

## 應用於精密檢測儀之複合式減振平台研究

黎文龍<sup>1</sup> 莊明治<sup>2</sup> 張進旺<sup>2</sup>

<sup>1</sup>台北科技大學 自動化所教授

<sup>2</sup>台北科技大學 自動化所研究生

聯絡作者：莊明治 E-mail: [s3618510@ntut.edu.tw](mailto:s3618510@ntut.edu.tw)

### 摘要

本研究中主要在探討複合式減振平台系統之減振效能，而本文之所謂「複合式」減振系統，係指鋼構平台再另加一隔振元件所結合構成之平台系統。研究過程中，係以平台實物測量之方式進行，同時也考慮了橡膠、混凝土、及空氣墊等三類，共五種形式之複合平台，經測量結果發現，所謂橡膠墊類之阻尼材，雖具有減振效果，但也會因載重、材質及疊層數目等因素，其自然頻率會因荷重增加而往低頻偏移，甚至幾成剛體，影響其減振效能；而氣壓墊類者雖有較佳之高頻減振效果，卻也具有低頻區放大效應之缺點，故不適用於對低頻區振動敏感之儀器，也即設計選用時必須慎重選擇，才能避開已知之低頻共振影響區域，如此才能顯現減振效能。本文之結論，以線寬檢測儀進一步比較，檢測影像確認本文之結論為正確。

**關鍵詞：**減振、複合式平台、傳遞率

### ABSTRACT

The main objective of the present study is to look into the vibration reduction effects of compound work benches. The so-called a compound work bench is the steel-structural bench that being inserted by a soft material as a damper or isolator. Since there exists no theoretical study or simulation software, this investigation is completed by the experimental measurements. In addition, there are three categories of damping materials are under consideration. They are the concrete, rubber and air-filled pad, and divided into five different types of compound benches. It has been found that the rubber may be a good damper only when it is within the elastic ranges. Otherwise, the rubber may be over-compressed and become rigid. On the other hand, the air-filled pad is a commonly used as an isolator. And, it is also found that the air pad is a good damping material for a compound workbench in a slightly high frequency ranges. However, it may not be suitable for a low-frequency sensitive instrument, since the air-filled isolator may amplify the low frequency vibrations from the environmental floors. The conclusions of the study have been further verified by the image of a line width inspector. The images substantiate the reported results.

**Key words:** Vibration Reduction, Compound Work

bench, Transmissibility.

### 1. 前言

在科技導向的時代，台灣之製造技術同時面臨低價的中國追趕與競爭能力相當的南韓擠壓，唯有作好每一個環節，才有可能拉開彼此距離，例如在高精度與奈米化的科技產業中，對於操作平台振動控制之要求愈來愈高，因此消除外來干擾源對精密系統之影響，也成了製程中一個重要因子，從而使得來自地面干擾源所產生之微振動，也成為影響製造良率與量測準確度上一個相當重要的因素。

減少干擾源影響的方法，除了增加基礎剛性外，切除干擾源之傳遞路徑都是有效之方式，而目前工業界最常使用之減振平台設計，若採用阻尼與低剛性設計，主要是為了降低地面干擾對平台之影響；而採用高剛性設計則是為了具有支撐設備及平衡問題，同時也讓干擾源能盡快傳遞出去。由於被動式減振平台的設計較為簡單，安裝容易而且穩定高，所以被廣泛地應用在工業界中，然而，另一方面，雖然此類的減振平台具有高度穩定性、低成本等優點，但是由於其所能達到的減振效果其實是受侷限的，因此最近幾年來，主動與被動混合或複合式減振平台已成為設計減振系統新的趨勢。例如，蔡[1]已成功地開發出多自由度之主被動混合式之隔振系統，其中主動隔振的頻寬垂直方向在3~65 Hz，以及水平方向在4~52 Hz之間，甚至若搭配被動隔振之材料，低頻部分則可由主動隔振控制，高頻部分可由被動隔振的方式加以隔離，有效的控制頻寬將可達到200 Hz以上，不過，基於原有的架構所開發隔振模組限制，所以只適用在小型之奈米檢測設備中。另一方面，在黃[2]研究中，針對大多數常用之橡膠墊產品評估其特性，評估規格以自然頻率及阻尼比來表示，因為這兩參數是隔振效率之主要參考指標，此兩參數值即可進行隔振設計，但是經過本文作者之實際測試後，其隔振效率似不如預期。

在輕量化高頻平台方面，孫[3]之研究是搭配主動隔振模組之使用，其目的為儘可能在隔振頻寬範圍內，不要放大或延長外界之振動干擾之影響，故在結構設計上必須要求輕量化及高剛性。常見之輕量化高頻平台結構有兩種：第一種為三明治複合層板之結構，另一種則為蜂巢板結構。由於廠房內之擾動源甚

多，且擾動函數及位置很難清楚定義，因此無塵室樓板的微振動反應，也很難由數值模擬分析而得到可靠的預測，故精密設備常以樓板動態反應規格作為樓板微振動的設計基準，可是，不同邊界條件、樓板厚度及梁尺寸均會造成樓版的動態反應不同，其中又以樓板厚度之影響最大，故阮[4]的報告中，先針對無塵室樓板補強方面討論，若減振平台加裝油壓阻尼器進行設備防振時，同樣也能降低設備的受振反應，倘若再對背景微振結構補強與減振平台的減振系統，同時加以考慮，這樣應該可解決振動源的問題。不過，油壓阻尼器參數不同，亦會影響減振效果，故性能仍有待商榷。

此外，蔡[5]利用高剛性減振承載平台之動能吸收能力，以減振平台支撐設備，再藉由該承載平台之結構阻尼器吸收設備所產生之振動能量。該減振承載平台之組件，包括有阻尼及鋼結構體，其中鋼結構體係設置在阻尼結構體與基礎間。整體而言，通常振動能量之吸收方法包括下列面向：(1)機台之振動能量由阻尼結構體予以接收，而阻尼結構體則包括有底材、基材、中材、以及面材等；(2)阻尼結構體之振動能量平均分散、並傳導至鋼結構體，同時鋼結構體之結構阻尼也會吸收部分振動能；(3)鋼結構體所承受之振動能量平均分散導入至承載之基礎，但實際探討[5]之發明專利之減振效能，卻如同水泥式減振平台一般，只能用在理想環境狀態下，而且改善程度也是受限，如同作者前發表之鋼構式減振平台[6]，若想要能廣泛應用在各種高科技產業中，勢必要找出能吸收環境振動源之元件，需額外再加入橡膠或氣壓墊等阻尼元件，也就是本文探討之複合式減振平台，否則應用之範疇並不廣泛。

由於減振平台加上之阻尼元件後，雖然具有較佳的吸收振動能效果，若與機械結構互相配合得當，應可達到預期之效果，理論上而言，加上一高阻尼元件之複合式系統，理當具有較佳之減振效果，不過，相關之研究報告或技術手冊，卻又相當稀少，電腦模擬與實際測量之比對、驗證資料，也不多。有鑑於此，本研究針對此複合式之減振系統，直接以實物量測為手段，嘗試歸納出相關之設計法則，以作為減振工程設計之參考依據。

## 2. 複合式減振平台之設計

### 2.1 基本安裝型式

本研究所謂之複合式減振平台，乃是將鋼構基礎平台上，另外加上特殊之阻尼元件，如氣壓墊，屬於被動式者。一般阻尼元件之頻率特性大都為低頻放大，而高頻衰減也大，故如何抑制低頻放大效應，是本文研究重點之一。

常見之複合式類之減振平台，其安裝方法大約可分為下列四種樣式：(1)懸吊式，常為高階主動式常用之方式(如南科某半導體公司 45 nm 設備)，如圖 1 所示；(2)光學桌式，一般光學儀器最常用之方式，常見

於要求不高之顯微鏡等，如圖 2 所示；(3)平台式，此種方式為高科技無塵室內，生產設備最常用之方式如圖 3；及(4)坑洞式，此式為高精度之龍門銑床或振源無法改善之方式(如中科院)，如圖 4 所示。在這四種中，以懸吊及坑洞式效果最好，主要因為重心靠近地面，故穩定性高，精密儀器也較不易產生低頻晃動，而缺點則其安裝方式與維修，會比較為麻煩。

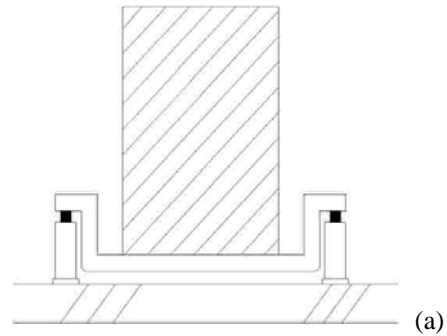


圖 1 懸吊式減振平台(a)示意圖(b)實物照片

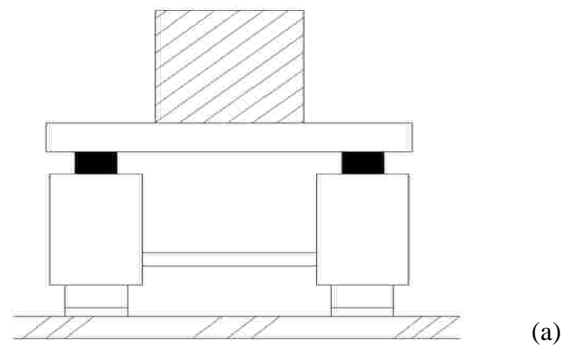


圖 2 光學桌式減振平台：(a)示意圖(b)實物照片

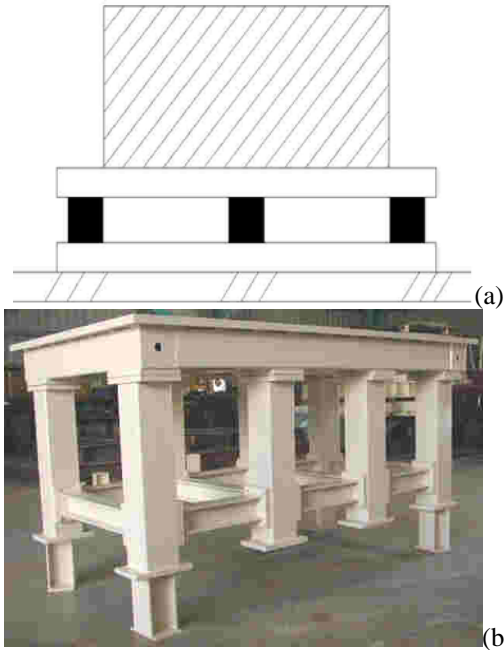


圖 3 平台式減振平台：(a)示意圖(b)實物照片

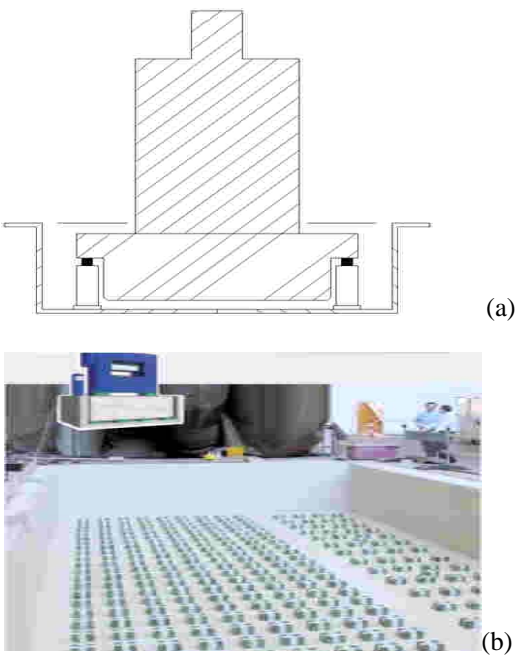


圖 4 坑洞式減振平台：(a)示意圖(b)實物照片

## 2.2 設計參數及隔振傳遞率

隔離其振動傳遞的方法，一般可分為兩種方法：第一種方法：是以隔離設備本身產生的振動為主，其產生振動能量經由樓板傳遞到外部(如圖 5)，若令  $F$  表示為儀器本身所產生之輸入激振源， $\omega$  為激振力頻率， $x$  為質量  $m_1$  之變動位移，而  $F_1$  為經由彈簧與阻尼傳遞至地板之輸出力量。

另一種方法：則是以隔離外部振源經由樓板等路徑傳遞到儀器設備上者(如圖 6 所示)，令  $y$  為基座受到外界振源直接產生之輸入位移，而  $x$  為質量  $m$  受到

彈簧與阻尼傳遞影響之輸出位移，此種隔振模式之振動傳遞率  $T_r$  (Transmissibility) 經由振動學之公式推導可計算出，第一種模式傳遞率一般為輸出力量振幅與輸入力量振幅之比，讀者可直接參考[7]；第二種傳遞模式為本文所討論重點。

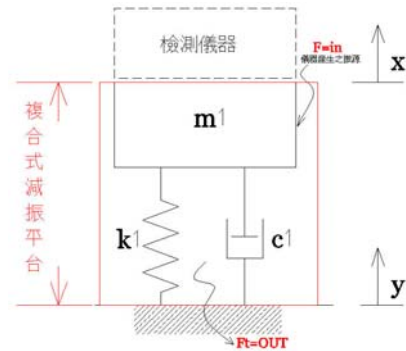


圖 5 由儀器產生之振源

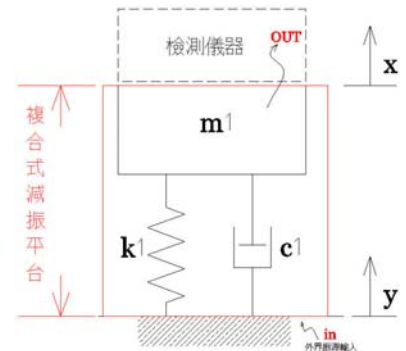


圖 6 由外界產生之振源

由圖 6 知其運動方程式可表示為

$$m_1 \ddot{x} + c_1 \dot{x} + k_1 x = c_1 \dot{y} + k_1 y \quad (1)$$

若令阻尼比

$$\zeta = \frac{c}{c_1}, \quad \omega_n^2 = \frac{k}{m} \quad (2)$$

及

$$r = \frac{\omega}{\omega_n} \quad (3)$$

則由(1)式

$$T_r = \frac{|X_0|}{|Y_0|} = \frac{1 + (2\zeta r)^2}{[1 - r^2]^2 + (2\zeta r)^2} \quad (4)$$

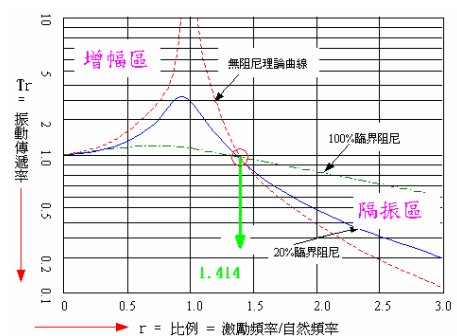


圖 7 隔振傳遞關係圖

簡言之， $T_r$  與  $r$  之關係，從圖 7 中知道，以  $\sqrt{2}$  為分界點，可區分兩區：(1)增幅區： $T_r > 1$ ，阻尼比  $\zeta$  愈小則  $T_r$  愈大；及(2)隔振區： $T_r < 1$  阻尼比  $\zeta$  愈大則  $T_r$  愈大。故一般隔振平台之設計應考慮，傳遞率  $r > \sqrt{2}$  以上，或甚至 3 以上才安全。不過，在另一方面，若  $r$  過大，則顯示其系統之共振頻率過低，或系統平台之剛性  $k$  值太小，從而將導致靜態變形過大，此時也會影響系統穩定問題。因此減振平台設計之參數配合，一直都是兩難的問題。此外，減振平台之設計，所要考慮的問題遠比(1)式之 SDOF 系統要複雜許多，例如，多自由度(MDOF)系統，可能產生模態能量轉移的問題等，都是(4)式之傳遞率所無法呈現的。

### 3. 複合式減振平台性能評估

#### 3.1 基本安裝型式

阻尼元件材料之選配與樓板背景動態頻率，有其不可分之關連性，若要同時保持高頻與低頻振動均具有較低之傳遞率特性，則必須由減振平台之結構設計與不同或多層材料結合而成。常見之結合型式大約有兩種樣式：第一種結合乃是液體與橡膠類之液體式避振機構(Hydraulic Mount)；第二種類為氣體與橡膠類結合之氣壓式避振器(Air Spring)等。因此，橡膠或氣壓墊常被用於吸收內外部之振源，兩者不論是高、低阻尼皆有相當良好的阻尼效果，故本研究之阻尼元件特別選擇常見之橡膠或氣壓墊。氣壓及液體式者其特性，如表一所示。

表一

減振機構	性能	反應	價格	噪音	壽命	阻尼	環境	耐壓
液體式	佳	慢	中	小	短	可調	易髒	大
氣壓式	較佳	快	貴	大	長	可調	無	小

#### 3.2 減振平台性能分析

為便於說明，本研究特以南科某 TFT 廠之精密檢測儀用之平台設計為例，說明減振平台之設計及確認過程。

本研究過程中，首先量測樓版之微振動訊號、轉成頻譜，同時，也確認動態運轉特性，與了解業者儀器之振動規範要求等級為 VC-D [8]，以利未來減振效能之比對。由於本案例之環境背景振動，在要求頻寬 4 ~ 100 Hz 約為 VC-B 級，已超過儀器所預估設計值 VC-D，故若只用純鋼構平台[6]，明顯地無法滿足儀器之需求，勢必須加入額外之阻尼或氣壓墊，以吸收環境之振動能量，也必須避開儀器之工作頻率。

有鑑於此，本研究開始先選用一般常用之減振元件，如橡膠墊在黃[2]研究報告中，顯示其具有良好之減振效果，頻率與負載關係圖，如圖 8 所示。由圖中得知：若承受之負載越大，其自然頻率將越低，又根據[6]之研究，只要環境振動接近儀器要求，平台減振

能力與設計經驗值應不會太差，也即純鋼構式之減振平台，就可以達到需求了，因此，只要如孫[3]之輕量化高頻平台、阮[4]或蔡[5]之任一種高鋼性減振承載平台，皆有可能達到需求目標。然而，但是若環境振動與儀器之要求相差兩個等級，向本研究所面對的情形，那麼前述之減振平台，確定都無法滿足儀器需求，故本研究嘗試以複合式者加以改善，同時，為了便於比較，本文將以五種形式之複合式平台來進行分析，實際量測其減振效能，以確保其能滿足此案例之規範要求。

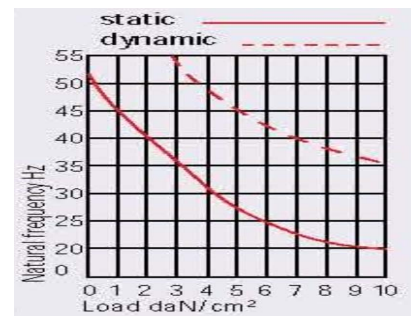


圖 8 橡膠墊性能

#### 3.3 減振平台之型式

在[6]之研究中，特別針對增加平台之剛性影響，提出完整的報告，為了本研究量測之比較基準，特將此純鋼構式、未加入任何阻尼元件者稱之為 Type 0，如圖 9 所示。

所謂之 Type 1 是指以純鋼構平台之 Type 0 為基礎，另加入一般常見、便宜之黑色橡膠墊，夾在上下鐵板之中，用螺絲調適其最佳壓縮量，形成三明治複合層板之結構，所發展出來之減振平台，整體組合如圖 10 所示。如圖 11 所示之 Type 2 基本上 Type 1 類似，但其橡膠墊被改為德製 B13 型之橡膠墊[9]，夾在上下鐵板之中與平台下，成為阻尼元件者，而橡膠墊之性能關係圖如圖 8 所示。

Type 3 則是前述之 Type 2 為基本架構，另於鋼構間灌滿混凝土，以增加其質量與剛性，如圖 12 所示；Type 4 則是再以 Type 3 為基本架構，另外加裝國產 YS-2100K 型之氣壓墊[10]，由於[10]產品無詳細之自然頻率與負荷趨勢圖，故本研究只能以經驗值來調整其壓力大小，控制其吸振效能，如圖 13 所示。Type 5 也仍是以 Type 3 為基礎，不過，其所加裝之氣壓墊乃是德製 BiAir2.5ED 型之氣壓墊[9]，氣壓墊本身之性能關係與構造，如圖 15 所示，平台之整體組合如圖 14 所示。



圖 9 純鋼構式(Type 0)實物圖



圖 10 Type 1 實物圖



圖 11 Type 2 實物圖



圖 12 Type 3 實物圖



圖 13 Type 4 實物圖



圖 14 Type 5 實物圖

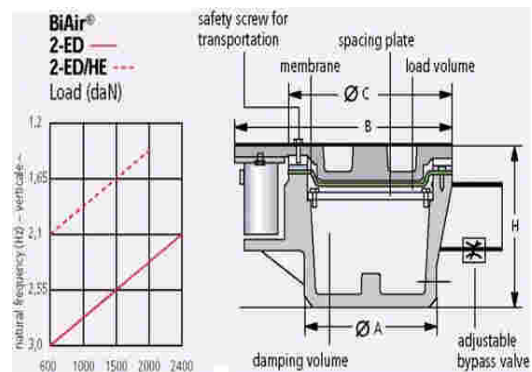


圖 15 BiAir2.5ED 型氣壓墊性能與構造

## 4. 性能量測分析

### 4.1 實驗配置

本研究使用之量測器材為 Brüel & Kjær 公司之 PULSE 3560C 頻譜分析儀, 及 Wilcoxon 公司之高感度 WR731A 型三軸向加速規與固定裝置, 其特色為可同時觀看時域、Frequency and Octave domain, 這是一般頻譜分析儀所達不到的, 實驗之配置如圖 16 所示。

另外, 本文量測參數乃是按照指定規範設定, 略述如下: 取樣速度為 1000 Hz、量測項目為加速度 (Acc.) 並分別安裝於樓板, 與減振平台桌面, 高通截止頻率設在 0.1 Hz、低通頻率在 500 Hz、量測範圍在 0 ~ 25 gal、取樣時間長度 > 600 s。

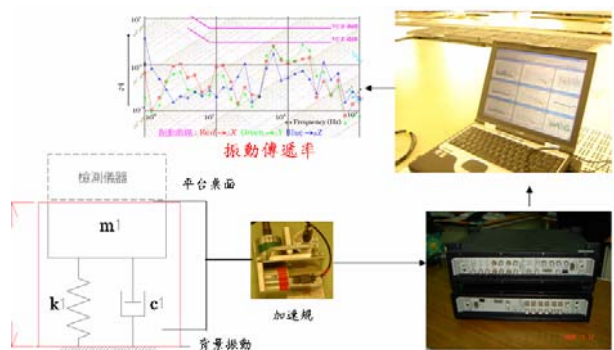


圖 16 實驗配置圖

### 4.2 量測與性能評估

由於平台之減振效能需要環境背景之比對, 研究中先測量樓版之環境背景振動, 結果如圖 17 所示。圖中顯示, 樓版背景振動只有在 Z 方向、約 16 至 30 Hz 間略微偏高, RMS 高達近約 22.6  $\mu\text{m/s}$  之 VC-B 級, 作者推測其主要是量測位置於第四樓層, 剛好位於廠房結構剛性不佳所造成的, 而第參樓層又為走道, 故無法使用阮[4]之樓版補強方面方法, 加以樓板剛性改善, 故僅能以本文之複合式減振平台來達成。

又基於研究目的，本研究分別以前節定義之五種平台，放置於前述之位置，在相同條件下，分別量測其傳遞率  $T_r$ ，以供分析比較，另外，也將[6]之純鋼結構 (i.e., Type 0, 如圖 18) 者加入本文與該五種平台比較，後者之結果如圖 19(a)~(e) 所示。

圖 19(a) 為 Type 1 平台之傳遞率，比較圖 19(a) 與 18X 後，顯示加入橡膠墊之 Type 1 平台傳遞率相當好，除了約 50~65 Hz 頻寬區外，絕大部分者接在 1.0 以下，但在計算入圖 17 之樓版背景振動後，發現 Type 1 平台雖然可改善 Z 方向偏高的問題，但整個頻譜圖還是無法達到 VC-D 等級。此外，依據[6]之報告，純鋼構之平台，其動態特性由於製造條件不易掌握，彼此間之差異也很大，是否每一個 Type 0 之平台加入相同之橡膠墊後，都可以有相同幅度之改善，本文作者仍然存疑。

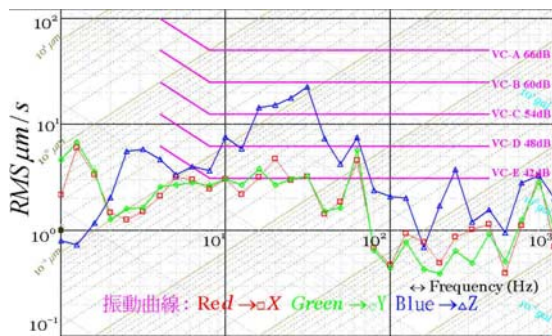


圖 17 樓版背景振動

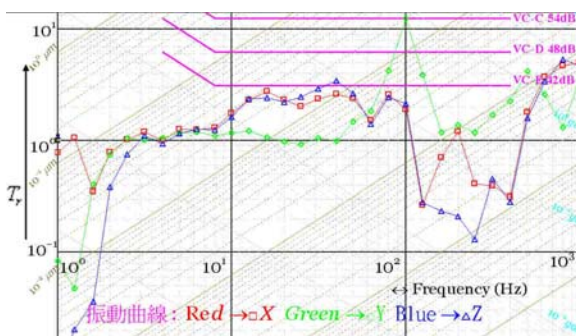


圖 18 Type 0 平台之傳遞率

觀察 Type 2 之傳遞率，如圖 19(b) 所示，基本上 Z 方向之特性非常類似於 Type 1 者，顧客以推論，可見台製之橡膠墊之性能不輸進口之德製材質，只要設計應用得當，採用台製橡膠墊之複合式平台，仍可有令人滿意之結果。不過以本研究而言，礙於環境背景振動值過大，經計算後，約 50~65 Hz 頻帶內，Z 方向之振幅值仍然無法滿足 VC-D 等級之需求。

加灌注混凝土於 Type 2 後之 Type 3 傳遞率，如圖 19(c) 所示，是可以改善原 50~65 Hz 頻帶內 Z 向之特性，但是由於整體剛性增加，也造成 X、Y 向特性稍稍變差、略大於 1.0，同時，Z 向放大頻寬也向高頻方向移動。因此，圖 19(c) 顯示，Type 3 平台，無法應用於約 160 Hz 以下之減振，而 X、Y 向免感

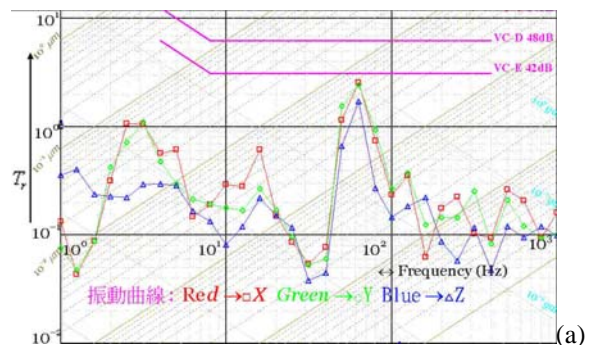
之儀器，也無法適用。

另外，若不計阻尼效果，本研究發現，若(水泥+橡膠墊)與[6]之(Epoxy 和石英砂之混合材)兩者相比較，整體效能而言，以後者較佳，原因是混凝土重量常超過橡膠墊之負荷，造成的永久變形，故橡膠墊之減振效能已趨近於零。

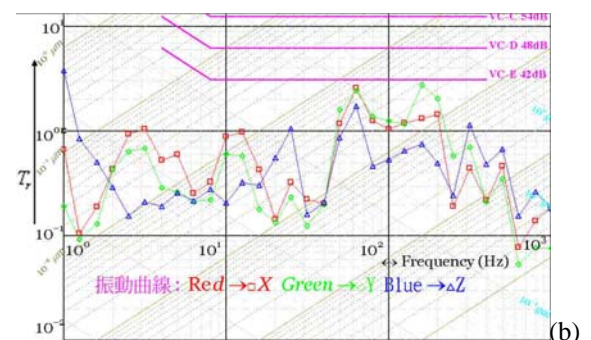
加入 YS-2100K 型氣壓墊後之 Type 4 平台，參考圖 19(d)，以 Z 向而言，高頻區 (ca. 10 Hz 以上) 減振效果甚佳，不過，如同被動式元件之特徵一般，其低頻區有放大效應，經過作者多次之調校下，仍然無法改善在 Z 方向 6.3 Hz 放大約 7 倍之結果，故不適用於對低頻區振動敏感之儀器。同時，以圖 17 之背景振動而言，在約 10 Hz 仍然無法滿足 VC-D 級之要求。

當氣墊改成德製 BiAir2.5ED 型氣壓墊之 Type 5 時，其特性如圖 19(e) 所示，其 Z 方向之低頻放大效應發生於約 5 Hz 左右，且只有 2.41 倍，遠低於 Type 4 者，就算記錄入樓板之背景振動，於考慮之 4~100 Hz 頻寬內，且幾乎都在 VC-E 等級區內，故滿足原儀器之微振要求。

經過多種方式組合與經驗值之調校下，避開了共振區，終於才有明顯效能出現，由以上共 5 種平台 Type，得知，倘若進一步以氣墊複合平台之 Type 4 與 Type 5 兩者比較，其中後者滿足儀器規範之需求，經以 0.3 μm 之線寬檢測儀結果，如圖所示。在 Type 4 之圖 20(a) 中，清楚看出因低頻振動所造成鋸齒狀，乃為不合格之線寬，而圖 20(b) 為採用 Type 5 平台所量測出來之合格線寬者，兩者有明顯之差異，同時也顯示出減振平台於精密檢測儀中所扮演之角色，非常重要。



(a)



(b)

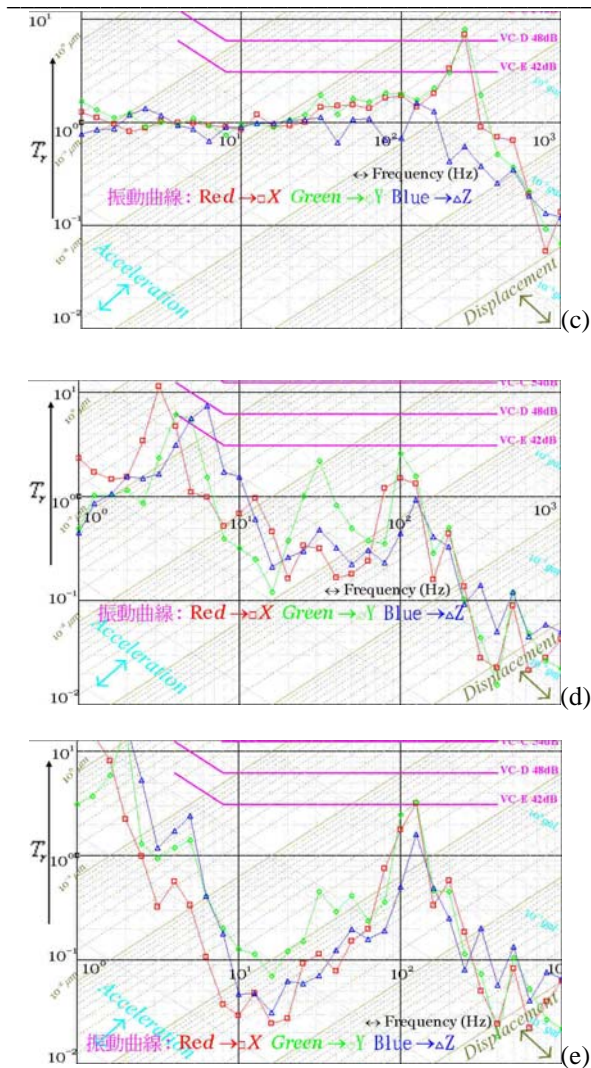


圖 19 各式複合式減振平台之  $T_r$  : (a) Type 1、(b) Type 2、(c) Type 3、(d) Type 4、及 (e) Type 5

## 5. 結論

由於本研究之量測數據顯示，在無振動源下，若減振頻寬於 4~100 Hz，則純鋼構平台最佳性能只能達到傳遞率不放大，或其減振效果，非常有限。有鑑於此，本文以實物測量方式，研究「複合式」減振平台特性。並且考慮以五種形式之複合平台。本文對減振效果、載重、材質及疊層數目等因素，都有探討。可供相關業者參考。

研究中是以鋼結構加上一阻尼材者，即所謂之「複合式」減振平台特性，研究過程中，考慮了橡膠、混凝土、及空氣墊三類、五種形式之複合平台，訊號測量結果發現，所謂橡膠墊類之阻尼材，雖具有減振效果，但也會因載重、材質及疊層數目等因素，其自然頻率會因荷重增加而往低頻偏移，甚至幾成剛體，影響其減振效能。另一方面，氣壓墊式者雖有較佳之高頻減振效果，卻也具有低頻區放大效應之缺點，故不適用於對低頻區振動敏感之儀器，也即選用時必須

慎重選擇，才能避開已知之低頻共振影響區域，如此才能顯現減振效能。本文之結論，以線寬檢測儀進一步比較，檢測影像確認本文之結論為正確。

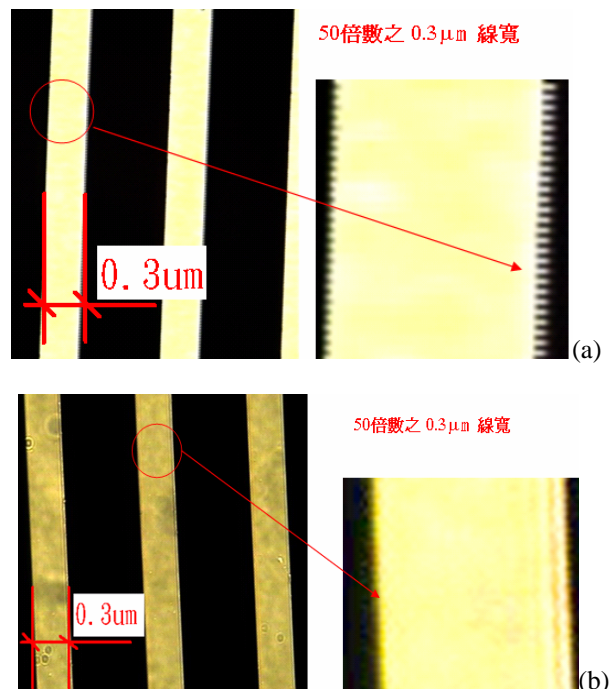


圖 20 線寬檢測結果：(a)不合格、(b)合格之線寬

## 6. 參考文獻

- [1] 蔡孟勳，“主被動混合式隔振系統開發實例”，機械工業雜誌，第267期，pp.55-68，2005/06.
- [2] 黃宇中，“橡膠防振墊隔振性能評估暨隔振應用”，第十三屆中華民國振動與噪音工程學術研討會，2005/06/03.
- [3] 孫彥碩，“奈米機械隔振平台技術分析”，機械工業雜誌，第255期，pp.186-194，2004/06.
- [4] 阮明坤，“高科技設備震害防制與無塵室樓版剛性補強研究文”，國立交通大學土木工程學系碩士論文.
- [5] 蔡宏毅，“高剛性抗震承載平台之動能吸收方法”，發明專利，專利號碼:240783，2005/10/01.
- [6] 黎文龍及莊明治，“微振用減振平台之模擬分析及實測研究”，2006年精密機械與製造技術研討會，2006/05/27.
- [7] 王栢村，1996，振動學，全華科技圖書.
- [8] Gordon, C. G., and Dresner, T. L., 1994, Methods of Developing Vibration and Acoustic Noise Specifications for Microelectronics Process Tools, SPIE 94.
- [9] 德國 Bilz 橡膠與氣壓墊之產品目錄.
- [10] 國產固安震避震器-YS-2100K 型氣墊避震器防震系列產品.