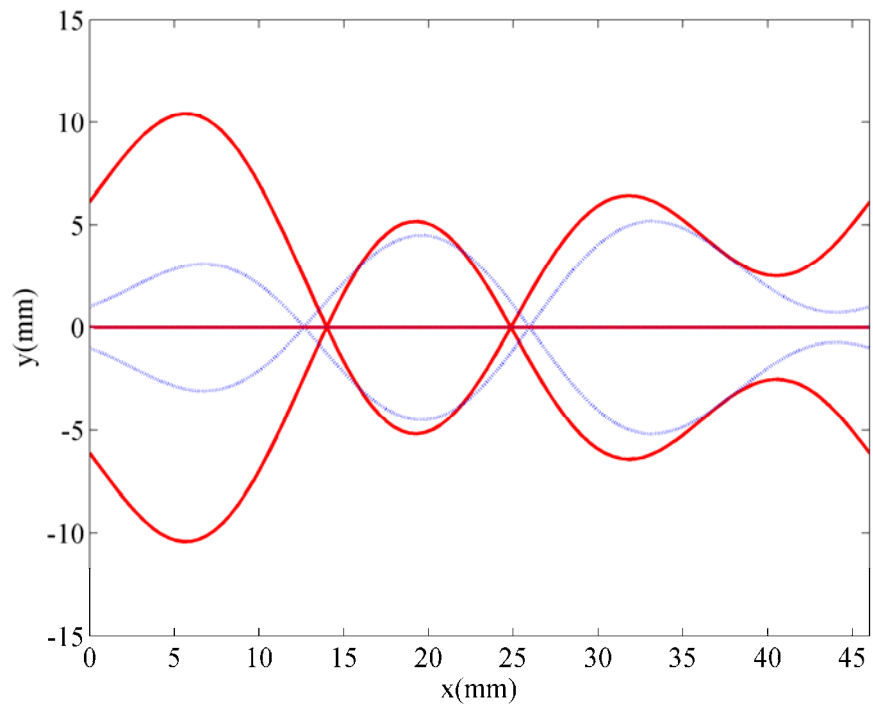


圖 3.28 第三模態濾除之初始與最佳化電極邊界(藍色虛線為初始邊界, 紅色實線為最佳邊界)

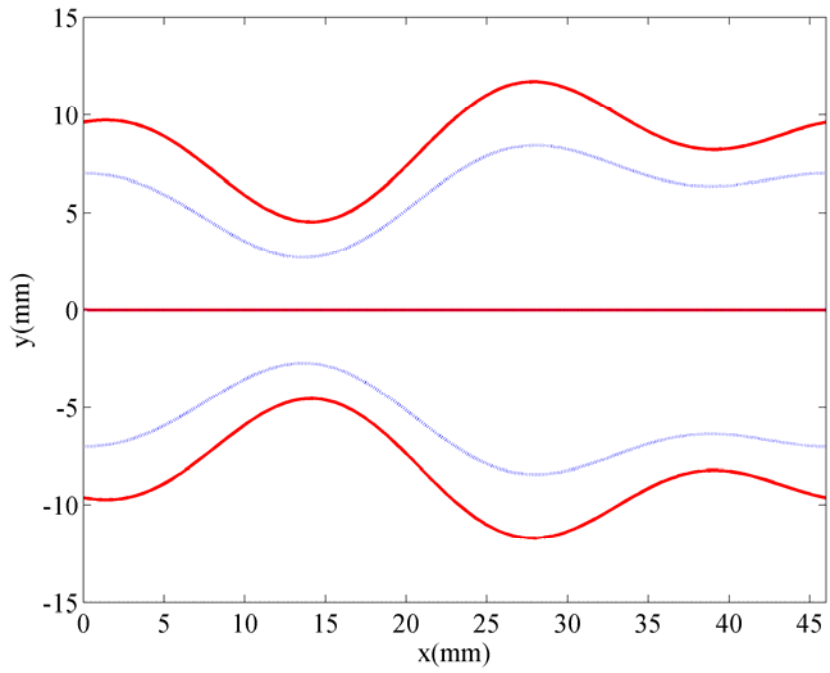


圖 3.29 第四模態濾除之初始與最佳化電極邊界(藍色虛線為初始邊界,紅色實線為最佳邊界)

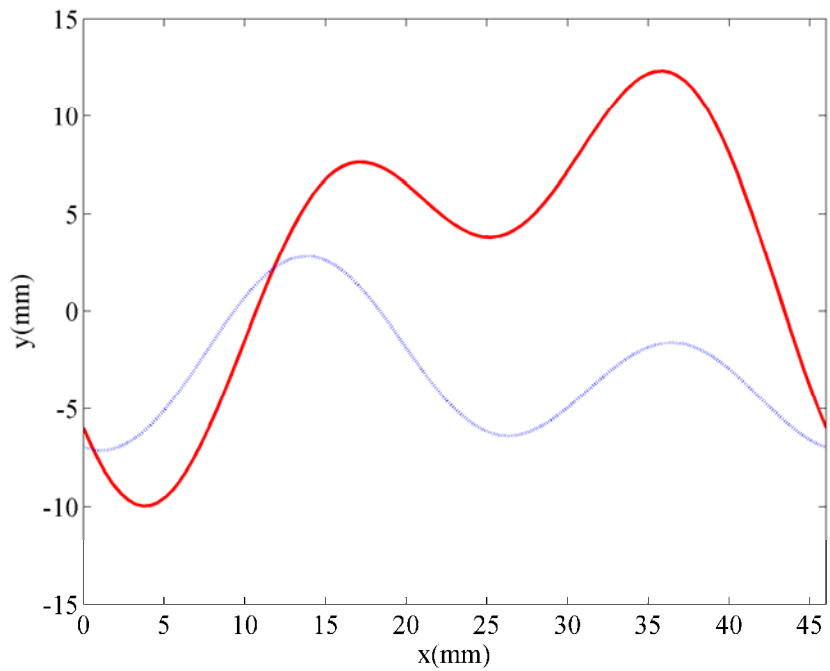


圖 3.30 第五模態濾除之初始與最佳化電極邊界(藍色虛線為初始邊界,紅色實線為最佳邊界)

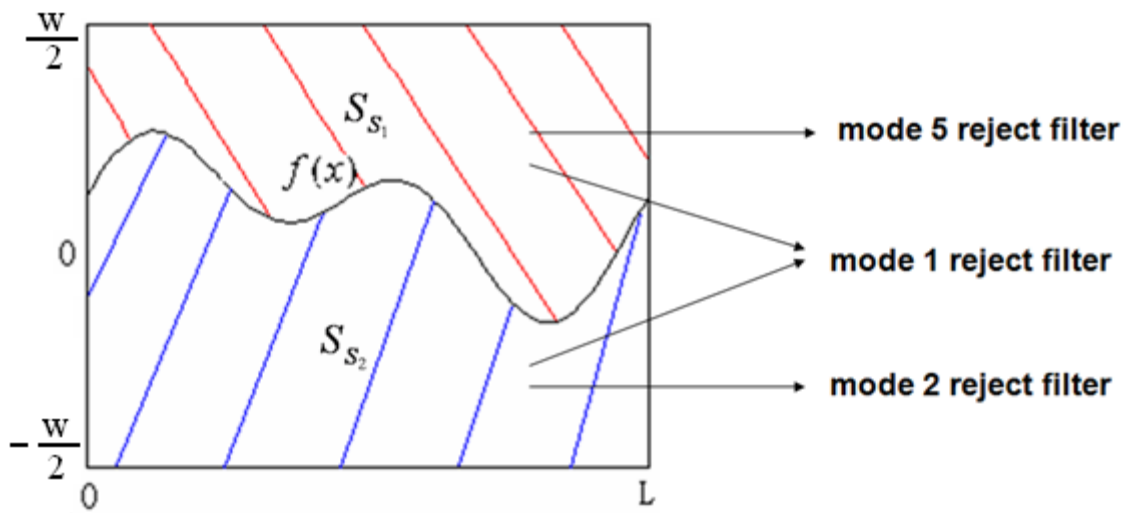


圖 3.31 第一二五模態濾除電極之示意圖

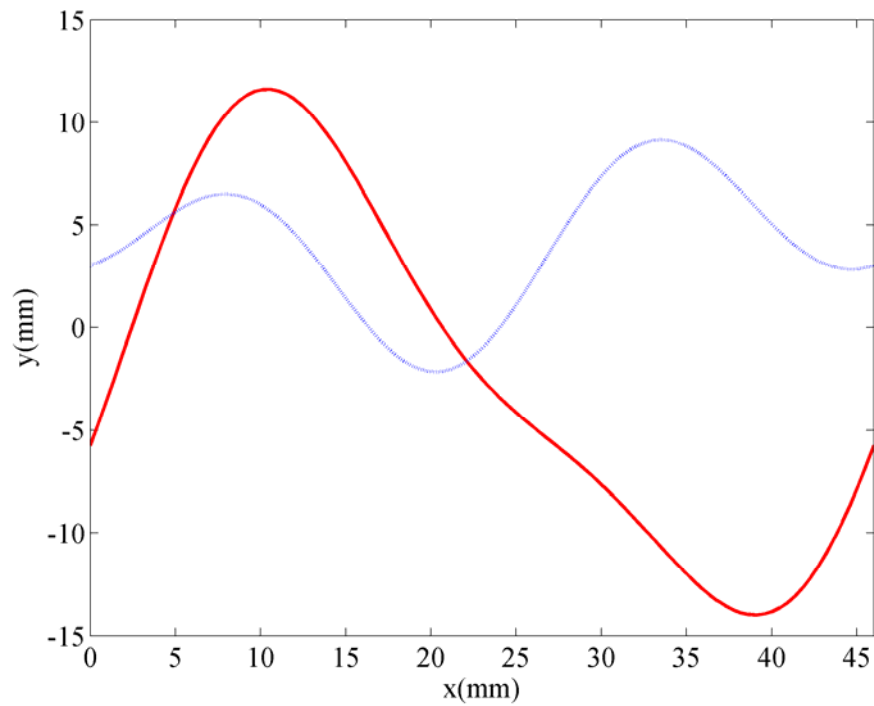


圖 3.32 第一二五模態濾除之初始與最佳化電極邊界(藍色虛線為初始邊界,紅色實線為最佳邊界)

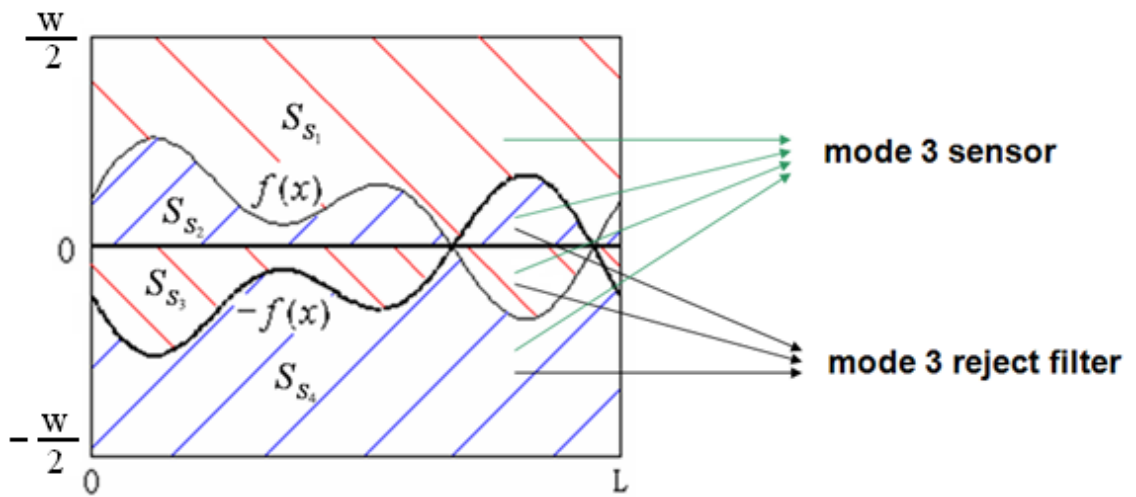


圖 3.33 第三模態感測與濾除電極之示意圖

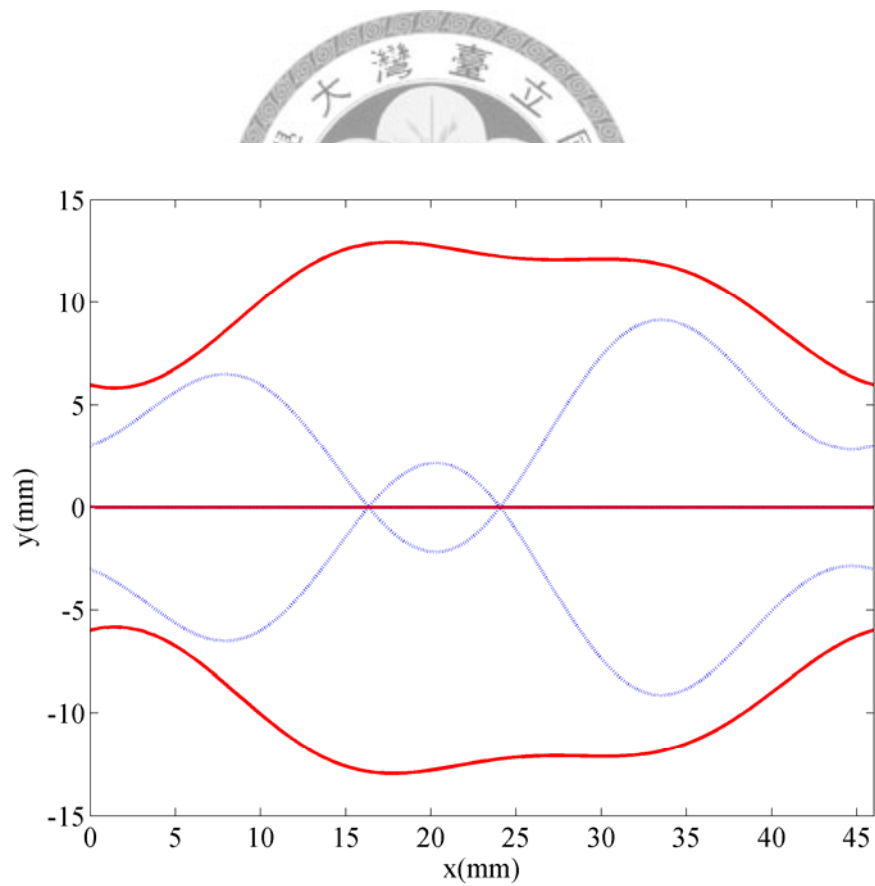


圖 3.34 第三模態感測與濾除之初始與最佳化電極邊界(藍色虛線為初始邊界，紅色實線為最佳邊界)

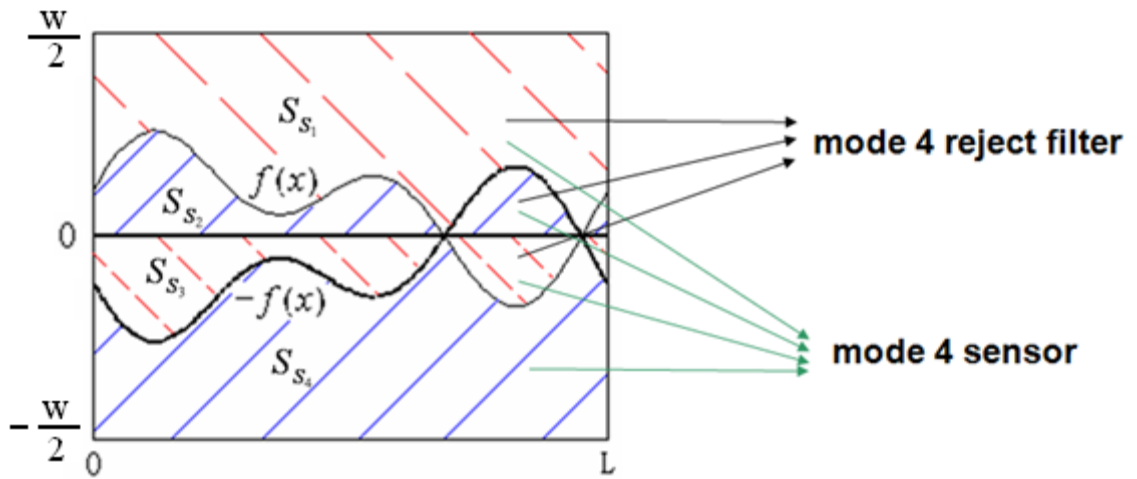


圖 3.35 第四模態感測與濾除電極之示意圖

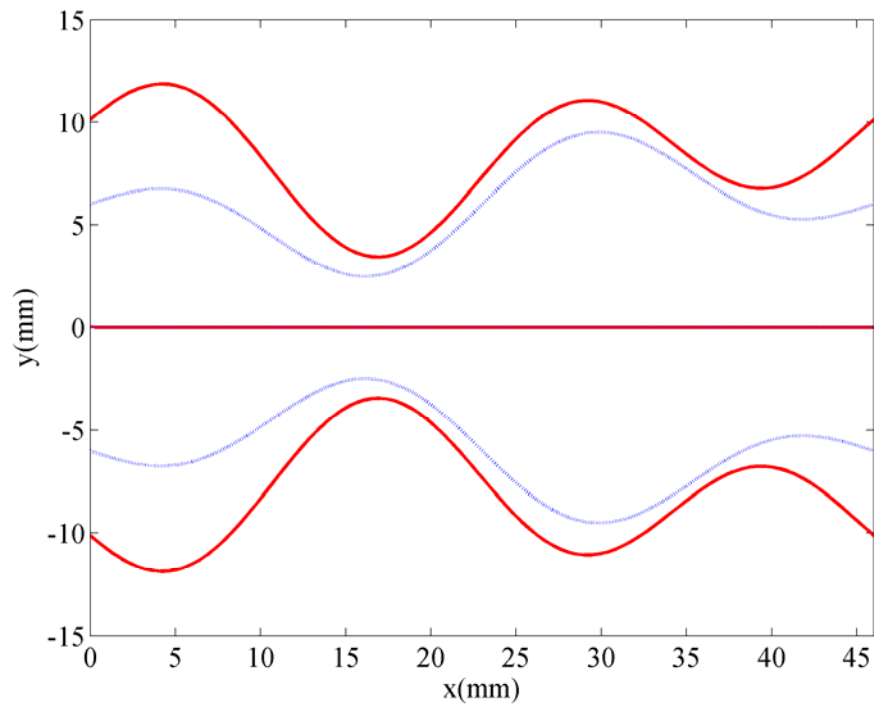


圖 3.36 第四模態感測與濾除之初始與最佳化電極邊界(藍色虛線為初始邊界，紅色實線為最佳邊界)

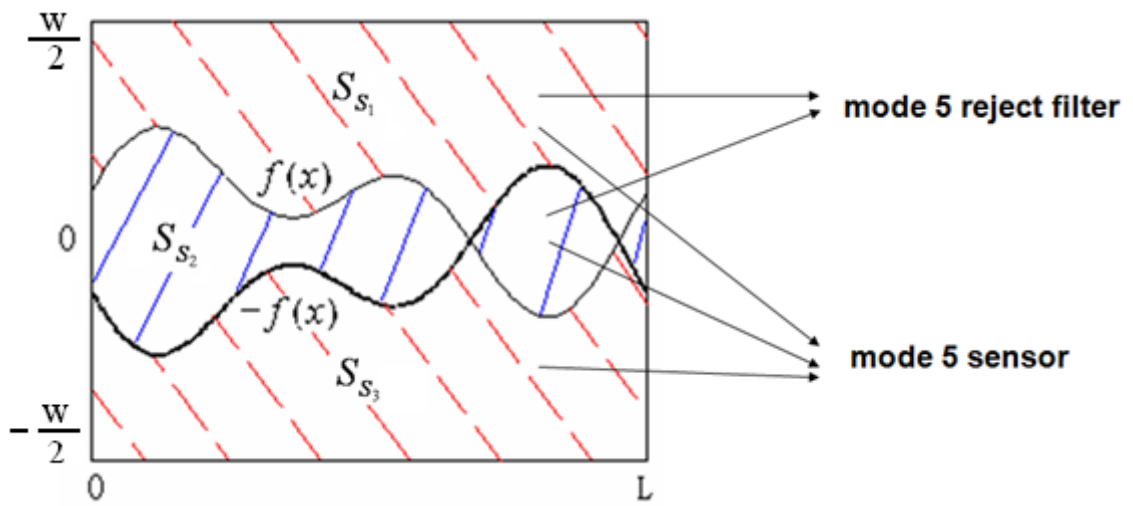


圖 3.37 第五模態感測與濾除電極之示意圖

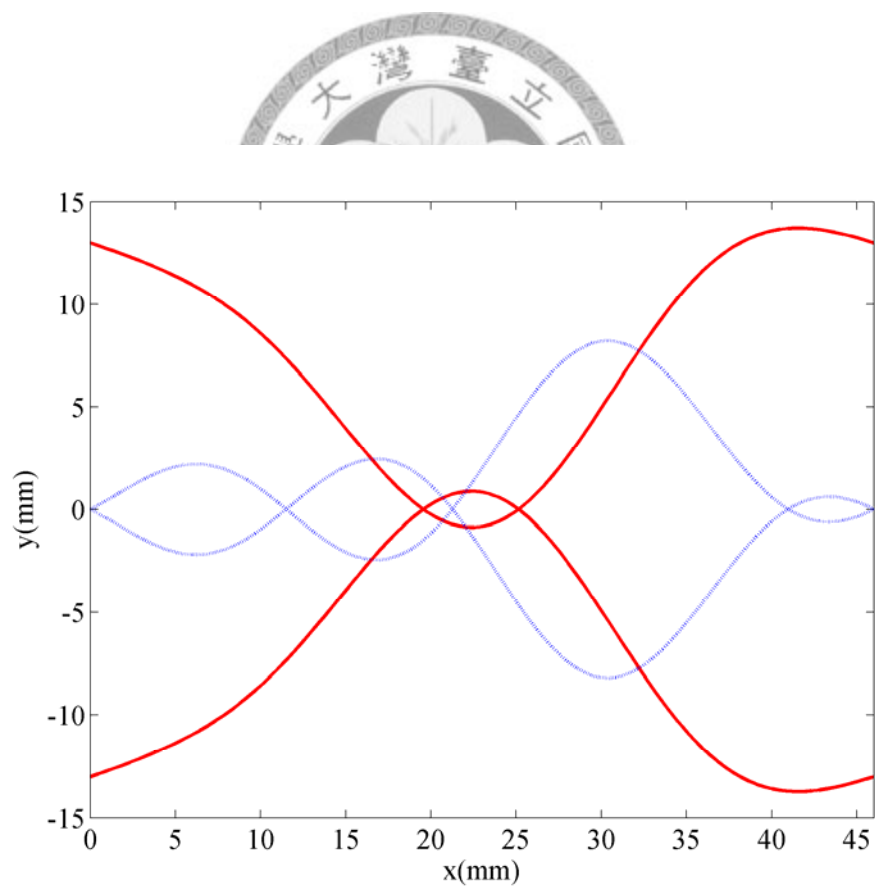


圖 3.38 第五模態感測與濾除之初始與最佳化電極邊界圖(藍色虛線為初始邊界，紅色實線為最佳邊界)

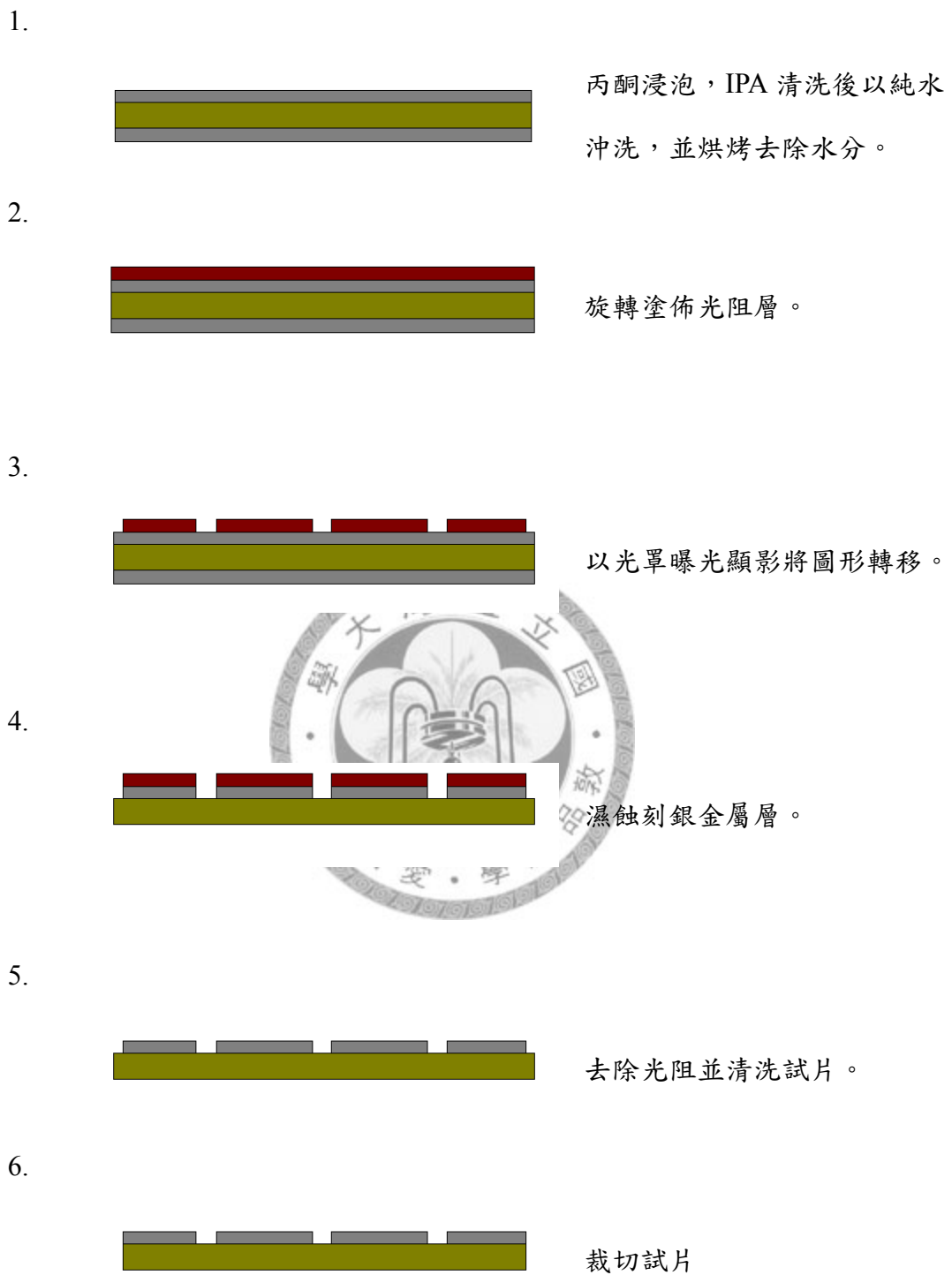


圖 4.1 PZT 壓電片製程圖

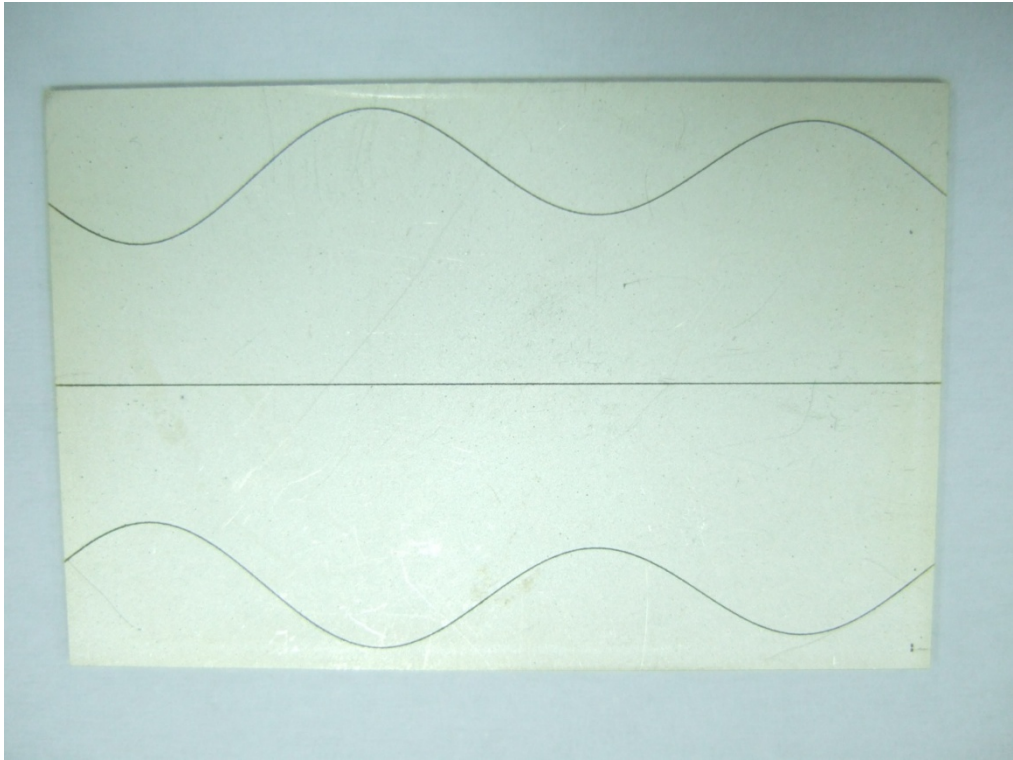


圖 4.2 蝕刻並裁切厚的壓電片

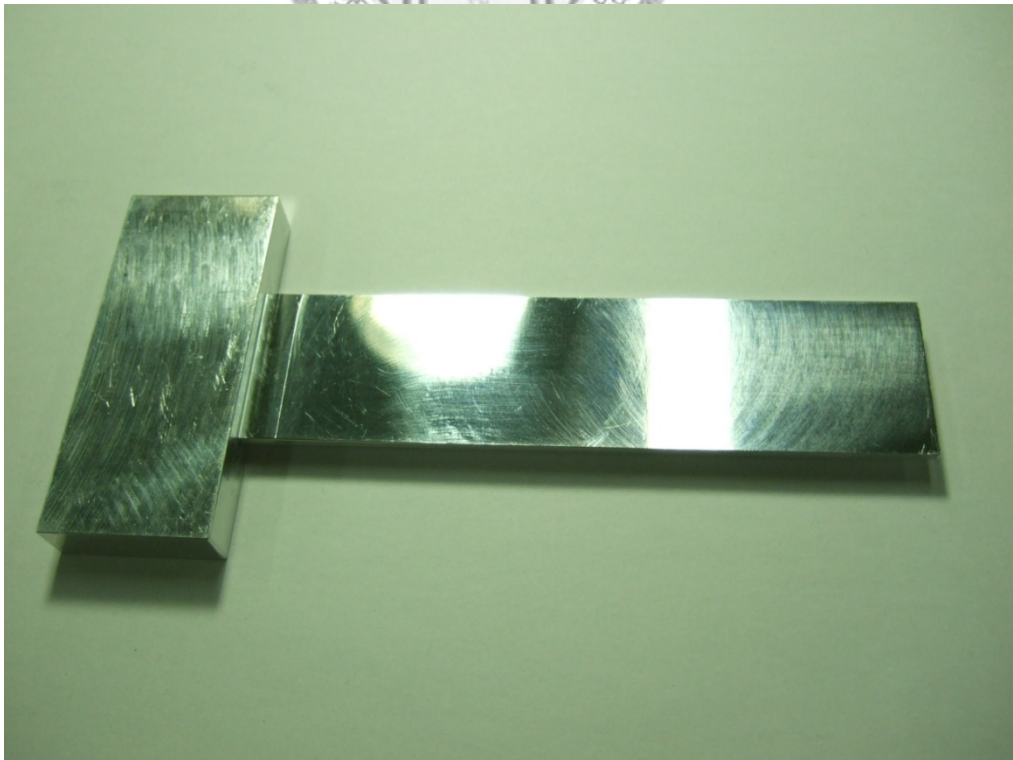


圖 4.3 鋁結構實體圖

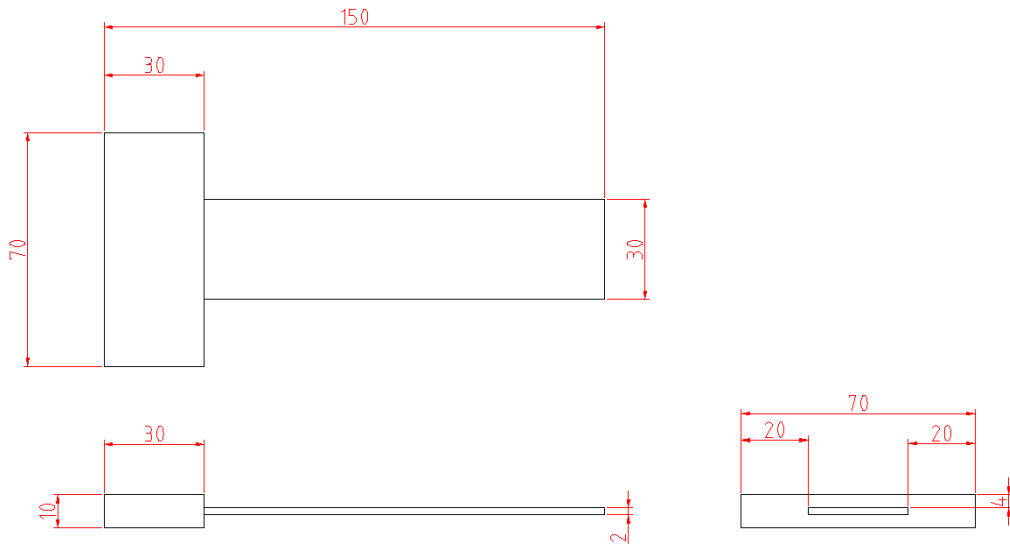


圖 4.4 鋁結構三視圖

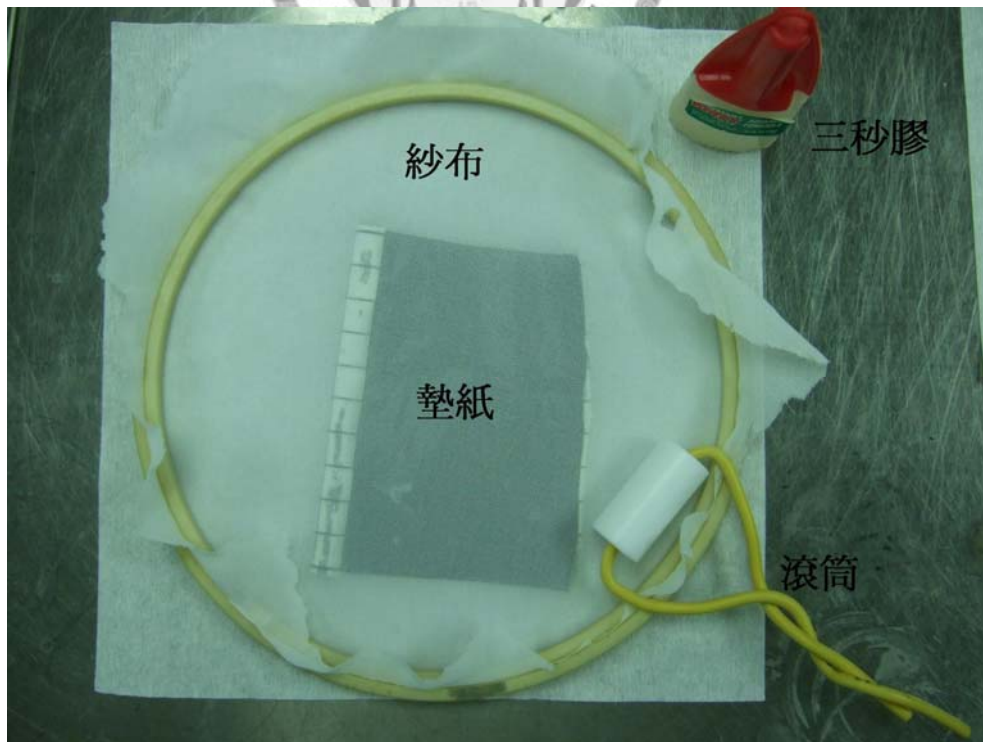


圖 4.5 紗布、墊紙、滾筒和三秒膠

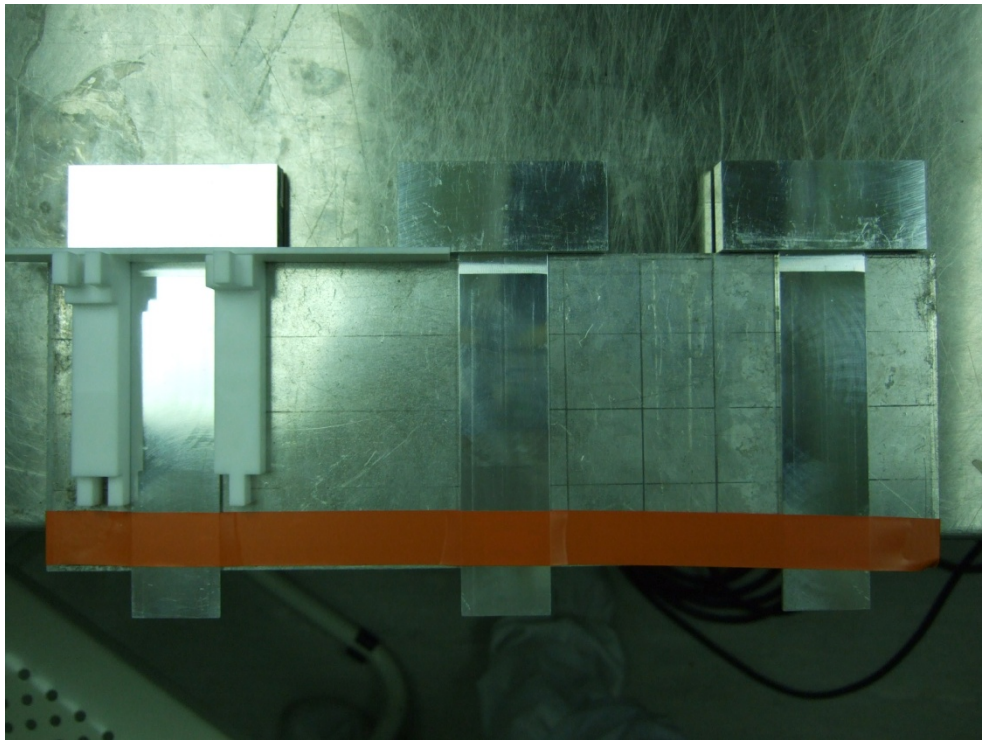


圖 4.6 膠帶固定多塊鋁板

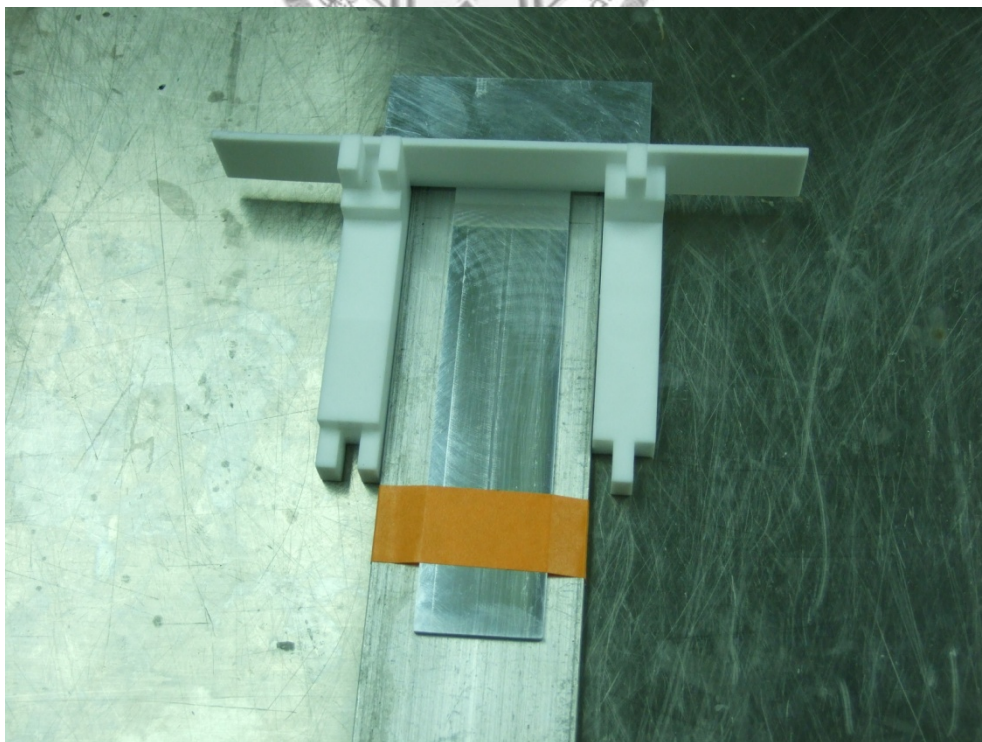


圖 4.7 固定好 2mm 厚的鐵氟龍條

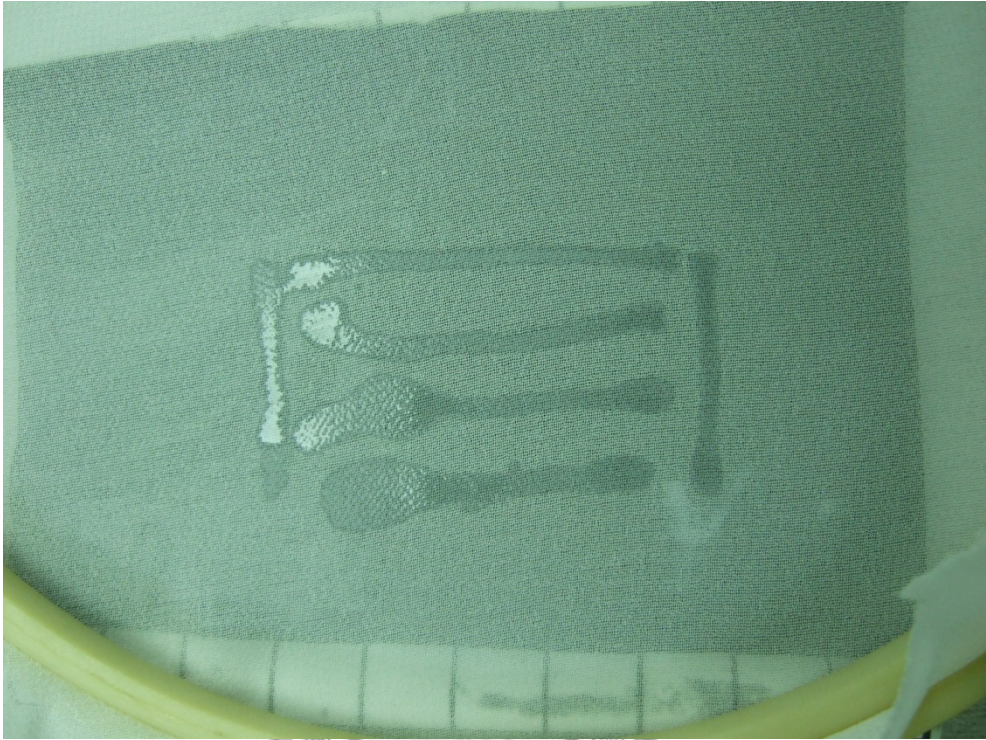


圖 4.8 上膠紗布

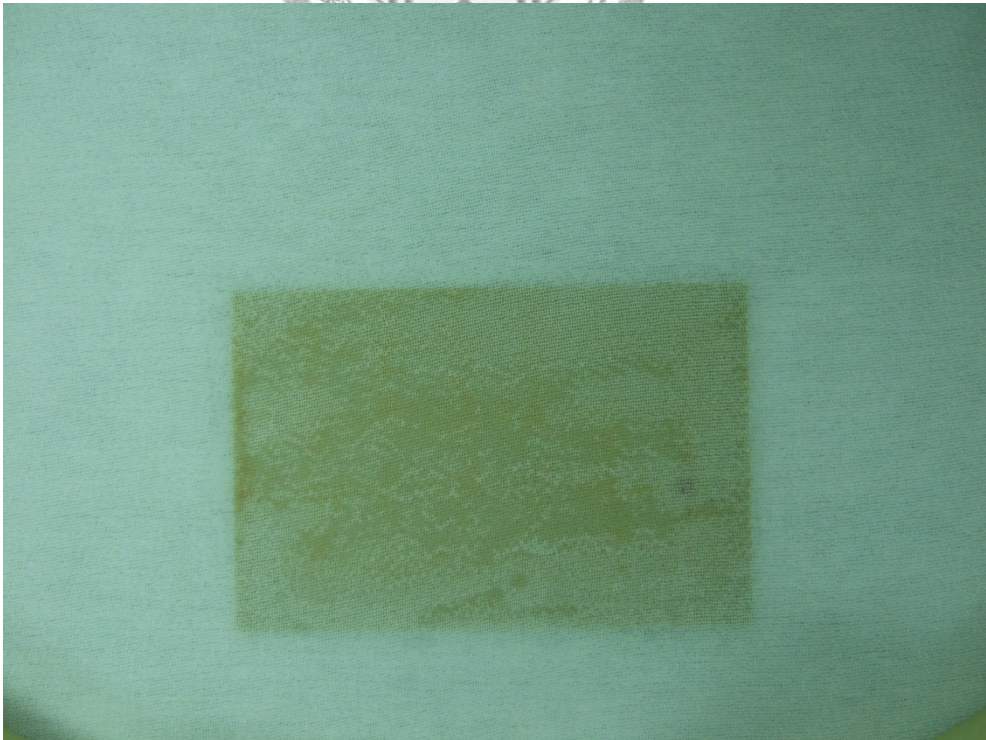


圖 4.9 紗布覆蓋於壓電片

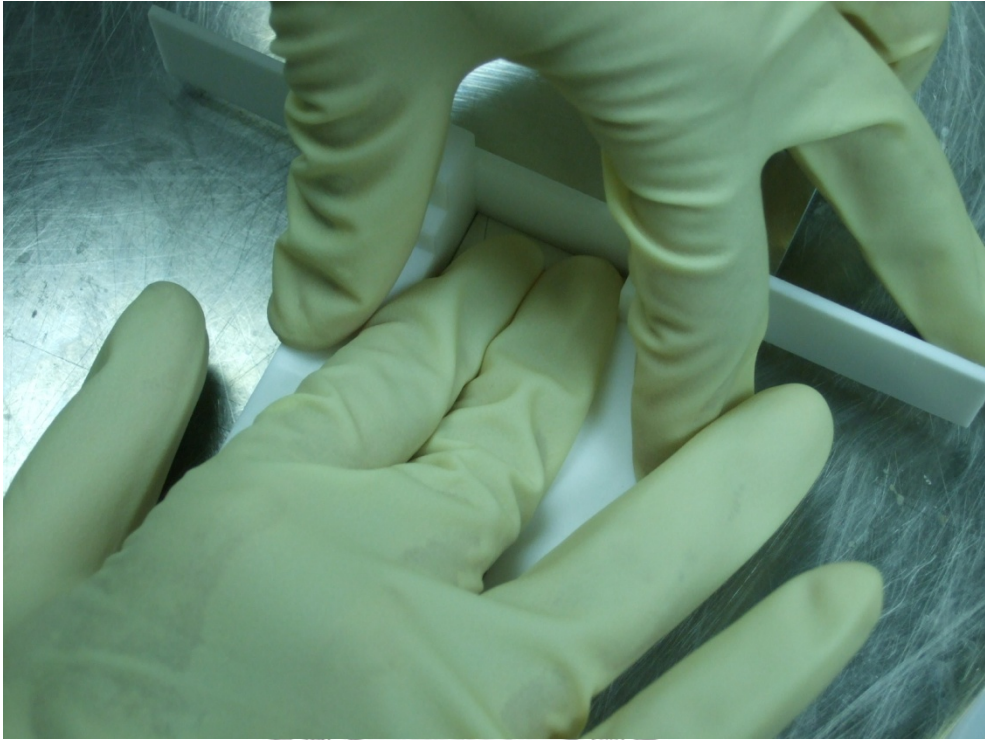


圖 4.10 手指輕壓壓電片

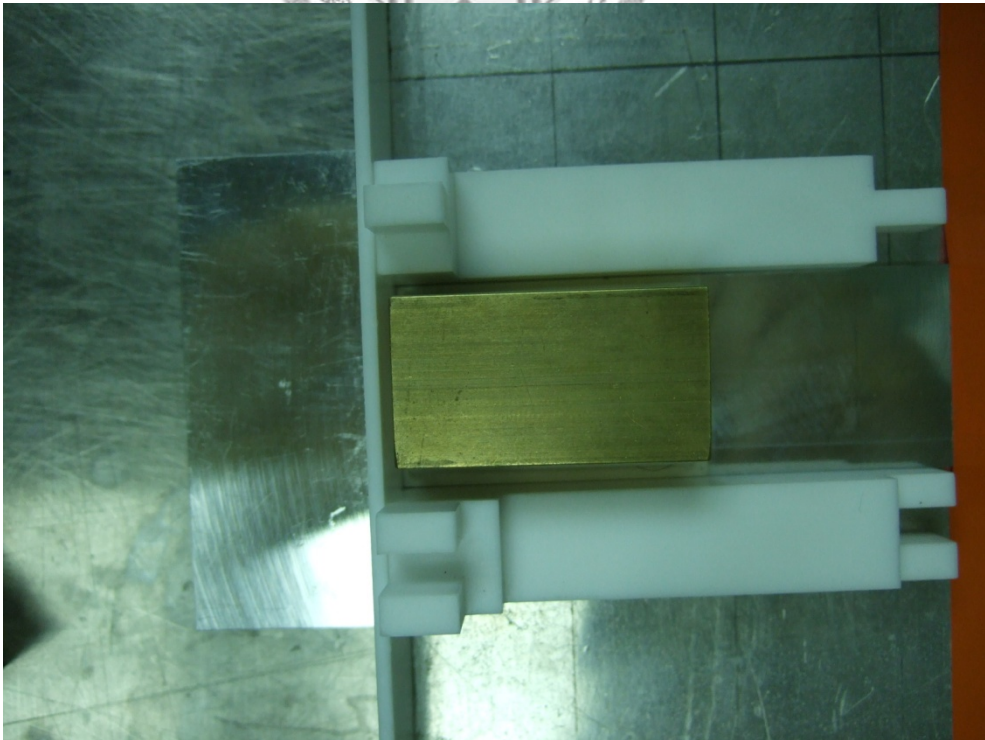


圖 4.11 銅錠壓在壓電片上

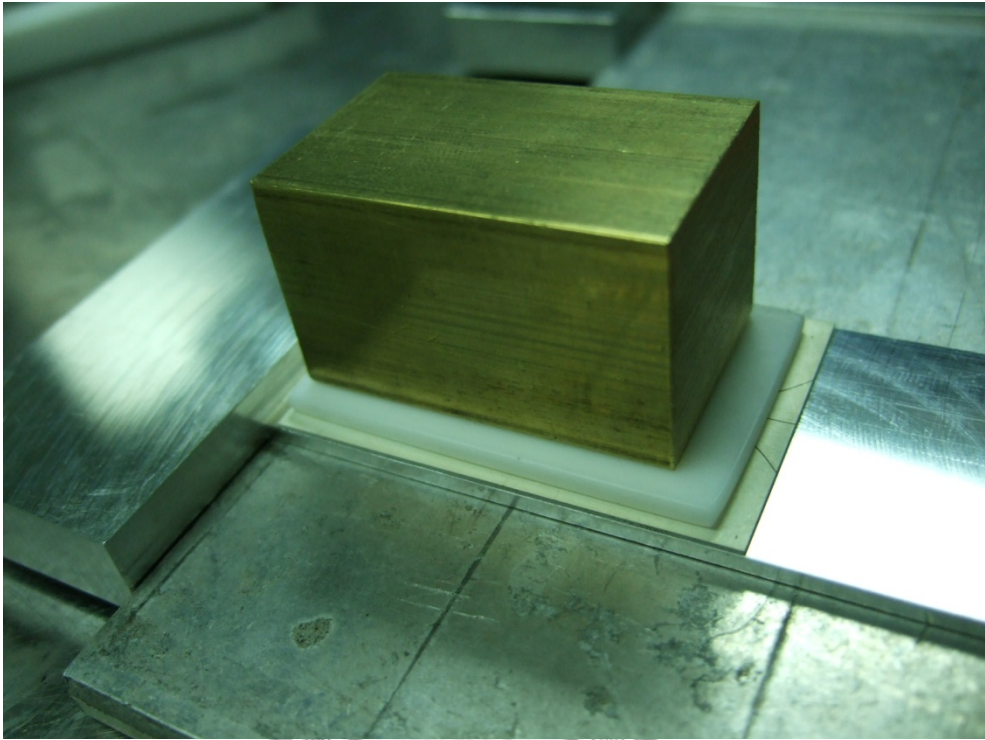


圖 4.12 等待膠乾

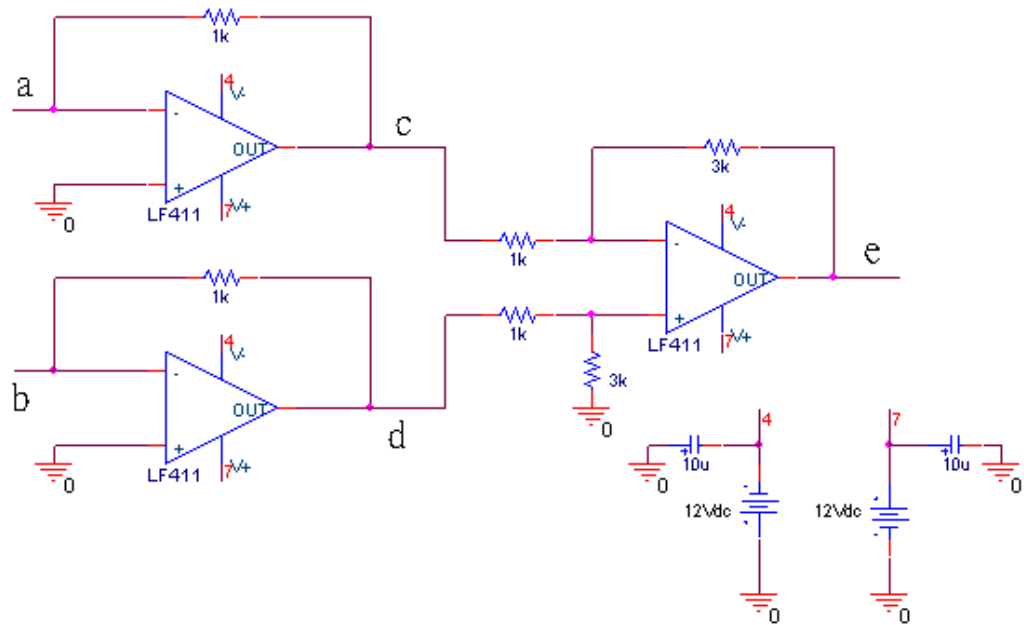


圖 4.13 信號處理電路

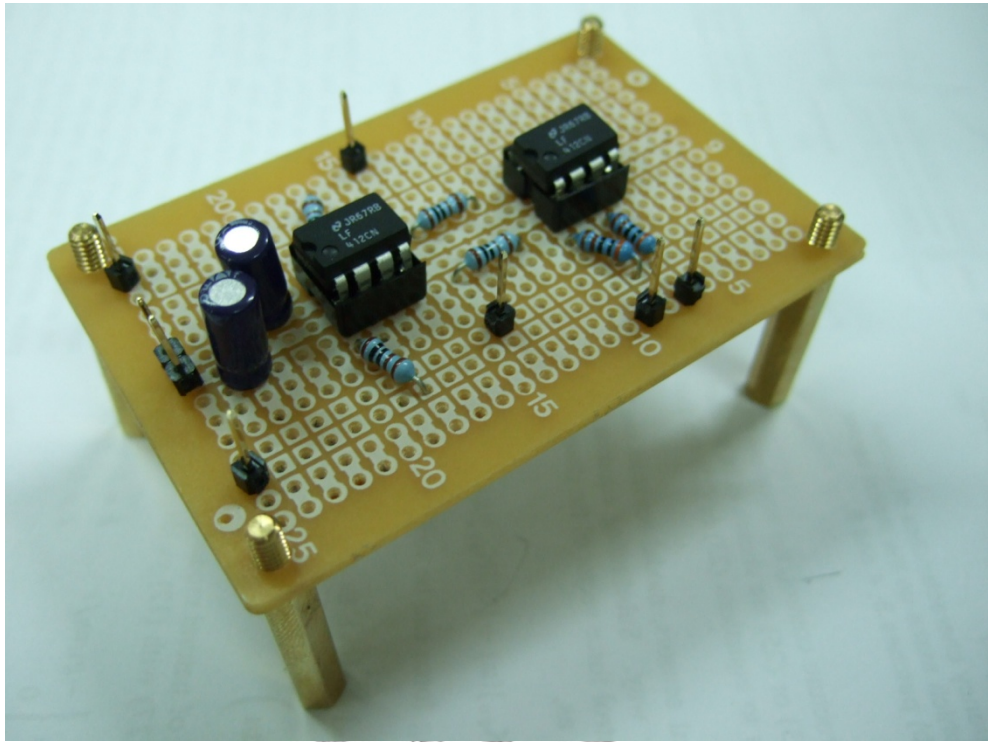


圖 4.14 焊接電路

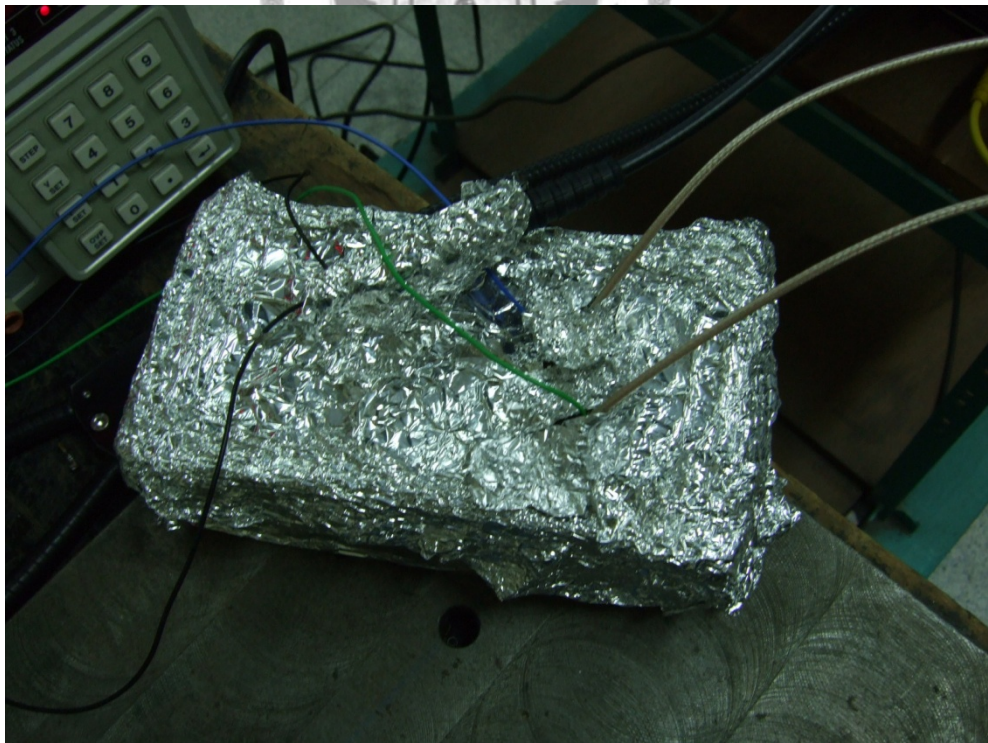


圖 4.15 鋁箔盒



圖 4.16 儀器照片一



圖 4.17 儀器照片二

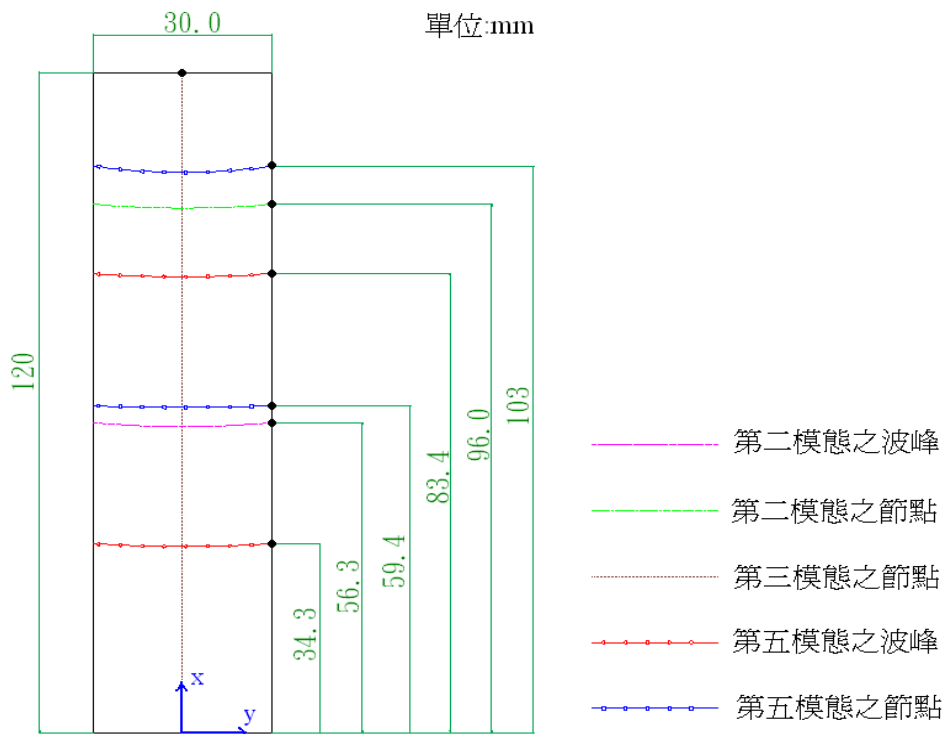


圖 4.18 振動模態位移波峰和節點

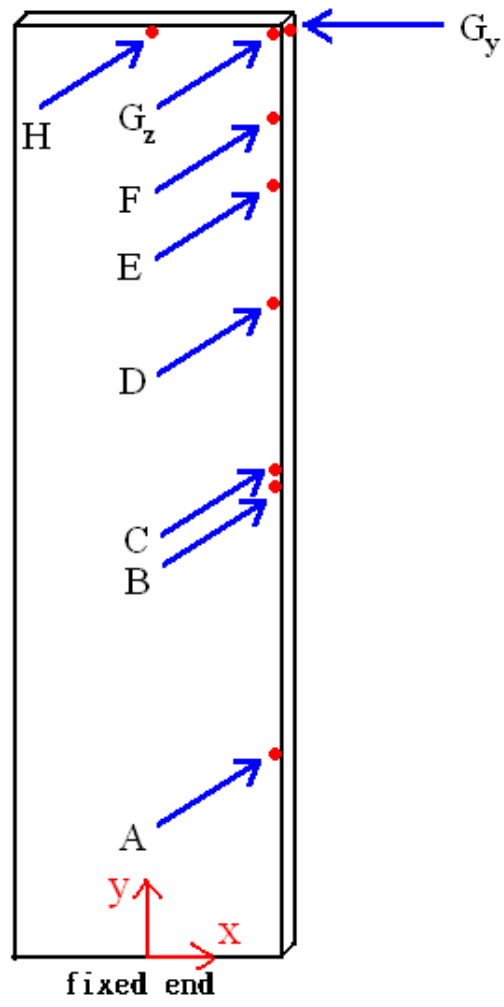


圖 4.19 敲擊點標號

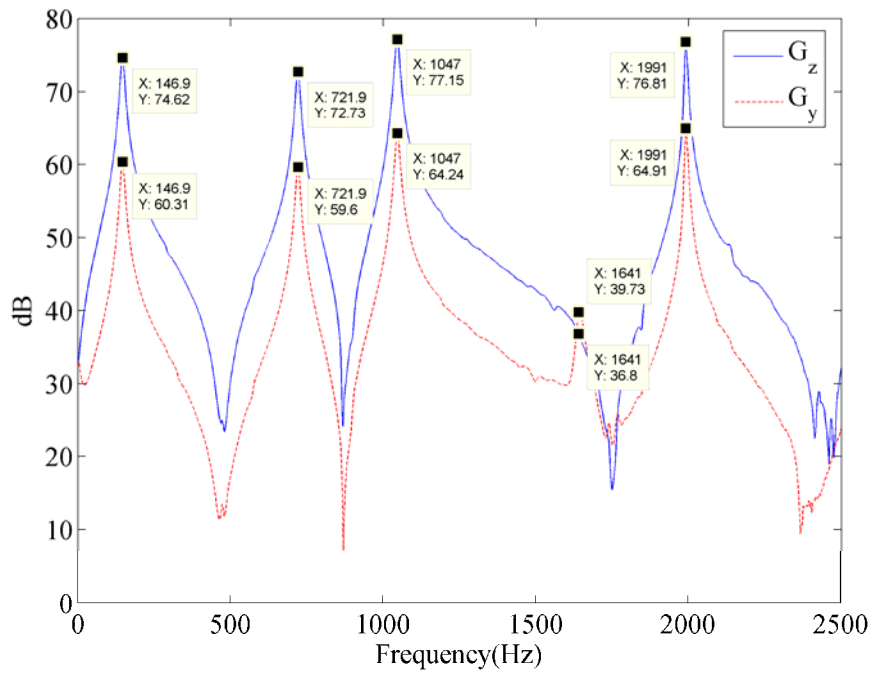


圖 4.20 垂直和側向敲擊第一模態感測試片角落之雷測信號之頻譜響應



A

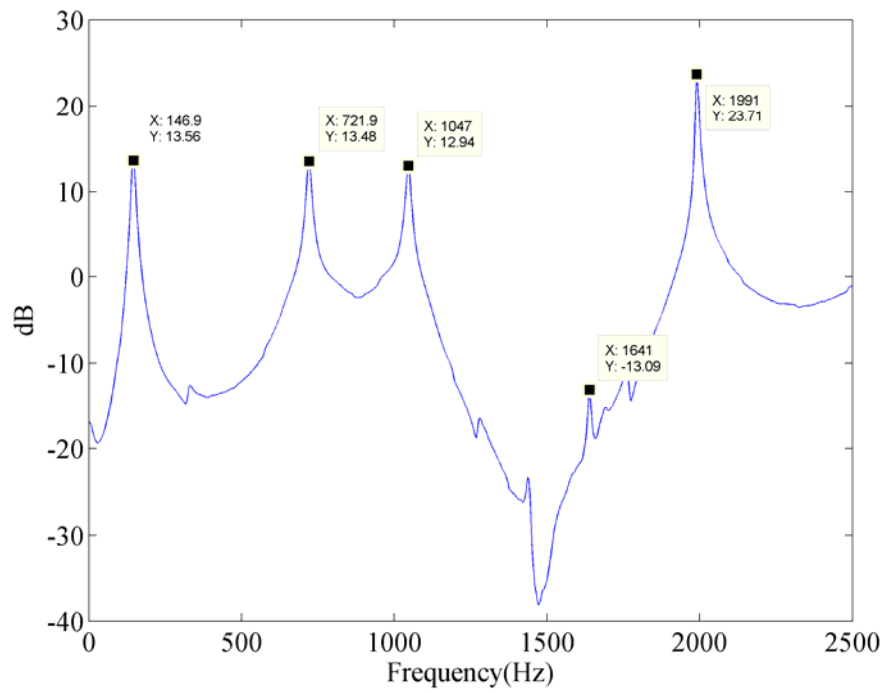


圖 4.21 敲擊 A 點，第一模態感測信號之頻率響應

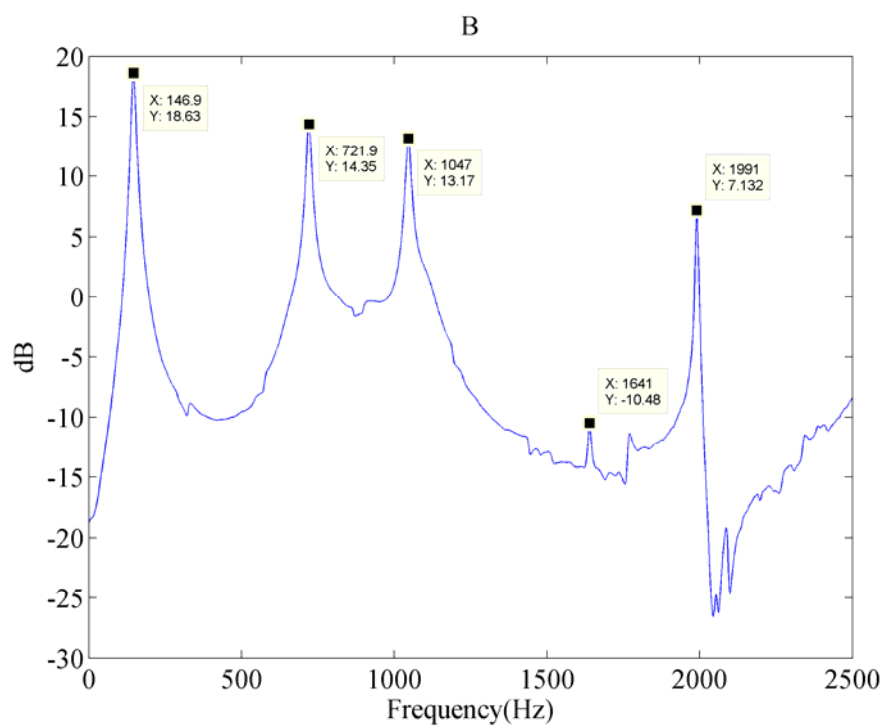


圖 4.22 敲擊 B 點，第一模態感測信號之頻率響應

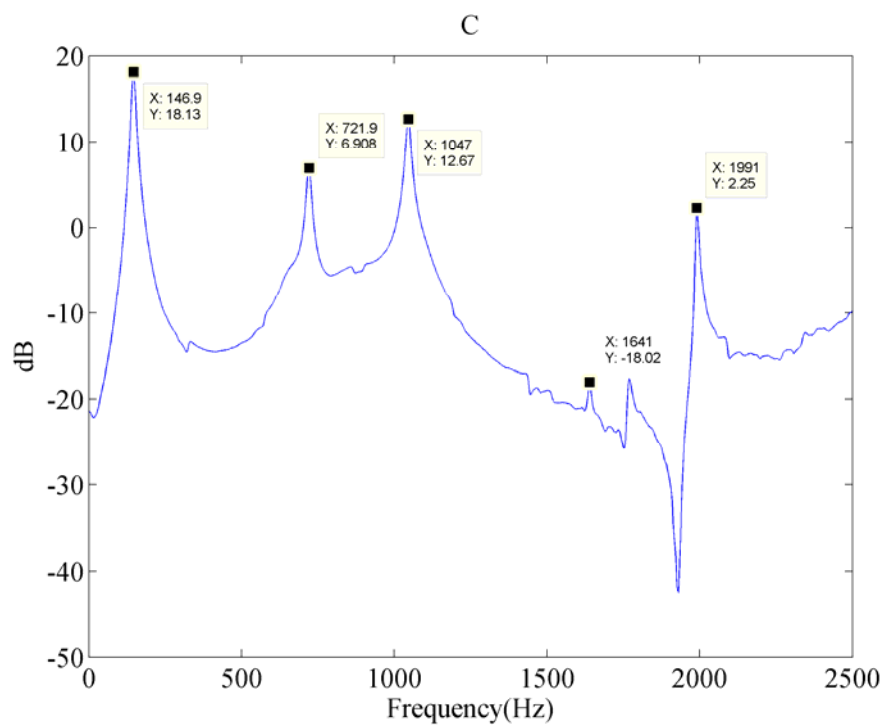


圖 4.23 敲擊 C 點，第一模態感測信號之頻率響應

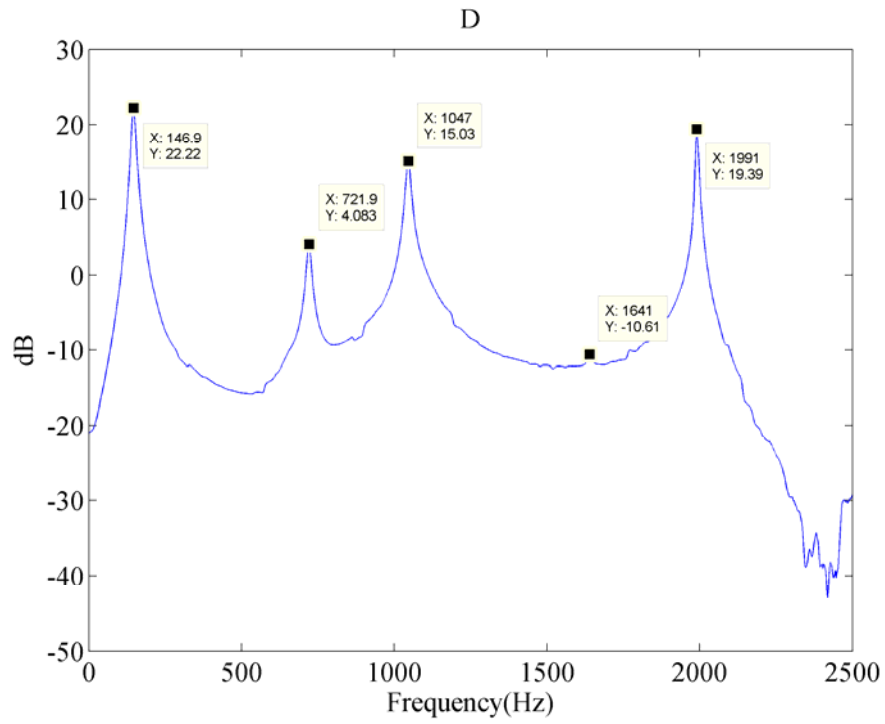


圖 4.24 敲擊 D 點，第一模態感測信號之頻率響應

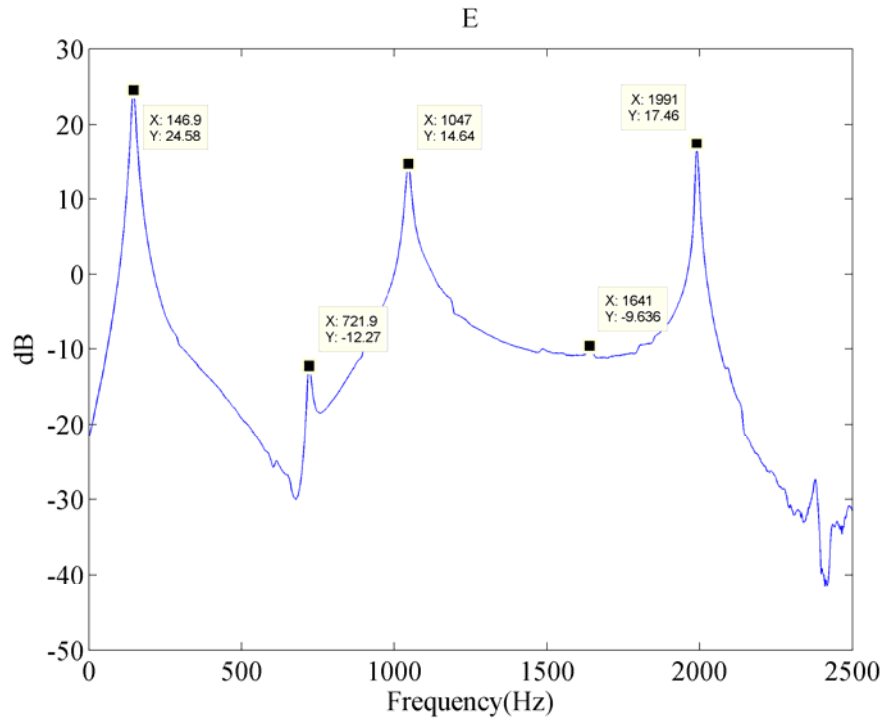


圖 4.25 敲擊 E 點，第一模態感測信號之頻率響應

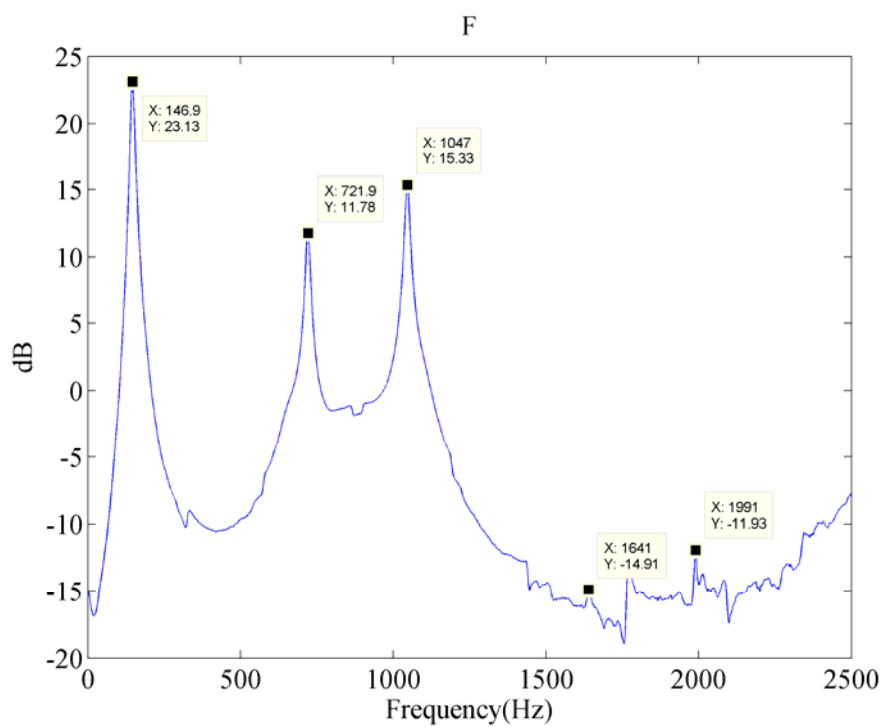


圖 4.26 敲擊 F 點，第一模態感測信號之頻率響應

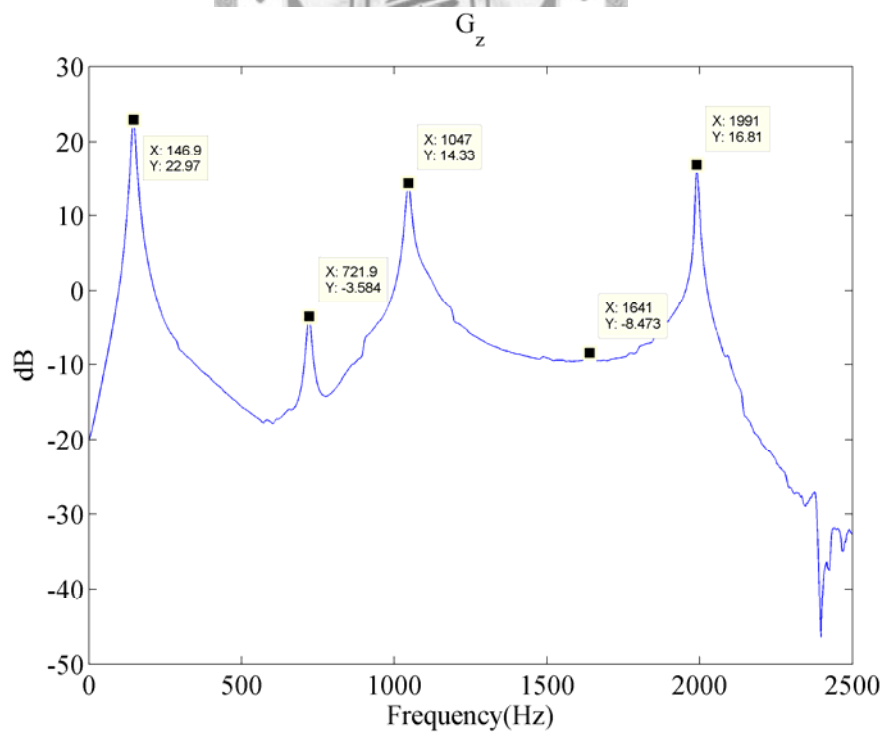


圖 4.27 敲擊 G_z 點，第一模態感測信號之頻率響應

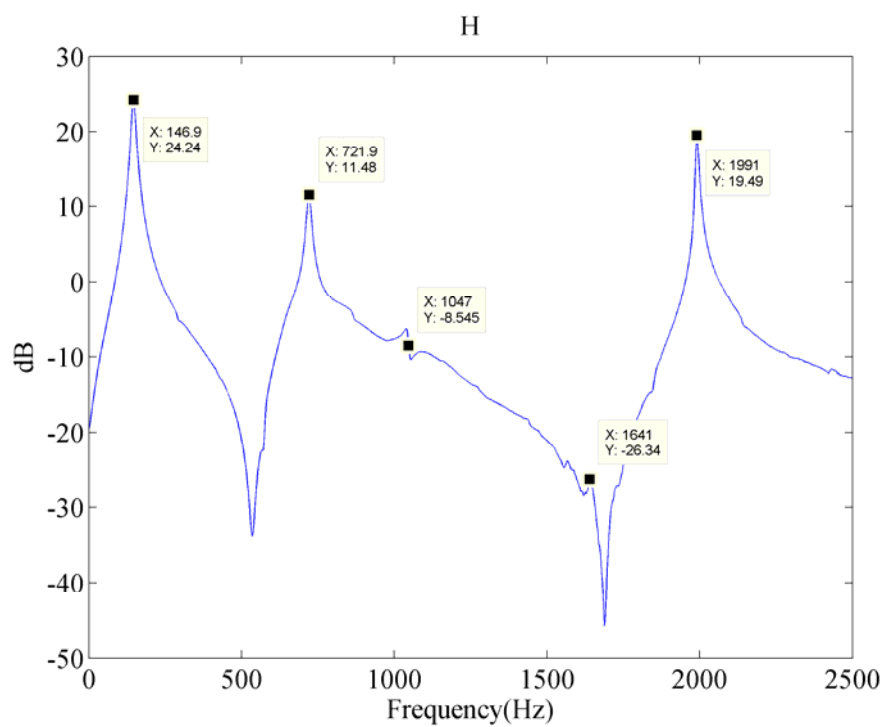


圖 4.28 敲擊 H 點，第一模態感測信號之頻率響應

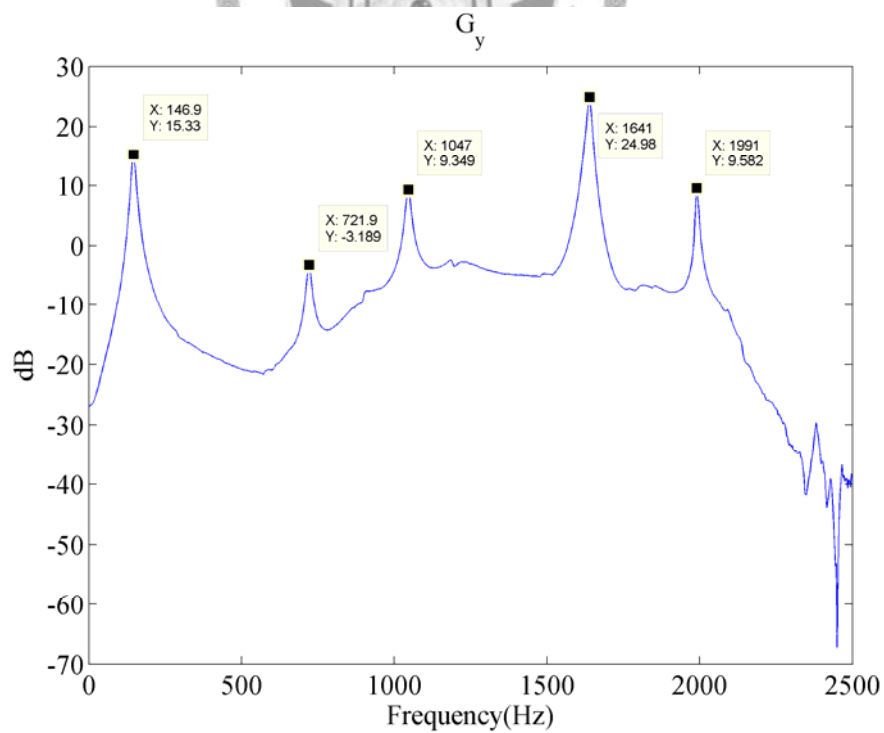


圖 4.29 敲擊 G_y 點，第一模態感測信號之頻率響應

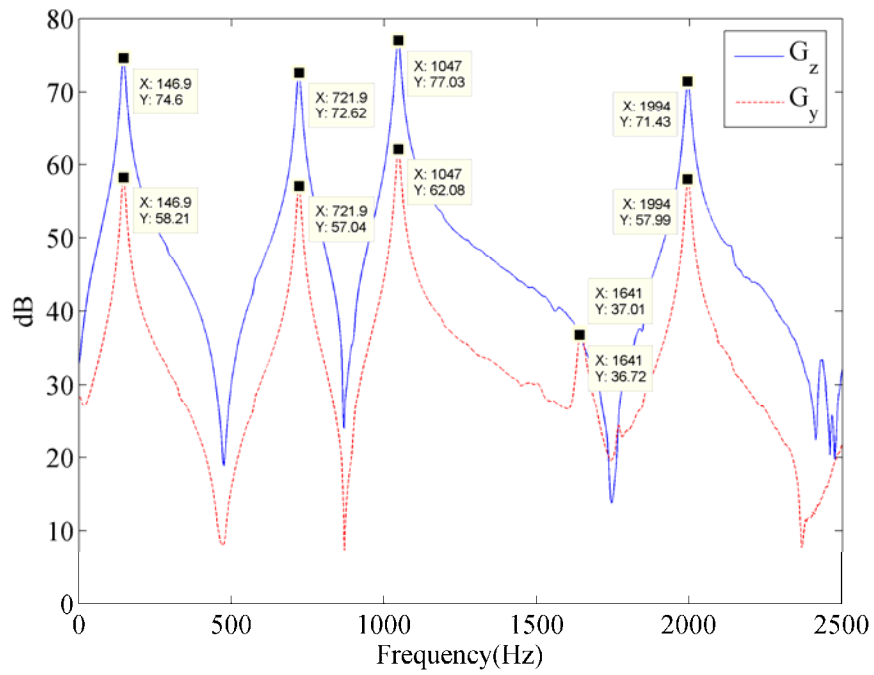


圖 4.30 垂直和側向敲擊第一模態濾除試片角落之雷測信號之頻譜響應

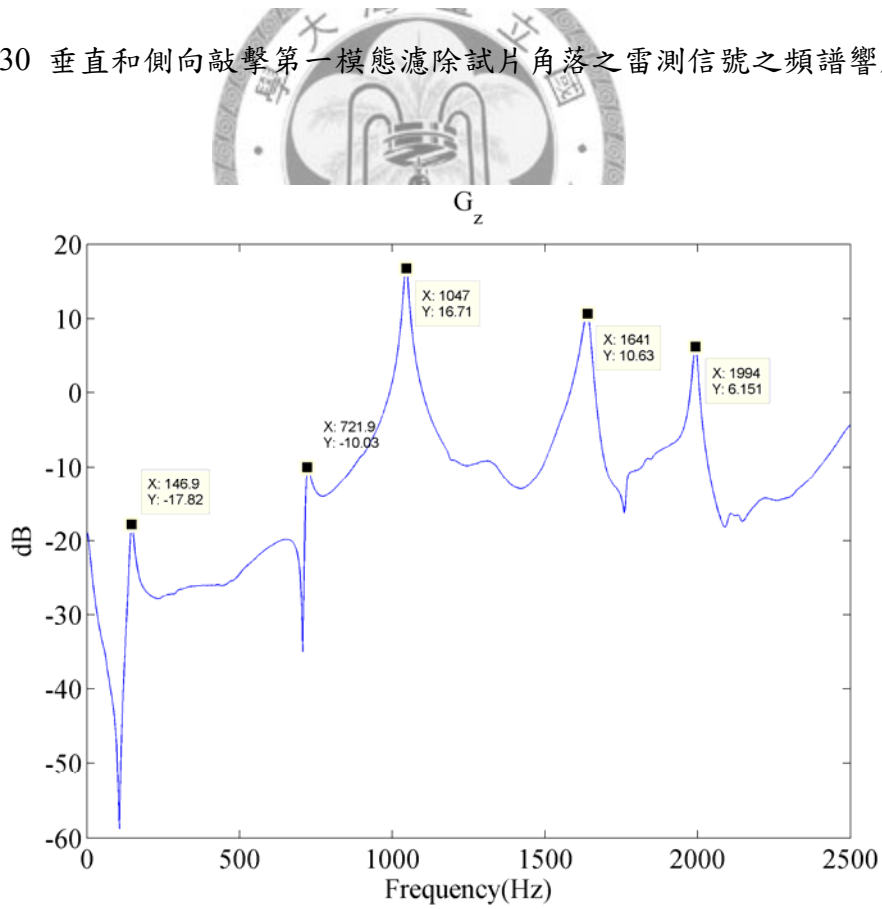


圖 4.31 敲擊 G_z 點，第一模態濾除信號之頻率響應

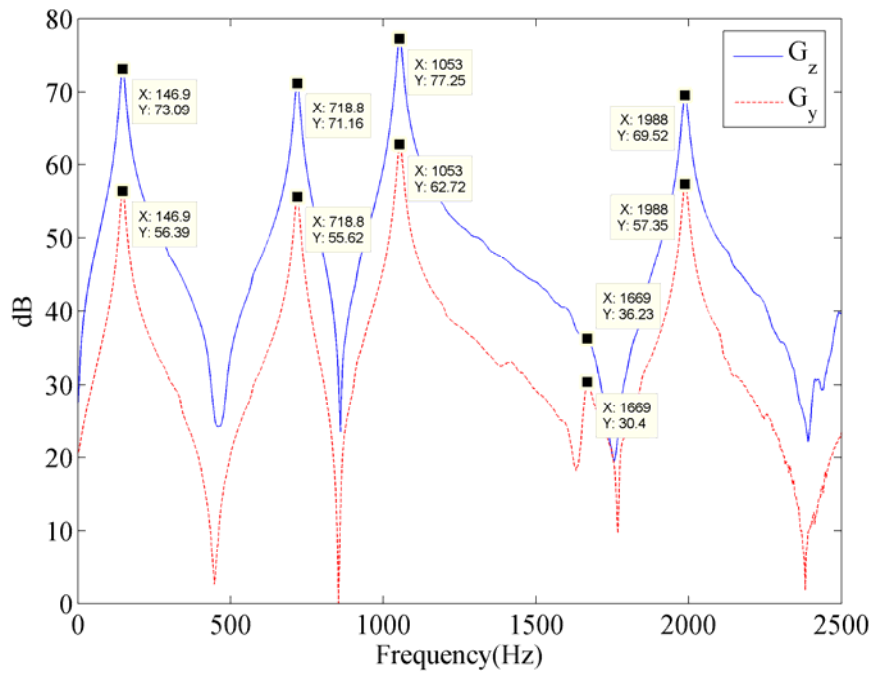


圖 4.32 垂直和側向敲擊第二模態感測試片角落之雷射信號之頻譜響應

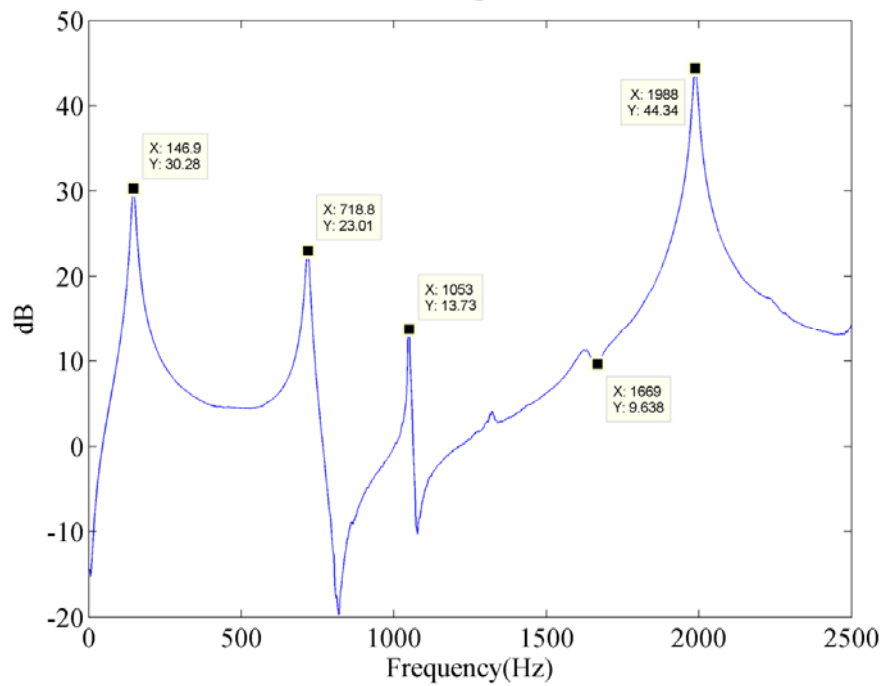
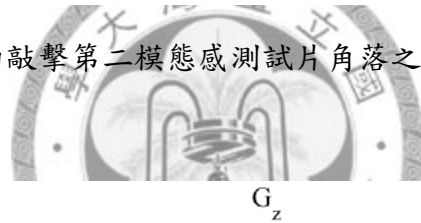


圖 4.33 敲擊 G_z 點，第二模態感測信號之頻率響應

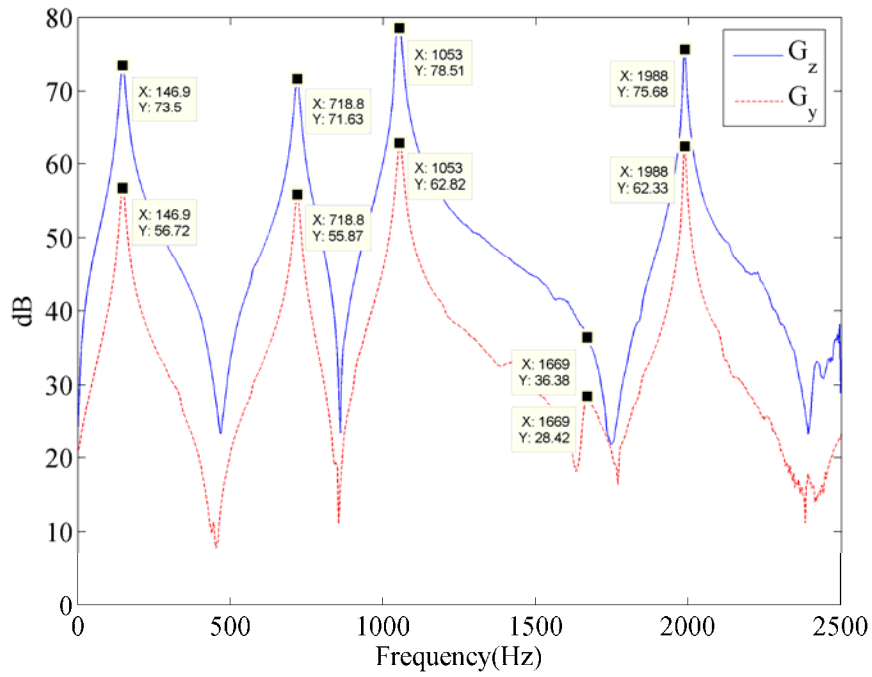


圖 4.34 垂直和側向敲擊第二模態濾除試片角落之雷測信號之頻譜響應

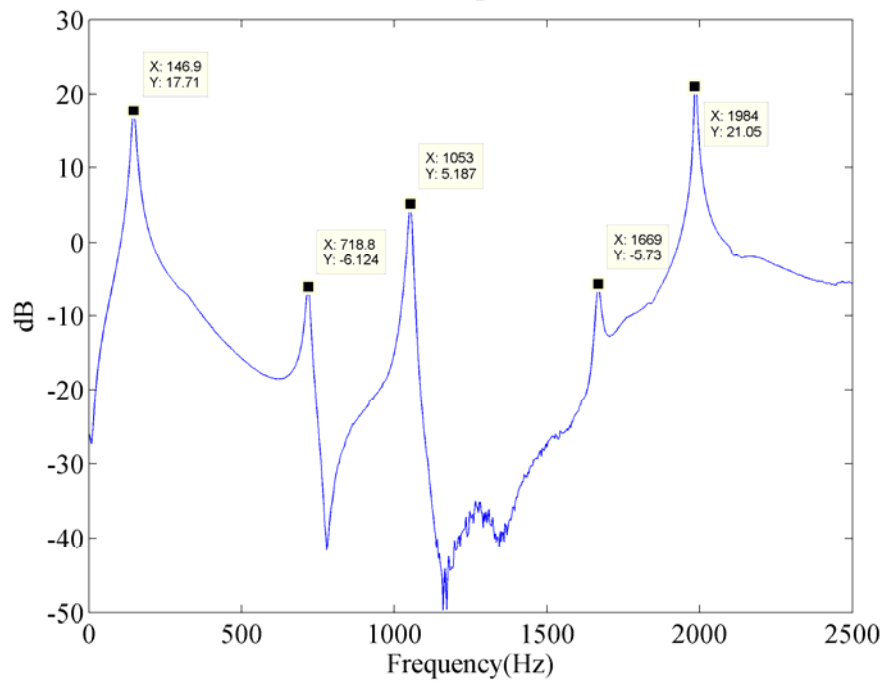
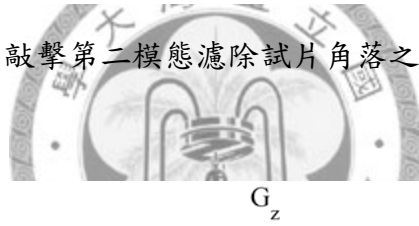


圖 4.35 敲擊 G_z 點，第二模態濾除信號之頻率響應

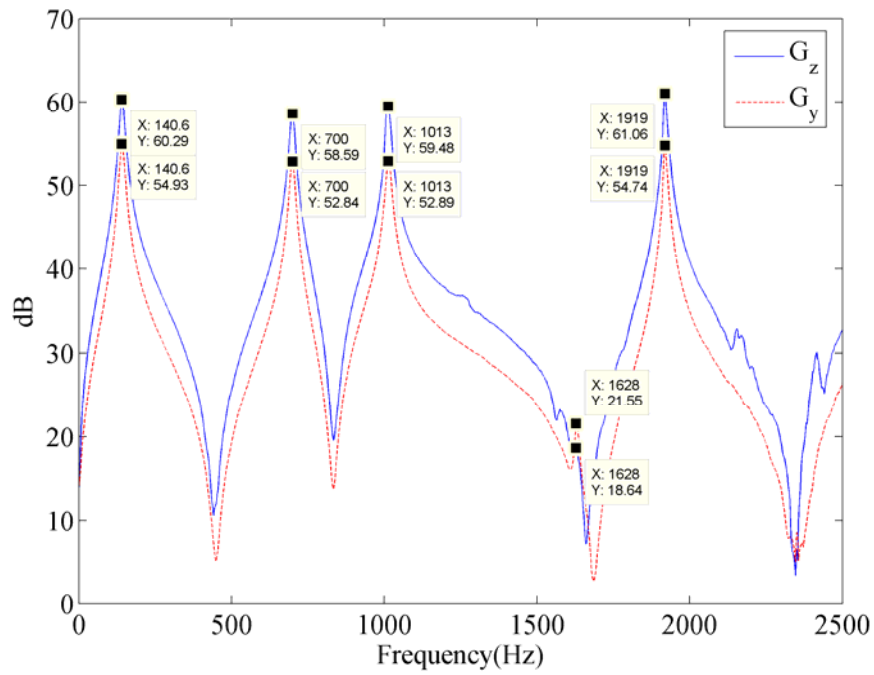


圖 4.36 垂直和側向敲擊第三模態感測試片角落之雷測信號之頻譜響應

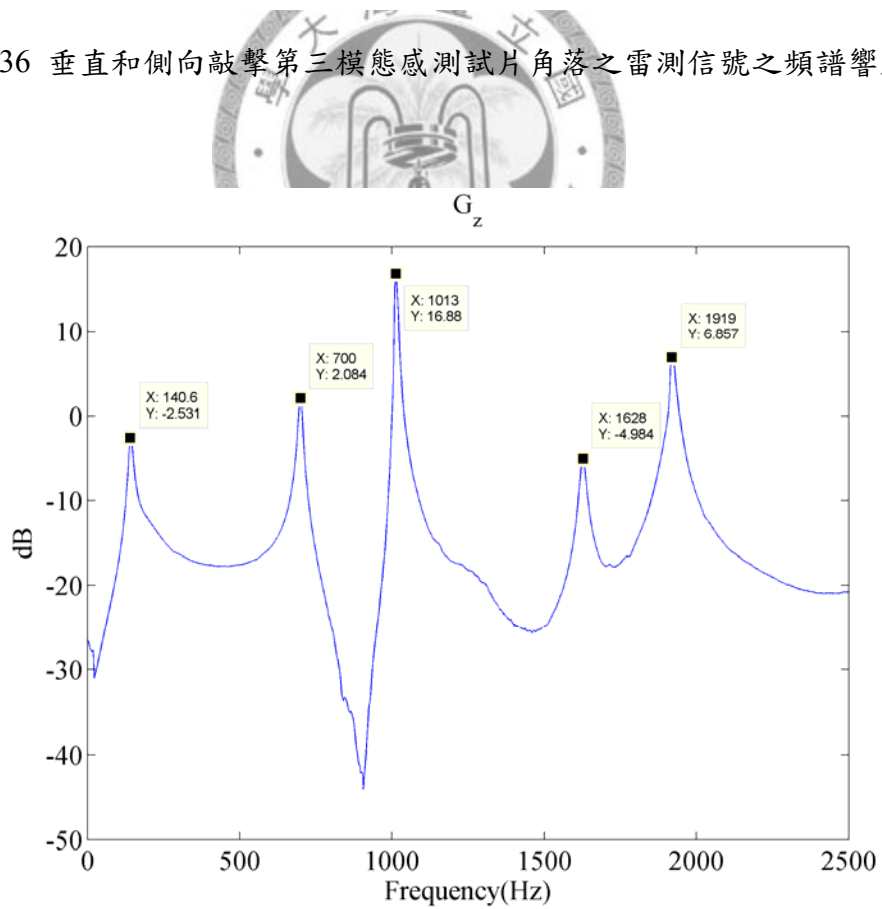


圖 4.37 敲擊 G_z 點，第三模態感測信號之頻率響應

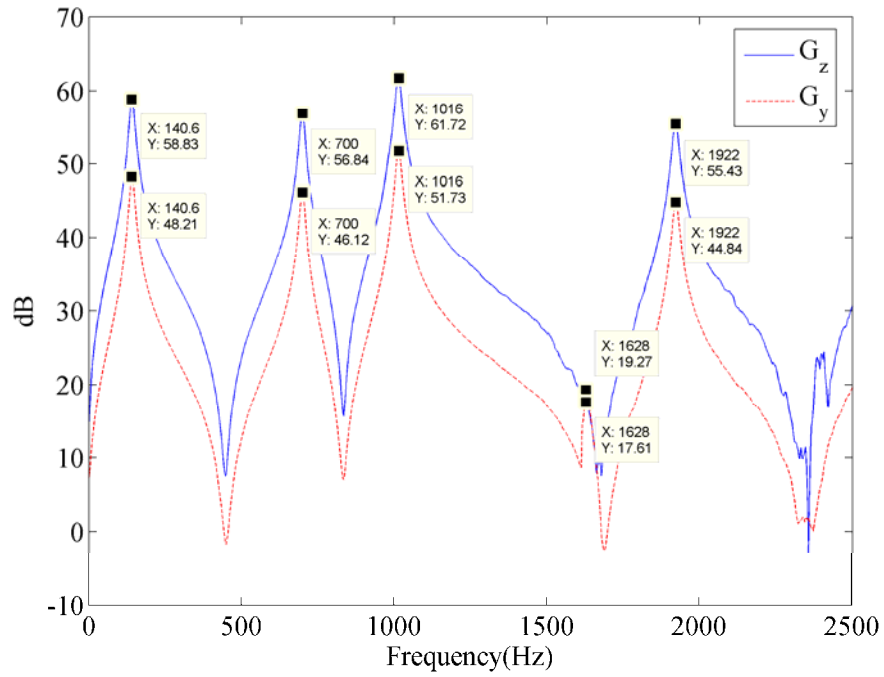


圖 4.38 垂直和側向敲擊第三模態濾除試片角落之雷射信號之頻譜響應

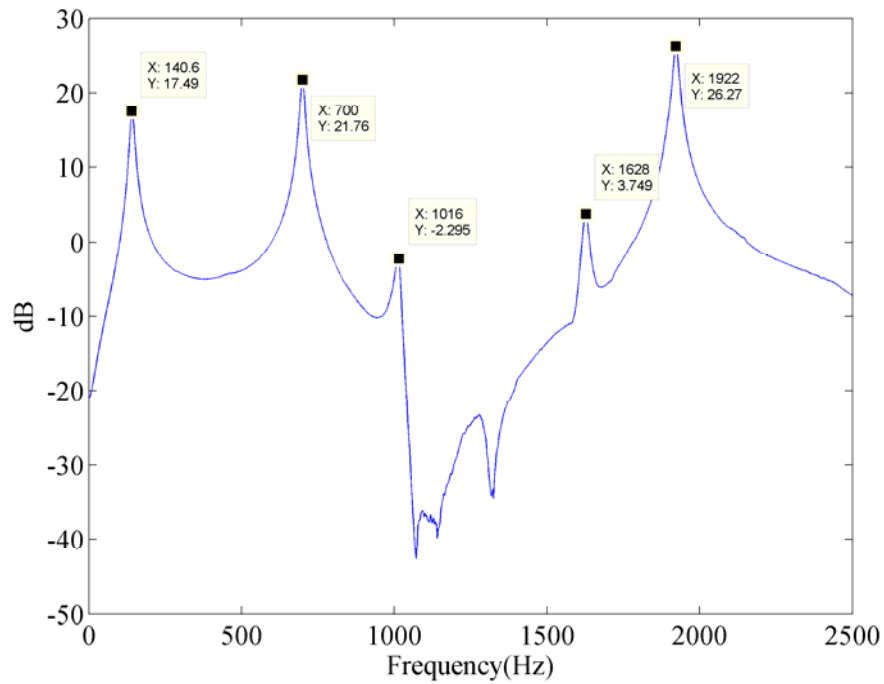


圖 4.39 敲擊 G_z 點，第三模態濾除信號之頻率響應

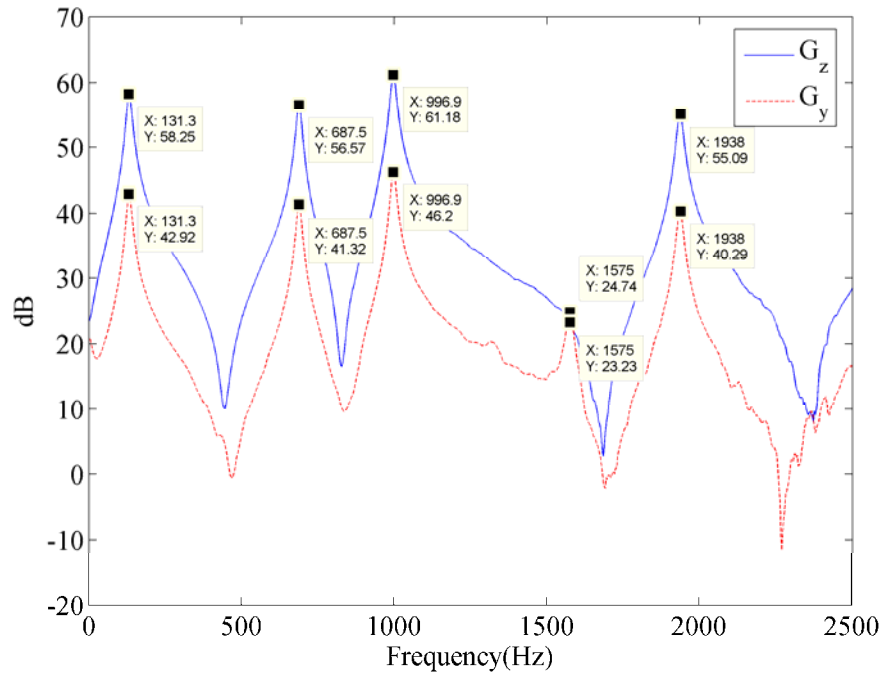


圖 4.40 垂直和側向敲擊第四模態感測試片角落之雷射信號之頻譜響應

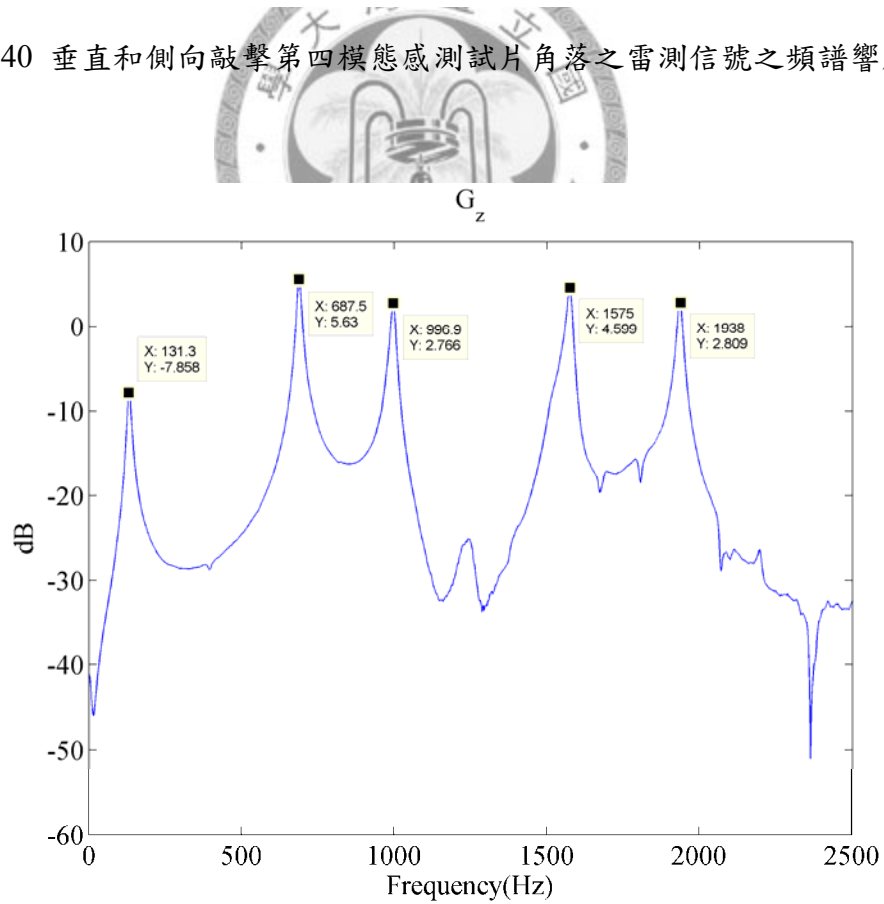


圖 4.41 敲擊 G_z 點，第四模態感測信號之頻率響應

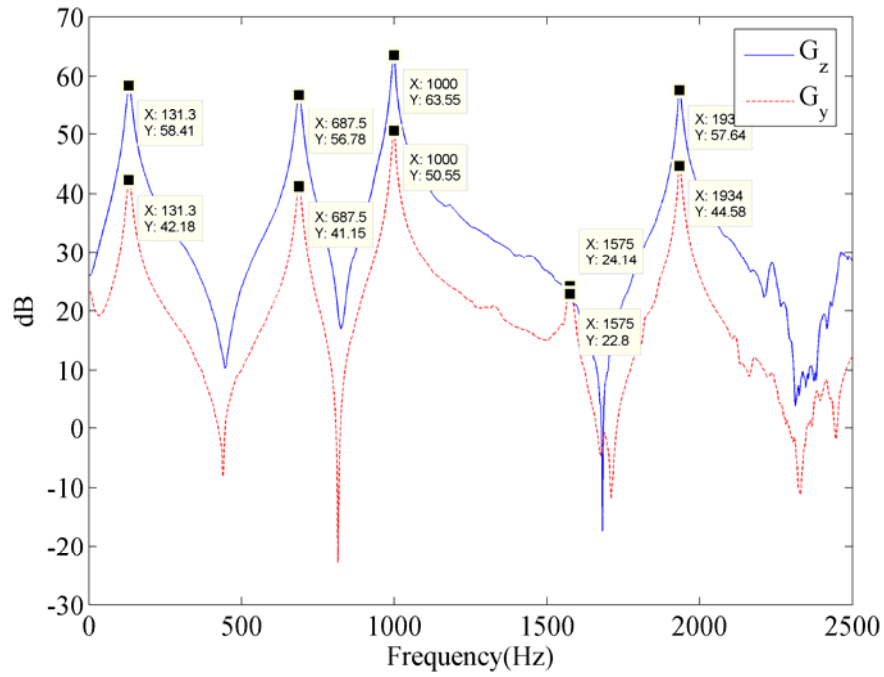


圖 4.42 垂直和側向敲擊第四模態濾除試片角落之雷測信號之頻譜響應

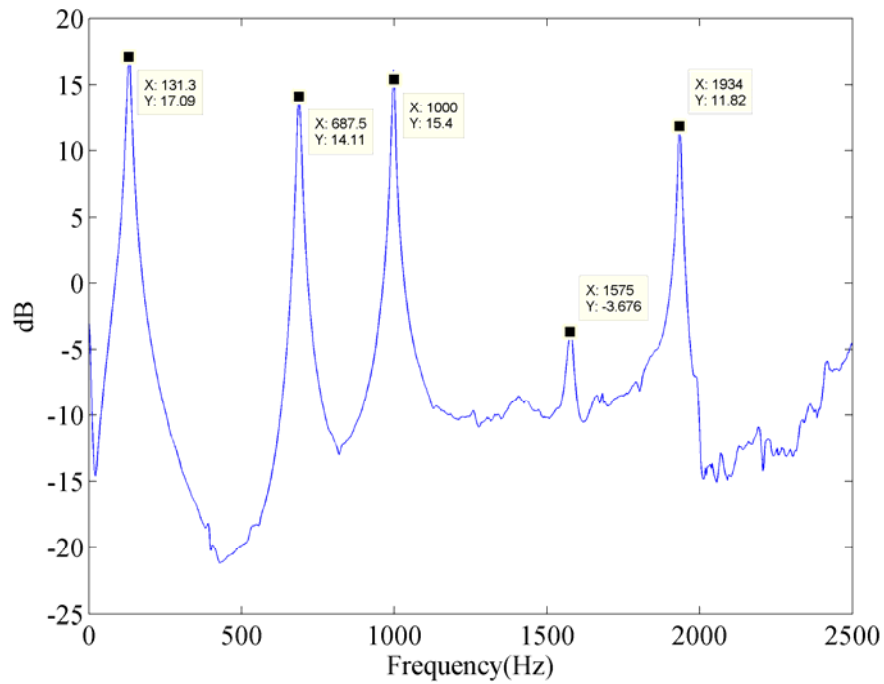


圖 4.43 敲擊 G_z 點，第四模態濾除信號之頻率響應

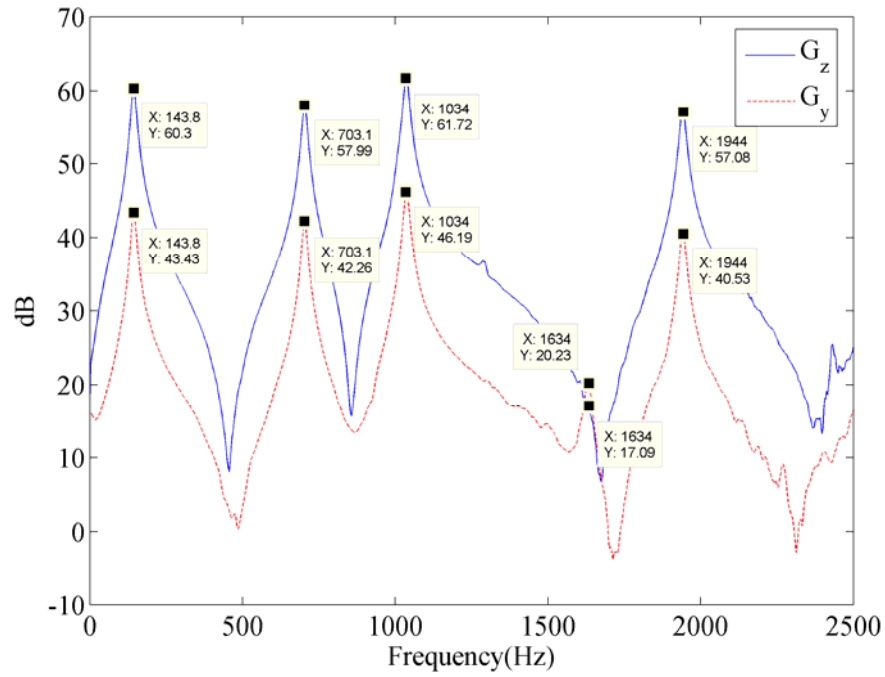


圖 4.44 垂直和側向敲擊第五模態感測試片角落之雷測信號之頻譜響應

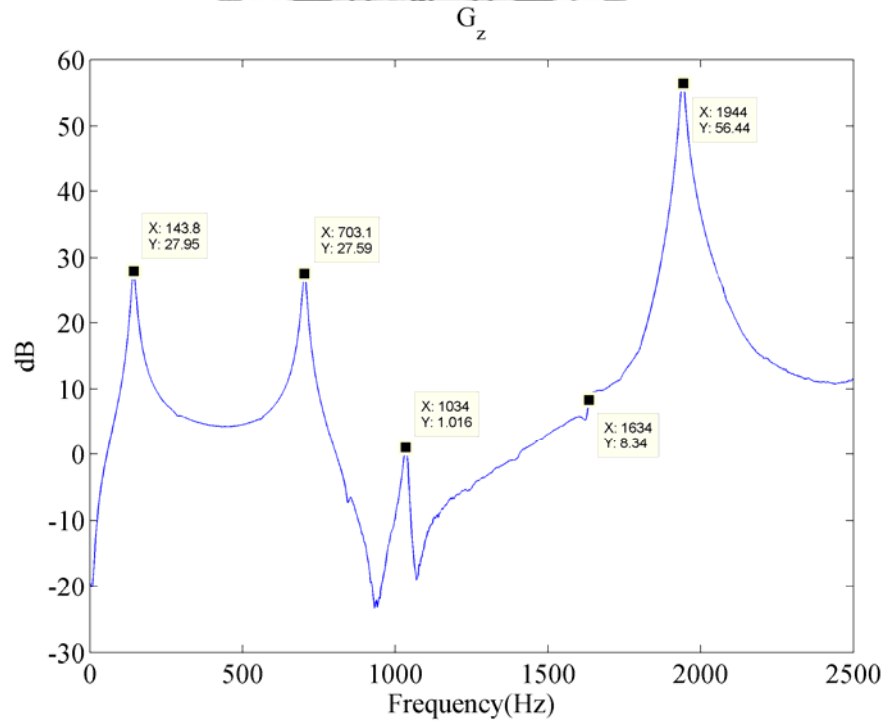
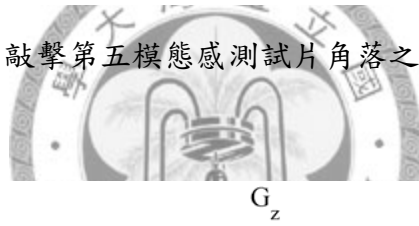


圖 4.45 敲擊 G_z 點，第五模態感測信號之頻率響應

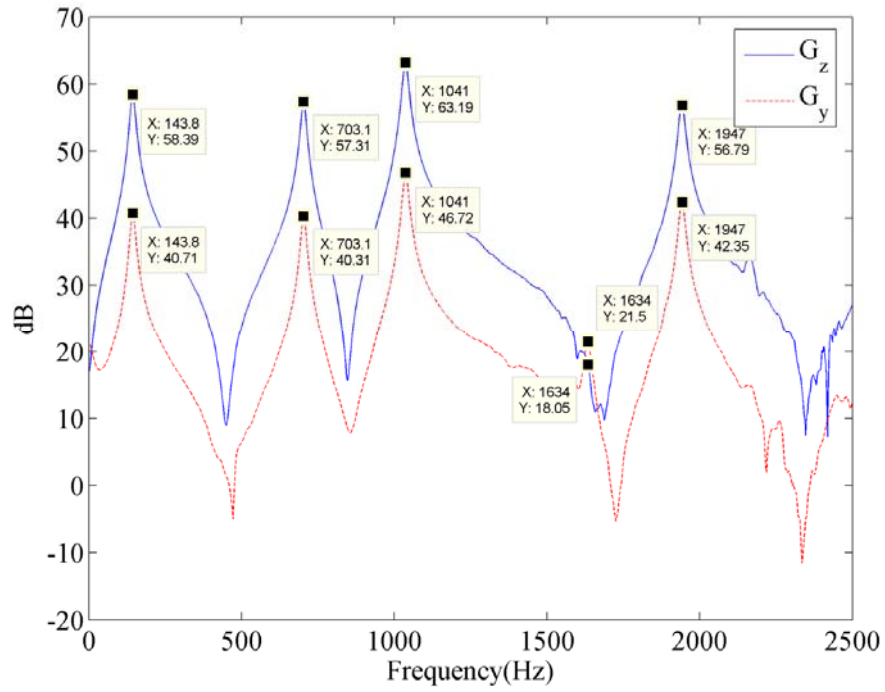


圖 4.46 垂直和側向敲擊第五模態濾除試片角落之雷測信號之頻譜響應



G

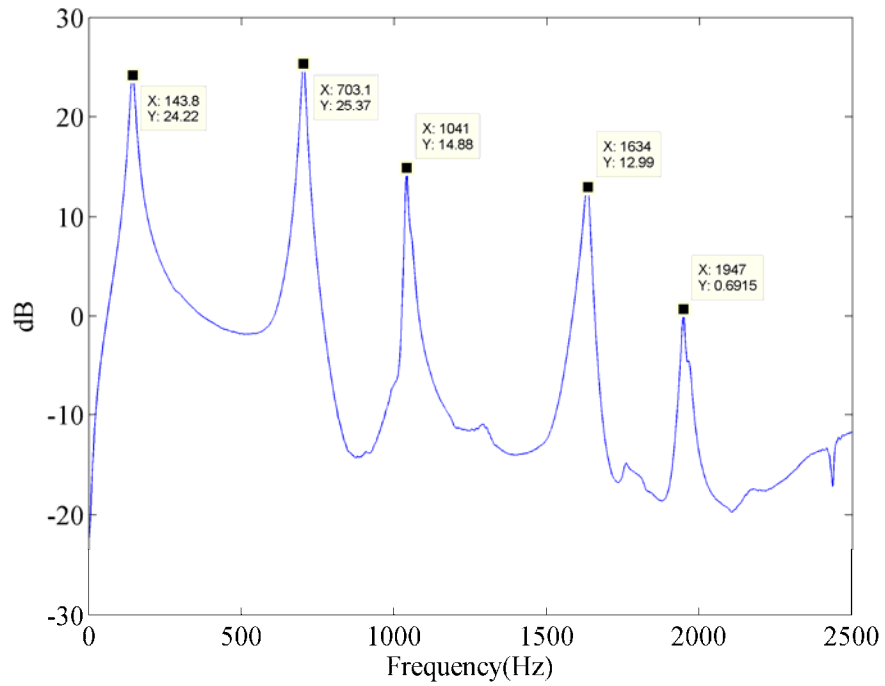


圖 4.47 敲擊 G_z 點，第五模態濾除信號之頻率響應

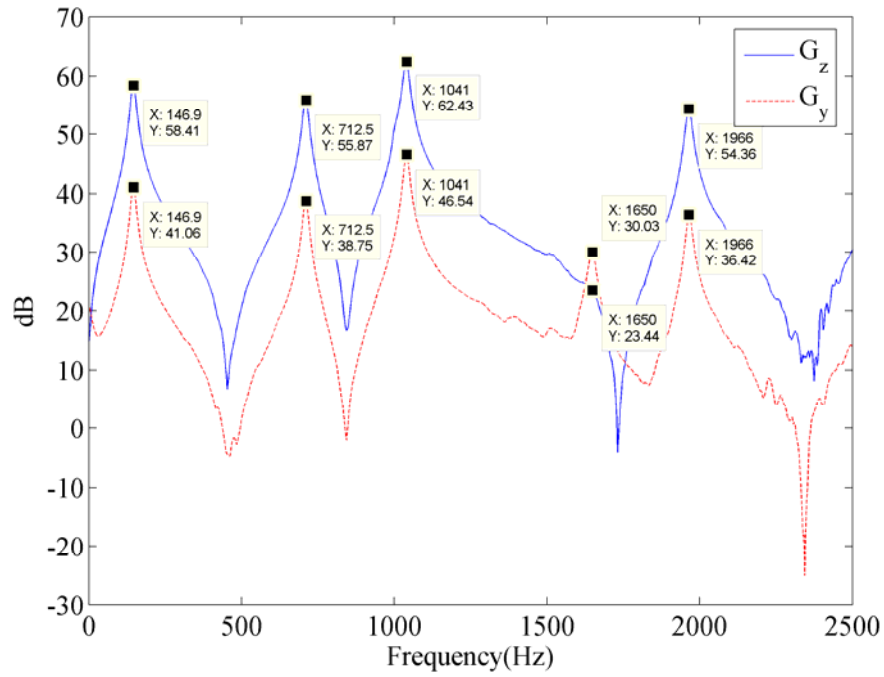


圖 4.48 垂直和側向敲擊多功能第一、二和五模態濾除試片角落之雷測信號之頻譜

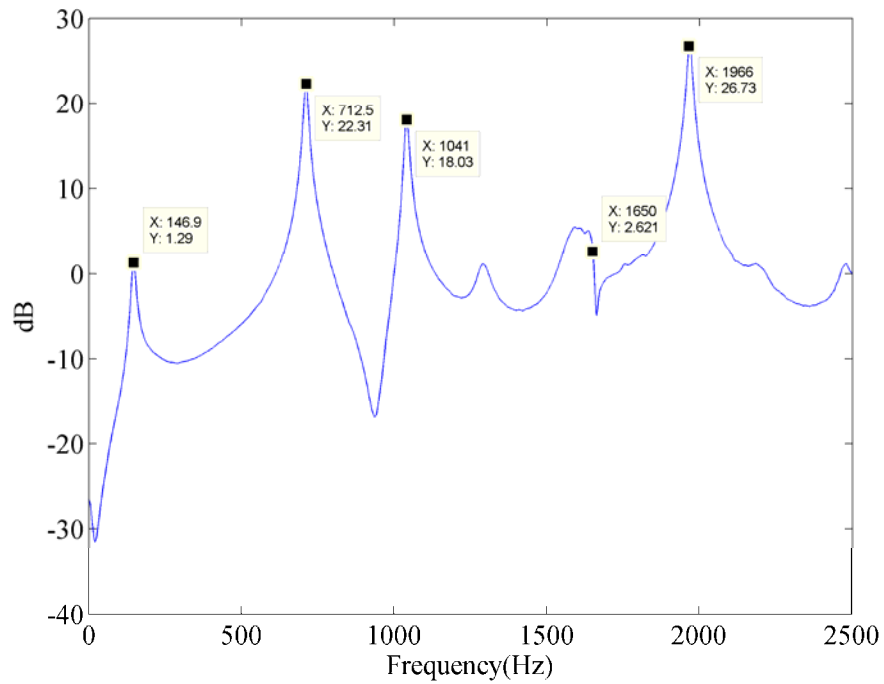
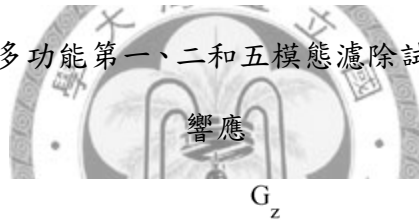


圖 4.49 敲擊 G_z 點，第一模態濾除信號之頻率響應

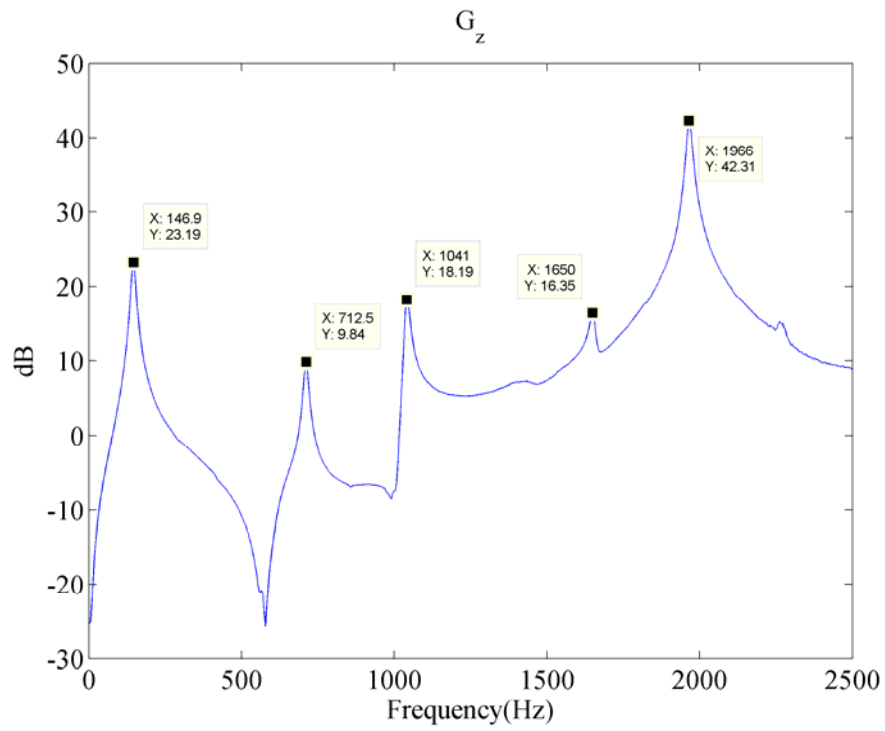


圖 4.50 敲擊 G_z 點，第二模態濾除信號之頻率響應

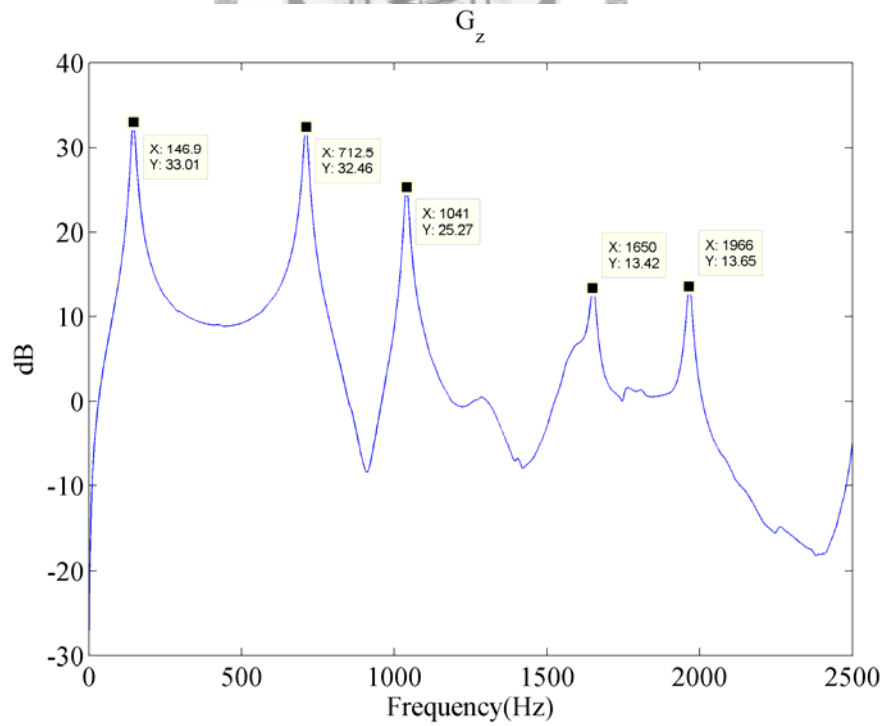


圖 4.51 敲擊 G_z 點，第五模態濾除信號之頻率響應

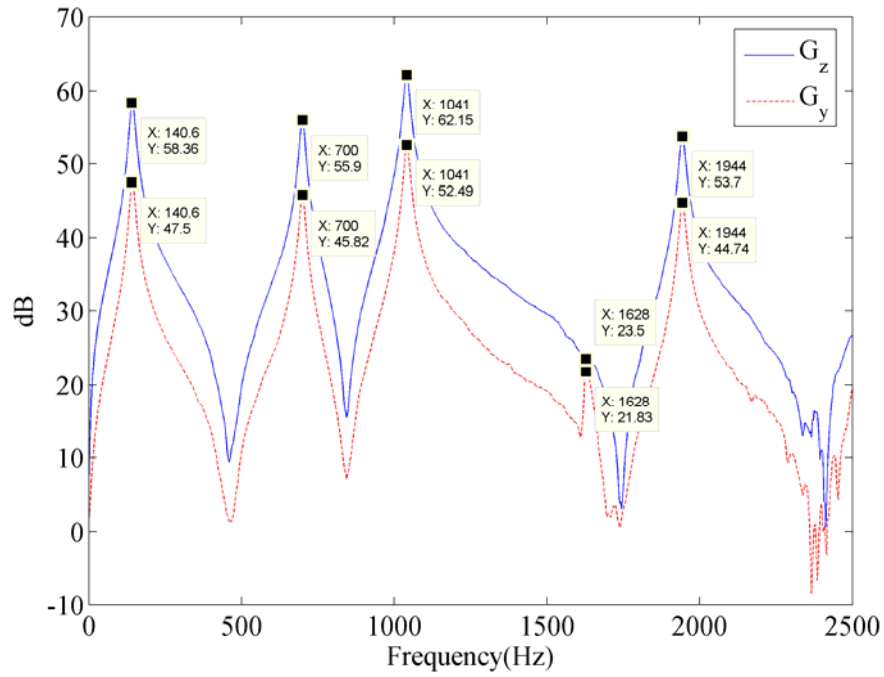


圖 4.52 垂直和側向敲擊多功能第三模態感測與濾除器試片角落之雷測信號之頻

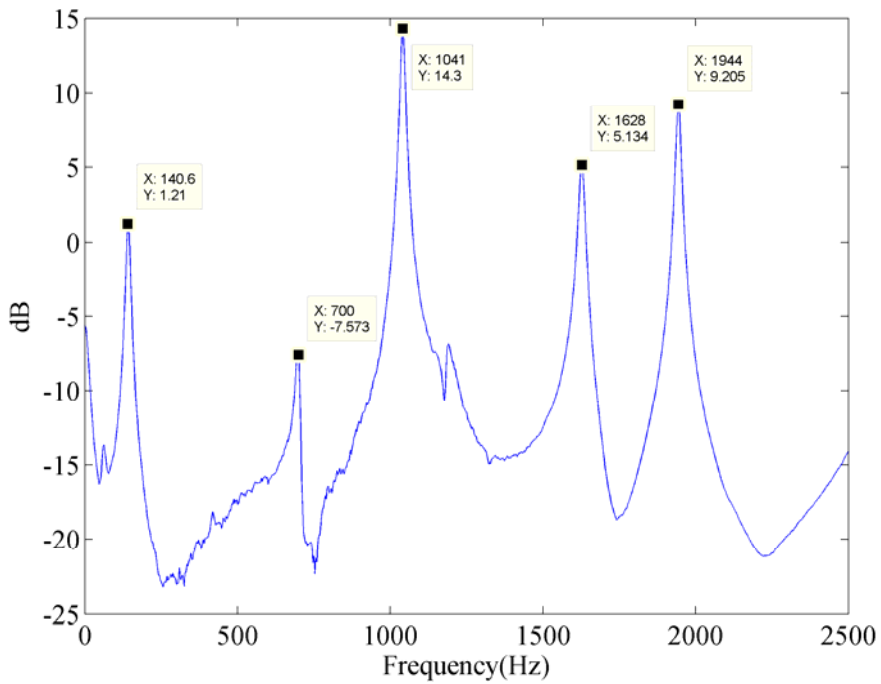
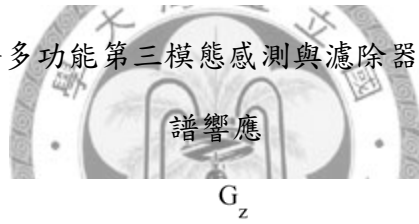


圖 4.53 敲擊 G_z 點，第三模態感測信號之頻率響應

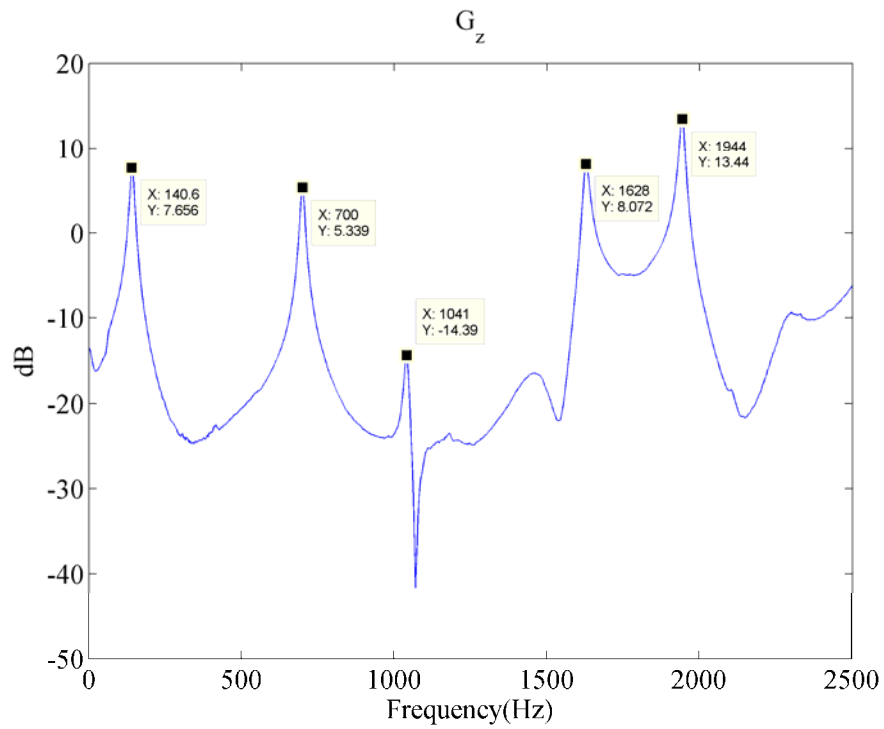


圖 4.54 敲擊 G_z 點，第三模態濾除信號之頻率響應

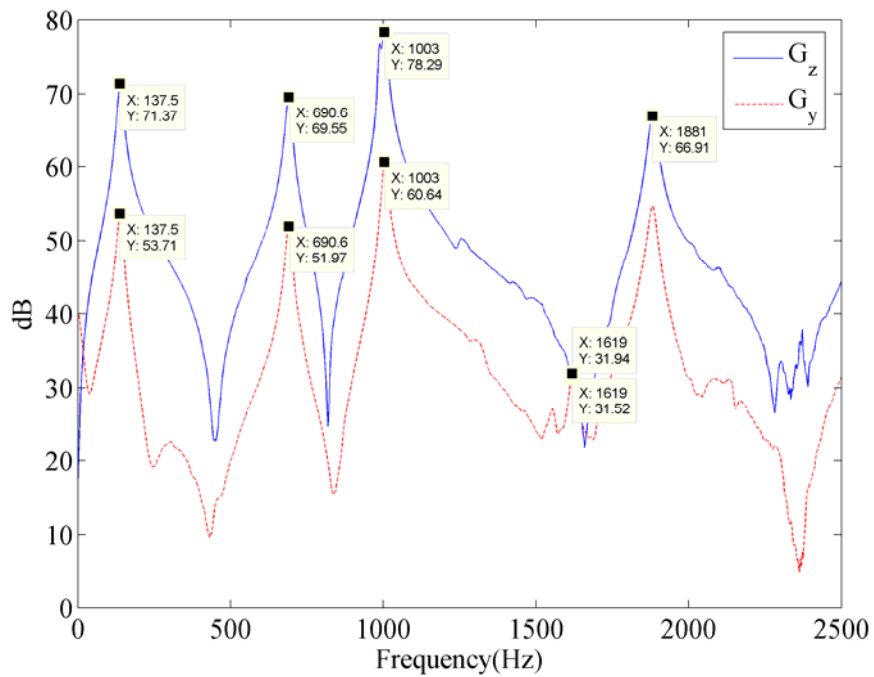


圖 4.55 垂直和側向敲擊多功能第四模態感測與濾除器試片角落之雷射信號之頻率響應

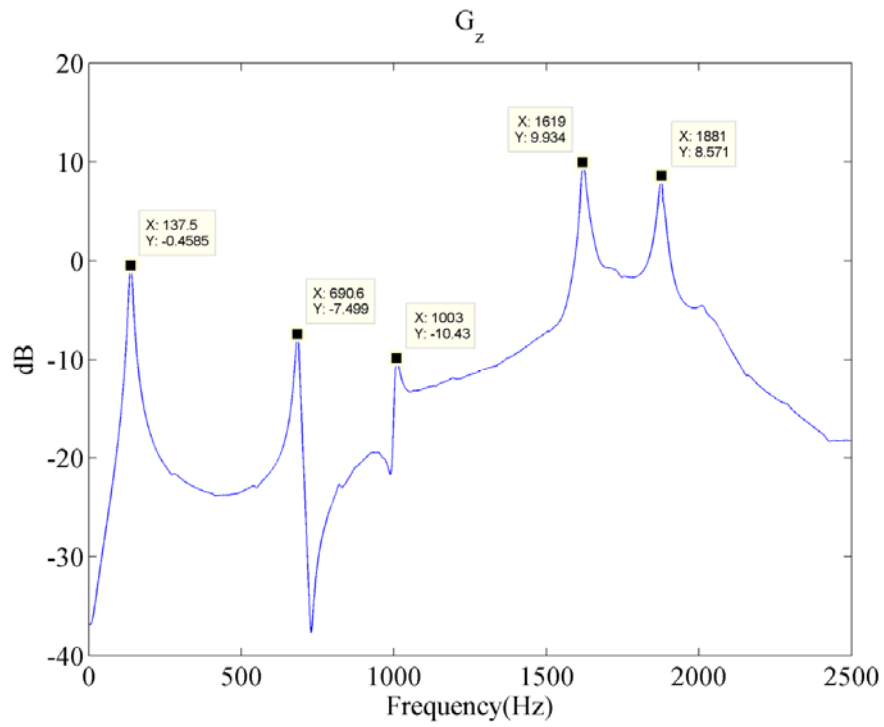


圖 4.56 敲擊 G_z 點，第四模態感測信號之頻率響應

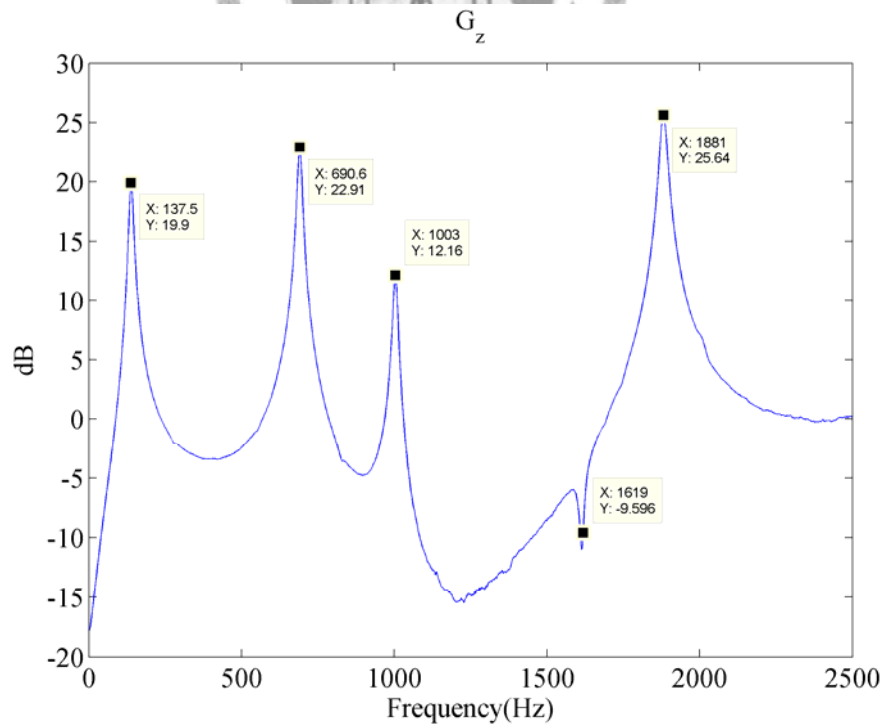


圖 4.57 敲擊 G_z 點，第四模態濾除信號之頻率響應

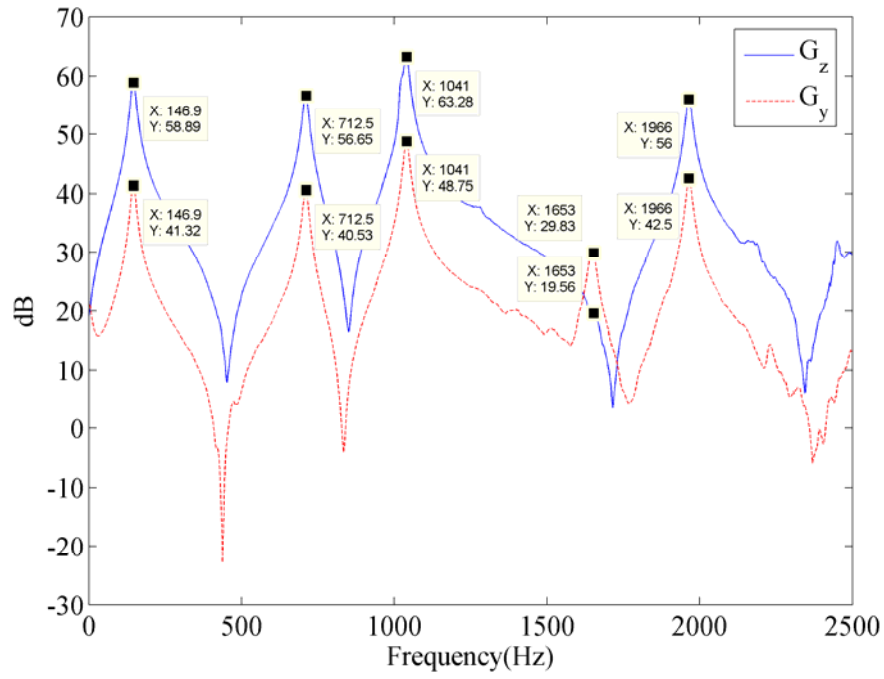


圖 4.58 垂直和側向敲擊多功能第五模態感測與濾除器試片角落之雷測信號之頻

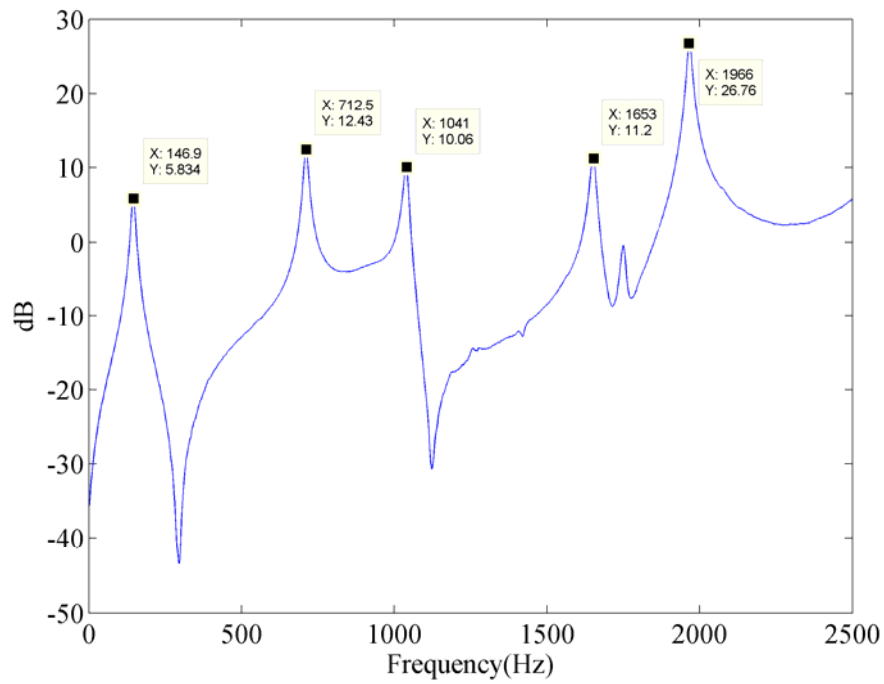
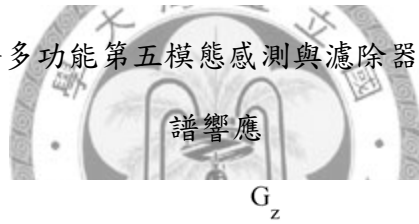


圖 4.59 敲擊 G_z 點，第五模態感測信號之頻率響應

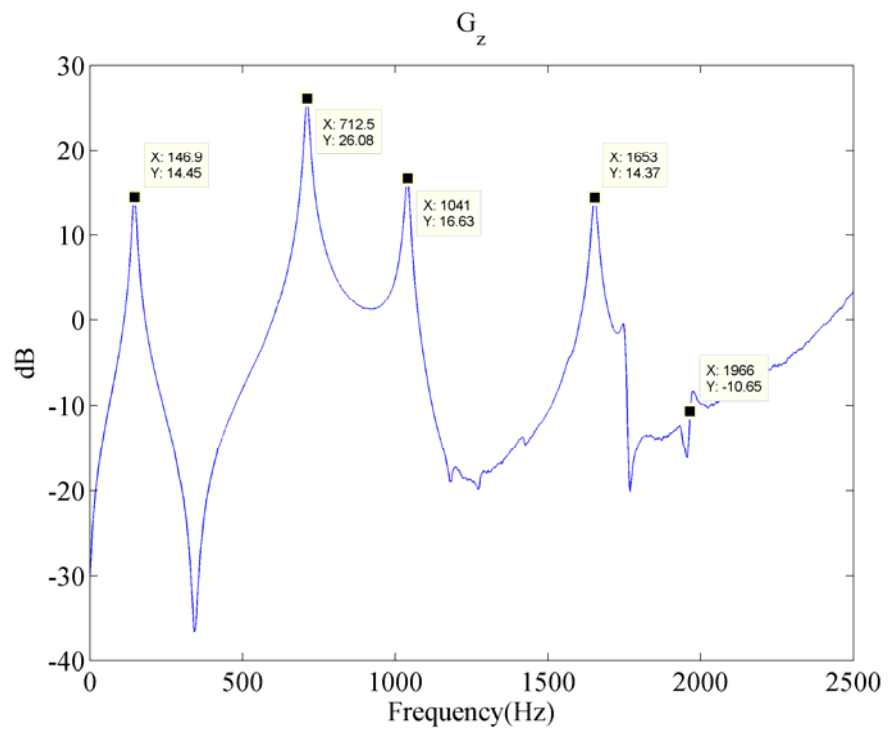


圖 4.60 敲擊 G_z 點，第五模態濾除信號之頻率響應



附錄

附錄 A

$\mathbf{f} \cdot \mathbf{A}\mathbf{g}$ 和 $\mathbf{g} \cdot \mathbf{A}\mathbf{f}$ 可以寫成

$$\begin{aligned}\mathbf{f} \cdot \mathbf{A}\mathbf{g} &= \mathbf{F} \cdot \mathbf{L}\mathbf{G} + \mathbf{F} \cdot \mathbf{E}\boldsymbol{\zeta} + \eta\mathbf{P}\mathbf{G} + \eta\mathbf{D}\boldsymbol{\zeta} \\ &= (F_j c_{ijkl}^E G_{k,l})_{,i} - F_{j,i} c_{ijkl}^E G_{k,l} + (F_j e_{kij} \zeta_{,k})_{,i} \\ &\quad - F_{j,i} e_{kij} \zeta_{,k} + \eta(e_{kij} G_{i,j})_{,k} - \eta(\varepsilon_{ij}^S \zeta_{,i})_{,j}\end{aligned}\quad (\text{A. 1})$$

和

$$\begin{aligned}\mathbf{g} \cdot \mathbf{A}\mathbf{f} &= \mathbf{G} \cdot \mathbf{L}\mathbf{F} + \mathbf{G} \cdot \mathbf{E}\boldsymbol{\eta} + \zeta\mathbf{P}\mathbf{F} + \zeta\mathbf{D}\boldsymbol{\eta} \\ &= (G_j c_{ijkl}^E F_{k,l})_{,i} - G_{j,i} c_{ijkl}^E F_{k,l} + (G_j e_{kij} \eta_{,k})_{,i} \\ &\quad - G_{j,i} e_{kij} \eta_{,k} + \zeta(e_{kij} F_{i,j})_{,k} - \zeta(\varepsilon_{ij}^S \eta_{,i})_{,j}\end{aligned}\quad (\text{A. 2})$$

(A. 1)式減上(A. 2)式得

$$\begin{aligned}\mathbf{f} \cdot \mathbf{A}\mathbf{g} - \mathbf{g} \cdot \mathbf{A}\mathbf{f} &= [F_j (c_{ijkl}^E G_{k,l} + e_{kij} \zeta_{,k})]_{,i} - [G_j (c_{ijkl}^E F_{k,l} + e_{kij} \eta_{,k})]_{,i} + (\eta e_{kij} G_{i,j})_{,k} \\ &\quad - (\eta \varepsilon_{ij}^S \zeta_{,i})_{,j} - (\zeta e_{kij} F_{i,j})_{,k} + (\zeta \varepsilon_{ij}^S \eta_{,i})_{,j} - \zeta_{,j} \varepsilon_{ij}^S \eta_{,i} + \eta_{,j} \varepsilon_{ij}^S \zeta_{,i} \\ &\quad + (G_{j,i} c_{ijkl}^E F_{k,l} - F_{j,i} c_{ijkl}^E G_{k,l}) - F_{j,i} e_{kij} \zeta_{,k} + \zeta_{,k} e_{kij} F_{i,j} - \eta_{,k} e_{kij} G_{i,j} \\ &\quad + G_{j,i} e_{kij} \eta_{,k}\end{aligned}\quad (\text{A. 3})$$

將(A. 3)式對全區域做體積分並利用材料對稱性 $c_{ijkl}^E = c_{klij}^E = c_{jikl}^E = c_{ijlk}^E$, $e_{kij} = e_{kji}$, 和

$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji}$ 可得到

$$\begin{aligned}\int_V (\mathbf{f} \cdot \mathbf{A}\mathbf{g} - \mathbf{g} \cdot \mathbf{A}\mathbf{f}) dV &= \int_D [F_j (c_{ijkl}^E G_{k,l} + e_{kij} \zeta_{,k})]_{,i} dV \\ &\quad - \int_D [G_j (c_{ijkl}^E F_{k,l} + e_{kij} \eta_{,k})]_{,i} dV \\ &\quad + \int_D [\eta (e_{kij} G_{i,j} - \varepsilon_{ik}^S \zeta_{,i})]_{,k} dV \\ &\quad - \int_D [\zeta (e_{kij} F_{i,j} - \varepsilon_{ik}^S \eta_{,i})]_{,k} dV\end{aligned}\quad (\text{A. 4})$$

利用高斯積分將(A. 4)式改寫整理得

$$\begin{aligned}\int_D (\mathbf{f} \cdot \mathbf{A}\mathbf{g} - \mathbf{g} \cdot \mathbf{A}\mathbf{f}) dx &= \int_{S_r+S_u} [\mathbf{F} \cdot \mathbf{T}(\mathbf{G}, \boldsymbol{\zeta}) - \mathbf{G} \cdot \mathbf{T}(\mathbf{F}, \boldsymbol{\eta})] dS \\ &\quad + \int_{S_\sigma+S_\varphi+S_S} [\eta \mathbf{B}(\mathbf{G}, \boldsymbol{\zeta}) - \zeta \mathbf{B}(\mathbf{F}, \boldsymbol{\eta})] dS\end{aligned}\quad (\text{A. 5})$$

附錄 B

特徵函數 Φ_r 和 Φ_s 必須滿足方程式(2.23)

$$\mathbf{A}\Phi_r + \omega_r^2 \mathbf{M}\Phi_r = 0 \quad (\text{B. 1})$$

$$\mathbf{A}\Phi_s + \omega_s^2 \mathbf{M}\Phi_s = 0 \quad (\text{B. 2})$$

將(B. 1)式左乘 Φ_s 而(B. 2)式左乘 Φ_r

$$\Phi_s \cdot \mathbf{A}\Phi_r + \omega_r^2 \Phi_s \cdot \mathbf{M}\Phi_r = 0 \quad (\text{B. 3})$$

$$\Phi_r \cdot \mathbf{A}\Phi_s + \omega_s^2 \Phi_r \cdot \mathbf{M}\Phi_s = 0 \quad (\text{B. 4})$$

(B. 3)式與(B. 4)式對全區域做體積分可得

$$\int_D \Phi_s \cdot \mathbf{A}\Phi_r d\mathbf{X} + \omega_r^2 \int_D \Phi_s \cdot \mathbf{M}\Phi_r d\mathbf{X} = 0 \quad (\text{B. 5})$$

$$\int_D \Phi_r \cdot \mathbf{A}\Phi_s d\mathbf{X} + \omega_s^2 \int_D \Phi_r \cdot \mathbf{M}\Phi_s d\mathbf{X} = 0 \quad (\text{B. 6})$$

(B. 5)式減上(B. 6)式

$$\int_D \Phi_s \cdot \mathbf{A}\Phi_r - \Phi_r \cdot \mathbf{A}\Phi_s d\mathbf{X} + (\omega_r^2 - \omega_s^2) \int_D \Phi_r \cdot \mathbf{M}\Phi_s d\mathbf{X} = 0 \quad (\text{B. 7})$$

由於系統為自伴隨系統，故上式簡化成

$$\int_D \Phi_r \cdot \mathbf{M}\Phi_s d\mathbf{X} = \delta_{rs} M_r \quad (\text{B. 8})$$

將(B. 8)式代入(B. 6)式可得

$$\int_D \Phi_r \cdot \mathbf{A}\Phi_s d\mathbf{X} = -\omega_s^2 \int_D \Phi_r \cdot \mathbf{M}\Phi_s d\mathbf{X} = -\delta_{rs} M_r \omega_r^2 \quad (\text{B. 9})$$

附錄 C

一、PZT-FT3 之材料常數：

$$\text{密度： } \rho = 7560 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

彈性係數：

$$[C] = \begin{bmatrix} 12.6 & 7.95 & 8.41 & 0 & 0 & 0 \\ 7.95 & 12.6 & 8.41 & 0 & 0 & 0 \\ 8.41 & 8.41 & 12.4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2.3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.35 \end{bmatrix} \times 10^{10} \left(\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right)$$

壓電耦合係數：

$$[d] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 741 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 741 & 0 & 0 \\ -274 & -274 & 550 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times 10^{-12} \left(\frac{\text{C}}{\text{N}} \right)$$

相對介電係數：

$$\begin{bmatrix} \varepsilon^T \\ \varepsilon_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3130 & 0 & 0 \\ 0 & 3130 & 0 \\ 0 & 0 & 2200 \end{bmatrix}$$

$$\varepsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12} \left(\frac{\text{C}^2}{\text{N} \cdot \text{m}^2} \right)$$

二、鋁合金 6061-T651 之材料常數：

$$\text{密度： } \rho = 2700 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

楊氏係數： $E = 6.890 \times 10^{10} \left(\frac{N}{m^2} \right)$

泊松比： $\nu = 0.330$



作者簡歷

姓名：李智航

生日：民國七十三年六月二十三日

籍貫：福建省金門縣

學歷：民國九十一年畢業於國立金門高級中學

民國九十五年畢業於私立逢甲大學機械與電腦輔助工程學系

地址：金門縣金湖鎮新市里中正路 59 號

