

電流變液阻尼器之半主動控制系統之研究

中 華 民 國 91 年 9 月 30 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

電流變液阻尼器之半主動控制系統之研究

Study on the Semi-Active Control System Using Electrorheological Damper

計畫編號：NSC 90-2212-E-002-176

執行期限：90 年 8 月 1 日至 91 年 7 月 31 日

主持人：陳義男 教授 台灣大學工程科學及海洋工程研究所

共同主持人：吳聰能 副教授 台灣大學工程科學及海洋工程研究所

一、中文摘要

本文使用流道串聯多極板之電流變液阻尼器進行振動系統的半主動控制研究。設計及製作一流道串聯多極板之電流變液阻尼器，並裝置二自由度振動系統，使用液壓伺服動態測試機驅動振動系統，輸入正弦波的振動，並以半主動控制方法進行減振控制研究。

研究結果顯示，使用流道串聯多極板之電流變液阻尼器可獲得良好的減振效果，而應用比例控制器的半主動控制也顯示，在不同頻率及振幅的振動下，均可快速達到穩定的效果。

關鍵詞：電流變液、阻尼器、振動系統、半主動控制

Abstract

This article is about the study on the semi-active control of vibration system using serial multielectrode electrorheological (SMER) damper. In the vibration damping study, a SMER damper was designed and manufactured, vibration system of two-degree-of-freedom was installed, then the vibration system was driven by a hydraulic servodynamic tester, vibration was input in the form of sine wave, and finally the vibration system was dampened by semi-active control. The results show that, the passive control enabled by a SMER damper produces a good vibration damping effect, whereas the semi-active control that involves using a proportional controller swiftly stabilizes the vibration system at different frequencies and amplitudes.

Keywords : Electrorheological Fluid, Damper, Semi-Active Control, Vibration

二、緣由與目的

電流變液(Electro-Rheological Fluids)是一種智慧型的流體，它是由易極化微米(μm)粉末顆粒及絕緣液體所均勻混合而成的流體。施加電場後，液體的黏度及降服應力會隨電場強度增加而變大，甚至變成塑性體，其反應時間約千分之一秒。在電場去除後，又可迅速恢復原來的液體狀態。由於控制容易、反應快、裝置簡單、應用範圍非常廣泛，因此在工業上的應用，極具開發潛力[1]。從 40 年代 Winslow 發現以來，引起世界各國無數學者及工業界注目，而相繼投入研究，並獲得許多具體的研究成果，如離合器、油封、軸承、夾頭、液壓控制閥、機電耦合器及減振系統的阻尼器等[2]。雖然電流變液的實用性仍有待改善，尤其是沈澱問題。但從各種應用研究顯示，電流變液避震器或阻尼器等減振裝置有較佳的效果。

由於電流變液阻尼器是一種可控制阻尼力的裝置，除了可作被動式的控制之外，亦可使用控制器作為半主動控制。例如 Wong 等(1993) [3]以流動模式並聯多極板電流變液阻尼器及使用多種控制方法，結果顯示對乘坐舒適性有顯著效益。Weyenberg 等(1996) [4]應用在汽車半主動懸吊系統，使用修正天鉤法(Modified Sky-hook Algorithm)的控制方式，以加速度計及位移感測器直接裝置在汽車上量測汽車的上下起伏(Heave)、前後簸動(Pitch)、左右晃動(Roll)的回饋信號，實驗顯示對乘坐舒適性及車子的操控性有所改善。Suh 等(1999) [5]使用天鉤控制法則(Skyhook Control Algorithm)之控制器，當車身垂直速度與車身和輪子垂直速度差的乘積大於 0，則產生高阻尼力；反之，其乘積小於 0，則阻尼器阻尼力最小，從模擬顯示，可改善乘坐的舒適性。

以上研究都是以模擬或直接裝置在汽車上測試。本計畫之研究目的在建立一 1/4 車輛模式懸吊裝置的振動系統直接在實驗室測試，並以比例控制探討半主動控制的減振效果。

三、電流變阻尼器的特性

阻尼器是抑制振動系統振動的主要裝置，而電流變液阻尼器的阻尼力主要由活塞上部的伸張室及下部的壓縮室之間的壓降 ΔP 及小部分的摩擦阻力 f 所產生的，即 $F = A(\Delta P) + f$ ， A 為活塞承受壓力的截面積，而壓降 ΔP 是由流經環管狀間隙的壓降 ΔP_v 及電流變效應產生的壓降 ΔP_e 所合成的，由簡化的式子(1)式來表示[6]：

$$\Delta P = \Delta P_v + \Delta P_e = \left(\frac{12\mu L}{h^3}\right)Q + \left(\frac{2L}{h}\right)\tau_y \quad (1)$$

為了提高電流變效應的可控制範圍，可從增加電極長度 L ，或減小電極間隙 h 來達成。但減小 h 時，將使 ΔP_v 的增加量遠大於 ΔP_e 的增加量，而使電流變效應的控制範圍相對變小。但電極長度 L 過長，會有使用上空間的限制，故採用多極板電流變阻尼器。多極板的壓降可用下式表示[7]：

$$\Delta P = 12\mu L \left(\frac{1}{\pi d_1 h^3} + \frac{1}{\pi d_2 h^3} + \dots + \frac{1}{\pi d_n h^3} \right) Q + \frac{2nL}{h} \tau_y \quad (2)$$

一般汽車懸吊系統是一種二自由度的振動系統，其使用的阻尼器特性在壓縮行程的阻尼力通常遠小於伸張行程的阻尼力，只要在活塞上設計一單向閥，控制單向閥口的大小即可改變其比值，其比值約為1/3。

一般電流變液阻尼器，在拉伸行程施加電場，增加阻尼力；在壓縮行程不加電場，使阻尼力最小。而單向閥的設計，可使控制器減少這一控制需求。三層串聯電流變液阻尼器如圖1。

電流變液阻尼器的性能通常以阻尼力-位移及阻尼力-速度圖來表示，阻尼器的性能使用液壓動態測試機來測試。圖2為實際測得三層電極串聯的阻尼力-速度(F-V)性能圖。

四、振動系統的模式及半主動控制

振動系統的減振控制，使用可控制多極板串聯電流變液阻尼器，依振動狀況，對電流變液阻尼器施加不同的電場，改變阻尼係數，以適應不同的振動狀況減振的需求。從阻尼器被動式控制抑制振動的特性，依載重

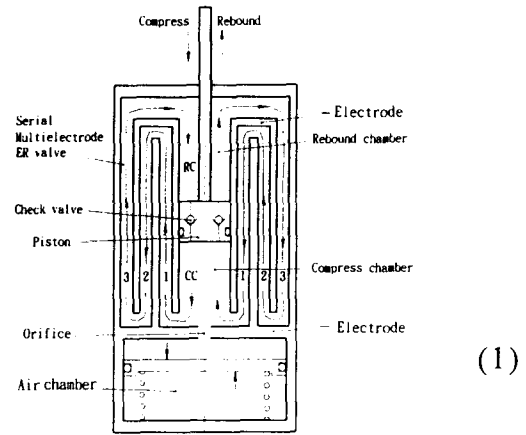


圖 1 三層電極串聯電流變液阻尼器

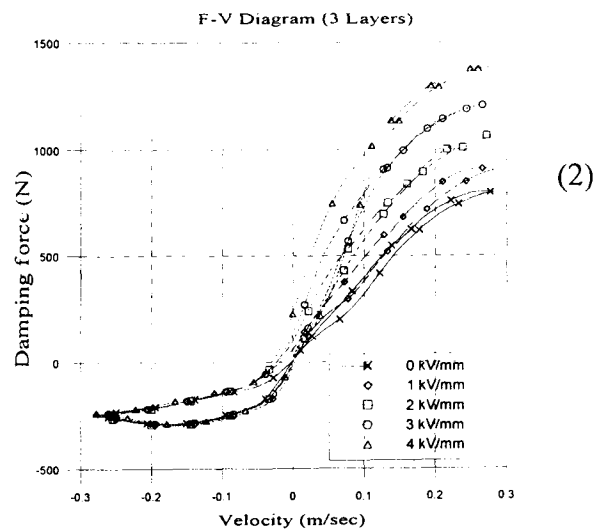


圖 2 三層電極串聯電流變液阻尼器性能測試圖 (3Hz, F-V 圖)

m_2 位移與速度的變化，感測回饋訊號，設計控制器，決定振動系統所需的阻尼係數，使載重在各種振動情況下，均能迅速恢復平穩的狀態。首先依振動系統架構，建立數學模式，使用 Simulink 模擬振動系統選擇適當的載重與彈簧係數。

本研究使用二自由度的振動系統如圖3，其中忽略 m_1 下之彈性係數。首先以被動式控制瞭解振動系統減振的特性，再設計一控制器，以半主動控制方式進行減振控制的實驗，使系統更容易達到控制減振的效果。

以圖3振動系統架構建立數學模式，此系統是二自由度的振動系統，忽略基座下的勁度及阻尼。在基座上承受一正弦波運動的外力，其運動方程式為：

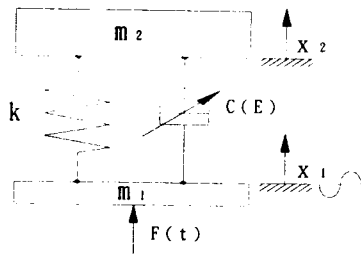


圖 3 振動系統圖

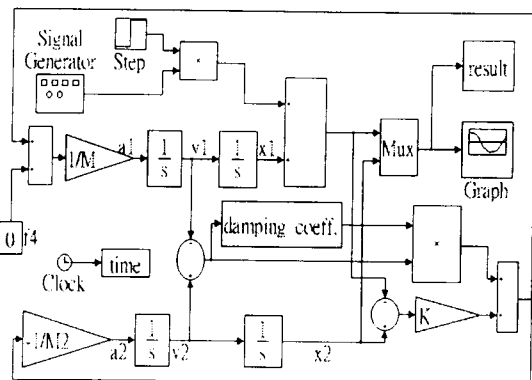


圖 4 振動系統的 Simulink 模擬圖

$$m_1 \ddot{x}_1 = k(x_2 - x_1) + C(E)(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + F(t) \quad (3)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 = -k(x_2 - x_1) - C(E)(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \quad (4)$$

由 (3) 及 (4) 式使用 Simulink 建立模擬方塊圖，如圖 4。三層電極串聯電流變液阻尼器之阻尼係數在電場 $E = 0 \text{ kV/mm}$ 時， $C = 2834.7 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ ，在電場 $E = 4 \text{ kV/mm}$ ， $C = 4898.5 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ 。模擬系統的數如下： $m_1 = 10000 \text{ kg}$ ， $m_2 = 156 \text{ kg}$ ， $k = 70 \text{ kN/m}$ 。基座 m_1 負載，即為液壓伺服系統液壓缸的驅動力。模擬結果：未施加電場 $E = 0 \text{ kV/mm}$ 時， m_1 及 m_2 之振幅變化圖，如圖 5；施加電場 $E = 4 \text{ kV/mm}$ 時，如圖 6，從 m_2 之振幅顯示有良好的減振效果。壓縮行程 m_2 的振幅較大，是因為阻尼器在壓縮行程阻尼力遠小於伸張行程的阻尼力，使車輛懸吊系統在壓縮行程時有較柔軟及較舒適的乘坐感較舒適。

一般電流變液阻尼器，電場強度大約在 $1.5 \sim 4 \text{ kV/mm}$ 時，其阻尼效果較顯著。因電場強度太高電極會穿擊，而在 1.5 kV/mm 以下電流變效應低，阻尼力不高。實驗時，以 m_2 的速度 (v_2) 做為回饋，並以比例式控制電場強度。即 $E = k_v v_2$ ， k_v 為速度比例控制電場的增益值。實驗使用 LabVIEW 來擷取資料及控制，受測系統以載重塊質量 $m_2 = 156 \text{ kg}$ 模擬振動系統的載重，阻尼器使用三層電極串聯電流變液阻尼器，彈簧之彈簧係數 $35000 \text{ N/m} \times 2$

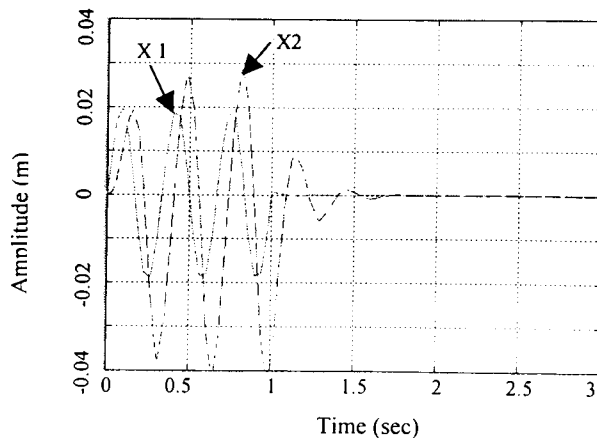


圖 5 電場 $E = 0 \text{ kV/mm}$ ， m_1 及 m_2 之振幅

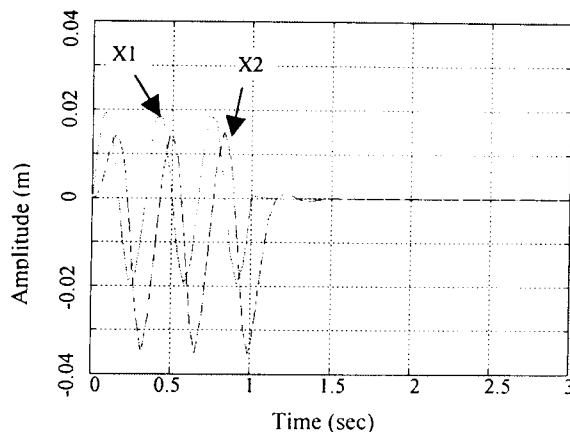


圖 6 電場 $E = 4 \text{ kV/mm}$ ， m_1 及 m_2 之振幅

支。由電腦模擬振動系統承受不同的振動狀況，以速度計量測載重的速度，經控制器隨不同的振動狀況來改變阻尼器的阻尼特性，以達迅速振至平穩的狀態。

由被動式控制測試的結果，設計一簡單的比例控制器，其控制曲線如圖 7，* 為測試值。速度與電場的比例增益 $k_v = 0.4$ ，在 $E > 4 \text{ kV/mm}$ 以上，因電極會穿擊，故電場只能限制在 4 kV/mm 以內，而電場在 1.3 kV/mm 以下時，電流變效應較低，對減振控制影響不大。

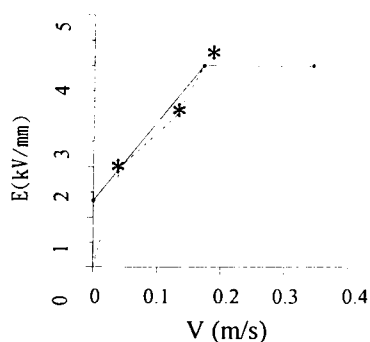


圖 7 控制曲線圖

圖 8 為振動系統的半主動控制示意圖，其控制法則使用圖 7 之控制曲線。圖 9 及圖 10 為不同驅動頻率及振幅下之實驗結果，顯示在驅動停止後，載種之振動能更快地衰減而達到平穩狀態。

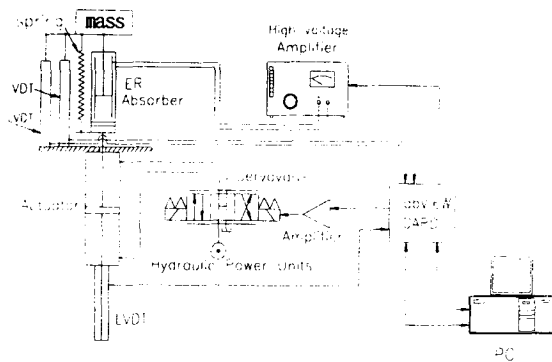


圖 8 振動系統的半主動控制圖

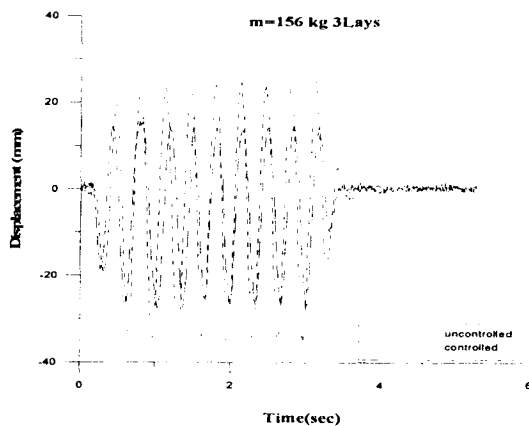


圖 9 驅動頻率 3Hz，振幅± 12mm 有控制及無控制 m_2 振幅的比較圖

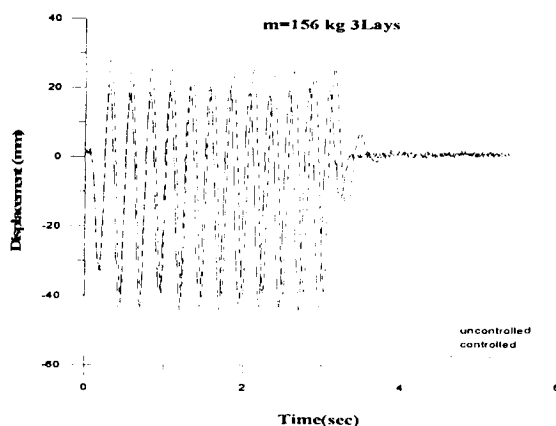


圖 10 驅動頻率 4Hz，振幅± 23mm 控制及無控制 m_2 振幅的比較圖

五、結論

本文使用多極板串聯電流變液阻尼器探討振動系統的半主動減振控制，由計算機模擬與實驗結果獲得以下結論：

1. 多極板串聯電流變液阻尼器之活塞上有單向閥的設計，可使半主動控制的控制器設計更為簡單。
2. 三層電極板串聯之電流變液阻尼器應用於振動系統的減振控制，顯示有良好的減振效果。
3. 根據被動式減振測試結果來設計半主動控制器，在不同振動狀況下，可達到快速穩定的控制效果。

六、參考文獻

- [1] Block, H. and Kelly, J.P., 1988, "Electrorheology", J. Phys. D: Appl. Phys. 21, pp1661-1677.
- [2] Weiss, K.D., Carlson, J.D. and Coulter, J.P., 1993, "Material Aspects of Electrorheological Systems", J. of Int. Material Systems and Structures Vol.4, pp13-34.
- [3] Wong, J.Y., Wu, X.M., Sturk, M. and Bortolotto, C., 1993, "On the Application of ER Fluid to the Development of Semi-active Suspension Systems for Ground Vehicles", Transactions of the CSME, Vol.17, No.4B, pp789-800.
- [4] Weyenberg, T.R., Piale, J.W. and Petek, N.K., 1996, "The Development of ER Fluids for an Automotive Semi-active Suspension System", International J. of Modern Physics B, Vol.10, Nos.23 & 24, pp3201-3209.
- [5] Suh, M.S. and Yeo, M.S., 1999, "Development of Semi-active Suspension Systems Using ER Fluids for the Wheeled Vehicle", J. of Intelligent Material Systems and Structures, Vol.10, pp743-747.
- [6] Wolff-Jesse, C., and Fees, G., 1998, "Examination of Flow Behaviour of ERF in the Flow Mode", Proc. Instn. Mech. Engrs. Vol.212, Part I, 1998, pp159-173. (IFAS Aachen, Germany)
- [7] Cheng, Y.N., Wu, T.N., Guo, J.H., Kuo, W.H., 2001, "Study on the Shock Absorber Using Multielectrode Electrorheological Valve", Chinese Journal of Chemical Physics, Vol.14, No.5, pp633-636, (in Chinese).