

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

電流變液壓避震器之研究

Study on the Electrorheological Fluid Shock Absorber

計畫編號：NSC 89-2212-E-002-113

執行期限：89 年 8 月 1 日至 90 年 7 月 31 日

主持人：陳義男 教授 台灣大學造船及海洋工程研究所

共同主持人：吳聰能 副教授 台灣大學造船及海洋工程研究所

一. 中文摘要

本研究使用電流變液來替代傳統避震器之液壓油作為電流變避震器之研究，由傳統避震器設計成流動式及混合式電流變避震器，來探討電流變避震器的性能。首先推導其運動方程式及理論模型，進行避震器的模擬。在不同電場下，模擬避震器的阻尼力，並使用電液伺服動態測試系統進行測試。模擬和實驗值比較後，顯示其結果相當吻合，可作為電流變液避震器設計分析的參考。
關鍵詞：電流變液、流動式、混合式、阻尼器、避震器

Abstract

This paper focuses on the study of the performance analysis of a prototype shock absorber by using electrorheological fluid. We design a flow-mode electrorheological shock absorber and a mixed-mode electrorheological shock absorber. After deriving the governing equation of motion of these two shock absorbers and the theoretical model, we simulated the damping force of the absorbers under different electric field strength conditions, and used an electrical hydraulic servo dynamic testing system to test them. The results from the computer simulation and the experiment meet well.

Keywords: electrorheological fluid, flow-mode, mixed-mode, damper, shock absorber

二. 計劃緣由與目的

電流變液 (Electro-Rheological Fluid), 簡稱 ER 流體(ERF)。透過外加電場的作用，使電流變液可在毫秒之

內由液體變成塑性體，而且完全可逆，並具有抗剪切強度。電流變液的特點為反應快、可逆性、控制容易、裝置簡單、應用方便。可與微機械結合，而且能耗極小。是具有發展前景和工程應用價值的「智慧材料」，所以被稱為下一代機械的革新技術。

電流變液可透過機電耦合的方法，將其應用在避震器的改善上。傳統的避震器是一具易漏的油缸，液壓油經過外力壓縮之後，將油以高速從一油室節流孔擠壓到另一油室，利用油通過節流口的阻尼力轉換成熱能，將外力的衝撞以熱能的方式消耗掉。一般避震器的阻尼係數僅能由節流口改變，若要在避震器產生不同的阻尼係數，就必須經過非常特殊的設計。電流變液避震器的特殊之處，在於可透過外加電場的方法進行對阻尼力及阻尼係數的無段調整控制，而且構造不複雜，如果使用適當的控制器，可以進行半主動式的減振控制，其未來的發展指日可待。

本計畫研究的目的是在探討電流變避震器的性能，及用來替代傳統避震器的可行性分析，並作為設計電流變避震器的參考。

三. 電流變液的特性

電流變液在未受電場的作用下，會呈現牛頓流體的力學特性，如圖 1 之 A 曲線。受到電場之後，其力學特性可用類似賓漢塑性體來描述，如圖 1 之 B 曲線。

$$\tau = \tau_y + h \dot{\gamma}$$

其中 τ 為塑性體的剪應力， τ_y 為賓漢降伏應力， h 為賓漢黏性係數， $\dot{\gamma}$ 為剪應變率，但實際電流變液的力學特性與理想賓漢塑性體有些不同。電流變液受電場

作用在剪應變率變大時，其剪應力會先微降，再成比例上升，但到一定的應變率時則剪應力微降而不成比例上升，如C曲線。

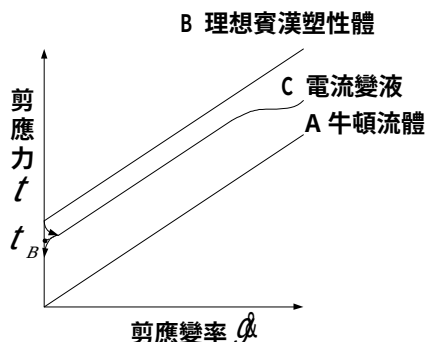


圖 1 電流變液力學特性示意圖

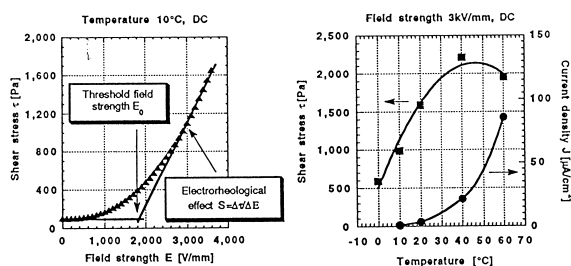


圖 2 拜耳電流變液之電場強度－降伏剪應力曲線

電流變液的剪切降伏應力(τ_y)與電場強度(E)有下式之關係：

$$\hat{\sigma}_y(E) = \hat{a} E^{\hat{a}}$$

其中 $\hat{a}$ ， $\hat{a}$ ：為常數，與電流變液材料有關；電場強度 $E = V/h_e$ ； V ：電壓； h_e ：電極間隙。

本研究使用德國拜耳 RHEOBAY TP AI 3565 之電流變液作實驗，其特性圖如圖 2。

四. 電流變液阻尼器設計與模擬

應用電流變液來設計避震器有多種設計方法，大致上可分為流動式(flow mode)、剪切式(shear mode)及混合式(mixed mode)。流動式的兩電極板均固定不動，流體在軸向壓力下流動。剪切式為兩電極板之一為固定，另一極板做相對的平行運動，而混合式為流動式及剪切式所合成的。本研究設計有流動式及混合式電流變避震器如圖 3 及圖 4 所示。

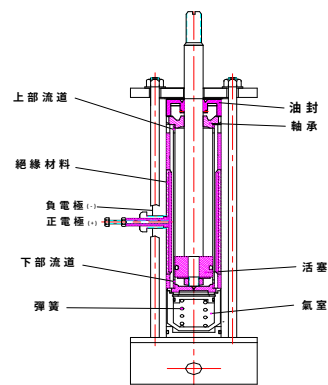


圖 3 流動式電流變避震器

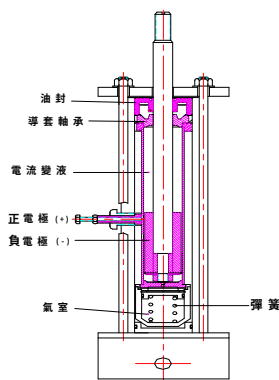


圖 4 混合式電流變避震器

(a) 流動式電流變避震器力學分析

由於避震器實際應用上的運動速度並不快，故流動式電流變避震器之電流變液體的流動，可視為一種圓形環管內的穩定層流，即所謂的普修業流(Poiseuille flow)，並由運動力學的分析如下：(如圖 5)

活塞運動的阻尼力是由(1)活塞加速度($\ddot{y}$)的慣性力，(2)流體的黏性(η)、阻尼口(A_d)及電流變效應(t_v)產生的壓降(ΔP_e)的阻尼力及(3)摩擦力(F_f)等所合成的，即總阻尼力

$$F = m \ddot{y} + (A_{rod} P_c - A \Delta P_e) + F_f$$

括弧中，若活塞拉伸時為-，壓縮時為+，其中：

$$P_c = k \left(\frac{x_0}{A_d} + \frac{A_{rod}(y - y_0)}{A_d^2} \right) + \frac{P_i V_i^0}{[V_i - (y - y_0)(A_{rod})]^0} + \frac{r Q_a^2}{2 C_d^2 A_d^2}$$

$$\Delta P_e = 2 \left(\frac{L_e}{h_e} \right) t_y + 12 \frac{m_e L_e Q_e}{\rho d_e h_e^3} + \frac{r Q_e^2}{2 C_d^2 A_s^2}$$

$$F_f = F_{fp} + F_{fs}$$

壓縮室壓力 P 是與壓縮室彈簧常數 k ，氣室初始壓力 P_i ，及進入氣室的阻尼口 A_d 有關。 F_{fp} 為活塞密封環與筒壁摩擦力， F_{fs} 為活塞桿與其密封環之摩擦力，可由實驗測量之。

(b) 混合式電流變避震器力學分析

混合式電流變避震器之活塞與缸壁間流體的流動可視為一種穩定層流的柯綆流(Couette flow)，如圖 6。活塞運動的阻尼力是由(1)活塞加速度($\ddot{y}$)的慣性力，(2)流體的黏性(m_e)、活塞的運動速度($\dot{y}$)及電流變效應(t_e)等所產生壓降(ΔP_e)的阻尼力及(3)摩擦力(F_f)所合成的，即總阻尼力

$$F = m\ddot{y}(A_{rod}P_c - A\Delta P_e) + F_{fs};$$

括弧中，若活塞拉伸時為-，壓縮時為+，其中：

$$\Delta P_e = \left(\frac{Q_e}{\rho d_e}\right) \frac{12m_e L_e}{h_e^3} - \left(\frac{\eta h_e}{2}\right) \frac{12m_e L_e}{h_e^3} + 2 \frac{L_e}{h_e} t_y$$

$P = k \left(\frac{x_0}{A_{rod}} + \frac{A_{rod}(\gamma - \gamma_0)}{A} \right) + \frac{PV_0^2}{A} + \frac{rQ_0^2}{A^2}$
 活塞運動時，活塞桿與其密封環之間的摩擦力 F_{fs} 可從實驗獲得。

將活塞運動的阻尼力化為位置(y)、速度($\dot{y}$)及電場強度(E)三個變數的函數，即可進行電腦模擬計算分析。

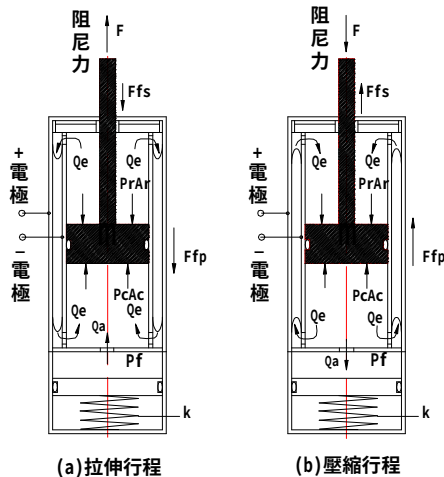


圖 5 流動式活塞運動受力示意圖

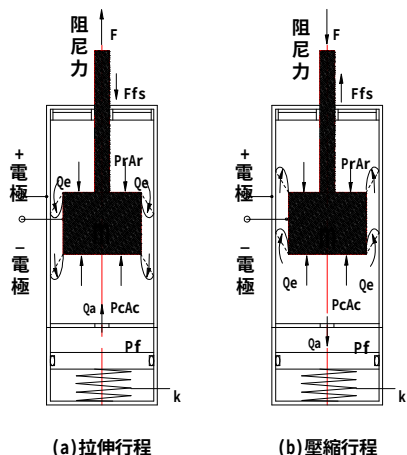


圖 6 混合式活塞運動受力示意圖

五. 實驗與分析

本實驗裝置如圖 7，此系統由四大單元所構成：

(1) 性能測試機，(2) 控制單元，(3) 油壓動力單元，(4) 高電壓電源供應器。

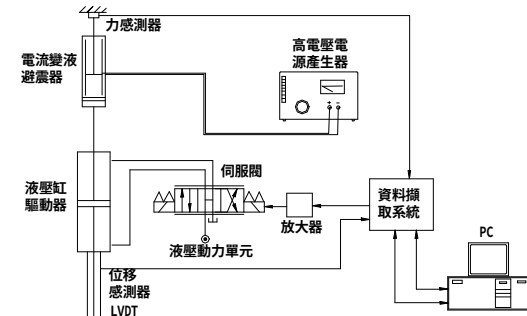


圖 7 實驗設備裝置圖

圖 8 與圖 9 為流動式電流變避震器在頻率 $f=2\text{Hz}$ (0.1m/sec)，電場強度 $E=0\text{kV/mm}$ 及 $E=2\text{kV/mm}$ 之 F-D 與 F-V 模擬與實驗比較圖；圖 10 與圖 11 為混合式電流變避震器在頻率 $f=2\text{Hz}$ ，電場強度 $E=0\text{kV/mm}$ 及 $E=2\text{kV/mm}$ 之 F-D 與 F-V 模擬與實驗比較圖。從電腦模擬與實驗結果之比較圖顯示，兩者所得結果是一致的。使用電流變液作為避震器阻尼力的控制，有顯著的效果。混合式電流變避震器在拉伸行程零電場時，阻尼力為 7kgf ；在 2kV/mm 時，阻尼力為 14kgf ，增加約 2 倍，而壓縮行程由 8kgf 到 16kgf 約增加 2 倍。流動式電流變避震器在拉伸行程零電場時，阻尼力為 10kgf ；在 2kV/mm 時，阻尼力為 18kgf ，增加約 1.8 倍，而壓縮行程由 18kgf 到 28kgf 約增加 1.6 倍。混合式電極長度 L_e 為 5cm ，流動式電極長度為 8cm ，混合式較流動式的電極長度短，但混合式電流變效應有 2 倍，流動式為 1.6~1.8 倍，顯然混合式較流動式的電流變效應高。

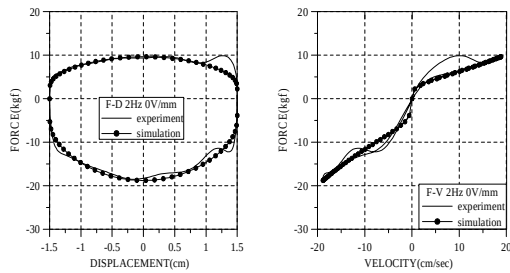


圖 8 流動式電流變避震器頻率 $f=2\text{Hz}$ ，電場強度 $E=0\text{kV/mm}$ ，F-D 及 F-V 模擬與實驗比較圖

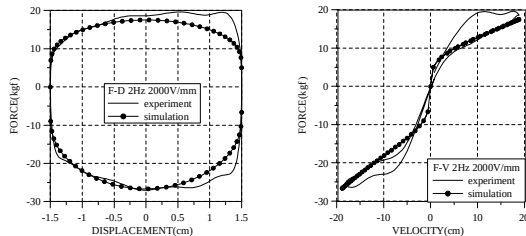


圖 9 流動式電流變避震器頻率 $f=2\text{Hz}$ ，電場強度 $E=2\text{kV/mm}$ ，F-D 及 F-V 模擬與實驗比較圖

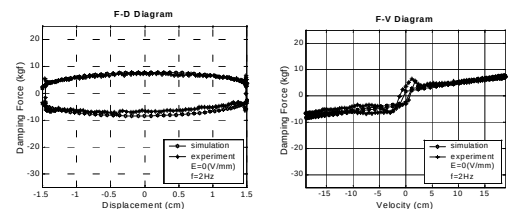


圖 10 混合式電流變避震器圖頻率 $f=2\text{Hz}$ ，電場強度 $E=0\text{kV/mm}$ ，F-D 及 F-V 模擬與實驗比較圖

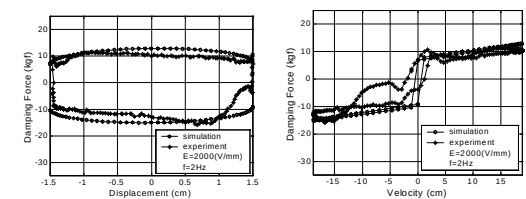


圖 11 混合式電流變避震器圖頻率 $f=2\text{Hz}$ ，電場強度 $E=2\text{kV/mm}$ ，F-D 及 F-V 模擬與實驗比較圖

六. 結論

1. 經電腦模擬與實驗測試比較，證明本研究推導的數學模型可描述電流變液阻尼器的性能，可作為設計電流變避震器的參考。
2. 從電腦模擬與實驗圖形綜合比較，電場強度增加時 F-V 特性曲線的斜率會產生改變，即改變阻尼器阻尼係數，因此可作為一種可變阻尼係

數的避震器，雖然可調控的阻尼力偏低，可使用較高電流變效應的電流變液。

3. 混合式電流變避震器的電流變效應較流動式電流變避震器大，但實用上，流動式電流變避震器較容易設計。

參考文獻

1. Stangroom, J.E., "Electrorheological Fluids", Phys. Chnol., Vol.14, 1983, pp290-296.
2. Tao, R., and Sun, J.M. "Effective Viscosity of an Electrorheological Fluid", Journal of Intelligent Material Systems and structures", Vol.7, Sep, 1996; pp555-559.
3. Bayer-Silicone, "Provisional Product Information RHEOBAY TP AI3565 and RHEOBAY TP AI3566", 1998, pp6.
4. Petek, N.K., "An electrologically controlled shock absorber using electrorheological fluid", SEA 920275, 1992.
5. Oyadiji, S.O., Mistry, D., "Non-linear dynamic properties of an electrorheological fluid-filled Shock Absorber", The 6th Int. Conf. On ERF/MRS and Their Applications, Yonezawa, Japan, 1997.
6. 陳義男, 吳聰能, 郭文化, 黃照傑, **流動式電流變液阻尼器設計與性能分析**, 中國機械工程學會, 第十七屆全國學術研討會論文集, Vol.2, 2000, pp169-176.
7. 陳義男, 郭振華, 郭文化, 曾敦彥, **剪切式電流變液阻尼器設計與性能分析**, 中國機械工程學會, 第十七屆全國學術研討會論文集, Vol.2, 2000, pp161-168.