

應用非線性元件於隔振之效應分析及驗證研究

黎文龍 林逸倫

台北科技大學 製造科技研究所

E-mail: s4568033@ntut.edu.tw

摘要

被動式隔振目前廣泛應用於工業界，然而被動式隔振卻有頻寬固定的缺點，為了改善此一缺點，過去之研究曾以參考現有的漸弱性非線性元件加以改良測試，結果發現效果相當好，不過，所謂的漸弱性非線性元件都不易有效的掌握。有鑑於此，本研究有系統地以 CAD/CAE 工具，分析歸納出漸弱性非線性元件組，並之後將此一元件實現於隔振器中，透過預壓非線性元件即可調整隔振器之自然頻率，在振動環境不變的情況下，提高隔振效果。由實驗結果可知，隨著預壓量的增加，隔振效果可逐漸提高，而預壓量 10 mm 所得到的隔振效果為沒預壓時的 4 倍以上，驗證了漸弱性非線性元件可將系統的自然頻率往低頻方向調整，提高隔振器的隔振效果。

關鍵詞：漸弱性非線性、隔振器

1. 前言

近年來，半導體產業於國內蓬勃發展，據經濟部於 2002 年統計，我國半導體業除專業代工佔全球 73% 為世界第一及設計佔全球 26% 為世界第二外，亦是全球晶圓製造效率最高之地區。為此，經濟部工業局於 2002 年 6 月成立兩兆雙星產業推動辦公室，期望於 2006 年使半導體產業成為全球第三大供應國。

然而，隨著半導體產業製程的精進，到目前為止開極寬度已經達到 65 nm，且 Intel 亦預計於 2007 年下半年進入 45 nm 製程的量產，在如此精密的製程中，環境振動已成為不可忽視的問題。在國內，振動議題對半導體產業的影響也因高鐵路線通過南科而造成了廣泛討論，為此台灣高速鐵路股份有限公司委託中鼎工程股份有限公司邀請美國 ICEC (International Civil Engineering Consultants, Inc.) 執行南科振動影響評估及對策研擬工作，研究結果顯示，高鐵行經南科所造成之振動量確實超出廠商設備允許的環境振動標準值[1]。

國際間則由 Intel 於 1978 年首度發現環境振動會對製程設備造成影響，而高科技廠房靈敏設備的振動標準於 1979 年由 Ungar and White [2] 率先提出，當時所提出的標準中最嚴格者為 VC-D，之後為了因應更高精度的製程，Gordon [3] 於 1991 年提出 VC-E，此振動標準目前仍為國際半導體廠房的通用標準。除此之外，美國國家標準與技術研究院 (NIST) 亦自定有 NIST-A 及 NIST-A1 兩規範，其中 NIST-A 與 VC-E 類似，不同處為其振動容許量於頻率 20Hz 以下比 VC-E 嚴苛，而 NIST-A1 為比 NIST-A 更加嚴苛之規範[4]，隸屬美國國

家標準與技術研究院的先進量測實驗室 (Advanced Measurement Laboratory, AML) 於近年完工的新大樓，即是以 NIST-A 與 NIST-A1 做為振動隔離的標準。

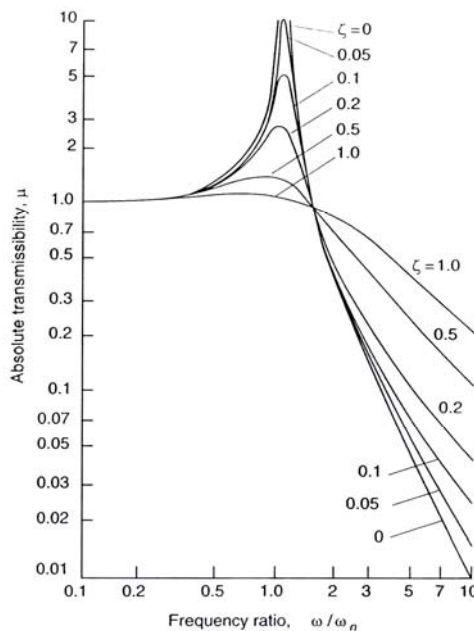


圖 1 頻率比與傳輸比之關係圖[5]

圖 1 為頻率比與傳輸比的關係圖，由圖可知，當環境振動頻率與系統自然頻率的比值大於 $\sqrt{2}$ 時，不論阻尼比的大小為何，傳輸比將隨著頻率比的增加而降低，且傳輸比必小於 1。可是外來的環境振動頻率往往無法控制，因此，若能將系統自然頻率降低，則可有效提升隔離振動的效能。然而，一個隔振系統之自然頻率在此隔振系統完成時就已經確定，一旦外來之環境振動頻率改變，則會影響該隔振系統的效能，且若環境振動的頻率接近隔振系統的自然頻率，甚至可能造成隔振系統失效，產生共振現象，令輸出之位移大於環境振動的位移量，使得隔振系統失去意義。為此，本研究決定採用漸弱性 (softening) 非線性元件做為隔振系統之勁度元件，如此便可調整並降低系統的自然頻率，避免共振現象及提高隔振效能。

常見的漸弱性非線性元件，主要以碟形彈簧 (Disc Spring) 為主，Almen 及 Laszlo [6] 於 1936 年將碟形彈簧各項參數整理為參數式，一般稱此參數式為 Almen - Laszlo 式，此參數式使得碟形彈簧有應用上的參考基準。爾後，陸續有研究修正此一參數式，Curti 及 Orlando [7] 將 Almen - Laszlo 式忽略徑向應力的假設條件修



正為忽略徑向應變，於 1976 年提出修正式。而碟形彈簧製造商亦有對參數式進行研究，德國 SCHNORR 公司於其碟形彈簧使用手冊中即有記載該公司發展的經驗式。由這些研究結果及規格書中都明確指出碟形彈簧在受到外力時具有明顯的漸弱性非線性現象，陳[8]及蔡[9]皆利用此一效果，將碟形彈簧應用於其自行設計的隔振系統，有效的改變系統的自然頻率，增加隔振效果。

除了碟形彈簧之外，Carrella *et al.* [10]使用一個垂直的彈簧與兩個傾斜的彈簧並聯，即實現良好的漸弱性非線性效果。此外，張等人[11]使用稱為負剛度的架構施加於隔振系統上，可使隔振系統的自然頻率由未施加前的 10 Hz 降低至 1 Hz，亦是應用漸弱性非線性元件的特性，方能達到如此的效果。但是，除了這些文獻外，漸弱性非線性元件的相關研究相當少，本研究的目前在於在以上的文獻外，自行設計及製造一組漸弱性非線性元件，並將其實現於隔振系統。

本研究旨在於設計並製作一漸弱性非線性元件，過程中先使用 SolidWorks 進行元件的設計與繪圖，之後以 COSMOSWorks 進行有限元素分析，分析該元件是否具有漸弱性非線性的特性，如果沒有，則重新設計。在分析後確定元件具有所需特性後，便製作實體元件，並將實體元件進行壓力試驗後與分析數據進行比較。之後進行動態隔振試驗，評估結合漸弱性非線性元件的隔振器是否具有自然頻率的可調性，以及調整後是否可提高隔振效能，最後將實驗結果進行整理與討論。

2. 漸弱性非線性元件

在非線性的特性部份，可依元件受力後位移變化的趨勢分為兩種，一為漸弱性非線性，另一為漸強性(hardening)非線性。漸弱性非線性元件在受力後，對於正向力之反力會隨著正向力的施加而減弱，漸強性非線性則反之，而線性彈簧的彈簧勁度 k 定義為

$$k = \frac{\partial F}{\partial \varepsilon} \quad (1)$$

此時若將漸弱性非線性元件視為一彈簧，則表示當正向力持續增加時，該元件的彈簧勁度將會不斷降低，直至趨近於 0。而一振動系統之無阻尼自然頻率 ω_n 定義為

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2)$$

式中 m 為振動系統之質量。由此式可知，欲改變一振動系統之自然頻率只能由系統之質量或彈簧勁度著手，但整個系統的質量通常難以改變，即使有所增減，也難對自然頻率頻寬有大幅度的調整，所以改變彈簧勁度來調整系統的自然頻率會是較為理想的作法。而若將漸弱性非線性元件做為振動系統中的勁度元件，即可透過施以預壓(pre-loading)的方式來改變彈簧勁度，就能達到改變整個系統的自然頻率，且因為漸弱性非線性元件的頻率調整是往低頻方向走，即使外界的環境振動頻率不變，透過將系統自然頻率降低，實質上也可得到更佳的隔振效果。

由於本研究的目前為自行設計一組與其他研究或文獻不同的漸弱性非線性元件，並且要符合容易製造加工的原則。設計之初，是以碟形彈簧的外形做為設計概念的雛型，之後再參考生活周遭常見的幾何形狀進行設計。設計過程首先以 Solid Works 進行繪圖，之後再將設計好的元件以 COSMOSWorks 進行有限元素分析，程序雖然簡單，但開始時設計出的元件往往不具有漸弱性非線性的特性，再加上有限分析時間相當長，所以過程相當費時。圖 2 為元件設計過程中的變革，由於碟形彈簧為圓錐形薄殼，所以設計初期的概念都以圓形為主，第一個設計出來的元件為甜甜圈形的中空薄殼，分析結果如圖 3(a)雖具有軟性非線性的現象，但是仍太接近線性變化，這樣的結果對於調整系統的自然頻率沒有太大的幫助，故不選用此一外形。之後將甜甜圈沿圓周水平面至 45°處切開，目的在於希望能藉此一缺口提供更大的變形量，提高非線性的效果，但分析結果不如預期，如圖 3(b)所示，除過程中一度出現非線性效果，幾乎都是線性變化。接著是參考電池回收筒蓋設計出來的外形，以及將回收筒蓋裁切成六片板狀後搭配中心柱組裝的造型，兩者分析結果分別為圖 3(c)及 3(d)，特性皆是漸強性非線性。

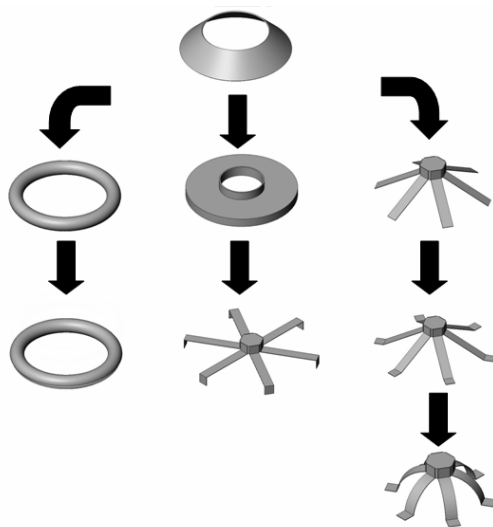


圖 2 非線性元件設計變革

之後依照將電池回收筒蓋切片的概念，將碟形彈簧的外型切割為六片板，分析過程底部的邊界條件為滑動面，結果如圖 3(e)，效果仍不顯著，於是將底部的分析條件改為固定邊界，但分析結果如圖 3(f)，反而更為線性變化，最後在固定底部的邊界條件下，給予板片一個弧度，分析結果如圖 3(g)，具有非常良好的漸弱性非線性效果，在這樣急遽的非線性變化下，理論上對於調整系統自然頻率會有相當顯著的效果。

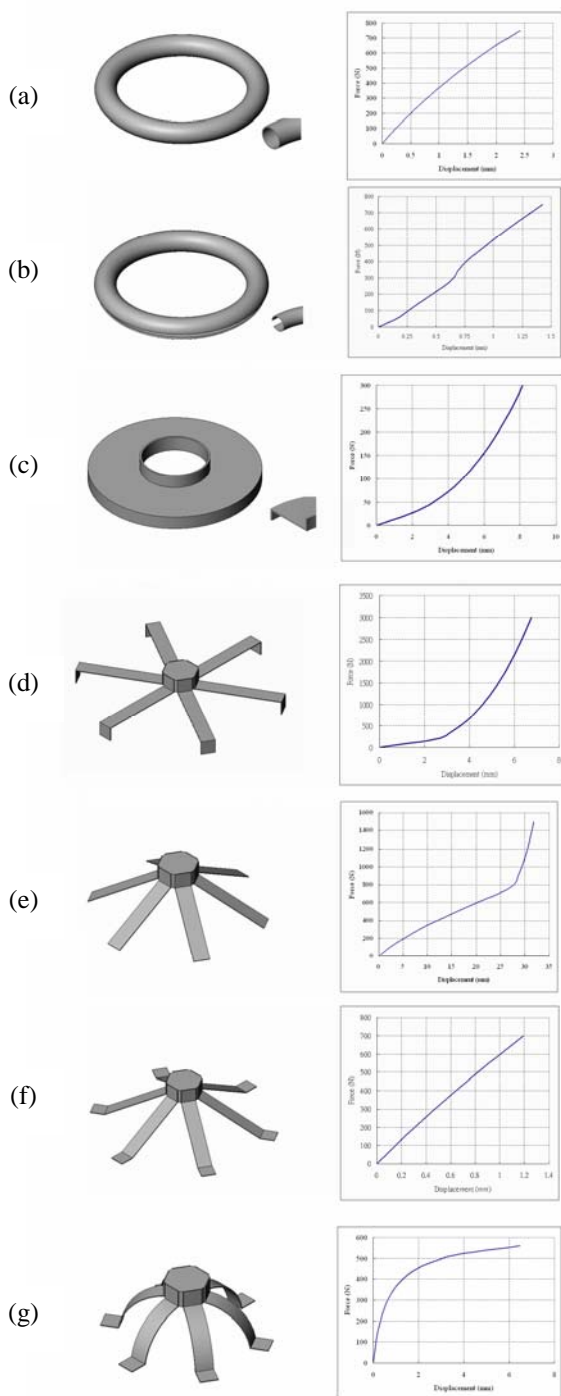


圖 3 設計期間的分析結果

3. 隔振器之設計與模擬

3.1 隔振器之設計

本研究為了將上述的漸弱性非線性元件使用於隔振器之上，並以被動式隔振為基礎，目的在於不額外施加能量即可達到隔振的效果。此外，也希望能在隔振器的組件數量上予以簡化，達到方便組裝的效果，最重要的是在故障時能更容易排除問題。本研究自行設計的隔振器如圖 4 所示，隔振器僅以三個組件所組成，分別為

平台底座、漸弱性非線性元件及平台頂體，以下將分別對各組件進行說明：

1. 平台底座：平台底座為支撐欲與振動環境隔離的儀器或設備，本體由中碳鋼所製。本體中央有一圓柱，與底座本體接合方式為銲接，目的為將平台頂體限制成單自由度運動，即僅能在 z 方向上運動，中心圓柱內攻 M14 內螺紋，供之後預壓螺絲鎖付。
2. 漸弱性非線性元件：本元件即第二章所自行設計的元件，採用的材料為 SK85 工具鋼，雖然蔡[10]主張塑膠材料具有比鋼更高的阻尼，對於吸收能量、穩定振盪有較鋼更佳的效果，不過塑膠的剛性不足，如果隔振器所承載的儀器設備極重，便不堪負荷。在此考量下，本研究決定以鋼做為本元件的材料。
3. 平台頂體：本平台頂體為六角形，係為了配合六片漸弱性非線性元件所製成。平台底座跟平台頂體在鎖付漸弱性非線性元件的地方皆挖槽，以限制平台頂體在 z 方向軸線上的旋轉，中心孔與平台底座中心柱間的配合為精密配合。

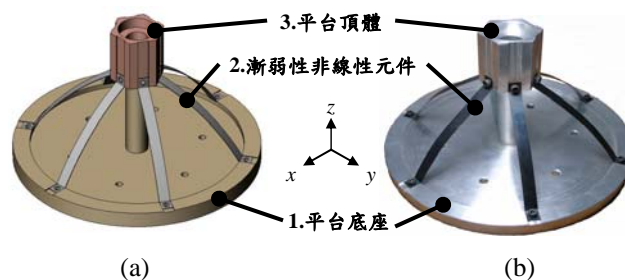


圖 4 避振器整體架構：(a)CAD 實體圖、(b)實物

3.2 隔振器性能驗證

為確認所設計之隔振器與前章分析結果相同，故需以實驗加以驗證，本實驗採用拉伸試驗機對隔振器本體進行試驗。驗證實驗架設如圖 5 所示，將隔振器置於拉伸試驗機之平台上，之後拉伸試驗機以等增加率給予隔振器一壓縮作用力，並透過力感測器擷取作用力大小，而拉伸試驗機提供位移訊號的資料。實驗結果與分析結果的比較如圖 6 所示，兩者結果雖然不是非常吻合，但是漸弱性非線性的現象趨勢卻是相同的，由這樣結果可知，此一隔振器可透過預壓的方式調整自然頻率。

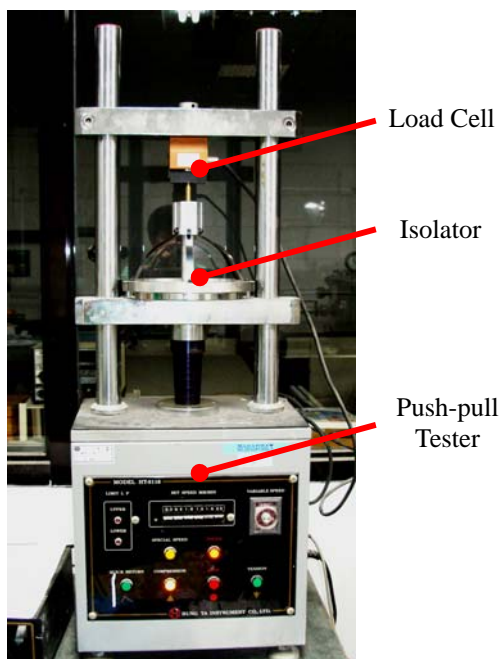


圖 5 隔振器性能測試架構圖

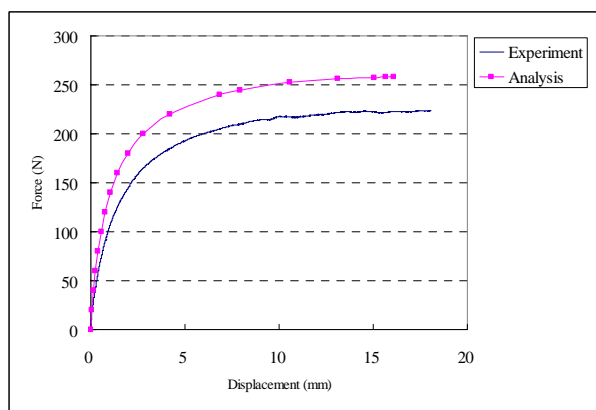


圖 6 分析結果與實驗結果比較圖

4. 動態隔振實驗

4.1 實驗架構

圖 7 為動態實驗架構圖，藉以量測在不同的預壓量下，隔離振動的效果如何，並將實驗過程量測到的訊號儲存以便後續的分析。實驗過程以激振器 (①) 直接推動隔振器 (②)，隔振器上放置四公斤之質量塊代表欲與振動源隔離之設備，並分別在隔振器底座及質量會上放置量測輸入與輸出訊號的加速度規 (③、④)，而加速度規所量測到的訊號同時由 B&K 3560C 訊號擷取器 (⑤) 擷取，之後將訊號傳輸至個人電腦 (⑥) 進行後續處理及儲存。

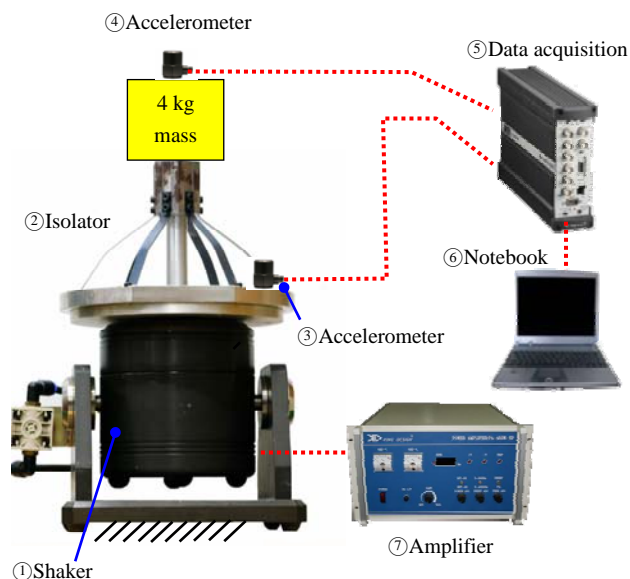
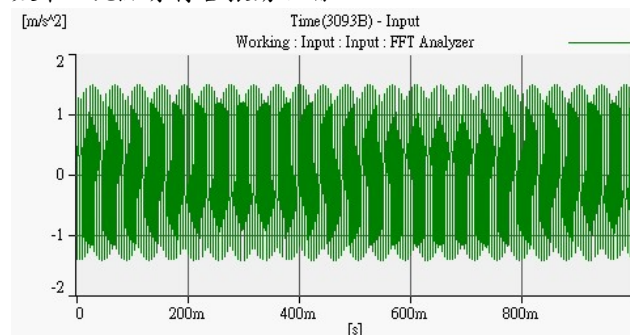


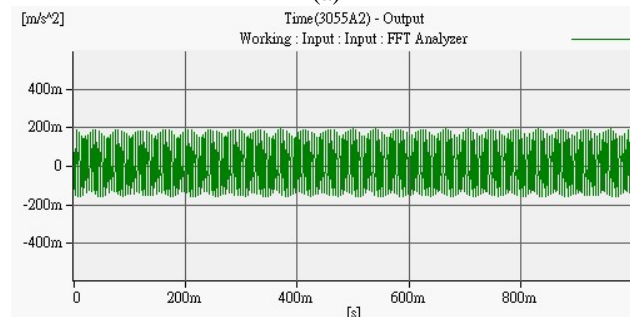
圖 7 動態實驗架構圖

4.2 實驗結果

本動態實驗對預壓量為 0 mm 至 10 mm，間隔 2 mm 的情況下分別進行 100 Hz、150Hz 及 200Hz 的隔振實驗，圖 8 為預壓 4 mm 激振頻率 200Hz 的時域圖，表 1 為動態隔振實驗之統整表，由表中可知，在預壓量增加而激振頻率不變的情形下，隔振的效果皆有提升，在預壓量 10 mm 時效果達到最好，這樣的結果證明了漸弱性非線性元件在透過預壓，能有效降低系統之自然頻率，轉而提高隔振之效率。而在相同預壓量之下，較高的激振頻率相對於較低的激振頻率下，會有較佳的隔振效果，此點亦符合振動理論。



(a)



(b)

圖 8 動態隔振實驗時域圖 (a)輸入訊號 (b)輸出訊號

表 1 動態隔振實驗結果

Excited Frequency (Hz)	Pre-loading Degree (mm)	Input (mm/s ²)	Output (mm/s ²)	Ratio of Output to Input
100	0	1020.9	318.0	0.311
	2	999.3	235.2	0.235
	4	1023.6	97.5	0.095
	6	1013.0	83.3	0.082
	8	1009.5	77.9	0.077
	10	1008.6	70.2	0.070
150	0	1003.6	274.0	0.273
	2	1017.6	215.3	0.211
	4	1006.9	94.1	0.093
	6	1012.3	79.3	0.078
	8	1001.3	73.4	0.073
	10	1002.8	46.5	0.046
200	0	1007.3	204.9	0.203
	2	993.9	170.2	0.171
	4	1007.8	88.2	0.088
	6	1001.8	76.5	0.076
	8	999.8	61.8	0.062
	10	1011.5	41.6	0.041

5. 結論

本研究以被動式隔振為出發點，透過參考常見的漸弱性非線性元件，自行設計一組製造容易且具有相同性質的元件，並將此元件應用於自行設計的隔振器上，在不需要額外施加能量的情況下，即可達到相當良好的隔振效果。此隔振器可由前一節實驗結果得知，能透過預壓的方式改變自然頻率，並提高隔離振動的效果，進而改良一般被動式隔振器隔振頻寬固定的缺點。

雖然於實驗得到相當良好的效果，但是漸弱性非線性元件在較大的預壓量之下，容易因撓曲量過大而產生塑性變形，建議未來可透過採用降伏強度更高的材料來改善此一缺陷。

6. 參考文獻

- [1] 中鼎工程股份公司，台灣高鐵計畫南科振動影響評估及對策研擬工作第一階段工作成果報告，民國 88 年 4 月。
- [2] Ungar, E.E., and White, R.W., "Footfall-Induced Vibrations of Floors Supporting Sensitive Equipment," *Sound and Vibration*, Vol. 13, No. 10, pp. 10-13, 1979.
- [3] Gordon, C.G., "Generic Criteria for Vibration-Sensitive Equipment," *Proceedings of International Society for Optical Engineering (SPIE)*, Vol. 1619, pp. 71-85, November 4-6, 1991.
- [4] Amick, H., Gendreau, M., and Gordon, C.G., "Facility Vibration Issues for Nanotechnology Research," *Proceedings of the Symposium on Nano Device Technology 2002*, May 2-3, 2002.
- [5] Rivin, E.I., "Passive Vibration Isolation," ASME Press, New York, 2001.
- [6] Almen, J.O., and Laszlo, A., "The Uniform-Section

Disk Spring," *Transactions of the ASME*, Vol.58, pp. 305-313, 1936.

- [7] Curti, G., Orlando, M., "A New Calculation of Coned Annular Disk Spring," *ASME Winter Annual Meeting*, New York, 1976.
- [8] 陳信宏，頻率可調式非線性微吸振器之研究，碩士論文，國立台北科技大學製造科技研究所，2003。
- [9] 蔡忠瑾，應用非線性元件模組之創新微振避振平台研發，國立台北科技大學機電整合研究所，2006。
- [10] Carrella, A., Brennan, M.J., and Waters, T.P., "Static Analysis of A Passive Vibration Isolator with Quasi-zero-stiffness Characteristic," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 301, pp.678-689, 2007.
- [11] 張建卓、董申、李旦，「基於正負剛度並聯的新型隔振系統研究」，*納米技術與精密工程*，第 2 卷第 4 期，第 314-318 頁，2004 年 12 月。

The Analysis and Experimental Verification on Vibration Isolation by Employing Non-linear Elements

Wenlung Li, Yi-Lun Lin

National Taipei University of Technology

Graduate Institute of Manufacturing Technology

ABSTRACT

The passive vibration isolator is an effective vibration isolation technique but inflexibility to the environments or occasions. In order to improve the deficiency, this study employed non-linear elements in the self-design vibration isolator. First all, confirming the elements had the non-linear property by FEM. The analysis result showed that it can be used to tune the natural frequency by pre-loads. After the practical experiments, all the results showed that the vibration isolation capability can advance with pre-loaded. Furthermore, the isolation capability with 10 mm pre-loaded degrees has four times better than without pre-loaded. The remarkable vibration reduction in some frequency bands has been observed.

Keywords: Softening Non-linear, Vibration Isolator

