

4. 雙盤面磁流變液離合器的實驗研究

郭文化¹、池德明²、林永建²、邱煥哲³、林洸泓³

¹東南科技大學 機電科技學系副教授

²東南科技大學 機電科技學系講師

³東南科技大學 機電整合研究所研究生

摘要

磁流變液(magnetorheological fluid縮寫為MRF)，是一種新型的智慧型材料，主要由載液、磁性微粒及介面活性劑所組成。當外加磁場時，磁流變液在毫秒內由流動性良好的流體變成塑性體，當外加磁場去除後，立即回覆原來的流體，而這種變化是連續、迅速、可逆及控制容易，本論文研究之磁流變液離合器即利用此特性探討離合器的傳動特性。

本研究首先設計一磁流變液離合器，並以Magneto V64進行磁路分析離合器結構的磁通密度。設計製造一磁流變液離合器，建立磁流變液離合器之動態方程式，模擬其傳動特性，最後建置一實驗裝置，使用Lord公司之MRF-132DG磁流變液及LabVIEW程式控制程序，再將實驗的結果加以分析和討論，並與模擬結果比較分析，經由實驗的結果顯示，磁流變液離合器對於傳動扭力有良好的控制效果。

關鍵字：磁流變液、離合器、磁流變液離合器、磁路分析。

一、前言

磁流變液主要由穩定性佳的載液、高導磁的磁性微粒和迅速分散磁性微粒的介面活性劑所組成，受外加磁場的作用，產生可控制的降服剪應力。廣泛應用避震器、剎車器、離合器、減震支座、緩衝器等機械與土木領域中，是一種新型的智慧型材料。

磁流變液在磁場的作用下，液體內的磁性顆粒會與磁場平行的方向產生鏈狀結構或進而形成柱狀結構，使自由流動且無固定形狀的磁流變液產生

類似於固化的變化，具有高抗降服剪應力的特性。當磁場移除後，鏈狀結構會立即消失，磁流變液又變回自由流動的流體狀態。磁流變液在強磁場作用下，數毫秒內由自由流動的牛頓流體(Newtonian fluid)變為賓漢塑性體(Bingham plastic)，此種變化謂之磁流變效應(magnetorheological effect)，這種變化是迅速、可逆、連續與容易控制。

磁流變液離合器是一種新的動力傳遞裝置，與傳統的離合器以彈簧機械式的控制方式及以電磁式的電

控方式截然不同。傳統離合器的主動軸和從動軸是由接觸面間的摩擦作用，或液力偶合器使用液體作為傳動介質，或以磁力傳動的電磁力來傳遞轉矩，而磁流變液離合器是接觸面為液體與塑性體間的變化，當不需傳動時，去除電場，需傳動時，施加足夠的磁場，使磁流變液變為塑性體帶動被動軸。

離合器的特性需求，必須能以最大轉矩傳遞動力，在分離時徹底分離，接合時柔和，並具有良好的散熱性，從動部分的轉動慣量儘量小，離合器切換容易，衝擊輕，能衰減從動軸的振動能力，噪音小，傳動穩定，操作省力，維修保養要方便等，磁流變液離合器是非常符合這些特性的需求。磁流變液的控制特性又可作半主動控制的智慧型控制。由於磁流變液離合器運轉滑順，不會造成機械的磨損，操作方便，其性能優於傳統的機械式離合器，是一種理想的扭力輸出裝置[1]-[3]。

由於磁流變液材料的研究已逐漸穩定，磁流變液的產品也商品化[4]，磁流變液離合器研究也受大家的矚目。Kavlicoglu[5]等使用雙盤面磁流變液離合器，分析靜態及動態傳動特性；Wang[6]等以理論探討離心力對磁流變液離合器穩定性的影響；Deur[7]等對磁流變液離合器作靜態及非線性動態分析及實驗，有良好的預測效果；Walker[8]等使用串聯式的磁流變液離合器，分析在高頻及電阻抗快速變化下扭力傳動特性；Cobanoglu [9]等探討磁流變液離合器以角速度作回授控制，當滑動時，可以保持輸入軸及輸出軸相對速度差為零；Hu[10]等將磁流變液離合器應用於引擎風扇的控制；Kikuchi[11]等將磁流變液離合器應用於機器人腳抽搖動作的控制。

本實驗研究是設計雙盤面磁流變液離合器作為傳動扭力控制，製作磁流變液離合器，並測試其傳動的扭力特性。

二、磁流變液離合器

磁流變液離合器是利用磁流變液的磁流變效應來進行離合變換的一種裝置，使用磁場來控制傳遞的扭力。在無磁場作用的情況下，磁流變液為液體狀態，僅只有流體原有的黏性阻力。當施加最大磁場時，磁流變液的磁性顆粒沿著磁力線方向形成鏈狀結構，使得磁流變離合器的主動軸與傳動軸相互

連結，可以透過離合器傳動扭力，而扭力的大小可用通過磁流變液磁場的強度大小來控制。磁流變液離合器一般設計上常見的有兩種形式，分別為圓盤式及圓筒式。圓盤式離合器為施加磁場後，磁流變液結成鏈狀與軸平行，帶動從動軸，而圓筒式離合器施加磁場後，磁流變液結成徑向固化的鏈狀，帶動從動軸。當磁場去除後，鏈狀結構斷裂，使主動軸與從動軸分離。

本研究以雙盤面磁流變液離合器，其構造如圖1所示。

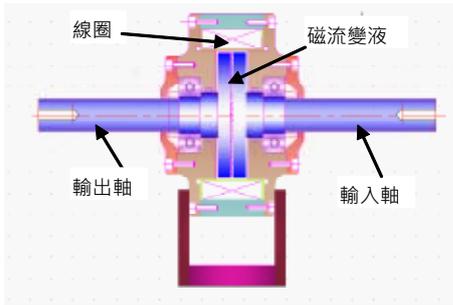


圖 1. 雙盤面磁流變液離合器構造

2.1 磁流變液離合器扭力分析

磁流變液離合器輸出軸之扭力分析，使用磁流變液的賓漢塑性模式(Bingham plastic model)，如式(1)。

$$\tau = \tau_y + \eta \dot{\gamma} \quad (1)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{\partial u}{\partial y} = r \frac{\Delta \omega}{h} \quad (2)$$

$$\Delta \omega = \omega_1 - \omega_2$$

ω_1 ：輸入軸轉速， ω_2 ：輸出軸轉速， h ：輸入軸與輸出軸間隙， τ ：剪應力， η ：黏度， $\dot{\gamma}$ ：剪應變率， τ_y ：降伏剪應力，隨磁場大小改變。

T 為輸出軸傳動扭力

這是磁流變液離合器理論上輸出軸的扭矩，但實際上，還有摩擦力產生的扭矩，但是通常磁流變液效應產生的扭矩較大，超過摩擦力產生的扭矩非常的大，而可忽略摩擦產生的扭矩。

$$\begin{aligned} dT &= r dF = r \tau dA = 2\pi r \tau r dr \\ dA &= 2\pi r dr \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} T &= \int_0^R dT = \int_0^R 2\pi r \tau r dr \\ &= \int_0^R 2\pi \left[\tau_y + \eta \frac{r(\omega_1 - \omega_2)}{h} \right] r^2 dr \end{aligned} \quad (4)$$

$$T = \frac{2\pi}{3} (R^3) \tau_y + \frac{\pi \eta}{2h} (R^4) (\omega_1 - \omega_2) \quad (5)$$

$$T = T_y + T_\eta \quad (6)$$

$$T_y = \frac{2\pi}{3} (R^3) \tau_y \quad (7)$$

τ_y 為磁流變效應產生的扭矩。

$$T_\eta = \frac{\pi \eta}{2h} R^4 (\omega_1 - \omega_2) \quad (8)$$

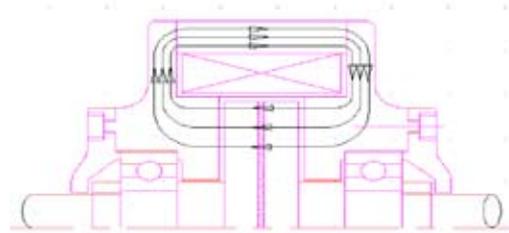
T_η 為磁流變液黏度產生的扭矩。

這是磁流變液離合器理論上輸出軸的扭矩，但實際上，還有摩擦力產生的扭矩，但是通常磁流變液效應產生的扭矩較大，超過摩擦力產生的扭矩非常的大，而可忽略摩擦產生的扭矩。

T_y 為磁流變效應產生的扭矩。

T_y 為輸出軸扭矩中可調節的部分，比黏性扭矩大很多，故離合器的輸出軸扭矩主要由外加磁場強度控制其扭矩，會隨著激磁電流增大控制磁場強度，使輸出軸扭矩顯著增大。

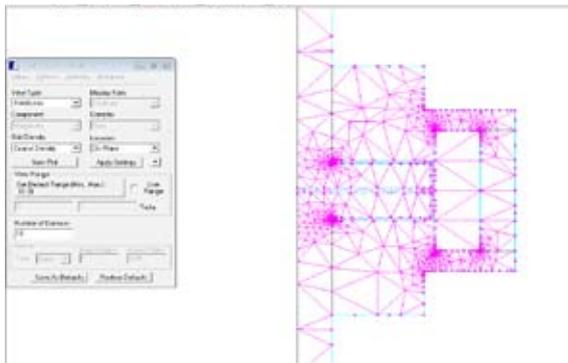
兩平行盤狀之磁流變液離合器線圈纏繞在盤外圓周圍，其磁力線分佈示意圖，如圖二。



圖二 磁流變液離合器磁力線分佈示意圖

2.2 磁流變液離合器磁路分析

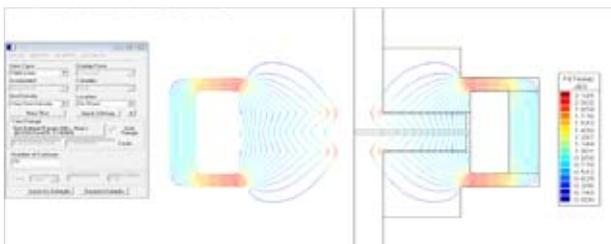
使用Magneto V64磁路分析軟體分析磁流變液離合器線圈產生的磁力線分佈及磁通量密度分佈，以磁流變液離合器初步設計之尺寸進行分析。從分析中找出通過磁流變液之磁通量密度最強的結構尺寸，作為設計磁流變液離合器之依據。由磁流變液離合器的設計分析中，影響磁流變液效應的重要參數包含磁流變液材料、線圈的圈數及線徑、線圈的尺寸、導磁的外殼材料、輸入電流大小等。從雙盤面結構磁流變液離合器主體結構其材料為低碳鋼，內部線圈為銅材料，線圈匝數780圈，線徑為0.5mm進行磁路分析與模擬，其磁力線分佈如圖三，磁場強度分佈如圖四，磁通量密度分佈如圖五，兩盤面間之磁通量密度平均約0.86 Tesla。



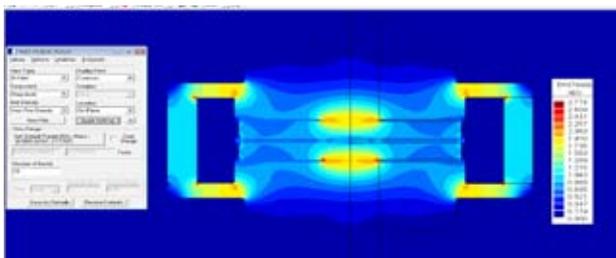
圖三 磁力線分佈圖

2.3 磁流變液離合器設計與製作

磁流變液離合器主要的組成元件有同軸線的輸入軸及輸出軸，兩軸相對的圓盤面間夾著磁流變液，兩圓盤面的外圓周裝有線圈，線圈外圓周有導磁的外環套，兩圓盤面外側有外蓋與軸接觸處裝有滾珠軸承，而磁流變液使用Lord公司的MRF-132 DG，依據這些基本條件及以上的分析，設計與製作磁流變液離合器，如圖六照片。



圖四磁場強度分佈圖



圖五磁通量密度分佈圖



圖六 磁流變液離合器

三、磁流變液離合器特性實驗

3.1 實驗裝置

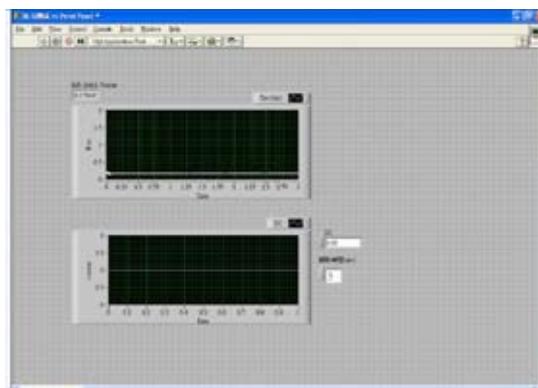
將線圈裝入離合器中，並以三用電錶測試線圈電路是否正常，中間裝有O型環以阻絕磁流變液漏出，將組裝完成的離合器倒入磁流變液，鎖緊上下裝有滾珠軸承的圓盤，將磁流變液離合器裝上測試台。

實驗裝置如圖七，包含實驗基台、驅動馬達及減速機、扭力計、聯軸器、電源供應器、LabVIEW軟體及控制卡與電腦等。經由電源供應器可調整電流的大小，進行實驗測試，從0A起每0.1A為一個量測間格單位，可從LabVIEW控制面板中直接調整，如圖八 LabVIEW實驗控制面板。從20rpm起每20rpm調整不同的驅動轉數，由電腦中可得到磁流變液離合器的扭力值數據及LabVIEW程式控制面板所顯示之數據圖，作為實驗數據分析比較。

3.2 實驗結果及分析



圖七 磁流變液離合器實驗裝置

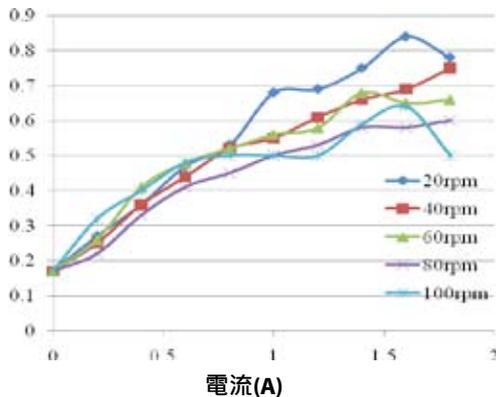


圖八 LabVIEW實驗控制面板

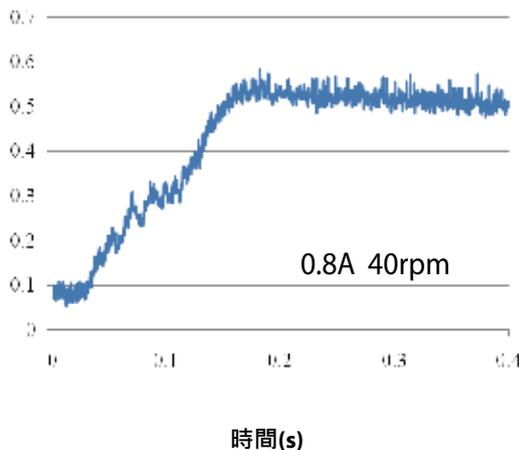
從LabVIEW控制面板顯示上半部為磁流變液離合器所測得之輸出軸扭力值，而下半部為輸入之電壓值，實驗的擷取時間為3秒，上方則顯示出時

間最終值之扭力值，可從圖中看出，實驗轉速由 20rpm、40rpm、60rpm、80rpm、100rpm 分別測試 0A~1.8A 之電壓值。在未施加電流時，其輸出軸扭力值約為 0.17N·m，由圖九之電流與輸出扭力特性圖顯示，輸出扭力值會隨著電流上升而增加，而轉數對輸出扭力值影響較小，但是從不同轉數中顯示，轉數越高輸出扭力值有點微降。

由圖十之輸出扭力之動態特性圖顯示，使用步階輸入，磁流變液離合器在輸入電流 0.8A 及轉數 40rpm 時的暫態反應時間約為 0.15 秒左右。



圖九 電流與輸出扭力特性圖



圖十 輸出扭力之動態特性圖

四、結論

磁流變液離合器是由外加磁場控制傳動輸出軸扭力，可經由半主動控制隨時離合的傳動裝置，故磁流變液離合器是一種良好的傳動控制裝置。

實驗研究中，由於磁飽和，磁流變液離合器輸入電流施加到 1.8A 後電流無法輸入，扭力也無法提高，因此磁飽和現象必需進一步改善。實驗時磁流變液離合器密封問題，應避免磁流變液流至傳動盤面的背部，使扭力傳動造成負面的效果，將會降低傳動效率，這些問題將是未來研究持續改善。

參考文獻

1. 離合器，<http://baike.baidu.com/view/21853.htm>
2. 離合器，維基百科，自由的百科全書，<http://zh.wikipedia.org/zh/%E9%9B%A2%E5%90%88%E5%99%A8>
3. 郭文化，蕭耀榮，邱煥哲，磁流變液離合器的研究，第十七屆中華民國振動與噪音工程學術研討會，北台灣科學技術學院，2009年6月6日。
4. Magneto-Rheological (MR) Technology, <http://www.lord.com/Home/MagnetoRheologicalMRFluid/MRFluidTechnology/tabid/3318/Default.aspx>
5. B. M. Kavlicoglu, F. Gordaninejad, C. A. Evrinsel, N. Cobanoglu, Y. Liu, A. Fuchs, "A High-torque Magneto-rheological Fluid Clutch", Proceedings of SPIE Conference on Smart Materials and Structures, San Diego, March 2002, pp1-8.
6. Wang Hong-yun, Li Yong-xian, Zheng Hui-qiang, "Analysis on the Centrifuging Characteristics of Magnetorheological Fluid Clutch", Journal Magnetic Material and Devices, Vol. 39, No. 3, June 2008, pp21-24.
7. Joško Deur, Zvonko Herold and Milan Kostelac, "Modeling of Electromagnetic Circuit of a Magnetorheological Fluid Clutch", 18th IEEE International Conference on Control Applications Part of 2009 IEEE Multi-conference on Systems and Control Saint Petersburg, Russia, July 8-10, 2009, pp113-118.
8. Daniel S. Walker, Dan J. Thoma, and Günter Niemeyer, "Variable Impedance Magnetorheological Clutch Actuator and Telerobotic Implementation", The 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, October 11-15, 2009 St. Louis, USA, pp2885-2891.
9. Nigar Cobanoglu, "Dynamic Behavior and Control of Magnetorheological Fluid Clutch", The degree of master of Science in Mechanical Engineering, University of Nevada, Reno, Aug, 2002.
10. Hu Hongsheng, Wang Juan, Cui Liang, Wang Jiong and Jiang Xuezheng, "Design, Control and Test of a Magnetorheological Fluid Fan Clutch", Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics, Shenyang, China August 2009, pp1248-1253.
11. Takehito Kikuchi, Kunihiko Oda and Junji Furusho, "Simulation of Clonic Movement with Leg-Robot Driven by Compact MR Fluid Clutch", 2009 IEEE 11th International Conference on Rehabilitation Robotics, Kyoto International Conference Center, Japan, June 23-26, 2009, pp80-85.