

41. 智慧型磁流變液避震器之研製

郭文化教授、王亞平 副教授、林永建講師
 東南科技大學 機電科技學系
 韓麗龍 副教授、陳信合 台北科技大學製造科技研究所

摘要

磁流變液是一種新型的智能材料，而磁流變液避震器是磁流變液應用新型的減震裝置。磁流變液主要由載液、磁性微粒及界面活性劑所組成，當外加磁場時，磁流變液產生明顯的磁流變效應，在毫秒時間內由流動性良好的Newton流體變成Bingham流體，而這種變化是連續、迅速、可逆，容易控制。從1960年代發展至今也廣泛的應用在工業。磁流變液阻尼器是一種理想的半主動控制裝置，即使當阻尼力在調節過程中發生故障，磁流變液阻尼器仍然能以被動式的方式使用。

本論文探討磁流變液避震器之特性。先以 Magneto V64 電磁場分析軟體，對避震器線圈進行磁路及磁場強度分析，探討磁場對磁流變液的剪應力效應，建立磁流變液避震器的數學模式，並以MATLAB進行數值模擬得到其阻尼力的特性。磁流變液以LORD公司製作之MRF-132DG磁流變液進行實驗，驗證得知在電流0.1~0.4 安培時，隨著電流增加而增強阻尼力，可達到一般車輛用避震器可控制之阻尼力，由模擬和實驗得到驗證磁流變液避震器可控制的最佳效果。

一、前言

磁流變液是一種可控流體，它在磁場作用可以在短時間內由牛頓流體（Newtonian fluid）變為賓漢流體（Bingham fluid）[1]，這種變化迅速、可逆、連續與易控制的。當對磁流變液外加磁場時，微細的磁性顆粒會在與磁場平行的方向產生鏈狀結構或進而形成柱狀結構，在此類似柵欄效應的影響下，使的原本可自由流動且無固定形狀的磁流變液產生類似於固化的相變化而改變本身的剛性及阻尼特性；當外加磁場移除時，此鏈狀結構會立即消失，磁流變液又變回可任意流動的流體狀態。

有關磁流變液的研究，最早在1948年Rabinow發現磁流變液現象[4,5]，並在1951年申請了美國專利。目前世界各國對磁流變液及其應用相關研究，可由每二年舉辦一次的電/磁流變液的國際會議[2]及中國大陸每2-3年也舉辦一次全國性會議[3]中，顯示各國研究單位的重視。磁流變液相較於電流變液研究的發展迅速，國外已經進入到商業化的產品。

二、磁流變液特性

磁流變液為微米磁性顆粒、非磁性載液與表面活性劑三種材料組成。磁流變液在磁場作用下，由液體瞬間變為固體，且具有極高的降伏剪應力；無磁場作用時，瞬間變為流動性液體，因此磁流變液具有瞬間液體

-固體轉換的性質。如圖1 在無磁場時，磁流變液的微米顆粒均勻散佈在載液中。當極板施加磁場後，微米顆粒瞬間成鏈狀排列，如圖2。當極板施加外力時，鏈狀排列的顆粒產生剪應力。若外力小於磁流變液降伏剪應力，如圖3的狀態，若外力大於磁流變液降伏剪應力，則鏈狀排列的顆粒被剪斷，如圖4的狀態。圖5為Lord公司製造的MRF-132DG磁流變液在無磁場及磁場下的狀態。

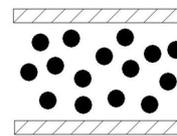


圖1 無磁場作用下的磁流變液

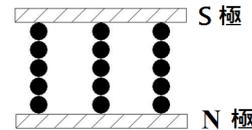


圖2 外加磁場後的磁流變液

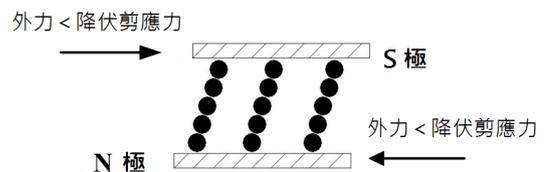


圖3 在磁場作用下承受剪應力磁流變液

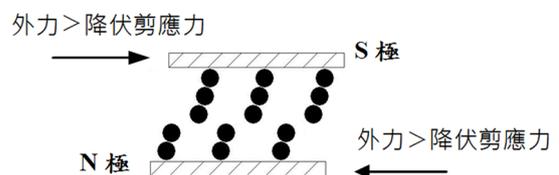


圖4 外力達超過降伏剪應力剪斷後的磁流變液



(a)無磁場下 (b)磁場作用下
 圖5 磁流變液在無磁場及磁場下的狀態

磁流變液的特性在無磁場的作用時，如同一般液體的牛頓流體特性，如圖6所示A直線。若施加磁場後，瞬間變成類似賓漢塑性體的特性，如圖6所示B直線。但實際上，磁流變液經磁化後流動時，如圖6所示E曲線，首先達到靜態降伏點後，會迅速下降一些再沿動態降伏點上升，如圖6所示C至E曲線，當剪應變率達到臨界點時剪應力會隨剪應變率下降，當磁場去除後，沿D曲線回到原點。

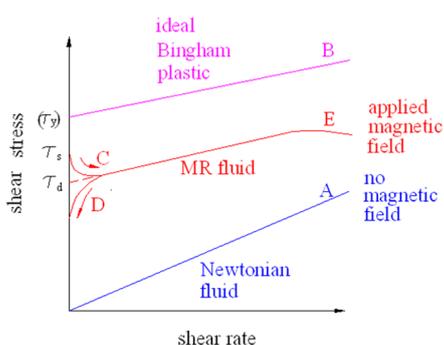


圖6 Bingham塑性流體模型應力-應變關係圖

三、磁流變液避震器

磁流變避震器是利用磁流變效應的特性控制阻尼性能，是一種智能的控制裝置，其結構簡單、響應速度快、動態範圍大。

本研究之磁流變液避震器，其示意圖如圖7所示。圖7(a)為磁流變液避震器拉伸行程示意圖，圖7(b)為磁流變液避震器壓縮行程示意圖。

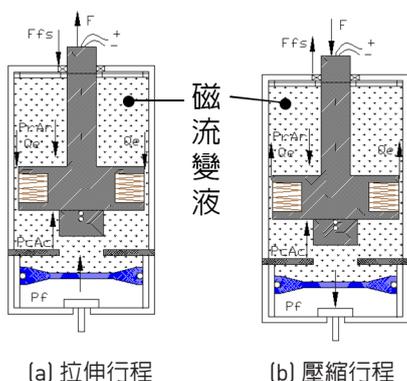


圖7 磁流變液避震器示意圖

2.1 磁流變液避震器的力學模式

為了簡化活塞與外筒間隙的流場性質，磁流變液避震器之活塞與外筒間隙的流場可視為一種Couette-Poiseuille流動模式，Couette-Poiseuille流動模式為Couette與Poiseuille流動模式，兩種流場組合而成。

磁流變液避震器作動時，各部份結構所產生的阻尼力，以數學式表示，可分成(a)慣性力，(b)拉伸室壓力與壓縮室壓力之間的壓降，(c)氣室內的壓降，(d)摩擦力。

(a)慣性力:
 $F_a = m \ddot{y}$

(1)

m =活塞桿及活塞的質量
 \ddot{y} =活塞的運動加速度

(b)拉伸室壓力與壓縮室壓力之間的壓降

零磁場時牛頓流體所產生的壓降
流量與壓降之間的關係為 $\Delta P_v = \left(\frac{Q_m}{\pi d_m} - \frac{\dot{y}h}{2}\right) \frac{12\mu_m}{h^3} l_p$ (2)

活塞與外筒間隙的流量 Q_m ，活塞速度 \dot{y} ，活塞與外筒間隙 h ，活塞與外筒間隙之直徑 d_m ，活塞長度 l_p 。

外加磁場後磁流變液所產生的壓降

當磁流變液流體施加磁場後，流體瞬間由牛頓流體變為賓漢塑性體，增加流體流經活塞與外筒間隙的流動阻力，則壓縮室與伸張室的壓力差變大，其除了降服應力 (τ_y) 成正比外，另外與活塞的長度 (l_p) 成正比，活塞與外筒間隙 (h) 成反比，利用下列數學式表示：

$$\Delta P_{mr} = 2\left(\frac{l_p}{h}\right)\tau_y \quad (3)$$

所以施加磁場以後，流經活塞與外筒間隙包含有牛頓流體及賓漢塑性體的特性，其總壓力降為(2)式和(3)式相加，則磁流變液拉伸室與壓縮室的總壓降可寫成：

$$\Delta P_m = \Delta P_v + \Delta P_{mr} = C_v Q_m + C_m \tau_y \quad (4)$$

$$\Delta P_m = \left(\frac{Q_m}{\pi d_m} - \frac{\dot{y}h}{2}\right) \frac{12\mu_m}{h^3} l_p + 2\left(\frac{l_p}{h}\right)\tau_y \quad (5)$$

$$\Delta P_m = \frac{12\mu_m l_p}{\pi d_m h^3} A_r \dot{y} - \frac{6\mu_m l_p}{h^2} \dot{y} + 2\left(\frac{l_p}{h}\right)\tau_y \quad (6)$$

(c)氣室內的壓降

氣室內空氣的壓力 P_f 利用熱力學公式，則

$$P_f = \frac{P_i (V_i)^\gamma}{[V_i - (y - y_0) A_{rod}]^\gamma} \quad (7)$$

γ ：指數值約1.2， V_f ：受壓力後的體積， P_i ：初使壓力， V_i ：初使體積綜合以上，可得總壓降

$$P_{ch} = P_f = \frac{P_i (V_i)^\gamma}{[V_i - (y - y_0) A_{rod}]^\gamma} \quad (8)$$

(d)摩擦阻力 F_{fs}

活塞運動時，受庫倫摩擦及流體摩擦黏性阻力，可以下式表示 $F_{fs} = f_{fs}(\dot{y})^\phi$ (9)

F_{fs} 為摩擦阻尼力係數， ϕ 為指數(通常小於1)

當活塞桿為拉伸時，拉伸面積 $A_r = A_c - A_{rod}$ ，當活塞桿為壓縮時，壓縮面積為 A_c 。

最後經拉伸行程與壓縮行程的力平衡式，可得阻尼力：

$$F = m\ddot{y} \pm \Delta P A_r \pm P_f A_r + F_{fs} \quad (10)$$

上式第2及3項為正時是拉伸行程阻尼力，為負時是壓縮行程阻尼力

三、磁流變液避震器的磁路分析

磁流變液避震器是在一封閉性的壓缸內裝置一磁流變閥，當磁流變液因活塞運動迫使磁流變液流經磁流變閥的流道時，受到磁場的控制，使流體改變其黏度及降伏應力，使磁流變液流動速度改變，因而改變活塞的阻尼力。因此磁流變液避震器的設計，主要在設計磁流變閥。控制磁流變閥流道的流體主要是磁場，而幾何結構也是影響磁場分佈及大小的重要因素，如圖8磁流變液避震器之磁迴路圖。

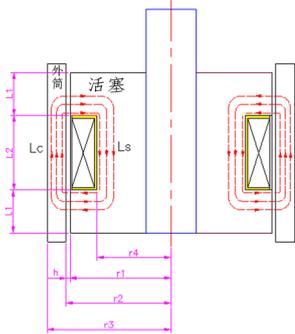


圖8 磁流變液避震器之磁流變閥磁迴路圖

磁流變閥之磁迴路設計程序：[30]

- (1) 由使用裝置的控制系統所需的降服應力 τ_0 決定磁流變液的磁感(magnetic induction) B_f 。
- (2) 從磁流變液的磁感及磁場強度的關係來決定磁流變液的磁場強度 H_f 。
- (3) 由總磁通(magnetic induction flux) $\Phi = B_f A_f$ 求鋼的磁感 B_s ， A_f 為有效的磁通面積

$$B_s = \frac{\Phi}{A_s} = \frac{B_f A_f}{A_s} \quad (11)$$

- (4) 決定鋼的磁場強度。
- (5) 使用磁迴路之Kirchoffs定律，求出所需的安培-匝(amp-turns) NI ， $NI = \sum H_i L_i = H_f g + H_s L$ (12)
 L 為磁極長度 $L = L_s + L_c$ ， g 為間隙總長度，如圖8。

首先以簡化磁路計算，利用磁路歐姆定律分析磁路中磁通量與磁動勢的關係，計算激磁電流與磁路中磁場強度關係的基本公式，是設計磁流變閥的原理和基礎。由圖8磁流變閥之簡化磁迴路圖所示，環形鐵心構成磁路，假設 $B = \mu H$ 橫截面積為 S ，激磁線圈數為 N 匝，激磁電流為 I ，磁路平均長度為 L ，並假設鐵心的磁場是均勻，由安培環路定律 $\oint H dl = \sum IN$ 得到 $HL = IN$ ，即

$$H = \frac{IN}{L} \quad (13)$$

上式中 稱為磁動勢，稱為磁壓降，其物理意義為磁路中磁場強度等於作用在磁路單位長度上的磁動勢。從磁感應強度關係式 $B = \mu H$ 和磁通量公式 $\phi = BS$ ，得到

$$\phi = \mu HS = \mu S \frac{IN}{L} = \frac{IN}{L/\mu S} \quad (14)$$

$$\mu \text{為鐵心的磁導率。假設 } R_m = \frac{1}{\mu S} \quad (15)$$

$$\text{則 } \phi = \frac{IN}{R_m} \quad (16)$$

R_m 為總磁阻，即物質對磁通量通過的阻礙作用。由(15)式得知，磁導率 μ 愈大，磁路橫截面積 S 愈大，磁路

愈短，則總磁阻愈小。

磁流變液避震器之磁流變閥設計，主要決定其幾何尺寸，首先假設下列參數：

- (1)磁流變閥之活塞半徑為 r_1 ，(2)外管內徑為 r_2 ，(3)外管外徑為 r_3 ，(4)線圈內徑為 r_4 ，(5)磁流變閥磁通之間隙，(6)線圈寬度為 L_2 ，(7)在外管的磁極長度為 L_c ，(8)在活塞中的磁極長度為 L_s 。 $l_p = 2L_1 + L_2$ ， $d_m = 2r_1 + h$ 。

由圖8之磁流變閥磁迴路，若忽略漏磁因素的影響，激磁線圈所產生的磁力線是一封閉的迴路，根據封閉磁力線的迴路，可計算出經過氣隙內的磁場強度。

磁迴路中各段的磁阻分別為：

$$(1) \text{中心軸的磁阻為 } R_2 = \frac{L_1 + L_2}{\pi(r_4)^2 \mu} \quad (17)$$

$$(2) \text{軛環磁阻為 } R_1 = \frac{r_1 - r_4 / 2}{\pi(r_1)L_1 \mu} \quad (18)$$

$$(3) \text{間隙}h\text{的磁阻為 } R_0 = \frac{h}{\pi(r_1 + h)L_1 \mu} \quad (19)$$

$$(4) \text{外管磁阻為 } R_3 = \frac{L_1 + L_2}{\pi[(r_3)^2 - (r_1 + h)^2] \mu} \quad (20)$$

$$\text{磁路的總磁阻為 } R_m = 2R_0 + 2R_1 + R_2 + R_3 \quad (21)$$

將磁路總磁阻代入磁路歐姆定律，再以間隙處的磁感應強度公式 $B_0 = \mu_0 \mu_r H$ ，即可進行磁路分析設計。

四、磁流變液避震器的設計製作及實驗

由磁流變液避震器之磁路及阻尼力分析後，設計磁流變液避震器如圖10，並製作磁流變液避震器如圖11，進行測試。圖12為磁流變液避震器之磁流變閥線圈之磁通量(T)與電流(I)之關係實驗特性圖。使用避震器阻尼力特性測試機量測磁流變液避震器之阻尼力(F)與位移(D)之特性圖如圖13，以及阻尼力(F)與速度(V)之特性圖如圖14。測試速度 $V=0.1\text{m/s}$ ，電流改變以 $I=0、0.1、0.4、0.7\text{A}$ (安培)所量測之特性圖。

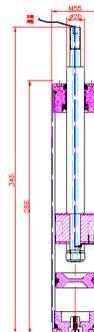


圖10 磁流變液避震器設計圖



圖11 自製之磁流變液避震器

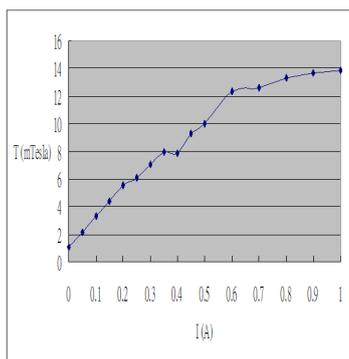


圖12線圈之磁通量(T)與電流(I)之關係圖

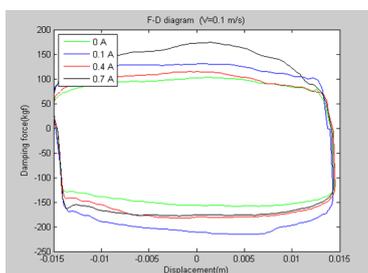


圖13磁流變液避震器阻尼力(F)與位移(D)之特性圖
(V=0.1m/s,電流I=0、0.1、0.4、0.7A 安培)

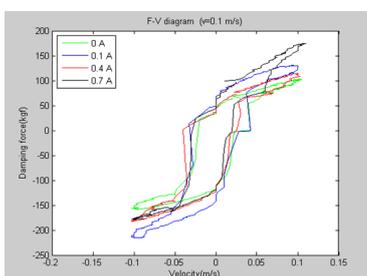


圖14磁流變液避震器阻尼力(F)與速度(V)之特性圖

五、結論

由實驗結果顯示，磁流變液避震器之阻尼力可由改變電流控制磁流變液避震器之阻尼力特性，所需的動力極小，可做半主動控制實驗時，輸入高電流及高速量測之阻尼特性呈現較不穩定，其原因是活塞在外筒內高速運動及高阻尼力時，活塞因懸浮在外筒內呈現不穩定，故阻尼特性亦呈現不穩定現象，因此活塞設計上應考慮支撐點的穩定平衡將可改善。

參考文獻

[1] 周玉豐、陳花玲，「磁流變阻尼器結構改進設計與性能研究」，寧夏工程技術，第4卷，第4期，2005，第325-327頁。
 [2] 電/磁流變液國際會議：http://ic.newmaker.com/art_6311.html。
 [3] 中國電/磁流變液會議：<http://www.cstam.org.cn/index.asp>。
 [4] Rabinow J. “The magnetic fluid clutch,” AIEE

Transactions, 1948, pp. 308-315.
 [5] David Simon, Mehdi Ahmadian, “Vehicle evaluation of the performance of magnetorheological dampers for heavy truck suspensions,” Journal of Vibration and acoustics, USA, 1998, pp.365-375 °
 [6] Papell,S.S., “Manufacture of Magnetofluids,” U.S.Patent,NO.3215527,1965.
 [7] R.E.Rosensweig,R.Kaiser and G.Miskolczy, “Viscosity of Magnetic Fluid in a Magnetic Field,” J.Colloid and Interface Sci,Vol.29 p.4,1969.
 [8] Z.P.Shulman,V.I.Kordonsky,E.A.Zaltsgendler,I.V.Prokhorov, B.M.Khusid and S.A.Demchuk,1986. “Structure,Physial Properties and Dynamics of Magnetorheological Suspensions,” Int. J.Multiphase Flow,Vol.12 No.6,p.935-955,1986 °
 [9] W. I. Kordonsky, Z. P. Shulman, S. R. Gorodkin, S. A. Demchuk,I. V. Prokhorov, E. A. Zaltsgendler and B. M. Khusid, “Physical Properties of Magetizable Structure-Reversible Media” ,J. Magn.Magn. Mater.,1990 °
 [10] E. M.Shtarkman,U.S.Patent 4,992,360,1991 and U.S. Patent 5,167,850 , 1992 °
 [11] K.D.Weiss al, “High Strength Magneto-and Electro-rheological Fluids” Society of Automotive Engineers,SAE Paper No932451 , 1993 °
 [12] J.D.Carlson et al, “Magnetorheological Fluid Damper” U.S.Patent5,277,282 and 5,284,330 , 1994 °
 [13] J.D.Carlson and K.D.Weiss, “A Growing Attraction To Magnetic Fluids” Machine Design,Aug.8 p61-66,1994 °
 [14] Ginder J M,Davis L C, “Shear stresses in magnetorheological fluids : role of magnetic saturation,” Applied Physics Letters,USA,1994,pp.65-70 °
 [15] Ginder J M,Davis L C,Elie L D, “MR Suspensions and associated technology,” World Scientific,vol. 5,no. 3,1996,pp.20-25 °
 [16] Carlson J D, “MR fluids and devices in the real world,” International Journal of Modern Physics B, USA, 2005, pp.56-75 °
 [17] Y. M. HAN , * M. H. NAM , S. S. HAN , H. G.LEE AND S. B.CHOI , “Vibration Control Evaluation of a Commercial Vehicle Featuring MR Seat Damper” ,Journal Of Intelligent Material Systems And Structures, Vol. 13—September 2002 °
 [18] J.M.He, J.Huang, L.J.Fu, “Design analysis of a magnetorheological damper” , ICMIT 2005 Proc. Of SPIE Vol. 6040 60402B-1 °
 [19] Jeong-Hoi Koo,Fernando D Goncalves,Mehdi Ahmadian, “A comprehensive analysis of the response time of MR dampers” ,Smart Materials And Structures Smart Mater. Struct. 15 [2006] 351-358 °
 [20] A.C.Shivaram and K.V.Gangadharan, “Statistical modeling of a magnetorheological fluid damper using the design of experiments approach” , Smart Materials And Structures Smart Mater.

- Struct 16 (2007) 1310–1314。
- [21] Xiaojie Wang, Faramarz Gordaninejad, “Flow Analysis and Modeling of Field-Controllable, Electro- and Magneto-Rheological Fluid Dampers,” *Journal of Applied Mechanics* JANUARY 2007, Vol. 74 / 13。
- [22] Y. Shen, M. F. Golnaraghi, G. R. Heppler, “Load-leveling suspension system with a magnetorheological damper” , *Vehicle System Dynamics* Vol. 45, No. 4, April 2007, 297–312。
- [23] 張進秋, 王光遠, 呂建剛, 「剪切閥式磁流變阻尼器動態特性實驗研究」, *Engineering Mechanics* Vol.22 NO.3 June 2005 1000-4750(2005)03-0011-05。
- [24] 陳昆山, 袁善掇, 周孔亢, 「磁流變減振器磁路磁場特性分析」, *托拉機與用運輸車(Tractor & Farm Transpoer)* Vo1.35.No.2 Apr.2008 1006—0006[2008 J02—0039—03。
- [25] 沙凌鋒, 李愛群, 「磁流變阻尼器的設計與分析」, 東南大學 土木工程學院 & 自動化學院, 南京。
- [26] Carlson J D, Catanzarete D M, St Clair K A, “Commercial magnetorheological fluid devices,” *Proceedings of 5th Int. Conf. on ER Fluids*, Singapore, 1996, pp.120-128.
- [27] Dyke S J, Spencer Jr. B F, Sain M K, Carlson J D, “An experimental study of MR dampers for seismic protection,” *Journal of Smart Materials and Structures*, vol.8, no. 2, 1998, pp.7-27.
- [28] Kormann C Laun H M, Richter H J, “MR suspensions and associated technology,” Bullogh W A ed. *Proc. of 5th Int. Conf. on ER Fluids*, Singapore, 1996, pp.233-243.
- [29] Kordonski W I, Gorodkin S R, Novikova Z A, “MR Suspensions and their applications,” Nakano M, Koyama K eds. *Proc. of the 6th Int Conf on ER Fluids*, Singapore, 1998.
- [30] Lord Corporation, 1999, “Magnetic Circuit Design” *Engineering Note*
- [31] 周雲, 譚平, 磁流變阻尼控制理念與技術, 科學出版社, 2007。