

第二章 超音波馬達簡介

超音波馬達是利用內部壓電材料的逆電壓效應產生超音波彈性震動，以獲得驅動動力，然後再利用摩擦力帶動轉子而驅動的馬達。一般人耳能感知的聲音頻率，約在 5Hz~20kHz 之範圍，因此一般設計驅動超音波馬達的振動頻率都在 20kHz 以上，已超過人耳可辨識的頻率範圍，故稱為超音波。以外加交流電壓於壓電陶瓷(Piezoelectric Ceramic)的兩端，壓電陶瓷會產生超音波的交替伸縮現象，雖然伸縮的大小僅達數微米(μm)程度，但因每秒之伸縮達數十萬次，每秒可移動達數厘米，所以相較於同體積的電磁式馬達，有較大的驅動扭矩。第一個可實際應用之超音波馬達，約在 1972 年，分別由 H. V. Barth 在 IBM Watson Laboratory，以及 Galutva 等學者在蘇聯共和國同時發展出來[3]。

2.1 超音波馬達的分類

USM 的研究均是設計以不同的方式，獲得屈曲彈性波(Flexure Wave)的橢圓運動，應用屈曲彈性波可將 USM 分成兩大類：

1. 駐波 (Standing wave) 型 USM，此型式之馬達在運作時會在定子激發出駐波，且定子會產生類似駐波狀態形變與轉子會做間歇性的接觸，而此形變的大小類似駐波振幅的大小，發生接觸的部份類似駐波點保持固定，如圖 2-1 所示，為雙模態駐波型 USM 運作示意圖[12]，本篇論文所使用的 USM 即是屬於此型，所謂雙模態即是定子會產生彎曲震動與長度震動。
2. 行波 (Traveling wave) 型 USM，如圖 2-2 為行波型 USM 運作示意圖，此型式之馬達在運作時會在定子激發出行進波，且定子和轉子會一直保持接觸，而發生接觸的部份會在行進波的波峰附近，並隨著行進波的移動而改變接觸的位置。所以此種形式的馬達其轉子是沿著特定方向傳遞前進的行進波所驅動[3]。

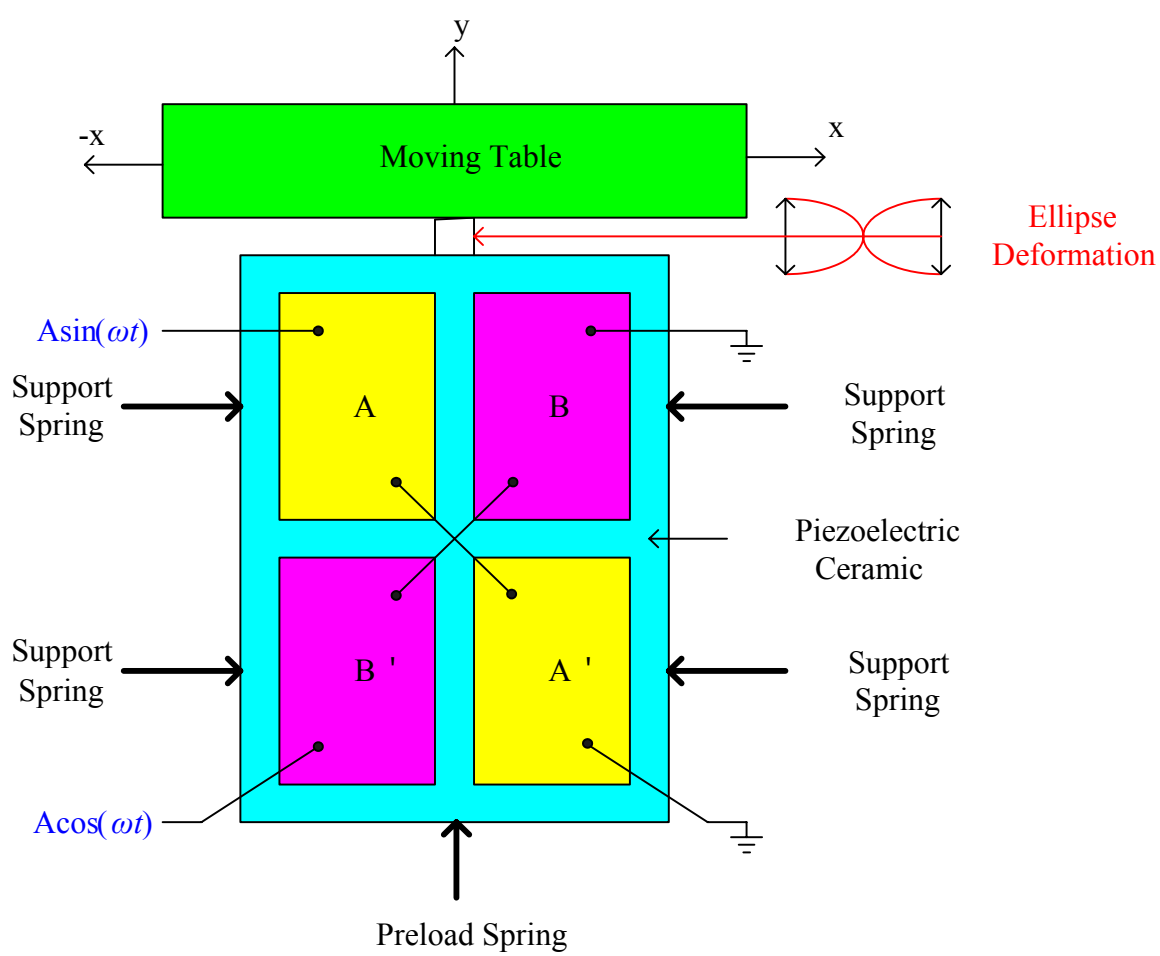


圖2-1 駐波型 USM 運作示意圖

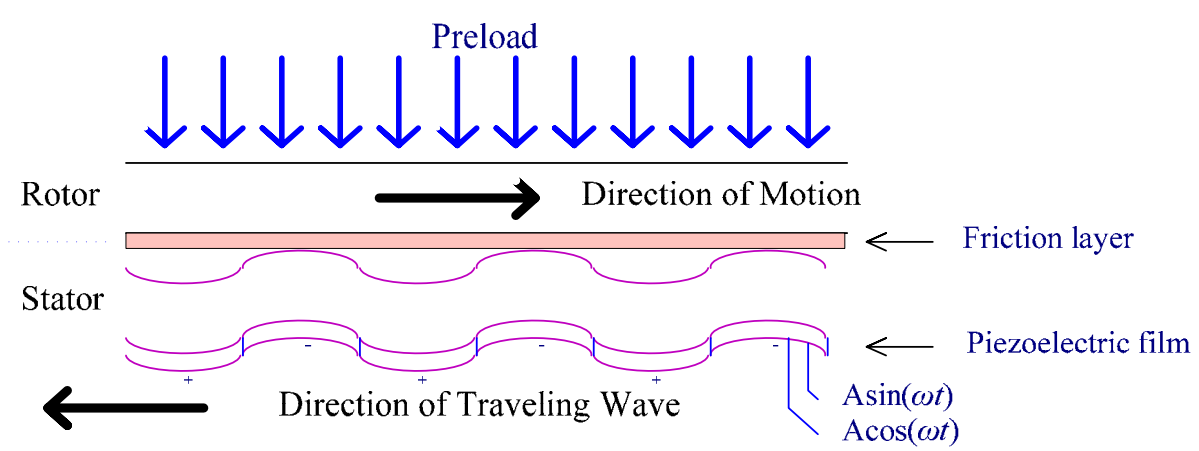


圖2-2 行波型 USM 運作示意圖

此外，超音波馬達亦可根據其產生運動之型式，分別再將駐波型超音波馬達與行波型超音波馬達分為兩大類，第一類為產生直線運動的直線型超音波馬達；另一類為產生旋轉運動的旋轉型（環型）超音波馬達；如圖 2-3 所示。

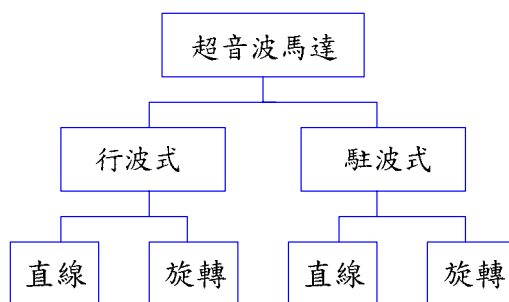


圖2-3 超音波馬達的分類

一般而言，駐波型 USM 相較於行波型 USM，有高效率、結構簡單等優點，但因其外形限制較嚴謹，且控制較為複雜，不易於商品化，直到 1995 年，Snitka 推導出雙模態駐波型超音波馬達之離散數學模型，並設計數位回授控制器[14]。1999 年，Fung, R. F.[15]利用雙模態駐波型超音波馬達以有限元素法，推導出其運動狀態，駐波型超音波馬達才被廣泛使用。行波型 USM 雖然效率較低，但其外形限制較小，且具微型化設計的優點，故在使用上有較佳的整合與微型化之能力。

2.2 超音波馬達的特點

相較於電磁式的馬達，超音波馬達有以下優點：

1. 高保持扭矩：保持扭矩意指在不輸入電壓的情形下，要讓馬達轉動所需施加的外力。一般的電磁馬達其保持扭矩較小，在切掉電源後，由於慣性力大於保持扭矩，所以馬達不會立即停止。而超音波馬達因為其摩擦驅動的原理，所以保持扭矩相當大，若在運轉時突然切掉電源，USM 在保持扭矩大於慣性狀態下會立即停止，不會因慣性作用而繼續移動；但若慣性力

大於保持扭矩時，USM 不會立即停止，也會繼續移動，但移動量遠比電磁式馬達小許多。

2. 高扭力：相較於電磁式的馬達，同體積的 USM 有較高扭力，可以直接驅動負載，不需要減速機構，可以減少因變速齒輪間因摩擦所產生的磨損、震動、衝擊與噪音，也可減少因機構所增加的體積與重量。
3. 不受電磁干擾：因為 USM 是靠壓電陶瓷元件產生超音波震動，透過摩擦來轉換動能驅動轉子，沒有線圈與電磁迴路的設計，所以在運轉時不受外界磁場所影響，而本身也不會產生磁場。
4. 安靜、低噪音：因為 USM 的工作頻率超過 20KHz 以上，以超過人耳可以辨識的頻率範圍。適合用在需要安靜的場所。
5. 高位移解析度：由於 USM 的運動方式是靠彈性體的變化來摩擦轉子，其變化程度約在數微米間，固 USM 有較高的位移解析度。
6. 結構簡單、體積小：因為 USM 是靠壓電陶瓷元件產生超音波震動，透過摩擦來轉換動能驅動轉子，構造簡單，易於微小化。如圖 2-4 所示[1]，目前的 USM 已可做到直徑 1mm，長度 5mm 的 USM。這種 USM 未來適合運用在醫療科技、生物科技或是影音科技上。

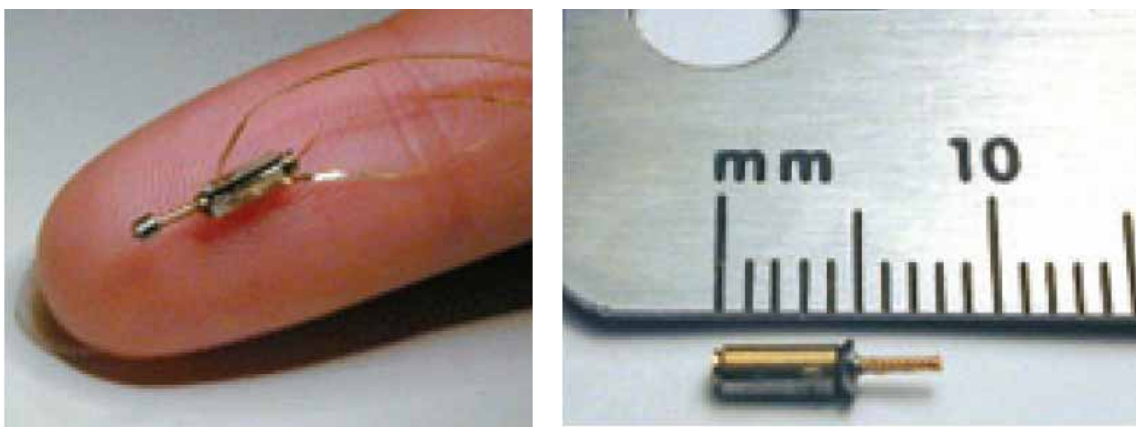


圖2-4 微型超音波馬達的外觀

(資料來源：<http://www.psu.edu/ur/heartdevices/tinymotor.htm> 2007)

由於 USM 具有以上優點，使得超音波馬達在小尺寸、高精度的領域中脫穎而出，目前已被商品化最多的產品，在於相機與攝影機鏡頭中的對焦與變焦機構，因 USM 的體積小、重量輕、低噪音、高制動性、高保持扭矩與高位移解析度，不但可以大大提升鏡頭的對焦與變焦性能，也可以使錄影對焦或變焦的過程中，降低馬達驅動所產生的噪音。

相較於電磁式的馬達，超音波馬達有以下缺點：

1. 低轉速：USM 不適合於高速運轉，因為 USM 的驅動是靠摩擦方式來產生運動，摩擦會生熱，摩擦的越快，產生的熱越多，於是造成 USM 內部的壓電陶瓷材料溫度也就越高，而壓電元件在不同的工作溫度下，施加相同的電壓會有不同程度的體積變化，若超過某一定溫度時，壓電元件的壓電效應甚至消失。所以 USM 不適合使用於需要高速運轉的設備。
2. 需使用特殊的驅動電路：USM 需要兩組正弦波訊號，分別相差 90° ，才能使 USM 產生運動。
3. 壽命較短：因 USM 是靠摩擦的方式產生運動，摩擦易生熱且會有磨耗的問題產生，所以 USM 壽命較短。
4. 數學模型非線性且時變：因為 USM 的驅動是靠摩擦方式來產生運動，摩擦會生熱，摩擦的越快，產生的熱越多，使用時間越長，產生的熱也越多，於是造成 USM 內部的壓電陶瓷材料溫度也就越高，而壓電元件在不同的工作溫度下，施加相同的電壓會有不同程度的體積變化，若超過某一定溫度時，壓電元件的壓電效應甚至消失。

綜合以上特點，USM 不適合使用在需要長時間連續運轉與高溫的環境中，只適合使用在間歇性運轉與常溫(25)的環境中，以本篇論文例，使用 Nanomotion 公司所生產之 LUSM，其技術資料摘要如附錄一[25]所示，工作環境的溫度在 0~50 ，且隨著工作環境的增加，LUSM 可允許的連續工作時間也會隨之下降。

在使用 USM 最大的困擾就是數學模型非線性且時變，所以需要設計一個能夠學習 USM 數學模型的控制器，在 USM 的控制上是件十分重要的工作；而 CMAC 有快速學習與收斂的特性，極適合於 USM 的控制上[2]。

2.3 壓電效應與壓電材料

晶體的壓電效應是 1880 年居里兄弟 (Jacques Curie, 1855-1941; Pierre Curie, 1859-1906) 所發現，他們在研究晶體熱電現象與結晶對稱關係時，認為這個現象可能是由加熱時晶體體積發生變化所導致的。根據這個想法他們做了許多實驗，發現電氣石或石英等天然礦石晶體受到壓力時，由於體積變化，在晶體表面會有微小電荷產生。隔年，他們又發現當晶體置於電場中時也會造成體積上的變化，證明了這種現象是可逆的。這個發現開啟了一項新的研究領域，即「壓電效應的探討與應用」。

所有構成材料之晶體依其結構可分為 7 大晶系，32 種結晶類，其中的 20 類具有壓電性。晶體是否具有壓電性，取決於晶體本身結構之對稱性，只有結構缺乏對稱中心的晶體才具有壓電性。壓電效應所產生之行為可分為縱效應和橫效應兩類，若晶體伸縮方向平行於外加電場方向，則稱為縱效應；反之，則稱為橫效應[1]。

又因為壓電效應是可逆的，所以把材料因體積變化而產生電壓的效應稱為「正壓電效應」，當施力於壓電材料上時，由於材料體積的變化，在壓電材料的表面可以量測到有微小電荷的產生。施力的方向相反，所產生電荷極性的方向也相反。若壓電材料因加入電壓而造成體積變化的效應稱為「逆壓電效應」。當改變電壓極性時，材料變形的方向也會隨之改變；而具有壓電效應的材料則統稱為「壓電材料」，如表 2-1 壓電材料分類所示。

表2-1 壓電材料分類

壓電材料	正壓電效應	逆壓電效應
縱效應		
橫效應		

具壓電效應材料的天然晶體，如石英、電氣石、羅德鹽等，另外還能以人工的方式製造，如氧化鋅、聚合物、陶瓷材料、複合材料等。其中陶瓷材料的優點在於製造容易、可製成任何形狀、且其特性可隨成份做多樣性的變化，目前已經成為壓電元件的主流。

一般而言，壓電陶瓷材料具有體積小、響應快速、位移量小、消耗功率低等特色。但也有一些使用上的限制，例如材質易碎等。雖然可以承受較大的正向壓力，但是當它承受不均勻的力量時，也很容易造成材料的破壞。另外，其特性受溫度影響大也是一種限制，故而直接影響超音波馬達的性能。

2.4 超音波馬達的動作原理

USM 的動作原理主要是利用壓電材料去激發彈性體的振動，在兩組壓電材料的兩端，分別輸入具有 90 度相位差的高頻正弦波，如此即可激發出彈性體的表面產生一個橢圓型的運動軌跡，若施加一個適當的預壓壓力於定子與轉子(滑軌)之間，以提供一個正向壓力，則定子就可藉由摩擦力去驅動轉子(滑軌)轉動或移動，這就是大多數超音波馬達的動作原理。

為了使 USM 能夠達到最高工作效率，施加於壓電材料兩端的弦波頻率會等於壓電材料的自然共振頻率，可使壓電材料所產生的振幅最大，而此共振頻率可由壓電材料所切割的長度與寬度求得[4]。以本篇論文為例，使用 Nanomotion 公司所生產之 LUSM，型號為 HR4，規格摘要如附錄一[25]所示，其共振頻率為 39.6KHz。