

磁性粒子串在擺動磁場下的運動行為與實驗控制

林合慶¹

空軍航空技術學院 機械工程科 少校助理教授¹

陳慶耀²

國立交通大學機械工程學系教授²

摘要

針對磁性粒子串在擺動磁場下的運動情形及其不穩定現象的相關研究，在近年來已被廣泛地提出作探討，在相關問題上透過系統性的研究及實驗已能獲得有效的解決，本篇文章主要是透過實驗來分析微磁性粒子串的操控及其運動機制，實驗中的粒子串為可反覆運用的，粒子串的組成為超順磁性粒子，其粒子直徑大小為4.5微米，首先透過單一水平磁場將粒子串接成串，再透過另一垂直擺動磁場做操控，磁場大小固定，改變擺動頻率來觀察粒子串的擺動情形，從實驗中可以觀察到粒子串不同的運動行為，如剛體擺動、扭曲變形、斷裂及再接回等運動模式。

關鍵字：微磁性粒子、超順磁性、頻率

Abstract

Issues concerning the structural instability of an oscillating micro-bead chain are addressed based on systematic experiments. This article outlines and illustrates the manipulations and mechanisms of micro magnetic chain by experimental analysis. A reversible microchain consisting of superparamagnetic particles whose diameters are about 4.5 micro-meters. The chains are formed under a static directional field and manipulated by an additional perpendicular field(different frequency). The effects of key parameter, such as frequency, is thoroughly analyzed. We demonstrate the chains appear different behaviors, from rigid body oscillations and bending distortions to rupture failures. These behaviors are observed by increasing the value of frequency.

Keywords：Micro-bead, Superparamagnetic, Frequency.

1. 前言

磁流變懸浮液(MR)是一種非常實用的功能性流體，其成分為順磁性粒子懸浮在無磁性的溶劑上，這樣一個人工合成的流體，也可被運用在泛磁流體範圍中作研究[1]，在這些研究範圍當中利用奈米級或微米級的磁性粒子去構成一微小裝置，再透過外加磁場作有效控制，是一個很熱門的議題，例如微機械感測器[2、3]，微游泳器[4、

5、6]，微混合器[7、8、9]，在不同磁場結構下，針對磁性粒子串的串接過程及運動力學研究，例如擺動磁場[5、6、10、11]也都有完整地研究。

從文獻研究中可以觀察到磁性粒子串透過外加磁場驅動後的運動情況，並發現在旋轉磁場下磁性粒子串不是保持著原本的串接模式就是斷裂成許多短粒子串(斷裂段)，當外加磁場的旋轉頻率趨於臨界值時，一個具有彈性可彎曲的磁性粒子串在外加磁場操控下，可以同時發生彎曲及旋轉的運動現象，而當施加一個極大頻率的外加磁

場時，磁性粒子串的運動會呈現不同步的往返運動現象。

透過誘導阻力(M^V)及磁力矩(M^m)的大小差異，可以很容易了解動態磁場下磁性粒子串擺動不穩定的物理機制，並定義出無因次參數Mason number (Mn)，假設N顆粒子組成的磁性粒子串放置在外加總合磁場強度為H的磁場下，磁性粒子串所遭遇之誘導阻力和磁力矩，及其相對應的Manson number如參考文獻[7]，公式條列如下

$$M^m = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{3m^2 N^2}{(2a)^3} \sin(2\Delta\theta_L) \quad (1)$$

$$M^V = \frac{4\pi a^3 N}{3} \frac{2N^2}{\ln(N/2)} \eta \omega \quad (2)$$

$$Mn = \frac{32\eta\omega}{\mu_0 \chi^2 H^2} \quad (3)$$

公式中的 μ_0 及 a 分別代表的是真空磁導率及粒子的半徑，磁性粒子的磁化率及溶劑流體的黏滯度分別表示為 χ 及 η ， m 為單一粒子的磁偶極矩，其定義為 $\vec{m} = \frac{4}{3}\pi a^3 \chi \vec{H}_0$ ，磁性粒子串擺動時之角速度表示為 ω ， $\Delta\theta_L$ 是外加動態磁場與磁性粒子串擺動之瞬間相位角差。當這些參數達到特定臨界值時，粒子串斷裂會發生在運動初期極短暫的時間階段，斷裂位置大部分接近粒子串中心區塊，避免粒子串斷裂之臨界長度與Mason number的平方根成反比，從實驗中可以觀察到粒子串不同的運動行為，如剛體擺動、扭曲變形、斷裂及再接回等運動模式。

2. 實驗設置

2.1 實驗說明

圖1中粒子串的組成粒子大小為微米級且具順磁性，懸浮在溶劑中，本實驗中所使用之溶劑為蒸餾水混合介面活性劑十二烷基硫酸鈉(SDS)，此溶劑之黏滯度為 $\eta=1.75\text{cp}$ ，實驗中所使用的順磁性粒子為Dynabeads M-450 Epoxy，成份為聚苯乙烯珠而外層包覆了氧化鐵且呈現順磁性，直徑大小為 $4.5\mu\text{m}$ ，飽和磁化率為1.6，Dynabeads M-450 Epoxy的飽和磁化強度是350和400 Oe之間。這些磁性粒子的超順磁性意味著它們將根據外部磁場的作用而被磁化，而當外部磁場移去後，粒子之磁化效果隨即消去。代表著磁性粒子無磁滯效應，故其串接操控具可逆性之特色，由直流電源供應器提供一水平固定串接磁場用於磁性粒子串接，再用交流電源供應器提供

一正弦波形的外加垂直動態磁場來控制磁性粒子串擺動，一個磁性粒子串由N顆粒子組成時，將其由左至右標示為-n到n，粒子串中心定義為第零顆，則 $N=2n+1$ 。

2.2 實驗架構

本研究將針對磁性粒子進行實驗操控，並且配合外加磁場控制進行實驗，本研究之實驗架構示意圖如圖1，用來串接磁性粒子串的外加固定磁場表示為 H_d ，外加垂直動態磁場標示為 H_v ，其用途為控制磁性粒子串的擺動，此動態磁場呈現正弦波形，表示為 $H_v = H_p \sin(2\pi ft)$ ，公式中 H_p 及 f 分別代表最大磁場強度及擺動頻率，外加磁場總和定義為， i 代表水平方向之單位向量(x方向)， j 代表垂直方向之單位向量(y方向)，在此實驗架構下，外加總和磁場下磁性粒子串擺動相位角軌跡表示為 $\theta_f(t) = \tan^{-1}[(H_p/H_d)\sin(2\pi ft)]$ ，而粒子串所有的運動過程皆是透過光學顯微鏡去做觀察，再連接至每秒可拍200張的高速攝影機(Silicon Video 643C)作完整的紀錄，本文當中所呈現之實驗影片截圖，其原始影片均已透過影像編輯軟體作過亮度調整及影像對比強化等解析度修正，藉以能清楚觀察不同實驗條件下的粒子串運動行為。

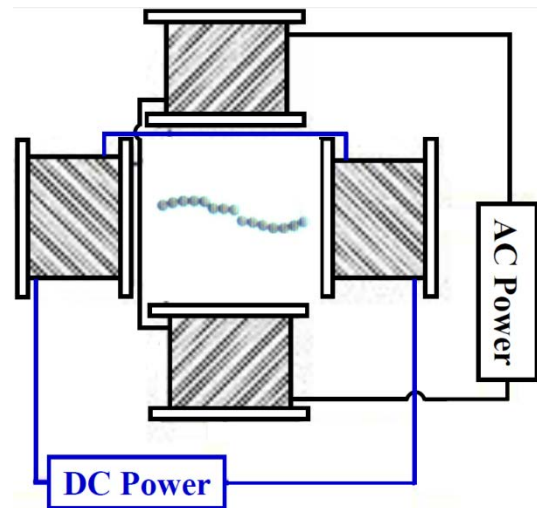


圖1實驗設置示意圖。

3. 結果與討論

本研究中主要是針對上下震盪型磁場下磁性粒子串擺動的不穩定現象作探討，利用光學顯微鏡配合高速攝影機來觀測並且記錄磁性粒子串之運動模式，著重於擺動磁場的頻率對磁性粒子串運動型態的影響，在不同的擺動頻率下，並以系

統性實驗去作驗證，用以觀察不同擺動頻率下，磁性粒子串的實驗情況。另一個是粒子串斷裂發生時間與擺動頻率的相關性，實驗中觀察到一個令人感興趣的現象，那就是粒子串的斷裂發生時間與擺動頻率有非常強的相關性，透過深入討論後，可以將這些實驗結果區分成不同類型的粒子串擺動不穩定現象，如發生斷裂的時間、粒子串斷裂的位置以及斷裂後再串連的可能性。

3.1 實驗結果與參考文獻之實驗比較

圖2表示的為不同頻率的動態磁場下由13顆粒子組成之磁性粒子串(簡稱為P13粒子串)的實驗影片截圖，其動態磁場強度為 $H_p = 18.73 \text{ Oe}$ ，使用的磁性粒子直徑為 $d = 4.5 \mu\text{m}$ ，串接磁場強度及擺動頻率分別為 $H_d = 24.15 \text{ Oe}$ 及 $f = 1、3、5$ 及 7 Hz ，此磁性粒子串在黏滯度及磁場擺動頻率較高的實驗環境中的運動情形與李姓等學者的實驗結果是十分相似的，參考文獻的實驗環境為在較低黏滯度的蒸餾水中[10]，即使實驗條件改變，但磁性粒子串在較小的動態磁場擺動頻率下的擺動情形仍是相仿的，其擺動情形同樣有明顯的彎曲變形，磁性粒子串也會隨著外加動態磁場做同步的擺動，如圖2左上及右下圖格所示，當外加動態磁場擺動頻率持續增加時，磁性粒子串的擺動振幅及結構彎曲也變得越來越不明顯，本實驗中觀察到當外加動態磁場擺動頻率為 3 Hz 及 5 Hz 時，磁性粒子串開始斷裂成兩個分離的短粒子串，代表此時的外加動態磁場擺動頻率已達到磁性粒子串斷裂的臨界外加動態磁場擺動頻率，說明如圖2右上及左下圖格所示。

根據先前章節所介紹的公式(1)-(3)中可以發現，外加動態磁場擺動頻率增大會導致磁性粒子串的擺動角速度增加，同時所受的誘導阻力也會變大，角速度變大，進而形成誘導阻力增加，而且會造成磁性粒子串的擺動會變得更加不明顯，擺動振幅也會變得更小，在此期間，由於磁性粒子串的擺動角速度增加，所受的誘導阻力也變大，因此當外加動態磁場擺動頻率達到特定臨界動態磁場擺動頻率時，磁性粒子串會因為誘導阻力的作用而產生斷裂。

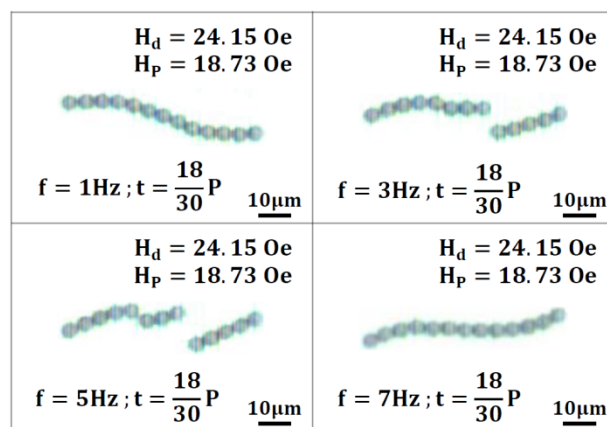


圖2由13顆粒子組成之磁性粒子串(簡稱為P13粒子串)的擺動實驗影片截圖，其動態磁場強度為 $H_p = 18.73 \text{ Oe}$ ，截圖時間皆為 $t = 18P/30$ ，串接磁場強度及擺動頻率分別為 $H_d = 24.15 \text{ Oe}$ 及 $f = 1、3、5$ 及 7 Hz 。

3.2 磁場擺動頻率對磁性粒子串擺動的影響

為了更深入了解磁場擺動頻率對磁性粒子串擺動的影響，可以透過其相對應的擺動相位角軌跡來作一個概括性的討論，由18顆粒子組成之磁性粒子串(簡稱為P18粒子串)的擺動相位角軌跡圖如圖3所示，繪製這些軌跡圖的實驗條件為為不同頻率的動態磁場下，其動態磁場強度為 $H_p = 18.73 \text{ Oe}$ ，串接磁場強度及擺動頻率分別為 $H_d = 24.15 \text{ Oe}$ 及 $f = 1、3、5$ 及 7 Hz ，固定串接磁場及動態磁場強度，以觀察磁性粒子串在不同動態磁場擺動頻率下其運動情形。

在動態磁場擺動頻率為 1 Hz 時，從圖2左上圖格可以看到P13粒子串能保持穩定擺動且沒有發生斷裂不穩定現象的情況，相同實驗條件情況下，從圖3中可以觀察到P18粒子串於0.6秒即發生斷裂不穩定現象，這是因為粒子串長度變長，其所受到的誘導阻力增加，造成磁性粒子串開始斷裂成兩個分離的短粒子串，外加動態磁場的擺動頻率大小均為 $f = 1 \text{ Hz}$ ，在固定磁場的情況下，較短的磁性粒子串由於其遭受的黏滯阻力較小，所以可以被穩定操控並達到更明顯的擺動情況，另一方面，相同顆數的磁性粒子串，在固定磁場大小的情況下，其擺動最大振幅的主要控制參數為動態磁場的擺動頻率，從圖中可以發現較小的動態磁場的擺動頻率，其黏滯阻力也變得更小，對磁性粒子串的擺動提供更有效的操作，較大的動態磁場的擺動頻率時，粒子串的擺動振幅是最低

的，這是因為磁性粒子串的擺動角速度增加，同時所受的誘導阻力也會變大所造成的現象。

另外，透過圖3可以發現在動態磁場的擺動頻率增加時，磁性粒子串發生斷裂不穩定現象的時間明顯要比動態磁場擺動頻率較小時要來的快，而且在動態磁場擺動頻率為5Hz時，於0.6秒後磁性粒子串重新地接回並穩定的擺動。

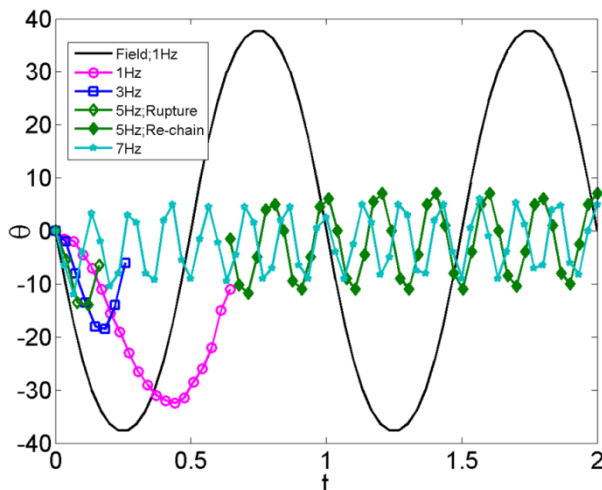


圖3磁性粒子串在不同動態磁場的擺動頻率下的相位角軌跡圖，實驗條件為為不同頻率的動態磁場下，其動態磁場強度為 $H_p = 18.73 \text{ Oe}$ ，串接磁場強度及擺動頻率分別為 $H_a = 24.15 \text{ Oe}$ 及 $f = 1, 3, 5$ 及 7 Hz 。

本文從一系列的實驗中挑出P3、P13及P18磁性粒子串來作比較及說明，從圖4中可以發現相同動態磁場擺動頻率下，P3磁性粒子串的擺動振幅明顯較大，擺動磁場具有強烈瞬時現象的特性導致磁性粒子串的擺動角速度隨著動態磁場擺動頻率而有明顯的變化，較短磁性粒子串的擺動有著較高的角速度(ω)，即使動態磁場擺動頻率增加時，其呈現的結果仍是如此，另外不論是P13或P18粒子串兩者的運動情況是非常相似的，其最大擺動振幅皆是隨著動態磁場擺動頻率增加而變小，因為動態磁場擺動頻率增加，磁性粒子串的擺動角速度增加，誘導阻力也會變大所造成的結果，由公式(2)可以知道較短的粒子串會造成誘導阻力明顯的變小，因此較短磁性粒子串的擺動有著較高的角速度(ω)，所以擺動振幅增加，即使動態磁場擺動頻率增加時，其呈現的結果仍是如此，而P3磁性粒子串的最大振幅即使在不同動態磁場擺動頻率下，其改變並不大，這是因為誘導阻力明顯的變小的原因。

圖4呈現的結果中，可以發現不論是P13或P18粒子串兩者的運動情況是非常相似的，其最大擺動振幅皆是隨著動態磁場擺動頻率增加而變小，這樣的結果是很容易去理解的，因為動態磁場擺動頻率增加，磁性粒子串的擺動角速度增加，誘導阻力也會變大所造成的結果。

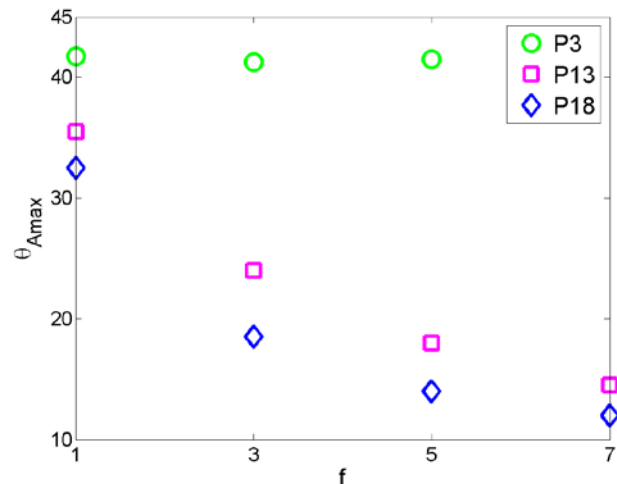


圖4 所繪製的是不同動態磁場擺動頻率下，P3、P13及P18磁性粒子串最大振幅大小變化及其相對應的值。

4. 結論

本研究在黏滯度較高的實驗操作環境下，針對磁性粒子串在不同動態磁場擺動頻率下的運動情形進行了系統系的實驗及分析，磁性粒子串首先由水平方向之外加固定串接磁場作串連，再由垂直方向之外加動態磁場驅使作擺動之運動，當外加動態磁場擺動頻率為1Hz時，粒子串擺動情形為一彎曲變形的S形結構，一旦外加動態磁場擺動頻率增加為3Hz及5Hz時，粒子串會因為誘導阻力的作用而斷裂成兩個較短的部分，一般情況下，斷裂段仍會隨著外加動態磁場同步擺動，並形成週期性地再串連及斷裂的過程。

相同顆數的磁性粒子串，在固定磁場大小的情況下，其擺動最大振幅的主要控制參數為動態磁場的擺動頻率，較小的動態磁場的擺動頻率，其黏滯阻力也變得更小，對磁性粒子串的擺動提供更有效的操作，另外動態磁場的擺動頻率增加時，磁性粒子串發生斷裂不穩定現象的時間明顯要比動態磁場擺動頻率較小時要來的快，而且在動態磁場擺動頻率為5Hz時，於0.6秒後磁性粒子串重新地接回並穩定的擺動，由於誘導阻力隨著

動態磁場擺動頻率增加而有顯著的變化，因此最大擺動振幅皆是隨著動態磁場擺動頻率增加而變小，因為動態磁場擺動頻率增加，磁性粒子串的擺動角速度增加，誘導阻力也會變大所造成的結果，本文針對不同動態磁場擺動頻率下磁性粒子串之運動情形都作了詳細的分析及討論。

"Trajectory Shift of Magnetic Microchains in an Oscillating Field." *Microfluidics and Nanofluidics*, 14, pp.831-838, 2013.

5. 參考文獻

- [1] Nguyen NT., "Micro-magnetofluidics: interactions between magnetism and fluid flow on the microscale. *Microfluidics and Nanofluidics*, 12: 1, 2012.
- [2] Goubault C., Jop P., Fermigier M., Baudry J., Bertrand E., and Bibette J., Flexible magnetic filaments as micromechanical sensors. *Physical Review Letters* 91: 260802, 2003.
- [3] Cebers A., "Flexible magnetic filaments." *Journal of Colloid and Interface Science* 10: 167, 2005.
- [4] Dreyfus R., Baudry J., Roper M. L., Fermigier M., Stone H. A., and Bibette J., "Microscopic artificial swimmers." *Nature* 437.7060: pp. 862-865, 2005.
- [5] Li Y.-H., Sheu, S.-T., Pai, J.-M., Chen, C.-Y., "Manipulations of oscillating micro magnetic particle chains." *Journal of Applied Physics* 111: 07A924, 2012.
- [6] Li, Y.-H., Lin, H.-C., and Chen, C.-Y., "Steering of magnetic microswimmers." *IEEE Transactions on Magnetic* 49(7): 4120, 2013.
- [7] Biswal S., and Gast A., Micromixing with linked chains of paramagnetic particles. *Analytical chemistry* 76.21: pp. 6448-6455, 2004.
- [8] Kang TG., Hulsen M., Anderson P., den Toonder J. M. J., and Meijer H., "Chaotic mixing induced by a magnetic chain in a rotating magnetic field." *Physical Review E* 76.6: 066303, 2007.
- [9] Roy T., Sinha A., Chakraborty S., Ganguly R., and Puri I. K., "Magnetic microsphere-based mixers for microdroplets." *Physics of Fluids* 21: 027101, 2009.
- [10] Li, Y.-H., Chen, C.-Y., Sheu, S.-T., and Pai, J.-M., "Dynamics of a Microchain of Superparamagnetic Beads in an Oscillating Field." *Microfluidics and Nanofluidics*, 13, pp. 579-588, 2012.
- [11] Li, Y.-H., Lin, H.-C., and Chen, C.-Y.,

