第一章 緒論

1.1 前言

有別於一般機械、航太、電子、電機等產業，土木營建產業的特性就是唯一與不可複製；例如橋樑、水壩、一般樓房建物、大型會場（例如巨蛋球場、音樂廳）等，往往因所處地理位置與功能需求迥異而有不同之設計考量。比方基礎開挖方式的選擇、基礎版形式的決定、鋼結構或鋼筋混凝土結構的選用、樓層與隔間的配置等，諸如此類設計因子，造成每一個土木建物的唯一與不可複製性。

一般結構設計理論與現場施工常有些許的差異存在，亦即結構物施工完成後，其真實結構特性是我們最想知道的。更因為台灣位處菲律賓板塊與歐亞板塊交界帶上，地震發生頗為頻繁。頻繁的地震常造成結構物的損害與人民生命財產的損失。在大震不倒、中震可修、小震不壞的設計前提下，結構物在經歷地震後，即便外表無明顯損壞，但其結構系統是否還保有原來特性？是否經得起再次地震？都是我們想知道的。不同於機械、電子等產業可經實體測試再行量產，土木結構基於本身特性與成本考量，實體測試有其困難與不便。一般常藉由數值模型以模擬真實狀況，但是難免與真實情況有程度上的差異。

系統識別（system identification）在土木工程領域中經過長時間的研究發展，已經成為在結構物動態特性識別上可以信賴的方法與工具。一般可藉由量測結構物實際振動反應，例如真實地震反應量測、微振動量測、強迫振動量測與自由振動量測等，再經由逆運算求得結構物的頻率、阻尼比與模態等動態特性。

1.2 研究動機與方法

近年來政府積極推動兩兆雙星計畫, 其中半導體產業與影像顯示產業, 因為該二項產業之未來產值分別達台幣兆元以上而稱謂之兩兆產業；而數位內容產業與生物技術產業, 因為該二項產業屬未來之明星產業而稱謂之雙星產業。

台灣半導體產業擁有完整之垂直專業分工體系, 於未來為了保持市場競爭力與獲利空間，朝 12 吋晶圓廠發展為必然趨勢。但是隨著製程技術的日益精進，元件的尺寸也越趨精緻。相形之下，半導體、微電子等精密產業對於作業環境周遭的微振動標準亦越趨嚴格, 如此才能確保產品能有較高的良率。國內土木建築相關業者近二十年來雖然累積許多高科技廠房的承建經驗，但是尚無法掌握微振動分析技術，仍需依賴國外顧問公司之協助，殊為可惜。倘若能精確掌握相關技術，則有助於提升國內土木營建業者的工程技術與國際競爭能力。

適逢“ 國家奈米元件實驗室新建工程 ”的興建, 本研究得以進行相當難能可貴的晶圓廠現地微振動量測實驗。本研究主要可分為兩大部份，其一為配合實驗室新建工程的興建，分別進行實驗室各階段的微動量測與分析。其二為待土建工程完工後，於實驗大樓(FAB 棟與 CUB 棟)不同樓層與 FAB 棟 class 100 之潔淨室進行微振量測，並利用次空間法(subspace approach)透過微振訊號識別實驗大樓的模態。

1.3 文獻回顧

晶圓廠之振動來源，可分為內部振動源及外部振動源。內部振動源含廠房內設備運轉（包括幫浦、冰水主機、冷卻水塔、風機等）、人員走動與搬運車之運動等。外部振動源則指廠房外交通、風力、周圍鄰房或工地施工所致之振動源。晶圓廠內置於黃光區之儀器設備如電子束寫(E-beam)、光學顯影(optical litho)及光罩(masking)等機台對於微動甚為敏感。雖然各種儀器設備均有其微動要求之規格，但於建廠時, 一般均依照 ISO16950 規範或 Gordon[1]所提微電子產業敏感儀器設備之容許振動標準（參考圖 1)。一般而言，8 吋晶圓廠房須滿足 VC-D 曲線之微振動要求；12 吋晶圓廠房須滿足 VC-E 曲線。美國半導體協會甚至預測 2007 年以後，0.1μm 以下之製程技術將要求小於 50μin/sec 之微振動標準。此將更造成地小人稠國家如台灣，在晶圓廠房選址之困難度。

雖然微振動是晶圓廠之設計與晶圓生產良率一重要之影響因素，但相關之研究論文並不多見；或許，此乃由於晶圓廠商業機密所限。此方面所發表論文主題可概分為五類：(1) 探討精密設備之容許振動標準[1-4]；例如 Amick 等人[3]提出奈米技術設備之容許振動標準，並初步建議該等設備所在樓板之結構型式。(2)廠房振動評估項目、量測技術與分析方法[5-9]；例如，文獻[7][9]詳細描述晶圓廠房動態量測項目(包括微動、敲擊、強迫振動試驗)、試驗設備規格、與信號分析技巧。(3) 潔淨室(cleanroom)樓板與機製程台之振動量測與分析[10-12] ；例如 Gordon 和 Tran [10]首先提出製程機台與樓板連接之機座設計對製程機台微振動之影響機制。(4) 機製程台之微動控制[13-15] ；例如 Kim 和 Amick [13]以實際案例，探討潔淨室中製程機台或設備微動控制，提出主動配合被動控制機制。(5)結構微動設計

[16-18]；例如 Bayat 和 Gordon[17]利用土壤與結構互制分析，探討不同土壤性質與基礎設計對振動敏感機器設備之影響。

以上之文獻回顧顯示尚未有研究論文針對一晶圓廠於不同建廠階段之微動量提出報告；此部分之研究甚為重要。目前之振動標準乃針對設備機台，但於建廠選址時，素地之環境振動標準應為何，現未有定論；此引致之爭議在制定高速鐵路通過南部科學園區振動標準中表露無遺。當然，潔淨室機台振動大小與素地振動大小之關係是與結構系統、機台機座(可能含主被動裝置)、及內外部振動源有關；欲利用數值分析，有其困難度，且目前未有關研究論文出現。本研究報告國家奈米元件實驗室於不同興建階段(包括素地、地下室開挖完成、地下室基礎完成、結構物完成、通風與冰水主機運作中，歷經一年半之量測)之微動量測結果；並從該實驗室之模態識別結果，定性探討不同興建階段微動量測結果。雖然國家奈米元件實驗室並非標準廠房，但其有與一般晶圓廠類似之潔淨室構造，並且其結構相關資料較易取得（不像一般晶圓廠，因商業機密而非常不易取得資料）。期望本研究結果能提供晶圓廠廠務人員了解晶圓廠微動之特性，並提供結構工程師發展微動數值分析程式之驗證。

1.4 論文內容

本論文後續各章節內容概述如下：第二章 NDL(National Nano Device Laboratories, 簡稱 NDL)介紹，主要為國家奈米元件實驗室之發展歷程與潔淨室介紹。第三章 資料分析方法，主要為本研究資料分析方法之介紹，包含計算單邊能譜密度函數（one-side power-spectral-density, PSD)、1/3 倍頻速度均方根值(root-mean-square value，RMS）與次空間法系統識別。第四章 微動反應量測及分析，主要包含量測系統介紹、量測佈置說明、歷次量測分析結果與討論。第五章 結論與建議，將本研究作一完整總結，並建議可再修正之方向。

第二章 奈米元件實驗室與潔淨室介紹

2.1 NDL 歷史簡介

國家奈米元件實驗室，座落於新竹國立交通大學校園內，緊臨著科學園區，是行政院國家科學委員會所屬六大國家實驗室之一。成立的宗旨主要為：(一)培訓國內半導體之專業人才；(二)協助國內學術界進行半導體材料、製程、與元件之研究發展；(三)研發前瞻性奈米元件關鍵技術。

國家奈米元件實驗室成立於民國七十七年，原名「國家次微米元件實驗室」，民國八十一年完成了 6 吋矽晶圓潔淨室的建造，並隨即開放提供學術界進行半導體材料及元件的研發。為避免與隨後成立之「工研院電子所次微米計畫」混淆，故於民國八十二年函報行政院，更名為「國家毫微米元件實驗室」。在長度公制單位上，「毫微米」與後來採用之「奈米」尺寸是一致的。但是由於名稱不同，常造成不明者混淆不清與誤解。因此，於民國九十一年函報行政院，並獲准更名為「國家奈米元件實驗室」。

2.1.1 NDL 新建工程與用途介紹

國家毫微米元件實驗室與國家晶片設計中心為了因應半導體科技與 IC 晶片設計日新月異的發展，於民國八十八年通過「國家毫微米元件實驗室新建工程」乙案，期能建造一個符合未來發展的實驗室，進而提升國內半導體產業技術與培育國家下一代半導體人才。新建工程於民國九十一年七月五日舉行動土典禮，工程之基地面積約為 135400 坪，總樓板面積約為 11,080 坪，土建工程於民國九十三年完

成，完工後將由國家奈米元件實驗室及國家晶片系統設計中心使用。

新建工程包含行政研究大樓及奈米實驗大樓，行政研究大樓建築範圍約 1000 坪，其中地上一層、地下一、二樓，每層約 870 坪，包括停車場、儲物室及機電設備空間；地上二層至六層，每層約 538 坪，包括 NDL 辦公室及實驗室；地上七層至十層，每層約 425 坪，國家晶片系統設計中心在這四個樓層中除了規劃辦公室、研究室、電腦暨網路管制室及電子資料庫管制室等基本空間外，亦規劃了三個訓練教室（兩間工作站之訓練教室及一間 PC 訓練教室）、微處理系統發展實驗室、IA 多媒體發展實驗室、通訊系統發展實驗室、系統仿真實驗室、數位混合信號晶片 /測試實驗室及通訊電路晶片量測實驗室等。

奈米實驗大樓建築範圍 1100 坪，其中地下一、二層，每層約 423 坪，包括機電設備空間；地上一層至四層，每層約 776 坪，包括潔淨室、機電設備空間，其中 100 等級之潔淨室約 340 坪，位於 FAB 棟三樓，樓版採用穿孔格只樑版，上方透過鋼構建構一挑高 7.5m 且垮距達 28.8m 之方正格局開闊工作空間。10000 等級之潔淨室為 540 坪，位於 CUB 棟三樓。附屬支援設備亦會產生振動源，例如冰水主機、馬達等位於 CUB 棟一樓；純、廢水等處理設備位於 CUB 棟地下二樓。

2.1.2 NDL 新建工程結構介紹

新建工程結構，依用途可區分為行政研究大樓(以符號 OFF 表示)與奈米實驗大樓（包含 FAB 棟與 CUB 棟兩部份），如圖 2.1 所示。FAB 棟與 CUB 棟為一完全相連之結構物，而行政大樓與奈米實驗大樓在地面以上之結構分離不相連接，中間採用伸縮縫設計，如圖 2.2 所示；FAB 棟地下一樓與 CUB 棟地下二樓之結構則透過筏式基礎(版)和樓

版連接在一起。國家奈米實驗室採用筏式基礎，整個結構體都在同一基礎之上。值得我們注意的是，整個實驗室的基礎高程不是唯一的，如圖 2.3 所示。由圖中可知 OFF 棟、FAB 棟、CUB 棟之基礎皆在不同高程。FAB 棟三樓以下採用鋼筋混凝土構造(R.C.)，其中一樓樓版為(R.C.)版、二樓為挑高、三樓 class 100 潔淨室樓版為穿孔格子樑版，如圖 2.4~8 所示。三樓穿孔格子樑版採用半預鑄工法，其朝上面四周外緣呈較薄版狀，其上設有凹孔，該孔可嵌入小型圓柱管，並與半預鑄格子版結合為一體。FAB 棟三樓以上為一鋼桁架(truss)結構，三樓、四樓間主要採用鋼骨混凝土（SRC）柱連接延伸到二樓樓版。CUB 棟和行政大樓則全為一純鋼筋混凝土之構造。

2.2 潔淨室系統

Clean Room 亦即潔淨室、無塵室或無菌室。在半導體工業、醫學、生物化學、食品界等為不可或缺之重要設施。顧名思義潔淨室就是將溫度、溼度、清淨度、氣流方式、氣流速度、室內壓力、噪音、振動及照明控制在某一需求範圍之間。隨著製程技術的進步，半導體元件之設計越來越細緻，因此潔淨室對於微塵粒子控制、環境微振動之要求也越來越嚴格。相對地，潔淨室環境需求之等級也大為提昇。但實際上構成潔淨室至少需具備及注意以下幾項要素：能除去空氣中漂浮之微塵粒子並防止微塵粒子產生與沉積、隔間之氣密程度、溫度及溼度之控制、壓力之控制、靜電之防治、噪音及振動之防治、電磁干擾之防治、細菌、病毒等感染源或有毒物質之控制處裡、合理有效之動線、區間規劃、運轉能源之考量、維護難易度及成本考量、結構強度及使用年限之考量、各項安全因素之考量。

潔淨室主要設備包括高架地板（如圖 2.9 所示）、MAU (Make-up

Air Unit)其轉速每風鐘 1300 轉(如圖 2.10 所示)、FFU (Fan Filter Unit)其轉速每風鐘 1300 轉、潔淨室氣密機制（如圖 2.11 所示）、人員機台出入口裝置等。為了有效提升潔淨室之效能，潔淨室與廠務特殊系統工程乃採分階段設計方式完成，其間總顧問只進行基本設計 (約佔總工程 30%) 的工作, 其餘的設計與施工則全由統包商統籌規劃及施作。因 NDL 實驗室屬於教學研究性質，尤以發展關鍵技術為導向，並無一般業界廠房生產成本之考量, 所以毋需考慮大尺寸晶圓的設計條件。目前現有實驗室以 6 吋晶圓為主, 而未來規劃最大尺寸仍以 8 吋晶圓做規劃設計。實驗室製程設備的規劃，皆以採用微環境 (mini-environment) 或是採用標準機械介面 (SMIF，Standard Mechanical Interface)為主，如此不僅能比一般的大環境潔淨室省能，更能在微環境中保持較高的潔淨等級與較佳的氣流分佈。因此潔淨室等級未做較高等級的設計，僅採用美國聯邦 209E 標準之 class100 及 class 10k 兩種潔淨度的等級，如表 2.1 所示。MAU(Make-up Air Unit)是潔淨室溫溼度控制的主要設備，因此其設計好壞影響潔淨室甚遠，而 MAU 首重其重要參數之設定，例如： filter 之效率、冷熱盤管之進出口溫、馬達風車規格及防振設備、噪音大小、風量、機外靜壓等。若能事先設定妥當各項之參數，即可獲至較完善溫濕度控制條件的潔淨室。傳統軸流式風車型潔淨室，因只一台風車在帶動整體空氣流動，通常會使得潔淨室內中間區域的氣流較快，而四週較慢之情況；進而造成潔淨室內各出風口的氣流分佈較不均勻及滯流死角，且易造成塵埃蓄積，以致影響晶圓產品的良率。於是潔淨室採用 FFU(Fan Filter Unit)系統，以便達到潔淨室氣流分佈較均勻之目的；且因每個 FFU 是獨立式，更可依潔淨室需求不同，適當調整其數量與分佈疏密，而達成各項等級之潔淨環境，頗具彈性空間。潔淨室高架地板首

重其耐壓程度，就此，實驗室定為 800kg，但依台積電建議，高架地板除了滿足向下之壓力外，還要注意到側邊的壓力；此因機台在移動時將產生側向之壓力，所以高架地板側邊壓力也須一併考量；另外本案還考量機台下方設置獨立支撐，以及在機台 move in 之動線上的高架地板加強支撐。

NDL 新建工程潔淨室原本規劃為 class 100 一層、class 10k 兩層，但受限經費所致，遂決定以階段分期的方式來完成本案之潔淨室興建。初期是先建構 class 100 一層與 class 10k 兩層之一的潔淨室，而 class 10k 的另一層則因預算不足，留待後期再行施作。

第三章 資料分析方法

本章內容主要為介紹歷次微振量測資料分析方法與識別模態之理論。主要分為兩大部分，其一為介紹 rms 均方根值(root-mean square value)之計算，其二則為介紹次空間系統識別理論。以下為相關計算理論。

3.1 微動量測分析

3.1.1 如何計算 rms 均方根值

精密儀器振動允許規範大多以對應於 1/3 八度音程頻寬（1/3 octave band）之振動反應速度均方根值（root-mean-square value,rms）來表示。由於廠房外部振動源多且不為人力所控制，故可將其所導致之振動反應視為隨機的（random），但為平穩的（stationary）。故該振動速度反應均方根可表示為

$$V_{rms}(i)=[\int_{f_l(i)}^{f_h(i)} G_{\dot{x}\dot{x}}(f)df]^{1/2} \tag{3.1}$$

其中，$V_{rms}(i)$=對應第 i 頻帶之速度均方根值；

$f_h(i)$與 $f_l(i)$=第 i 頻帶之上限與下限(依規範規定參考表 3.1)[21]

$G_{\dot{x}\dot{x}}(f)$=測站之速度反應單邊能譜密度函數(one-side power spectral density function)

依漫散振動理論，能譜密度函數可依量測反應估算之；依 Bendat 和 Piersol [22]之建議，$G_{\dot{x}\dot{x}}(f)$可利用分段量測反應估算，即

$$\hat{G}_{\dot{x}\dot{x}}(f)=\frac{2}{n_d T}\sum_{k=1}^{n_d}\left|V_k(f,T)\right|^2 \tag{3.2}$$

其中，$\hat{G}_{\dot{x}\dot{x}}(f)$＝$G_{\dot{x}\dot{x}}(f)$之估算值，

$V_k(f,T)$＝第 k 段速度反應歷時之 Fourier 轉換，

T＝每段反應歷時（單位為秒），

n_d ＝一筆反應分成 n_d 段處理。

既然式(3.2)所得之$\hat{G}_{\dot{x}\dot{x}}(f)$為$G_{\dot{x}\dot{x}}(f)$之估算值；當然，希望此估算誤差越小越好，依平穩隨機過程理論，Bendat 和 Piersol [22]推導出，當式(3.2)之 T 越大時，其估算之偏誤差（bias error）越小；且當 n_d 越大時，估算之隨機誤差（random error）越小。因為無法量測集錄無限長之資料，故吾人無法同時讓偏誤差及隨機誤差均達到最小。針對一筆量測資料，T 常決定於頻率域之解析度（$1/T$）是否已滿足需要。而 n_d 則希望在決定 T 之值後，越大越好；因此，常在分段一筆量測資料時，常讓相鄰兩段資料互相重疊一半，以增加 n_d 值。在利用式（3.2）估算 $G_{\dot{x}\dot{x}}(f)$ 時，另外常遇到之問題，出現於從時間域之速度反應轉換至頻率域。由於量測數據於時間域是離散的（discrete），且為有限長的。故利用快速 Fourier 轉換至頻率域時，會遇到假象（aliasing）及頻譜洩漏（leakage）現象[23]。本研究所用之量測系統低通率波器之截止頻率（cut off frequency）設於 1/3 取樣頻率，故能有效解決假設問題。

依式（3.1）計算 V_{rms} 後，為與一般規範（如圖 1 表 3.1、3.2）之表示法一致，以 dB 值表示 V_{rms} 之大小：

$$20\log\frac{V_{rms}(i)}{V_0} \tag{3.3}$$

其中V_0取為$1 \times 10^{-6}\ {}^{in}\!/_{\sec}$。

3.1.2 不同取窗（windowing）函數之比較

頻譜洩漏問題之解決常透過將每段資料乘於一窗函數（window function）以降低每段資料之第一個數據及最後一個數據明顯不連續現象。對於固定頻寬之分析而言，視窗可視為時域之權函數，選擇適當視窗函數可有助於減低頻譜洩漏（leakage）現象。常見的窗函數有：

1.矩形窗（Uniform）：對時域不做任何加權處理、如首尾不連續會產生嚴重漏失、或稱自身窗或均勻窗。

2.漢寧窗（Hanning）：頻率軸有極佳解析度、振幅精確度較差、適用於隨機訊號與頻率變化甚大之量測。

3.凱薩貝瑟窗（Kaiser-Bessel）：可明顯區分兩相近頻率、振幅解析度相當精確、實用性最高的選擇、缺點為對隨機訊號會產生較多漏失。

4.平頂窗（Flat Top）：極佳的振幅解析度、頻率解析度較差、適用於訊號的振幅量測校準。

本研究任取一筆資料分別取矩形窗與漢寧窗做比較，如圖 3.1 與圖 3.2 所示，其中綠色代表矩形窗取窗結果，藍色代表漢寧窗取窗結果。吾人可以發現，相較於採用矩形窗，採用漢寧窗明顯較為保守，相差約 6 個 dB 值，亦即兩者相差約一倍。故 Bendat 及 Piersol [22] 建議取漢寧窗後估算$G_{\dot{x}\dot{x}}(f)$時，須乘於 8/3。

3.2 系統識別

從微動反應量測數據，反算識別系統之動態特性（自然振動頻率、阻尼比、模態），常用之方法可分為頻率域與時間域方法。頻率

域方法需將離散之反應歷時，經 FFT 轉換成頻率域。雖然理論簡單，但因假象及頻譜洩漏問題，常造成頻率域方法之失敗於識別模態干擾嚴重的系統。另外，其識別阻尼比及模態亦較麻煩。時間域方法直接使用反應歷時，常用之方法有隨機遞減法[24]配合 Ibrahirn 時間域識別法[25]、時間序列法[20,26]、及次空間識別法[27]。本研究採用次空間識別法，其主要優點在於該方法亦可直接使用於地震反應量測資料及自由振動反應數據，使工程師只要懂得一套理論，即可應用至工程界常使用之動態試驗。

3.2.1.運動方程式與次空間模式之間的關係

一個 n 自由度結構系統之運動方程式為

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}+\mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}+\mathbf{K}\mathbf{x}=\mathbf{f} \tag{3.4}$$

其中 **M**，**C**，**K** 分別為 $n\times n$ 的結構系統之質量，阻尼，和勁度矩陣。**f** 為一 $n\times 1$ 的輸入行向量。藉由定義一個狀態變量 $z=\left(x^T\,\dot{x}^T\right)^T$,方程式(3.4)之解可表示為

$$z(t)=\mathrm{e}^{\mathrm{A}t}z_{\mathbf{0}}+\int_0^t \mathrm{e}^{\mathrm{A}(t-\tau)}\hat{\mathbf{f}}(\tau)\,d\tau \tag{3.5}$$

其中

$$\mathbf{A}=-\mathbf{G}^{-1}\begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & -M \end{bmatrix} \tag{3.6a}$$

$$\hat{\mathbf{f}}=\mathbf{G}^{-1}\begin{Bmatrix} \mathbf{f} \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} \tag{3.6b}$$

$$\mathbf{G}=\begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{M} \\ \mathbf{M} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \tag{3.6c}$$

$\mathbf{z_0}$ 為起始條件向量

依式(3.5)可得：

$$\mathrm{z}(t+\Delta t)=\mathrm{e}^{\mathrm{A}\Delta t}\mathrm{z}(t)+\int_{t}^{t+\Delta t}\mathrm{e}^{\mathrm{A}(t+\Delta t-\tau)}\hat{\mathbf{f}}(\tau)d\tau \tag{3.7}$$

其中Δt是一個時間增量。當Δt非常小時，可以合理假設當τ從t變化到$t+\Delta t$時，$\hat{\mathbf{f}}(\tau)$為一常數向量。 然後，從方程式(3.7)可得下列離散時間域模式：

$$\tilde{\mathbf{z}}_{k+1}=\tilde{\mathbf{A}}\tilde{\mathbf{z}}_{k}+\tilde{\mathbf{B}}\tilde{\mathbf{f}}_{k} \tag{3.8}$$

其中

$$\tilde{\mathbf{A}}=\mathrm{e}^{\mathrm{A}\Delta t} \tag{3.9a}$$

$$\hat{\mathbf{B}}=\begin{bmatrix}\hat{\mathbf{B}}_{1} & \hat{\mathbf{B}}_{2}\end{bmatrix}=\int_{k\Delta t}^{(k+1)\Delta t}\mathrm{e}^{\mathrm{A}((k+1)\Delta t-\tau)}\mathbf{G}^{-1}d\tau \tag{3.9b}$$

$\tilde{\mathbf{B}}=\hat{\mathbf{B}}_{1}$，為一 $2n\times n$ 之矩陣，$\tilde{\mathbf{z}}_{k}=\mathbf{z}(k\Delta t)$，$\tilde{\mathbf{f}}_{k}=\mathbf{f}(k\Delta t)$

當量測得之自由度(l)小於兩倍系統總自由度($2n$)，而且量測物理量為位移或速度。在$t=k\Delta t$時觀察得之反應(y_k)可表示為：

$$\mathbf{y}_{k}=\mathbf{L}\tilde{\mathbf{z}}_{k}+\mathrm{a}_{k} \tag{3.10}$$

其中$\mathbf{L}$為一包含 0 或 1 之挑選被觀察自由度的矩陣；$\mathrm{a}_{k}=\mathrm{a}(k\Delta t)$，為一量測雜訊向量，$\mathrm{a}(t)$假設為零均值之白噪（white noise）過程。然而，如果反應為加速度訊號，則透過方程式（3.4），可推得
下式：

$$\mathbf{y}_{k}=\tilde{\mathbf{E}}\tilde{\mathbf{z}}_{k}+\tilde{\mathbf{D}}\tilde{\mathbf{f}}_{k}+\mathrm{a}_{k} \tag{3.11}$$

其中

$$\tilde{\mathbf{E}}=\tilde{\mathbf{L}}\begin{bmatrix}\mathbf{-M^{-1}K} & \mathbf{-M^{-1}C}\end{bmatrix} \tag{3.12a}$$

$$\tilde{\mathbf{D}}=\tilde{\mathbf{L}}\mathbf{M}^{-1} \tag{3.12b}$$

$\tilde{\mathbf{L}}$亦為挑選自由度的矩陣。

方程式（3.8）和（3.10）或（3.11）建構一個次空間模式。一般地，次空間模式依下內容考慮將被表示為

$$\tilde{\mathbf{z}}_{k+1} = \tilde{\mathbf{A}}\tilde{\mathbf{z}}_k + \tilde{\mathbf{B}}\tilde{\mathbf{f}}_k + \mathbf{w}_k \tag{3.13}$$

$$\mathbf{y}_k = \tilde{\mathbf{E}}\tilde{\mathbf{z}}_k + \tilde{\mathbf{D}}\tilde{\mathbf{f}}_k + \mathbf{a}_k \tag{3.11}$$

其中$\mathbf{w}_k = \mathbf{w}(k\Delta t)$，而且$\mathbf{w}(t)$亦為一零均值之白噪（white noise）過程，但與$\mathbf{a}(t)$非相關聯。特別地，當可被觀察的反應為位移或速度時，$\tilde{\mathbf{E}}$和$\tilde{\mathbf{D}}$分別對等於$\mathbf{L}$和$\mathbf{0}$。在處理微振動量測，$\tilde{\mathbf{f}}_k$視為零而輸入假設為一白噪（white-noise）過程$\mathrm{w}(t)$。在處理自由振動試驗，$\tilde{\mathbf{f}}_k$與$\mathbf{w}_k$同時對等於零。當地震反應被考慮時，$\mathbf{w}_k$可以假設為零。

3.2.2.係數矩陣之估算

從方程式（3.13）和（3.11）可以建構

$$\mathbf{y}_{k+s} = \tilde{\mathbf{E}}\tilde{\mathbf{A}}^{s}\tilde{\mathbf{z}}_k + \tilde{\mathbf{D}}\tilde{\mathbf{f}}_{k+s} + \sum_{i=1}^{s}\tilde{\mathbf{E}}\tilde{\mathbf{A}}^{i-1}\tilde{\mathbf{B}}\tilde{\mathbf{f}}_{k+s+i-1} + \sum_{i=1}^{s}\tilde{\mathbf{E}}\tilde{\mathbf{A}}^{i-1}\mathrm{w}_{k+s+i-1} + \mathrm{a}_{k+s} \quad \cdots$$

$$\cdots\cdots \tag{3.14}$$

經由方程式（3.14）可以再建構

$$\bar{\mathbf{y}}_k = \mathbf{\Gamma}_a\tilde{\mathbf{z}}_k + \mathbf{\Phi}_\alpha\bar{\mathbf{f}}_k + \bar{\mathbf{\delta}}_k \tag{3.15}$$

其中

$$\bar{\mathbf{y}}_k = \begin{pmatrix}\mathbf{y}_k^{\mathrm{T}} & \mathbf{y}_{k+1}^{\mathrm{T}} & \cdots & \mathbf{y}_{k+s-1}^{\mathrm{T}}\end{pmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{3.16a}$$

$$\mathbf{\Gamma}_a = \begin{bmatrix}\tilde{\mathbf{E}} \\ \tilde{\mathbf{E}}\tilde{\mathbf{A}} \\ \vdots \\ \tilde{\mathbf{E}}\tilde{\mathbf{A}}^{s-1}\end{bmatrix} \tag{3.16b}$$

$$\mathbf{\Phi}_a = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{D}} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \tilde{\mathbf{E}}\tilde{\mathbf{B}} & \tilde{\mathbf{D}} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \tilde{\mathbf{E}}\tilde{\mathbf{A}}\tilde{\mathbf{B}} & \tilde{\mathbf{E}}\tilde{\mathbf{B}} & \tilde{\mathbf{D}} & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \tilde{\mathbf{E}}\tilde{\mathbf{A}}^{s-1}\tilde{\mathbf{B}} & \tilde{\mathbf{E}}\tilde{\mathbf{A}}^{s-2}\tilde{\mathbf{B}} & \tilde{\mathbf{E}}\tilde{\mathbf{A}}^{s-3}\tilde{\mathbf{B}} & \cdots & \tilde{\mathbf{D}} \end{bmatrix} \tag{3.16c}$$

$$\bar{\mathbf{f}}_k = \left(\tilde{\mathbf{f}}_k^{\mathrm{T}} \quad \tilde{\mathbf{f}}_{k+\mathbf{1}}^{\mathrm{T}} \quad \cdots \quad \tilde{\mathbf{f}}_{k+s\text{-}\mathbf{1}}^{\mathrm{T}}\right)^{\mathrm{T}} \tag{3.16d}$$

$$\bar{\mathbf{\delta}}_k = \mathbf{\Psi}_a \bar{\mathbf{w}}_k + \bar{\mathrm{a}}_k \tag{3.16e}$$

$$\mathbf{\Psi}_a = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \tilde{\mathbf{E}} & \mathbf{I} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \tilde{\mathbf{E}}\tilde{\mathbf{A}} & \tilde{\mathbf{E}} & \mathbf{I} & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \tilde{\mathbf{E}}\tilde{\mathbf{A}}^{s-2} & \tilde{\mathbf{E}}\tilde{\mathbf{A}}^{s-3} & \tilde{\mathbf{E}}\tilde{\mathbf{A}}^{s-4} & \cdots & \mathbf{I} \end{bmatrix} \tag{3.16f}$$

$$\bar{\mathbf{w}}_k = \left(\mathbf{w}_k^{\mathrm{T}} \quad \mathbf{w}_{k+1}^{\mathrm{T}} \quad \cdots \quad \mathbf{w}_{k+s\text{-}1}^{\mathrm{T}}\right)^{\mathrm{T}} \tag{3.16g}$$

$$\bar{\mathbf{a}}_k = \left(\mathbf{a}_k^{\mathrm{T}} \quad \mathbf{a}_{k+1}^{\mathrm{T}} \quad \cdots \quad \mathbf{a}_{k+s\text{-}1}^{\mathrm{T}}\right)^{\mathrm{T}} \tag{3.16h}$$

其中$\mathbf{\Gamma}_a$即所謂的可觀察矩陣。從方程式 (3.15)，可以建立下列關係：

$$\bar{\mathbf{Y}}_k = \mathbf{\Gamma}_a \bar{\mathbf{Z}}_k + \mathbf{\Phi}_\alpha \bar{\mathbf{F}}_k + \bar{\mathbf{\Delta}}_k \tag{3.17}$$

其中

$$\bar{\mathbf{Y}}_k = \left[\bar{\mathrm{y}}_k \quad \bar{\mathrm{y}}_{k+\mathbf{1}} \quad \cdots \quad \bar{\mathrm{y}}_{k+N\text{-}\mathbf{1}}\right] \tag{3.18a}$$

$$\bar{\mathbf{Z}}_k = \left[\tilde{\mathrm{z}}_k \quad \tilde{\mathrm{z}}_{k+\mathbf{1}} \quad \cdots \quad \tilde{\mathrm{z}}_{k+N\text{-}\mathbf{1}}\right] \tag{3.18b}$$

$$\bar{\mathbf{F}}_k = \left[\bar{\mathrm{f}}_k \quad \bar{\mathrm{f}}_{k+\mathbf{1}} \quad \cdots \quad \bar{\mathrm{f}}_{k+N\text{-}\mathbf{1}}\right] \tag{3.18c}$$

$$\bar{\mathbf{\Delta}}_k = \left[\bar{\delta}_k \quad \bar{\delta}_{k+\mathbf{1}} \quad \cdots \quad \bar{\delta}_{k+N-\mathbf{1}}\right] \tag{3.18d}$$

從線性代數，我們可以定義一個正交投影矩陣，$\Pi_f^{\perp}$，於$\bar{\mathbf{F}}_k$的零域（null-space）上

$$\mathbf{\Pi}_f^{\perp} = \mathbf{I}\text{-}\bar{\mathbf{F}}_k^{\mathrm{T}}\left(\bar{\mathbf{F}}_k\bar{\mathbf{F}}_k^{\mathrm{T}}\right)^{-1}\bar{\mathbf{F}}_k \tag{3.19}$$

方程式（3.17）等號兩邊同乘$\mathbf{\Pi}_f^{\perp}$可得

$$\bar{\mathbf{Y}}_k \mathbf{\Pi}_f^{\perp} = \mathbf{\Gamma}_\alpha \bar{\mathbf{Z}}_K \mathbf{\Pi}_f^{\perp} + \bar{\mathbf{\Delta}}_k \mathbf{\Pi}_f^{\perp} \tag{3.20}$$

顯然地，從方程式（3.16e），當$m \geq k$時，$\bar{\boldsymbol{\delta}}_k$由白噪（white noise）$\mathbf{w}_m$和$\mathrm{a}_m$所構成。因此，可以合理假設$\bar{\mathrm{f}}_k$和$\bar{\boldsymbol{\delta}}_t$對所有$k$和$t$而言為非相關，而且$\bar{\mathrm{y}}_m$和$\bar{\boldsymbol{\delta}}_k$對於$k>m$而言為非相關。亦即

$$E\left[\bar{\delta}_k \bar{\mathrm{f}}_t^{\mathrm{T}}\right] = \mathbf{0} \quad \textit{for all } k \textit{ and } t \tag{3.21a}$$

$$E\left[\bar{\delta}_k \bar{\mathrm{y}}_m^{\mathrm{T}}\right] = \mathbf{0} \quad \textit{for } k > m \tag{3.21b}$$

其中$E[\ ]$為一均值運算

引入工具參數，$\mathbf{P}$，定義為

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{F}}_p \\ \bar{\mathbf{Y}}_p \end{bmatrix} \tag{3.22}$$

其中$p<k$。當N夠大時，將方程式(3.20)兩邊同時乘上$\left(\dfrac{\mathbf{1}}{N}\right)\mathrm{P}^{\mathrm{T}}$並利用方程式(3.21a)和(3.21b)提出下列關係：

$$\frac{\mathbf{1}}{N}\bar{\mathbf{Y}}_k \mathbf{\Pi}_f^{\perp} \mathbf{P}^{\mathrm{T}} = \frac{\mathbf{1}}{N}\mathbf{\Gamma}_\alpha \bar{\mathbf{Z}}_k \mathbf{\Pi}_f^{\perp} \mathbf{P}^{\mathrm{T}} \tag{3.23}$$

將方程式（3.23）等號兩邊同乘權重矩陣，$\mathbf{W}_r$和$\mathbf{W}_c$可得下式

$$\frac{\mathbf{1}}{N}\mathbf{W}_r \bar{\mathbf{Y}}_k \mathbf{\Pi}_f^{\perp} \mathbf{P}^{\mathrm{T}} \mathbf{W}_c = \frac{\mathbf{1}}{N}\mathbf{W}_r \mathbf{\Gamma}_\alpha \bar{\mathbf{Z}}_K \mathbf{\Pi}_f^{\perp} \mathbf{P}^{\mathrm{T}} \mathbf{W}_c \tag{3.24}$$

其中$\mathbf{W}_r$必須為一正定矩陣而且矩陣$\mathbf{W}_c$的秩數（rank）必須不小於$2n$。權重矩陣會影響方程式（3.11）與（3.13）由於雜訊與依據偏差模型估算係數矩陣的變異數。下列由 Verhaegen 所建議的權重矩陣被採用。

$$\mathbf{W}_r = \mathbf{I}, \tag{3.25a}$$

$$\mathbf{W}_c = \left(\frac{\mathbf{1}}{N} \mathbf{P\Pi}_f^{\perp} \mathbf{P}^{\mathrm{T}} \right)^{\frac{-1}{2}} \tag{3.25b}$$

定義一個 $\bar{\mathbf{H}}$ 矩陣等於方程式（3.24）等號左邊。

$$\bar{\mathbf{H}} = \frac{\mathbf{1}}{N} \mathbf{W}_r \bar{\mathbf{Y}}_k \mathbf{\Pi}_f^{\perp} \mathbf{P}^{\mathrm{T}} \mathbf{W}_c \tag{3.26}$$

經由奇異值分解，下列關係成立

$$\bar{\mathbf{H}} \approx \mathbf{Q}_{\bar{n}} \mathbf{\Sigma}_{\bar{n}} \mathbf{V}_{\bar{n}}^{\mathrm{T}} \tag{3.27}$$

其中 $\mathbf{\Sigma}_{\bar{n}}$ 為一包含 $\bar{n}$ 最大奇異值之對角矩陣，$\mathbf{Q}_{\bar{n}}$ 和 $\mathbf{V}_{\bar{n}}$ 的直行（columns）分別對應左右奇異向量。顯然地，在完美資料案例裡 $\bar{n}$ 等於 $2n$。然而，如果資料包含雜訊，典型地 $\bar{n}$ 大於 $2n$。因此方程式（3.24)、（3.26）和（3.27）衍生

$$\mathbf{\Gamma}_{\alpha} = \hat{\mathbf{\Gamma}}_{\alpha} \mathbf{T}_{\bar{n}} \tag{3.28}$$

其中

$$\hat{\mathbf{\Gamma}}_{\alpha} = \mathbf{W}_r^{-1} \mathbf{Q}_{\bar{n}}, \tag{3.29a}$$

$$\mathbf{T}_{\bar{n}} = \mathbf{\Sigma}_{\bar{n}} \bar{\mathbf{V}}_{\bar{n}} \left(\frac{\mathbf{1}}{N} \bar{\mathbf{Z}}_k \mathbf{\Pi}_f^{\perp} \mathbf{P}^{\mathrm{T}} \mathbf{W}_c \right)^{-\mathbf{1}} \tag{3.29b}$$

在過程中基於這個觀點，藉由利用可觀察的反應，$\hat{\mathbf{\Gamma}}_{\alpha}$ 可以從方程式（3.29a）中被估算。然而，方程式（3.29b）中 $\bar{\mathbf{Z}}_k$ 依然未知，$\mathbf{\Gamma}_{\alpha}$ 無法被估算。將方程式（3.28）帶入方程式（3.15）中可得

$$\bar{\mathbf{y}}_k = \hat{\mathbf{\Gamma}}_{\alpha} \hat{\mathbf{z}}_k + \mathbf{\Phi}_{\alpha} \bar{\mathbf{f}}_k + \bar{\mathbf{\delta}}_k \tag{3.30}$$

其中 $\hat{\mathbf{z}}_k = \mathbf{T}_{\bar{n}} \tilde{\mathbf{z}}_k$，並指出 $\mathbf{T}_{\bar{n}}$ 可以視為一個狀態空間變數針對不同基底（bases）的轉換矩陣。如同方程式（3.15）從方程式（3.11）與（3.13）而來。因此方程式（3.30）符合下列狀態空間模式：

$$\hat{\mathbf{z}}_{k+\mathbf{1}} = \hat{\mathbf{A}} \hat{\mathbf{z}}_k + \hat{\mathbf{B}} \tilde{\mathbf{f}}_k + \mathbf{T}_{\bar{n}} \mathbf{w}_k \tag{3.31a}$$

$$\mathbf{y}_k = \hat{\mathbf{E}} \hat{\mathbf{z}}_k + \tilde{\mathbf{D}} \tilde{\mathbf{f}}_k + \mathrm{a}_k \tag{3.31b}$$

其中

$$\hat{\mathbf{A}} = \mathbf{T}_{\bar{n}} \tilde{\mathbf{A}} \mathbf{T}_{\bar{n}}^{-1} \tag{3.32a}$$

$$\hat{\mathbf{B}} = \mathbf{T}_{\bar{n}} \tilde{\mathbf{B}} \tag{3.32b}$$

$$\hat{\mathbf{E}} = \tilde{\mathbf{E}} \mathbf{T}_{\bar{n}}^{-1} \tag{3.32c}$$

如同方程式 (3.16b) 裡 $\mathbf{\Gamma}_{\alpha}$ 的表示法，$\hat{\mathbf{\Gamma}}_{\alpha}$ 可以更近一步類似的表示為：

$$\hat{\mathbf{\Gamma}}_{\alpha} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{E}} \\ \hat{\mathbf{E}}\hat{\mathbf{A}} \\ \vdots \\ \hat{\mathbf{E}}\hat{\mathbf{A}}^{s\text{-}\mathbf{1}} \end{bmatrix} \tag{3.33}$$

顯然地，上述從方程式（3.14）至方程式（3.33）的推導對於 $\tilde{\mathbf{f}}_k = \mathbf{0}$ 亦是成立的。意味著，前述方程式亦適用於處理微振動量測與自由振動量測。在這些例子裡，$\mathbf{\Pi}_f^{\perp} = \mathbf{I}$。

在 $\hat{\mathbf{\Gamma}}_{\alpha}$ 從觀察資料被確定後，$\hat{\mathbf{A}}$ 和 $\hat{\mathbf{E}}$ 可以依下列步驟被直接估算：

（a）從方程式（3.33）給的關係中建立下列兩個矩陣：

$$\hat{\mathbf{\Gamma}}_{\alpha\mathbf{1}} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{E}} \\ \hat{\mathbf{E}}\hat{\mathbf{A}} \\ \vdots \\ \hat{\mathbf{E}}\hat{\mathbf{A}}^{s\text{-}2} \end{bmatrix} \tag{3.34a}$$

$$\hat{\mathbf{\Gamma}}_{\alpha\mathbf{2}} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{E}}\hat{\mathbf{A}} \\ \hat{\mathbf{E}}\hat{\mathbf{A}}^{\mathbf{2}} \\ \vdots \\ \hat{\mathbf{E}}\hat{\mathbf{A}}^{s\text{-}1} \end{bmatrix} \tag{3.34b}$$

（b）從方程式（3.34a）和（3.34b），可得：

$$\hat{\mathbf{\Gamma}}_{\alpha\mathbf{2}} = \hat{\mathbf{\Gamma}}_{\alpha\mathbf{1}} \hat{\mathbf{A}} \tag{3.35}$$

因此

$$\hat{\mathbf{A}} = \hat{\mathbf{\Gamma}}_{\alpha 1}^{+} \hat{\mathbf{\Gamma}}_{\alpha 2} \tag{3.36}$$

其中下標符號'＋'代表矩陣廣義逆運算（generalized inverse operation）。方程式（3.36）的解為方程式（3.35）的最小二次方誤差解（least-square error）。

（c）從方程式（3.33）提供的關係中，我們可以建立下列方程式：

$$\hat{\mathbf{E}}\hat{\mathbf{\Omega}} = \hat{\mathbf{\Gamma}}_{\alpha p} \tag{3.37}$$

其中

$$\hat{\mathbf{\Omega}} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \hat{\mathbf{A}} & \hat{\mathbf{A}}^2 & \cdots & \hat{\mathbf{A}}^5 \end{bmatrix} \tag{3.38a}$$

$$\hat{\mathbf{\Gamma}}_{\alpha p} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{E}} & \hat{\mathbf{E}}\hat{\mathbf{A}} & \hat{\mathbf{E}}\hat{\mathbf{A}}^2 & \cdots & \hat{\mathbf{E}}\hat{\mathbf{A}}^5 \end{bmatrix} \quad , \tag{3.38b}$$

矩陣$\hat{\mathbf{\Gamma}}_{\alpha p}$等於$\hat{\mathbf{\Gamma}}_{\alpha}$前六個列（rows）區塊，而$\hat{\mathbf{\Omega}}$是利用之前步驟估算得的$\hat{\mathbf{A}}$而建立。必須注意的是方程式（3.38a）裡$\hat{\mathbf{A}}$的階數（order）5是任意選擇地。因為方程式（3.4）的穩定動力系統$\hat{\mathbf{A}}$的特徵值模數小於1，在估算$\hat{\mathbf{E}}$時高階$\hat{\mathbf{A}}$可被忽略。從方程式（3.37），$\hat{\mathbf{E}}$可被定為

$$\hat{\mathbf{E}} = \hat{\mathbf{\Gamma}}_{\alpha p} \hat{\mathbf{\Omega}}^{+} \tag{3.39}$$

再一次地，方程式（3.39）提供的解$\hat{\mathbf{E}}$為方程式（3.37）關係的最小二次方誤差解（least-square error）。對於其它係數矩陣$\hat{\mathbf{B}}$和$\hat{\mathbf{D}}$的估算於此並不包含，因為它們跟測定結構系統的動態特性無關。

3.2.3.結構系統動態特性的測定

當運動方程式，例如方程式(3.4)，被以狀態空間變量'z'表示，眾所周知的結構系統的動態特性被方程式(3.6a)中 $\mathbf{A}$ 的特徵值（eigenvalues）與特徵向量（eigenvectors）所確定。然而，$\mathbf{A}$ 不能被

根據先前的推導決定。因此，為了找出動態特性，$\hat{\mathbf{A}}$ 被引用。方程式(3.9a)和(3.32)顯示下列

$$\hat{\lambda}_j = e^{\lambda_j \Delta t} \tag{3.40a}$$

$$\hat{\varphi}_j = \mathbf{T}_{\bar{n}}\, \varphi_j \tag{3.40b}$$

其中

λ_j 和 $\hat{\lambda}_j$ 分別是 $\mathbf{A}$ 和 $\hat{\mathbf{A}}$ 第 j 個特徵值，φ_j 和 $\hat{\varphi}_j$ 分別為向應特徵向量。顯然地，因為 $\mathbf{T}_{\bar{n}}$ 仍然未知，方程式（3.40b）$\mathbf{A}$ 的特徵向量無法估算。然而，通常，只需確定可相應觀察自由度 $\varphi_{j,y}$ 的特徵向量（或模態）。從方程式（3.31b），下列關係可被發覺：

$$\varphi_{j,y} = \hat{\mathbf{E}}\, \hat{\varphi}_j \tag{3.41}$$

特徵值為複變數，令

$$\lambda_j = \alpha_j + i\beta_j \tag{3.42a}$$

$$\hat{\lambda}_j = a_j + ib_j \tag{3.42b}$$

從方程式（3.40a）可得

$$\alpha_j = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2}\Delta t} \ln\left(a_j^{\mathbf{2}} + b_j^{\mathbf{2}}\right) \tag{3.43a}$$

$$\beta_j = \frac{\mathbf{1}}{\Delta t} \tan^{-\mathbf{1}}\left(\frac{b_j}{a_j}\right) \tag{3.43b}$$

則系統的（pseudo-undamped circular natural frequency）為

$$\omega_j = \sqrt{\alpha_j^{\mathbf{2}} + \beta_j^{\mathbf{2}}} \tag{3.44a}$$

阻尼比為

$$\xi_j = \frac{-\alpha_j}{\omega_j} \tag{3.44b}$$

在比例阻尼系統 ω_j 等於其 undamped circular natural frequency

第四章 微動反應量測及分析

4.1 量測系統介紹

本實驗量測之儀器為日本東京測振公司所製造之 SPC-51 集錄系統，其詳細規格如表 4.1 及圖 4.1 所示。並採用日本東京測振公司所生產之 VSE-15D 型速度計如圖 4.2 所示，其詳細規格如表 4.2 所示。因為晶圓廠之振動標準是以速度，且在常用之時間域系統識別技巧中，亦以速度反應數據較加速度反應數據為佳[19，20]，故本研究以速度計進行量測（雖然速度計之價格遠較加速度計貴）。速度計所感應之振動量以電壓方式，透過纜線（cable）傳至集錄系統，經放大濾波（若有必要）與數位化，然後記錄儲存。此集錄系統之低通濾波器自動設為取樣頻率之 1/3；類比訊號與數位訊號轉換器為 16 位元。故配合速度計之靈敏度及放大器，本量測系統之解析度約為 0.3 μ kine。但整套系統之雜訊限度在 1 100Hz 頻寬內之速度均方根值約為 10 μ kine。

4.2 量測佈置

不同之量測目的，通常需有不同之量測佈置配合。本研究擬探討結構物不同興建階段及不同地點之微動量，以及識別結構系統之動態特性（自然振動頻率、阻尼比、模態）；故量測佈置分成兩大類，一為求微動量；另一類為求動態特性。此兩大類佈置之最大同處為集錄反應之取樣頻率（sampling rate）不同。估算微動量通常考慮之頻率範圍較大；而結構動態特性較重要者通常為低頻者，且高頻之模態通常較難利用微動反應識別，故其量測之取樣頻率可較小。值得注意的

是，所有量測均在晚上深夜（約在晚上 11 點至清晨 4 點間）中進行，主要是避免白天工地施工或是人類文明活動（含交通）所引致之振動變異性較大；或甚至造成量測佈置之困難。

4.2.1 歷次現地量測點位說明

在為估算微動量部分本研究配合 NDL 新建工程的工程進度進行量測，依序分別為 1.素地階段（量測點位於對應 FAB 棟中央）、2.基礎開挖完成（量測點位於對應 FAB 棟中央）、3.基礎版興建完成（量測點位於對應 FAB 棟與 CUB 棟中央）、4.實驗大樓(含基礎、潔淨室與桁架結構)結構體初步完成（量測點位於 FAB 棟地下一樓與 CUB 棟地下二樓）、5.通風設備運轉（含冰水主機、馬達、MAU、FFU 等）進行量測（量測點位於 FAB 棟地下一樓)。其相對位置如圖 4.3、4.4 所示。

在為識別結構系統動態特性之量測佈置中；理想之量測點應是各棟各樓版之中點，但常迫於現況而無法為之。例如，各潔淨室已於運作中，若於其中設測站，則該測站則無法透過訊號纜線與室外其他樓層測站相連，進行同步量測。（當然，若有無線之量測系統，則此問題將迎刃而解。）另外，頂樓層因鋪連鎖磚塊（亦稱壓力磚塊），並未膠結固定於樓版；因此，亦無法於其上設測站。

由於實驗大樓（含 FAB 及 CUB 棟）之結構佈置是相當不對稱；因此，將可預期各樓版之兩水平向平移運動及扭轉運動是互相藕合，導致不同地點所量測識別振動模態是不一樣的。

FAB 棟與 CUB 棟各樓層間水平向量測點位相關位置如圖 4.5~10 中所示。地下一樓 FAB 棟量測點位於地下一樓樓版中央處。一樓 FAB 棟量測點位於入口處中央，一樓 CUB 棟量測點位於冰水主機旁之樓

版。二樓為挑高設計只有控制室位於 CUB 棟北側，故不設量測點位。三樓 FAB 棟量測點位於休憩區地板，CUB 棟量測點位於電梯口與走道間。四樓 FAB 棟量測點位於兩台 MAU 間之地板，CUB 棟量測點位於電梯口與走道間。五樓 FAB 棟量測點位於機房樓版，CUB 棟量測點位於電梯口與走道間。六樓 CUB 棟量測點位於機房地板。

4.2.2 歷次現地量測時機說明

奈米實驗室基地原為為交通大學校內機車停車棚，因作為興建奈米實驗室之故，於 2002 年 8 月 12 日將機車遮雨棚拆除完畢。如圖 4.11 所示，吾人以”素地階段”稱呼該階段之工程進度，並進行首次現地量測。機車遮雨棚拆除完畢後即進行實驗室基地之開挖，於 2002 年 11 月 12 日左右完成基地開挖，如圖 4.12 所示，吾人於本階段工程完成時進行第二次現地量測。工程單位於完成基地開挖後隨即著手進行筏式基礎的興建，於 2003 年 1 月 15 日左右完成，如圖 4.13 所示，吾人並於筏式基礎完成同時進行第三次現地量測。圖 4.14 為實驗大樓結構體在 2003 年 5 月 22 日之工程進度，結構體在 FAB 棟的部分初步完成，吾人在 FAB 棟地下一樓樓版與 FAB 棟三樓格子樑版，接續進行第四次現地量測。此外，為避免白天基地人員，機具活動的影響，本研究量測皆在深夜（22 點至 05 點間）較少外界干擾時進行。於 2003 年 8 月 31 日時，通風設備（如圖 4.15 所示）已開始運轉，唯獨工程單位因成本考量僅開放部分運轉能量（約百分之 5）；在 2004 年 4 月 28 日時，開放運轉能量達百分之 50 以達最低設備驗收量測要求。其間吾人於 FAB 棟地下一樓樓版、FAB 棟三樓格子樑樓版與高架地板，進行本研究第五階段之現地量測，同時並進行 FAB 棟與 CUB 棟水平向相關量測，直至 2004 年 6 月 1 日。歷次詳細量測

時間如表 4.3 所示。

4.2.3 量測取樣與集錄系統操作程式

本研究每筆紀錄之資料長度五分鐘，取樣頻率設為 200Hz，每間隔 30 分鐘取樣一次。於量測水平向模態識別時，每筆紀錄之資料長度 10 分鐘，取樣頻率設為 100Hz。而進行微動量測設備操作時應注意下列事項: (1)速度計於現地之佈點情況是否可靠(2)從 SPC-51 中設定量測參數如取樣頻率、取樣點數、放大倍率……等參數設定等。(3)檢視電腦螢幕訊號，特別留意訊號有無異常現像並校正，待穩定後始開始紀錄。 (4)留意周圍有無特定或突然之擾動源，將其紀錄之。

4.3 分析結果與討論

吾人將各次量得之速度微動反應資料，透過快速傅立葉(FFT)的轉換，將時間歷時資料轉換至頻率域，經計算並繪製成單邊能譜密度函數（Power-Spectral-Density，PSD）圖和 1/3 倍頻均度均方根值（Root-Mean-Square value，RMS）圖。藉由各次量測之單邊能譜密度函數圖和 1/3 倍頻速度均方根值，探討各測站在奈米實驗大樓興建過程中振動量之變化與通風設備運轉時對潔淨室振動量之影響。本研究進行多次奈米實驗室基地之微動量測。由於白天外界擾動源較多且複雜，例如人文活動頻繁、車流量較大、工地施工、附近工廠大型機械運作等等。相較於深夜時人類文明活動較少，較可獲得現地背景微動資料。並計算當次量測所得多筆資料之平均值與標準差。由統計學的觀點，我們可以經由資料之標準差判斷資料可信度。

4.3.1 各測站歷次單邊能譜分析與比較

圖 4.16~圖 4.27 為各測站歷次量測之平均單邊能譜，於圖上觀察較為明顯之尖峰值，以及尖峰值所對應之頻率，藉此可初步判斷地表擾動特性。從各測站歷次量測之平均單邊能譜中，可以找到許多尖峰值，於頻率 3~5Hz、8~11Hz、28~30Hz 頻率帶中，每次量測均有明顯尖峰值出現，此可能代表該區土層振動特性，或穩定之振動源。特殊地，在 55~60Hz 之間亦有尖峰值，但因量測系統所用之電源為交流電，考慮交流電特性為 60Hz 左右，可能有所干擾。且相對大地振動頻率而言 55~60Hz 屬較高頻率，故不考慮之。

4.3.2 各測站歷次速度均方根值之分析與比較

圖 4.28~38 為本研究所繪製之歷次 1/3 倍頻速度均方根圖的統計資料，圖中所標示之阿拉伯數字代表第幾次之微動量測，以實線表示各次量測之平均值，以點線表示各次量測 標準差。其中 5A 表通風設備運轉能量達 5%，於 FAB 地下一樓中央點位量測。5A-A 表通風設備運轉能量達 5%，於 FAB 三樓格子樑版 A 點位量測。5A-B 表通風設備運轉能量達 5%，於 FAB 三樓格子樑版 B 點位量測，A、B 點位如圖 4.39 所示。5B 表通風設備運轉能量達 50%，於 FAB 三樓格子樑版中央點位量測。5B-H 表通風設備運轉能量達 50%，於 FAB 三樓高架地板中央點位量測。

(1) 測站 FAB

圖 4.28 為測站 FAB 不同興建階段之速度均方根值，因為每次量測有 8 筆資料，故圖示者為此 8 筆資料所得之平均值。水平向（東西與南北向）大於 3.15Hz 速度均方根值者，有隨著奈米實驗室的興建

而出現明顯下降的趨勢，垂直向之結果則未有如此明顯之趨勢。。由以上觀察發現，基礎開挖後之微動量明顯小於素地者，此可能因為開挖後速度計是擺在較硬之土層，而素地量測時擺在較軟之土層；另外，人類文明活動（含交通）也多作用於表層。當築上筏式基礎後，水平向之微動量再次明顯降低（當 $f \geq 3.15$Hz 者），但垂直向則未有明顯改變當（當 $f \geq 2$Hz 者）。當建築物完成後，微動量有再減少之趨勢，尤其是高頻者；可見建築物有類似低通濾波器之作用。由此也可瞭解高頻之振動對結構振動之影響，相對較低頻頻率振動為小，亦即在結構振動之影響，低頻之微振害是我們必須去防治的。值得注意的是，實驗大樓結構完成時(第四次量測)，垂直方向上 10Hz、12.5Hz 頻帶均方根值，與前三次量測最大差距達 4~5 dB，這觀察結果透露，實驗大樓結構在垂直方向可能有一 10Hz 左右之自然振動頻率(如要知道結構體真正振動頻率則要透過系統識別的方法)。

另外於通風設備運轉能量達 5%時，FAB 地下一樓，即 5A 曲線。吾人可發現垂直向大於 12.5Hz、東西向大於 31.5Hz 與南北向大於 25Hz；且於通風設備運轉能量達 50%時，FAB 三樓，即 5B 曲線（圖 4.38）。吾人可發現垂直向大於 10Hz、東西向大於 2.5Hz 與南北向大於 2Hz 時，均明顯比第四次量測值高出許多這可解釋冰水主機、MAU、FFU、馬達等擾動源亦被引入其中。

(2) 測站 Ref-1 與 Ref-2

圖 4.30 為測站 Ref-1 四次微動量測之速度均方根值，測站 Ref-1 在垂直向較高頻之速度均方根值，受到奈米實驗室興建影響而有些許下降之趨勢；相較於垂直向而言，水平向所受到奈米實驗室興建影響較小。圖 4.31 為測站 Ref-1 各方向歷次量測之 1/3 倍頻速度均方根平

標準差，由圖中可知，垂直向在 1.25Hz 之頻帶變動最大；東西向在 20Hz 頻帶變動最大，而南北向在 20Hz 頻帶之變動最大。圖 4.32 為測站 Ref-2 四次微動量測之 1/3 倍頻速度均方根值，如圖所示，相較於圖 4.28 和圖 4.30 測站 FAB 和 Ref-1 均方根值之變化而言, 測站 Ref-2 各頻帶均方根之變化又顯得更小。

(3) 測站 FAB 與測站 Ref-1 之比較

為瞭解實驗大樓基礎樓版與鄰近基地地層微動反應之差異，吾人將測站 FAB 與測站 Ref-1 同時間量測之資料計算兩者 1/3 倍頻速度均方根做比較。圖 4.34 為測站 FAB 與 Ref-1 在第一次與第四次兩測站同時量測之 1/3 倍頻速度均方根圖，如圖所示，在奈米實驗大樓基地尚未開挖時，兩測站垂直和水平向在頻帶小於 20Hz 之振動量最大差異約 3~4 dB，而在大於 20Hz 頻帶，測站 FAB 之振動量明顯大於測站 Ref-1。推測兩測站高頻頻帶均方根值之差異可能與測站 FAB 鄰近之竹科廠商啟動之空調設備有關，因測站 FAB 較接近竹科方向明顯之擾動源，因此在高頻的振動量較測站 Ref-1 稍大。等到實驗大樓完成後，測站 FAB 垂直向之頻帶在以後之振動量下降幅度略較測站 Ref-1 大；而水平向上，測站 FAB 在 4Hz 以後之頻帶均方根值，明顯比測站 Ref-1 之振動量小很多。

(4) FAB 基礎樓版與 CUB 基礎樓版振動量之比較

吾人於進行第四次量測時同時量測 CUB 棟基礎樓版和測站 FAB 之微動反應，藉此探討筏式基礎上，基礎樓版在點位 FAB 與 CUB 振動量之差異。另外亦選取第三次量測兩測站所集錄之訊號比較，如圖 4.36 所示，基礎施作完成時或實驗大樓完成後，兩基礎版水平向振動

量差異性不大；而垂直方向上，測站 FAB 與 CUB 在基礎施作完成時，各頻帶之振動量差異不大；到了實驗大樓結構完成時，測站 FAB 與 CUB 兩者在頻帶 10~12.5Hz 之振動量最大差異約 6 dB，這也許說明實驗大樓結構在垂直方向可能有一 10Hz 左右之自然振動頻率。

(5) FAB 基礎樓版、三樓樓版與高架地板振動量之比較

吾人於通風設備運轉時進行量測，藉此探討 FAB 棟因空調等設備運轉下之差異。如圖 4.38 所示，與第四次量測比較，明顯地隨著通風設備運轉能量的提高，垂直向大於 10Hz、水平向大於 2Hz 時，振動量隨著明顯提高。且三樓樓版比基礎版振動量大，特別是高架地板水平方向在 31.5 Hz 比三樓樓版水平方大約 15dB。吾人可發現高架地板設置將放大水平向微動量，尤其是高頻處（特別是中心頻率 25Hz 及 31.5Hz 之頻帶處，此處可能包含高架地板設置之自然振動頻率）；但對垂直向振動量則未有明顯影響。其原因可由高架地板設置得到解釋，該設置只有直立之鋼棒支撐而未有側撐，故可預期其側向剛性較小，導致會有放大水平向振動量。

潔淨室樓版之振動量是較令人有興趣的，圖 4.39 為 FAB 棟 3 樓潔淨室樓版上不同位置之振動量測。注意圖中〝□〞代表柱之位置，柱中心間距 4.8m，〝○〞代表開孔處。值得注意的是，一般建築物由於柱間距較大且樓板較薄，以致中心點處之垂直向振動量遠大於柱頂處。圖 4.40 為沿樓板對角不同點位垂直向之振動量，於低頻處（約小於 5Hz），各點位之振動量相當一致；而高頻處，則角落點（點位 6）之振動量最小。圖中兩明顯之尖峰點（頻率 3.15Hz 及 31.5Hz 處），3.15Hz 處應是由於土層特性所引起，類似之尖峰點亦出現於不同興建階段所量測結果；而 31.5Hz 處應是包含該樓板之自然振動頻率。A

點（柱位）與 B 點（格子樑版中央），三個方向振動量差異十分微小。針對三樓格子樑版垂直向之微動量測，圖 4.40 中，吾人可以發現在 5 Hz 以下 9 個點位的差異不大。當大於 5Hz 時，中央點位與 1、6 點位的差異越來越大，於 31.5Hz 差異可達 5dB 以上。這可以說明邊界條件的束制導致其振動量較中央點小。

4.3.3　模態識別

由於奈米元件實驗室整體結構十分複雜，包含 R.C.構造、半預鑄穿孔格子樑版與鋼構。整體結構形狀亦屬非對稱結構，於 100 等級潔淨室、10K 等級潔淨室與通道走廊間樓地板分屬不同高層，最大高層差達 90 公分（於 CUB 棟四樓與走道間），與一般樓房結構或橋樑結構迥異。一般橋樑結構大致上屬於對稱結構，且於垂直向非墩柱間橋面版較為柔軟，其變位相對於墩柱附近橋面版而言較大。而奈米實驗室整體結構相對於橋樑結構而言屬較堅硬之結構物，此外不論材料或幾何上奈米實驗室亦屬非對稱結構，此等因素造成於模態識別上的複雜性，即兩水平向側向模態與扭轉模態會互相藕和。

A　FAB 棟與 CUB 棟水平向模態識別

每一佈置各同時量測 10 自由度（5 測點，每測點含兩水平向）。圖 4.40、4.41 所示展示經平滑後之傅氏譜。傅氏譜有助於吾人識別結系統之自然振動頻率。傅氏譜中明顯之尖峰處，約略對應自然振動頻率。圖 4.42 為 FAB 棟與 CUB 棟水平向模態圖，其中●黑色圓點表 FAB 東西向模態，●灰色圓點表 FAB 南北向模態，而⊕黑色點表 CUB 東西向模態，⊕灰色點表 CUB 南北向模態。表 4.4 為 FAB 棟與 CUB 棟模態列表。比較 FAB 棟第一（東西向為主）、第二（南北向為主）

模態與 CUB 棟第一（東西向為主）、第二（南北向為主）模態，可發現其振形一致，且頻率值相差在 5%之內。但於第三模態至第九模態，FAB 棟與 CUB 棟於振形上較無一致性，但頻率值相差亦皆小於 5%。其間未有伸縮縫，且樓版可透過深樑相連，可視為同一結構，理論上，在兩棟所得之頻率值應為一致。由於結構的不對稱造成水平東西與南北向模態的互相影響，故在第三模態後 FAB 棟與 CUB 棟在振形上出現較不一致現象；表 4.4 所得之頻率差異可視為識別誤差，其誤差約在可接受之範圍。

B　FAB 棟三樓等級 100 潔淨室垂直向模態識別

圖 4.43 所示垂直向自由度經平滑後之傅氏譜圖，圖 4.44 為 FAB 棟三樓等級 100 潔淨室垂直模態圖，其中量測點位如圖 4.39 所示，圖 4.44 上●黑色圓點表格子樑版對角線上量測點位 1 至 6 與點位 7 至 9。於垂直向模態上，吾人可以發現其第一模態頻率相對水平向第一模態頻率而言高出許多，約 3 倍之多，第二至四模態亦屬相對水平向較高頻。由於格子樑版樑深達 1 公尺，且採開孔設計整體樓版質量減低，支撐柱達 25 隻，可預期其垂直向整體勁度較大，故其頻率較高。

第五章　結論與建議

5.1　結論

由歷次奈米元件實驗室工程進度與通風設備不同運轉能量階段之現地微動量測與分析比較可知，奈米實驗室微動反應之演變情形如下

(1)由能譜密度函數比較：

由各測站歷次量測之能譜中，可以找到許多尖峰值，吾人可發現於頻率 3~5Hz、8~11Hz、28~30Hz 區間，均有尖峰值出現，此現象可能代表該區土層振動特性，或奈米實驗室附近有穩定之振動源存在。

(2)由速度均方根值比較：

(a)由測站 FAB 歷次量測得知:

實驗室基地大於 4Hz 之環境振動量，會隨著奈米實驗室的興建而出現明顯下降，由此可推測建築結構體對高頻振動具有濾波的特性，並提醒我們，我們必須去防治低頻之微振害。當通風設備運轉能量達 5%時吾人量測 FAB 棟地下一樓反應，比較其與第四次 FAB 棟地下一樓量測結果，可發現垂直與水平方向在大於 31.5Hz 時，其振動量皆比實驗大樓結構完成時反應大。此點可說明冰水主機、通風設備等運轉時其較高頻振動特性（相對結構物自然週期而言）被引入 FAB 棟振動特性裡。

(b) 測站 Ref-1 與 FAB 歷次量測得知:

為瞭解實驗大樓基礎樓版與鄰近基地地層微動反應之差異，吾人

將測站 FAB 與測站 Ref-1 同時間量測之資料計算兩者 1/3 倍頻速度均方根做比較。在奈米實驗大樓基地尚未開挖時，兩測站垂直和水平向在頻帶小於 20Hz 之振動量最大差異約 3~4 dB，而在大於 20Hz 頻帶，測站 FAB 之振動量明顯大於測站 Ref-1。推測兩測站高頻頻帶均方根值之差異可能與測站 FAB 鄰近之竹科廠商啟動之空調設備有關，因測站 FAB 較接近竹科方向明顯之擾動源，因此在高頻的振動量較測站 Ref-1 稍大。等到實驗大樓完成後，測站 FAB 垂直向之頻帶在以後之振動量下降幅度略較測站 Ref-1 大；而水平向上，測站 FAB 在 4Hz 以後之頻帶均方根值，明顯比測站 Ref-1 之振動量小很多。

(c) 由 FAB 與 CUB 之比較得知:

奈米實驗室基礎施作完成時或實驗大樓完成後，兩基礎版水平向之振動量差異性不大；等到實驗大樓完成後，兩測站在 10~12.5Hz 之垂直方向振動量變動性較大。

(d) 由 FAB 基礎版、穿孔格子樑版與高架地板之比較得知:

吾人可發現通風設備運轉能量達 5%時，垂直向大於 10Hz、水平向大於 2Hz 時，FAB 三樓樓版相對於 FAB 基礎版振動量明顯提高許多；當通風設備運轉能量達 50%時，FAB 三樓樓版在垂直向與水平向振動量，皆比通風設備運轉能量達 5%時高出許多。特別的是當通風設備運轉能量達 50%時，高架地板水平方向在大於 16 Hz 時，比三樓樓版水平方向振動量大出許多。

(d) 由 FAB 與 CUB 模態識別之比較得知:

由於結構的複雜與成非對稱性，於低頻模態（水平向前兩個模態）FAB 與 CUB 在振形上較能符合；但較高振態（水平向第三個模態後）

因東西、南北振態交互影響，故其振形較無一致性。且因其實際 FAB 與 CUB 旋轉中心無從得知，故無法計算其交互影響的比例。

5.2 建議

1. 由歷次量測可發現，附屬設備之運轉，如通風設備、冰水主機等，其振動將影響到潔淨室之整體效能。尤其奈米實驗室因用地考量，將 FAB 與 CUB 規劃在同一塊基礎版上，此等設計並非一般科學園區傳統高科技廠房設計標準。倘若能讓 FAB 與 CUB 分隔遠一點，則將能減少附屬運轉機構振動對潔淨室振動量之影響。
2. 潔淨室高架地板在水平方向之振動量明顯較大，由於一般人員皆在高架地板上活動，製程機台透過隔振機構置於格子樑版上。對於高架地板的影響，實為一可近步探討之課題。可改善高架地板之支撐方式（加斜撐）。
3. 於識別實驗室結構物模態時，因通風設備運轉影響，其頻率亦被引入結構物中。建議如欲識別結構物模態，可盡量於整體結構物完成，通風設備尚未運轉時進行量測，以減少干擾源。