

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

微小質量動態量測系統之設計開發

Design and Development of a Dynamic Weighing System for Micro-Mass

計畫編號：NSC91-2212-E-002-081-

執行期限：89年08月01日至90年07月31日

主持人：黃光裕 國立臺灣大學 機械工程學系

計畫參與人員：廖啟男 葉貞秀 國立臺灣大學 機械工程學研究所

一、中文摘要

本研究目的在於設計開發一個適合於自動化量測之微小質量量測系統。為配合自動化量測之需求，採用電容式量測原理作為質量量測系統之基本作用原理。以電容薄膜電極作為質量負載台，質量負荷時薄膜的共振特性會產生改變。進行振動式量測時，薄膜的共振頻率可以透過質量負載及最大形變之關係近似解進行估算。受質量負載的薄膜以各種激振方式產生振動，薄膜在自由振動情形，分別以光學式及電容式量測分析其在質量改變下之頻率響應變化情形。將質量負載振動薄膜與電極薄膜之功能獨立化，透過電容式量測器可以準確測得因質量負載改變所產生之振動薄膜共振音波變化。

關鍵詞：微小質量、動態質量量測、振動原理、量測系統、電容式量測器

Abstract

The aim of this research project is to develop a dynamic micro-mass measuring system designated for automatic mass measurement. To achieve an automatic measuring function, the capacitive measuring method was applied as the basic principle of the micro-mass measuring system. A mass-loading diaphragm is used as one of the capacitive electrodes and under influence of loading mass, the resonant characteristics will change. When processing the vibration measurement the resonant frequency is derived by the

relationship between loading mass and maximum deflection of the diaphragm. By applying the free vibration method, the optical and capacitive sensors are used to study the dynamic responses of the diaphragm. Through the functional separation of the mass loading diaphragm and capacitive electrode, the capacitive sensor can accurately measure the variation of the resonant frequency induced by mass loading.

Keywords: micro-mass, dynamic mass measurement, vibration principle, measurement system, capacitive sensor.

二、緣由與目的

隨著科技進步與產業昇級，微系統與奈米技術之開發與推廣，微小質量之量測技術也愈加重要，例如量測系統之校正質量；生產過程中物料之配比；鍍膜製程中元件厚度之控制；用於品管控制高頻振盪系統之振盪質量，如石英振盪子或鐘錶控擺輪；用於控制小光學鏡坯之厚度；用於微小元件或複雜元件體積之控制；用於環境落塵量之監測；或用於生物晶片反應作用所造成質量變化之檢驗。隨著產能提昇與品質要求提高，量測精確度、量測速度與量測環境的要求也越來越嚴格[1-3]。

微小質量的量測傳統上主要是採用靜態的精密天平，以比較方式進行量測[2]。此種量測方式必須有極精密的機構與軸承才能達到系統之精度要求。早期量測值數據必須以人工方式讀取，而隨著量測技術

的發展陸續也將各式位移或變形感測原理應用於其上，以偵測質量所造成之天平偏擺量。當被測質量越小時，量測系統本身的質量與軸承特性必須與其匹配，才能提昇量測系統的感測精度與靈敏度。但結構系統有其剛性強度的基本要求，結構質量與軸承摩擦也不能無限制地減少，在執行上也受到量測原理與設備裝置的限制，並不能適用在所有自動化製程或自動化設備中。從質量量測方法的文獻發現，應用不同的量測原理及搭配不同的量測設備，再經過量測過程中設備間多層級轉換鏈，每次的轉換對質量量測時的感測精度和靈敏度有很大的影響。本研究的目的是在於微小質量動態量測方法之探討以及高精度及高解析度量測系統之設計開發。首先進行質量量測原理的比較與特性分析，然後運用系統化設計方法，依據系統功能需求設計開發出適用於微小質量的質量量測系統，同時也建構系統理論模型以利於影響因素之分析。

三、結果與討論

由文獻[3-10]之探討得知，經由振動方式可以量測得振動系統之共振頻率，進而就可以求得振動系統的質量大小。以振動方式進行質量量測具備有三個重要特點：(a)排除重力加速度之影響；(b)以時間為量測對象；(c)共振頻率對微小質量變化反應靈敏。

依據薄板之振動理論，若薄板具備等向性及均勻性的特性，並且對稱於中立線，同時也滿足線性薄板小撓動理論的假設條件，則依據 Rayleigh 的聲學理論可以得到圓形薄板在邊界固定的情形下振動之運動方程式。運動方程式之解透過數學軟體 Mathematica 可以求得所有特徵值根 $\beta_{n,s}$ 之解，特徵值 $\beta_{n,s}^2$ 則再經過(1)式可以算出各模態的共振頻率，其中基頻特徵值 $\beta_{0,1}^2$ 為 10.215823。

$$\omega = \beta_{n,s}^2 \sqrt{\frac{D}{a^4 \rho h}} = \beta_{n,s}^2 \sqrt{\frac{\pi D}{a^2 (\pi a^2 h \rho)}} \quad (1)$$

$$= \beta_{n,s}^2 \sqrt{\frac{\pi D}{a^2 m_{plate}}} \quad (1)$$

當薄圓板在圓心部位受到一集中質量之負荷時，若集中質量以重力 mg 之型式作用，則無法求得運動方程式之解析解。若將集中質量也視為薄圓板之一部分，如此則可以透過 δ -function 以突然改變之質量密度改寫薄圓板之密度函數，由 Roberson 之推導結果透過計算可以得知負荷質量大小和基頻特徵值間之關係如圖 1 所示；質量比 μ 很小的地方，基頻特徵值 $\beta_{0,1}^2$ 和質量比 μ 之間有高度線性關係。

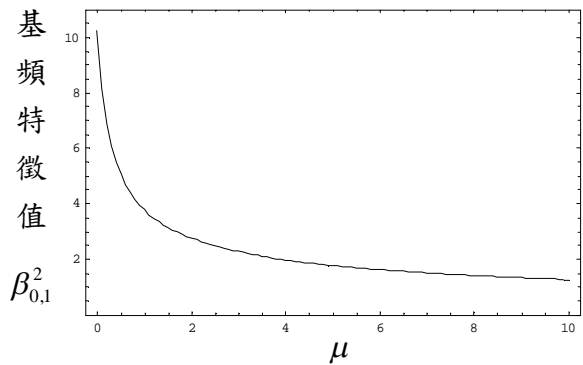


圖 1：基頻特徵值 $\beta_{0,1}^2$ 對質量比 μ 的關係

若將整個薄圓板和負載質量視為一個等效彈簧質量系統，且不考慮薄板本身之質量，以彈簧受靜態負荷和變形之關係來近似，如此則可以利用受力負荷與整個薄圓板平均變形量關係求得其共振頻率 ω_{avg} (2)式，經過推導也可以找到與振振動手冊 [4]記載相同之公式(3)式。若以薄板受力負荷與薄圓板中心點最大變形量來計算共振頻率的近似值 ω_{peak} (4)式，則其結果等於平均變形量所求得共振頻率 ω_{avg} 之一半。

$$\omega_{avg} = \sqrt{\frac{k}{M_{load}}} = \sqrt{\frac{64\pi D}{a^2 M_{load}}} = 8 \sqrt{\frac{\pi D}{a^2 M_{load}}} \quad (2)$$

$$= 8 \sqrt{\frac{\pi}{a^2 M_{load}} \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}} = 4.0933 \sqrt{\frac{Eh^3}{a^2 M_{load} (1-\nu^2)}} \quad (3)$$

$$\omega_{peak} = \sqrt{\frac{k}{M_{load}}} = \sqrt{\frac{16\pi D}{a^2 M_{load}}} = 4\sqrt{\frac{\pi D}{a^2 M_{load}}} \quad (4)$$

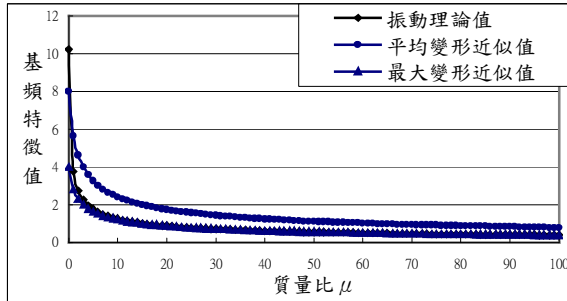


圖 2：不同近似方式下基頻特徵值 β^2 與質量比 μ 之關係比較

對微小質量而言當負荷質量和薄板質量相當接近時，薄板質量也會對振動系統的振動質量造成影響，薄板質量則是不容忽略。根據 Rayleigh 方法，若考慮薄板質量，以薄板振動的第一個模態作為逼近振形，則可得質量補償值大小為 $0.182834 m_{plate}$ 的逼近結果。為了便於比較，將集中質量負載 M_{load} 以質量比 μ 和薄板質量 m_{plate} 來表示，圖 2 顯示各種不同近似方式所得基頻特徵值 β^2 相對於振動理論計算所得結果。在質量比 μ 很小的情況下，質量補償前後的兩種近似值都有明顯差異，因為實際情況下薄板上大部分質量都比較分散，與集中質量之假設不相符。經過質量補償後，平均變形近似方式之誤差反而變大，而最大變形近似方式的誤差則明顯變小。表 1 列出了以最大變形方式經質量補償後的誤差範圍，當質量比大於 3 時其誤差已小於 1%；由此可知，共振頻率可以不須複雜公式計算求得，以質量補償後最大變形近似值已經能夠相當精確求得。

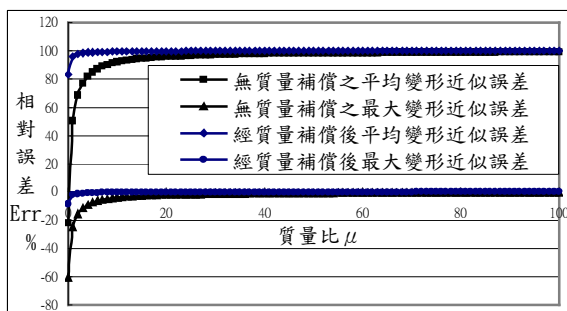


圖 3：不同近似方式所得基頻特徵值相對於振動理論計算的相對誤差

表 1：最大變形近似方式經質量補償後的相對誤差 Err% 一覽表

μ	0	1	2	大於 3	大於 28
Err%	-8.433	-2.161	-1.194	小於 -0.824	小於 -0.098

圖 4 為振動式質量量測系統之功能架構圖。以薄膜電極作為振動媒介進行動態量測時，系統包含振動致動、位移量測、負荷及訊號處理等功能。

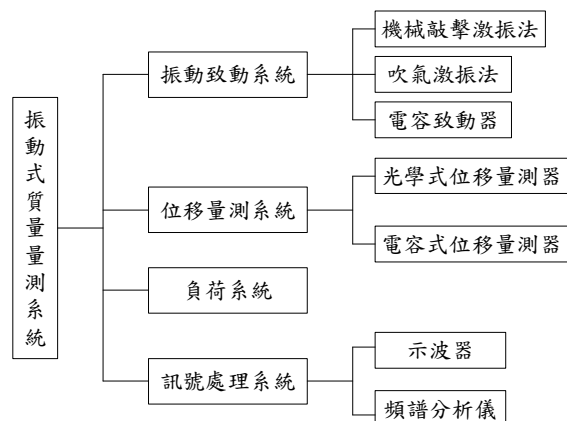


圖 4：振動式質量量測系統之功能架構圖

自由振動的起振方式可分為直接激振或基底激振兩種方式，而掃頻式或白雜訊式激振則由電容式致動器透過壓力波來作為激振源。負荷系統採用金屬或塑膠小片黏貼於薄膜中心位置來模擬集中質量。在實際進行振動位移量測時，先進行光學式的振動量測來測試找出薄膜環境限制及干擾影響最小的情形下之自由振動響應，實驗所使用的薄膜為市售光碟片上的金屬膜，實驗裝置如圖 5 所示。薄膜透過機械敲擊或脈衝空氣壓力波激振，薄膜中心點的變形量使用雷射干涉儀搭配專用訊號處理控制器，輸出訊號直接接到示波器和頻譜分析儀上進行記錄和分析，量測結果顯示於圖 6，質量負荷所造成之共振頻率偏移情形則如圖 7 所示；10 次共振頻率的重現測試結果紀錄於表 2，以平均值為基準，最大誤差為 0.59%，顯示量測結果有很高重現性。圖 8 為光學式量測振動膜承

受集中質量下共振頻率對質量比之關係。

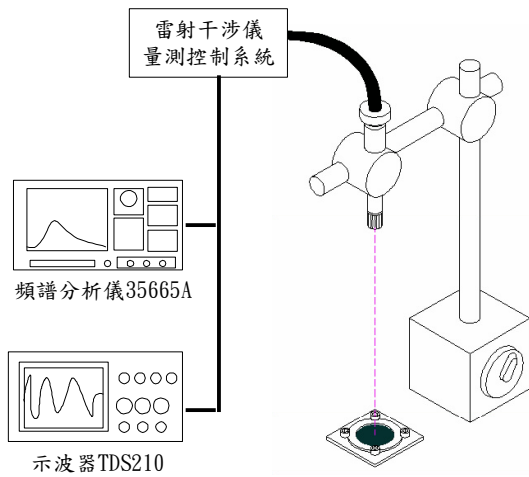


圖 5：光學式振動量測系統之架構圖

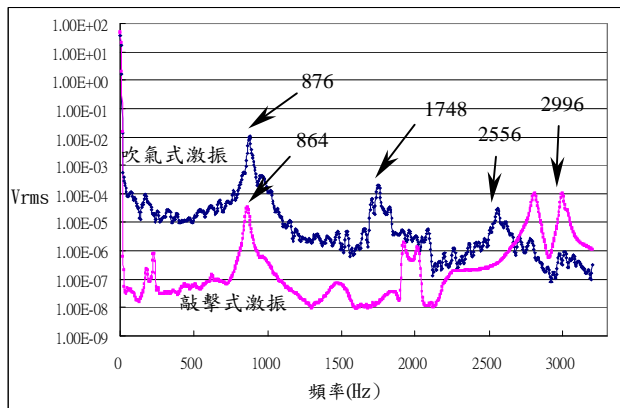


圖 6：振動膜自由振動頻率響應圖

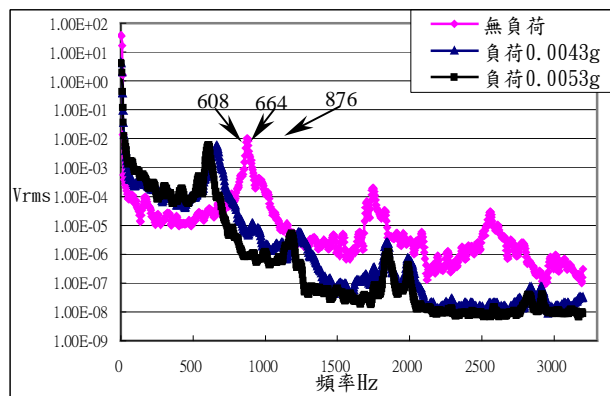


圖 7：振動膜承受不同集中質量後共振頻率偏移情形

表 2：光學式基頻量測重現記錄

項目次	1	2	3	4	5	6
基頻值	672	672	672	672	672	672
項目次	7	8	9	10	平均	最大誤差
基頻值	668	668	676	676	672	0.59%

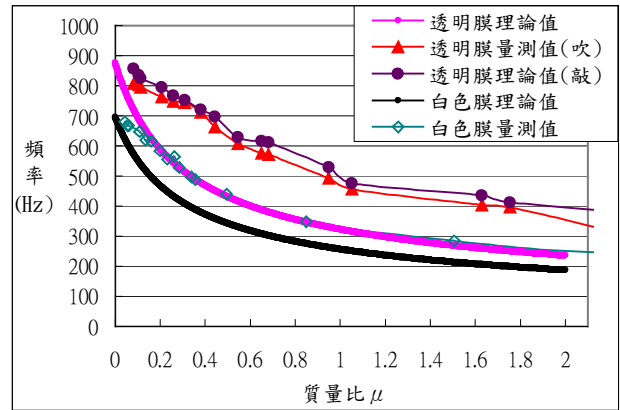


圖 8：光學式量測振動膜承受集中質量下共振頻率對質量比之關係

圖 9 是利用光碟片上金屬薄膜自行開發設計電容式量測器中元件之配置圖，搭配圖 10 電容式麥克風量測電路即可達到振動量測之目的。圖 11 為實際電容式振動量測系統之架構圖。

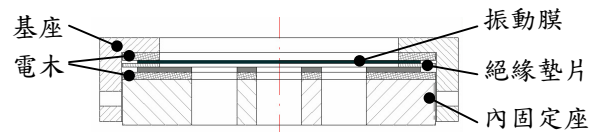


圖 9：電容式量測器中元件之配置

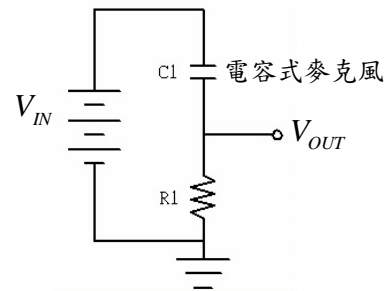


圖 10：電容式麥克風量測電路

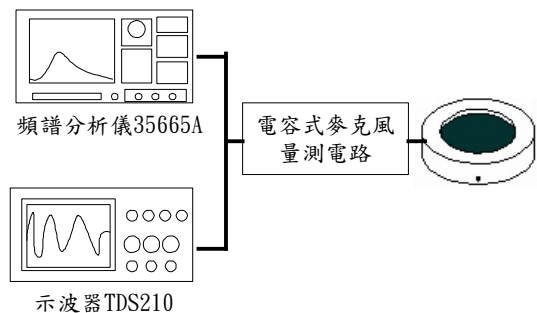


圖 11：電容式振動量測系統之架構圖

圖 12 為電容式位移量測器搭配電容式麥克風量測電路以各種方式激振薄膜來量測薄膜振動響應的結果。從測試結果可以發現，由於電容式量測器之頻率響應頻？很廣，所以無法測得振動膜因質量變化所造成共振響應偏移現象。

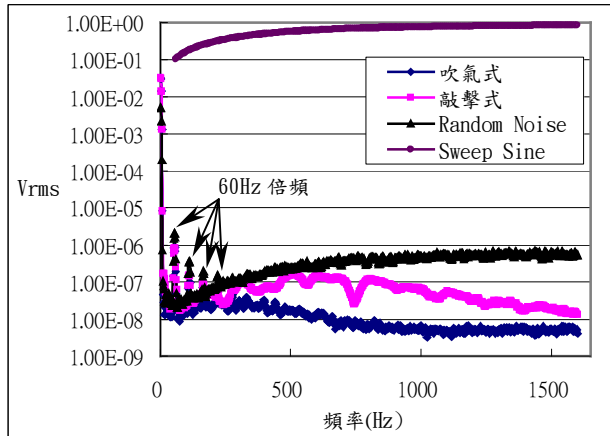


圖 12：各種激振方式振動膜之頻率偏響應圖

除了敲擊式和吹氣式激振方式產生薄膜振動之外，音波也是一種振動。在此將質量量測用振動薄膜與電容式量測器之電極薄膜功能予以分離，如此振動薄膜才不會受到靜電力及空氣阻尼之影響而能夠自由振動，電容式量測器則只用來量測振動薄膜受激振所產生之共振音波，共振音波之頻率會隨著附加被測質量而變化。圖 13 為共振音波電容式質量量測系統之架構圖。

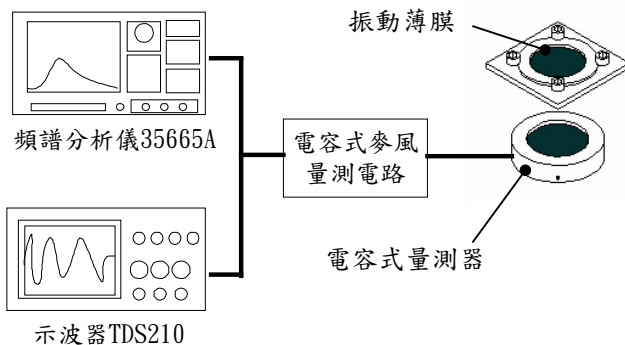


圖 13：共振音波電容式質量量測系統架構

測得結果相似於光學式量測結果，共振偏移現象能夠清楚辨識，其結果分別顯

示於表 3、圖 14 及圖 15 中。

表 3：共振音波電容式基頻量測重現記錄

項目次	1	2	3	4	5	6
基頻值	692	698	696	694	692	690
項目次	7	8	9	10	平均	最大誤差
基頻值	686	688	688	688	691	0.98%

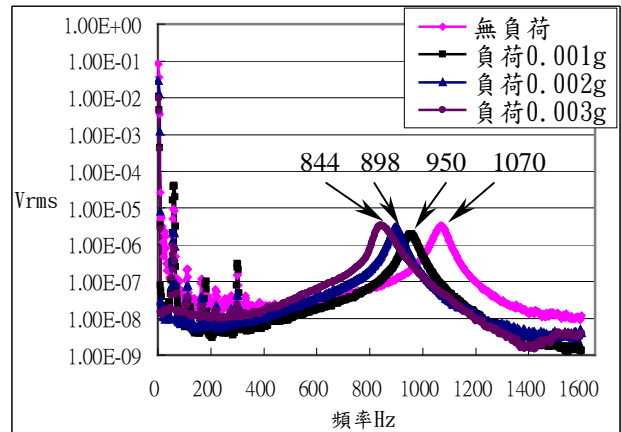


圖 14：透明膜承受不同集中質量後共振音波頻率偏移情形

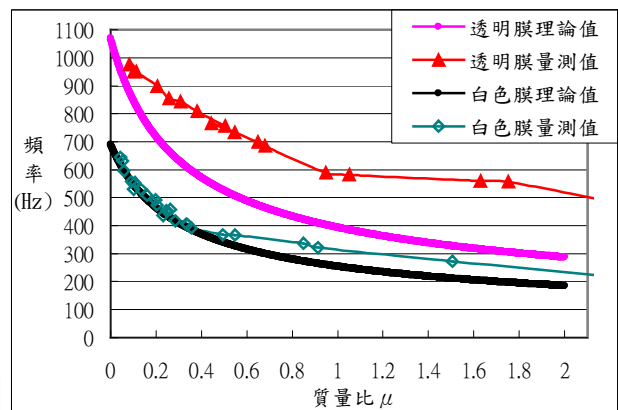


圖 15：共振音波電容式量測振動膜承受集中質量下共振音波頻率對質量比之關係

圖 8 和圖 15 為兩種直徑 32mm 振動膜測得之共振頻率和質量比關係，當附加的集中質量變大時，共振頻率會隨著下降，透明膜量測值比理論值高。圖 15 中在質量小於 0.4 之範圍內，白色膜量測值和理論值十分相符。質量比較大時白色膜或是透明膜測得共振頻率都明顯比理論預估趨勢高，此現象可能是源自於薄膜之漸增式彈

性係數，薄膜變形量大時彈性係數呈非線性增加，所以基頻偏移也有非線性增加現象。以高解析度雷射干涉儀進行共振頻率量測時，激振方式之要求較少，很容易就可以量測到因空氣振動或人聲激振所產生的薄膜振動。但是在共振音波量測方法中則需要足夠激振能量才能使薄膜發出聲音，為了避免其他外來音波干擾，振動膜必須儘可能接近電容式量測器，以利於振動膜基頻之量測。經實驗測試結果證實，以振動量測方式可以準確量測到質量振動系統之共振頻率偏移現象，量測值和理論值有很高的吻合度，質量量測解析度可優於1mg，相對誤差低於1%。

四、計畫成果自評

本研究計畫如原預期規劃，以分析、實驗測試與設計方法完成設計開發出微小質量量測系統。由探討薄板共振頻率與負荷質量之間關係之文獻中，發現兩種專家提出計算公式之差異，我們經由理論推導提出更為精確的估算公式。透過量測系統的開發設計與測試後，亦找出表現相當優異之共振音波電容式振動量測系統；在實際測試部份，也針對光學式、電容式及共振音波電容式等量測方法進行性能測試比較和分析。如預期規劃完成計畫進度，並些微超越原先規劃項目，有助於後續相關之研究進展。

五、參考文獻

1. Raiteri, R., Grattarola, M., Butt, H. J. and Skladal, P., *Micromechanical cantilever-based biosensors*, Sensors and Actuators, B, Vol.79, n 2-3, Oct. 15, 2001, p.115-126
2. Quinn, T.J., *Beam balance as an instrument for very precise weighing*, Measurement Science & Technology, v 3, n 2, Feb., 1992, p. 141-159
3. 施漢謙, *電子秤技術*, 中國計量出版, 1991[民80]
4. Cyril M. Harris, *Shock and vibration handbook*, New York: McGraw-Hill, c1988, p1-16, p. 7-24---35.

5. Sang, J. S. and Hee, J. E., *Small-mass measurement by optical glass-fibre elastic cantilever*, Measurement Science & Technology, v 1, n 7, Jul., 1990, p. 556-560
6. Ramakrishnan, S. and Philip, J., *An optically activated resonant force sensor calibrated as a weighing balance*, Measurement Science & Technology, v 2, n 6, Jun., 1991, p. 549-552
7. Mizuno, T. and Araki, K., *Application of active vibration control techniques to mass measurement*, IEEE Conference on Control Applications - Proceedings, v 1, 1998, p. 609-613
8. Suzuki, T., *Development of mass measurement system under randomly vibrating circumstances*, IEICE Transactions on Electronics, v E84-C, n 4, April, 2001, p.475-477
9. Rayleigh, J. W. S., *The theory of sound*, New York : Dover publications, 1945.
10. Roberson, R.E., *Vibrations of a Clamped Circular Plate Carrying Concentrated Mass*, J.Appl.Mech.18, 1951, p.349-352.
11. 廖啟男, *微小質量量測系統之設計開發與特性分析*, 國立台灣大學機械工程學研究所碩士論文, 2003.

可供推廣之研發成果資料表

可申請專利

可技術移轉

日期：92年9月8日

國科會補助計畫	計畫名稱：微小質量動態量測系統之設計開發 計畫主持人：黃光裕 計畫編號：NSC91-2212-E-002-081- 學門領域：生產自動化
技術/創作名稱	微小質量動態量測系統
發明人/創作人	黃光裕
技術說明	中文： 本技術採用電容式量測原理作為質量量測系統之基本作用原理。以電容薄膜電極作為質量負載台，量測時受質量負載的薄膜以各種激振方式產生振動。薄膜在自由振動情形下，以電容式量測器量測分析質量改變下之頻率響應變化情形，量測器可以準確測得因質量負載改變所產生之振動薄膜共振音波變化，並且不易受到激振方式之干擾。 英文： In this technology, the capacitive measuring method was applied as the basic principle of the micro-mass measuring system. A mass-loading diaphragm is used as one of the capacitive electrodes. By applying the free vibration method, the capacitive sensor is used to study the frequency responses of the diaphragm according to the variation of mass. The capacitive sensor can accurately measure the variation of the resonant frequency induced by mass loading without interference from excitation.
可利用之產業 及 可開發之產品	1. 鍍膜製程產業， 2. 微小質量量測系統， 3. 落塵監控。
技術特點	1. 動態質量量測， 2. 以頻率為量測對象， 3. 不受小振動干擾， 4. 共振頻率偏移對微小質量變化反應靈敏。
推廣及運用的價值	1. 可量測微小的質量， 2. 可在振動干擾的環境下操作。

※ 1. 每項研發成果請填寫一式二份，一份隨成果報告送繳本會，一份送 貴單位研發成果推廣單位（如技術移轉中心）。

※ 2. 本項研發成果若尚未申請專利，請勿揭露可申請專利之主要內容。

※ 3. 本表若不敷使用，請自行影印使用。