

顛覆 傳統的 無聲馬達 超音波馬達

隨著科技的發展，
各式各樣的馬達已經成為我們日常生活的一部分，
但是如果你以為馬達全都是以電磁力來驅動的話，
那麼就有點落伍了。
因為有一種顛覆傳統的無聲馬達已經誕生，
那就是超音波馬達。

■ 蔡明祺
蕭仕偉
謝旻甫

何謂超音波馬達

超音波馬達是二十世紀七〇年代提出的一種新型馬達，發展的歷史不過30年，卻已有許多不同結構的馬達陸續問世，特別是日本工業界更是積極投入這個領域的研究開發，例如SHINSEI、CANON、SONY、SEIKO、NEC……等公司，都有許多關於超音波馬達的專利與應用。雖然目前超音波馬達的應用尚不及常見的電磁馬達那麼普遍，但是它有一些電磁馬達所不能及的優點。在某些特殊場合使用超音波馬達，可以使工作效率大為提升。

閱讀本文後，讀者不妨試著找找看，周遭有哪些東西已經應用超音波馬達，以及在哪些場合也可能需要使用這種馬達。在了解超音波馬達之前，首先要知道什麼是超音波。一般而言，人耳所能聽到的聲音頻率範圍大約在20赫茲~20千赫茲之間，而超過20千赫茲以上，人耳無法辨識的頻率便稱為超音波。

那麼究竟什麼是超音波馬達？其基本工作原理又為何？簡單地說，利用壓電材料輸入電壓會產生變形的特性，使其能產生超音波頻率的機械振動，再透過摩擦驅動的機構設計，讓超音波馬達如同電磁馬達一般，可做旋轉運動或直線式移動。

通常電磁馬達運轉時我們會覺得有雜音，這是因為馬達內部結構產生振動，而振動頻率恰好在我們耳朵可以感受的頻率範圍內。超音波馬達的振動頻率則設計在人耳所能聽到的範圍之外，所以當它運轉時我們感覺不到有聲音，因而覺得非常安靜，這是超音波馬達一個相當重要的特色。

神奇的壓電效應

在上面的說明中，我們知道壓電材料在超音波馬達內扮演著極為重要的角色，接下來將引導各位進入壓電的世界。壓電效應是一八八〇年居里兄弟（Jacques Curie, 1855-1941；Pierre Curie, 1859-1906）發現的，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。

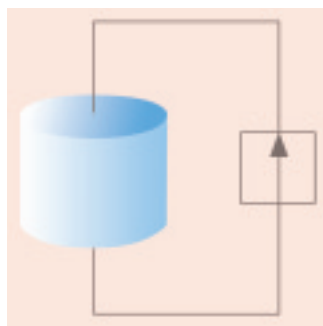
隔年，他們又發現當晶體置於電場中時也會造成體積上的變化，證明了這種現象是可逆的。這個發現開啓了一項新的研究領域，即「壓電效應的探討與應用」。因為壓電效應是可逆的，所以把材料因體積變化而產生電壓的效應稱為「正壓電效應」；反之，材料因加入電壓而造成體積變化的效應稱為「逆壓電效應」；而具有壓電效應的材料則統稱為「壓電材料」。

具壓電效應的材料除了天然的晶體，如石英、電氣石、羅德鹽等材料以外，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。其中陶瓷材料因為製造容易、可製成任何形狀、且其特性可隨組成做多樣性的變化等優點，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，例如材質易脆等。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。

目前壓電陶瓷材料應用的範圍相當廣。利用材料的正壓電效應可應用於感測器、點火器等；而逆壓電效應則可做成致動器、蜂鳴器、超音波轉換器等裝置。

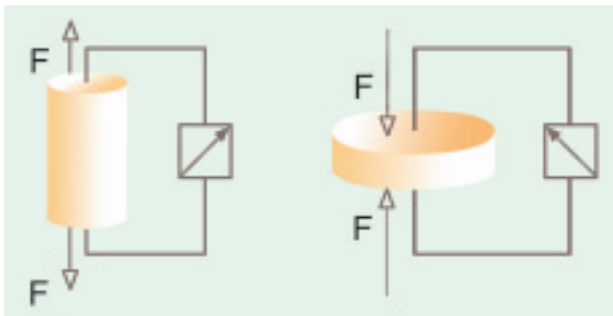
很明顯地在超音波馬達中，主要是利用壓電陶瓷材料的逆壓電效應，從外部輸入高頻電壓訊號，就會產生高頻的機械振動。雖然壓電材料體積的變化量非常小，約微米甚至是奈米量級，不過透過一秒數萬次的振動放大，使得超音波馬達可以兼顧高位移解析度與長行程的特色。



壓電材料原本的形狀

超音波馬達的起源

在超音波馬達問世之前，實際上已有利用壓電材料振動特性來驅動的壓電馬達，惟其頻率並不限於超音波的範圍。早在一九四八年威廉和布朗就申請了「壓電馬達」的美國專利；一九六一年寶路華鐘表公司研製出音叉驅動的手



正壓電效應 當施力於壓電材料上時，由於材料體積的變化，我們可以在材料的表面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。

表；一九七〇~一九七二年西門子和松下兩公司發展出線型壓電步進馬達，不過因為無法達到較大的輸出力及效率，所以當時並沒有普遍地應用。

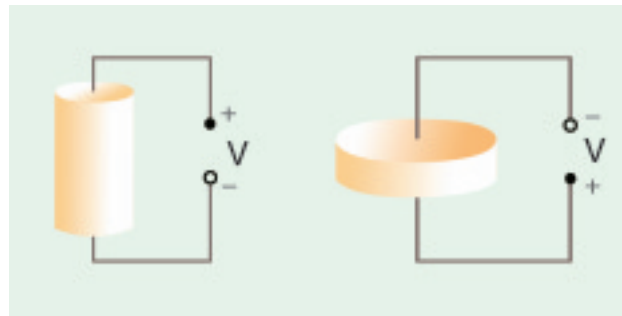
一九七三年美國IBM公司的巴特（H.V. Barth），首次提出利用壓電元件以超音波振動的方式來驅動的馬達，但因為磨耗上的問題，和之前的手表案例一樣，僅發表出來而沒有實際上的應用。幾乎同時，俄國人V. H. Lavrinenko也設計了一些驅動原理相同的馬達結構；一九七八年瓦西里耶夫（P.E. Vasiliev）則是利用超音波轉換器作為馬達的驅動來源，不過都沒有發展出完整的馬達結構。

一九八〇年日本指田年生（Toshiiku Sashida）研製出以振動片驅動的超音波馬達，具有較完整的馬達結構。至此，以壓電材料產生超音波振動來驅動馬達的概念就開始慢慢地發展起來。雖然因為磨耗以及溫度上升等問題，使得這些超音波馬達仍然沒有實際的應用，不過已具有高精度、低速高轉矩等特色。

直到一九八二年，指田年生又發展出一種新型的超音波馬達驅動方式，在設計上已經考慮到磨耗的改善，這才是第一個真正達到具有商業應用價值的超音波馬達，且首先應用在照相機的自動對焦系統中，這也是目前使用超音波馬達最多的領域。

超音波馬達和電磁馬達的比較

超音波馬達突破了傳統電磁馬達的觀念，沒有了線圈與磁鐵，也就是不依靠電磁的相互作用來轉換能量。取而代之的是利用壓電陶瓷的逆壓電效應產生超音波振動，透過摩擦來轉換能量。因為如此截然不同的作用原



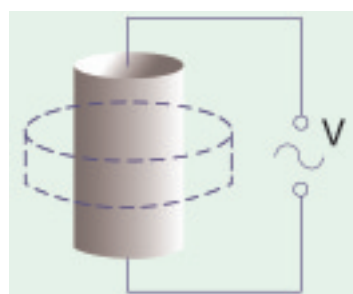
逆壓電效應 當施加直流電壓在壓電材料的兩端時，會造成材料形狀的改變。而改變電壓的方向，材料變形的方向也會隨之改變。

理，也造成了超音波馬達和電磁馬達之間迥異的特性。接下來讓我們來看看，超音波馬達和電磁馬達之間有哪些不同的地方吧！

超音波馬達不受磁場干擾的影響。從馬達的結構我們可以明顯看出，超音波馬達沒有線圈與磁路的設計，當然在運轉時也就不會受到外界磁場的影響，而且其本身也不會有磁場產生。

在某些具有強磁場干擾的場合，例如磁浮列車上以及醫院裡的核磁共振設備中，磁場的干擾可能會造成電磁馬達失效；或是在極精密的儀器裡，使用一個電磁馬達對儀器而言，可能會是一個磁場的干擾源，進而影響儀器的精密度。而超音波馬達的本質特性恰好能夠解決這些因磁場干擾而造成的問題。

超音波馬達有較大的保持扭矩。什麼是保持扭矩呢？即是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，馬達會立即停止，不會因慣性作用而繼續移動。利用這個特點，我們可以輕易地做到快速且精確的定位，不但可以大幅增加



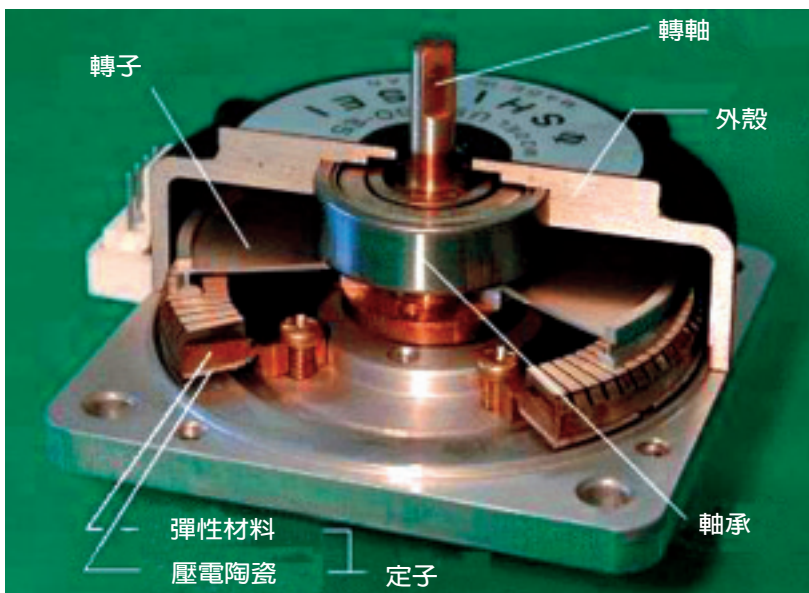
施加一交流電壓在材料的兩端時，因為電壓是正負交替的形式，由「逆壓電效應」可知材料的伸長與收縮會不斷地交替變化，即產生振動，而振動的頻率則和輸入的電壓頻率有關。

系統的定位性能，更可以減少系統設計時的複雜度。

超音波馬達在低轉速時有較大的輸出轉矩，可直接驅動負載，這是超音波馬達另一個相當重要的特點。一般常見的電磁馬達若要達到低轉速時有大輸出轉矩的特性，通常要加上齒輪變速機構來降低轉速才能夠達成；而超音波馬達不需要這類減速機構就能夠直接驅動負載，不但可以減少減速機構的重量與其所占的體積，更可以避免因為齒輪變速機構所產生的振動、衝擊與噪音等問題。

另外，目前電腦中所使用的光碟機和硬碟機，磁頭的直線運動是使用電磁馬達和齒輪機構來實現的。在這樣的傳動系統中要進一步減小機構的體積，並提高定位精度是相當困難的。如果利用直線型超音波馬達的直接驅動特性，製造出更薄、更小且高定位精度的傳動系統就不再是一件困難的事情了！

超音波馬達運轉較為安靜。本文前面已經提過，因為超音波馬達的振動頻率高於我們耳朵所能感受的範圍，而且不需要變速機構即可直接驅動，因此避免了機構振動所產生的噪音。所以在某些需要安靜的場合，例如醫院、辦公室、圖書館……等場所，使用超音波馬達

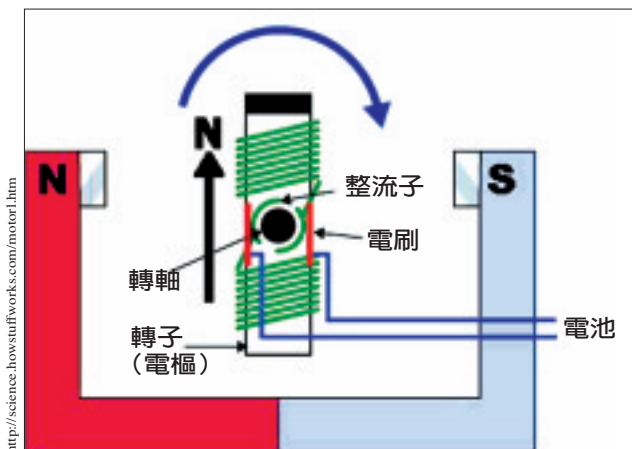


一九八二年指田年生 (Toshiiku Sashida) 提出的超音波馬達原理，以及利用此原理所生產的超音波馬達

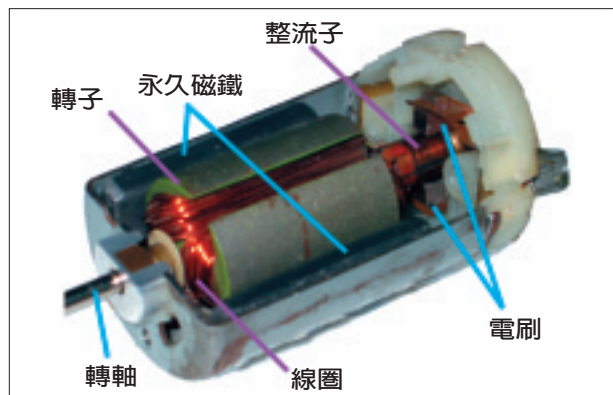
不失為一個不錯的選擇。在日本東京的市政辦公大樓中，便有使用超音波馬達驅動的自動窗簾。

除了上述主要的特點外，超音波馬達還具有體積小、重量輕、響應快速、結構簡單……等特色。不過有優點也會有缺點，例如摩擦會造成磨耗的問題，而且由於超音波馬達使用壓電陶瓷材料，其材料特性也直接影響工作的性能。以下讓我們來看看超音波馬達還有哪些需要改進的地方吧！

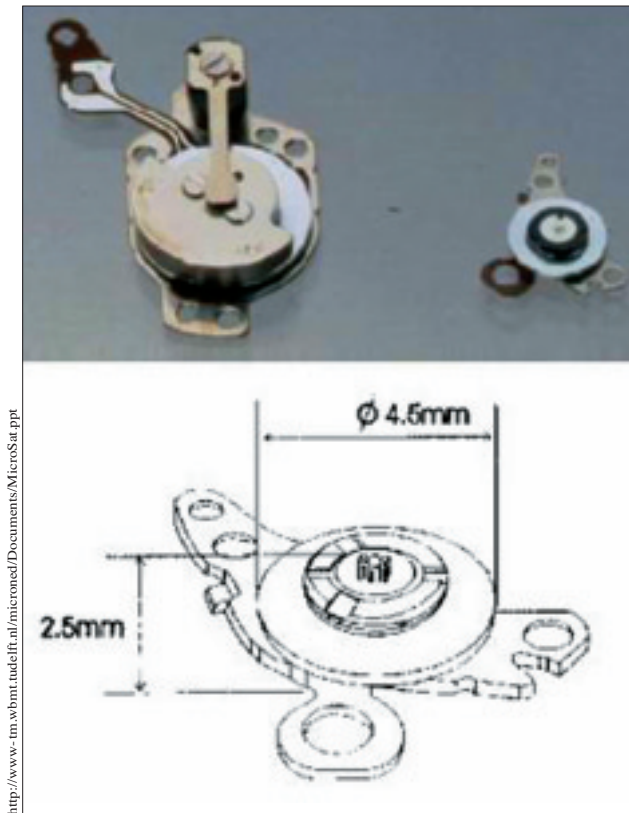
超音波馬達不適合高速運轉。我們已經知道超音波馬達在低速運轉時的某些特性比電磁馬達好，但是在高速運轉的情況下是不是也一樣呢？答案是否定的！因為若我們拿同樣一片壓電陶瓷接上固定的電壓時，可以發現到在不同的溫度下會有不同程度的體積變化，在超過了某一特定溫度後其壓電效應甚至會消失！又超音波馬



簡單的電磁馬達驅動原理 將直流電源或是電池接到電刷上，當電流經由電刷、整流子並通過線圈後會使轉子變成電磁鐵並產生磁極，利用磁極同極相斥，異極相吸的原理，使轉子轉動。整流子的功用在於改變電流的流向，使得轉子的極性改變，以達到連續運轉的目的。



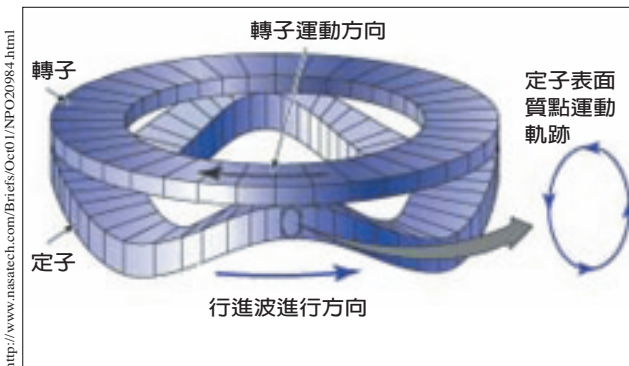
利用電磁馬達驅動原理所製造的馬達。



SEIKO所研發的兩種小型超音波馬達，其直徑均不到一公分，並且已有商業化的應用。

達是以摩擦的方式來產生運動，摩擦會生熱，轉速越快摩擦得越快，產生的熱量也越多，於是造成超音波馬達內部的壓電陶瓷材料溫度也就越來越高，進而影響輸出性能。所以超音波馬達不適合用在需要高速運轉的場合。

超音波馬達使用壽命較短。因超音波馬達是利用摩擦驅動的方式運轉，有摩擦勢必會產生磨耗，長期下來



超音波馬達驅動原理 讓定子產生行進波，則定子表面的質點將會產生橢圓形的運動，當質點在最頂端，也就是定子和轉子所接觸的地方，質點會有切線方向的小位移，於是便會產生摩擦力推動轉子轉動。因為其接觸面較大，所以可以減輕磨耗的問題。

摩擦介面會變得越來越光滑，所能產生的摩擦力也跟著變小，馬達所能輸出的力也相對地變小。雖然目前有許多減少超音波馬達磨耗的設計以及較好的摩擦材料，不過和一般的電磁馬達相比，超音波馬達本質上還是無法比電磁馬達長壽。

超音波馬達定速控制的設計較為複雜。在前面提過超音波馬達在精密的定位控制上有其先天的優勢。但是在某些需要以固定速度運轉的場合，反而不如傳統電磁馬達適用，這是因為超音波馬達內部的溫度與摩擦介面的摩擦係數會隨著操作時間及溫度而改變，亦即超音波馬達輸出的性能會因為運轉的時間不同而有所差異，還有因為正轉與反轉的動態特性亦不大相同……等因素所造成的。因此，如果要用超音波馬達來達到精密的速度控制時，我們需要比電磁馬達更為複雜的控制設計才能夠達成。

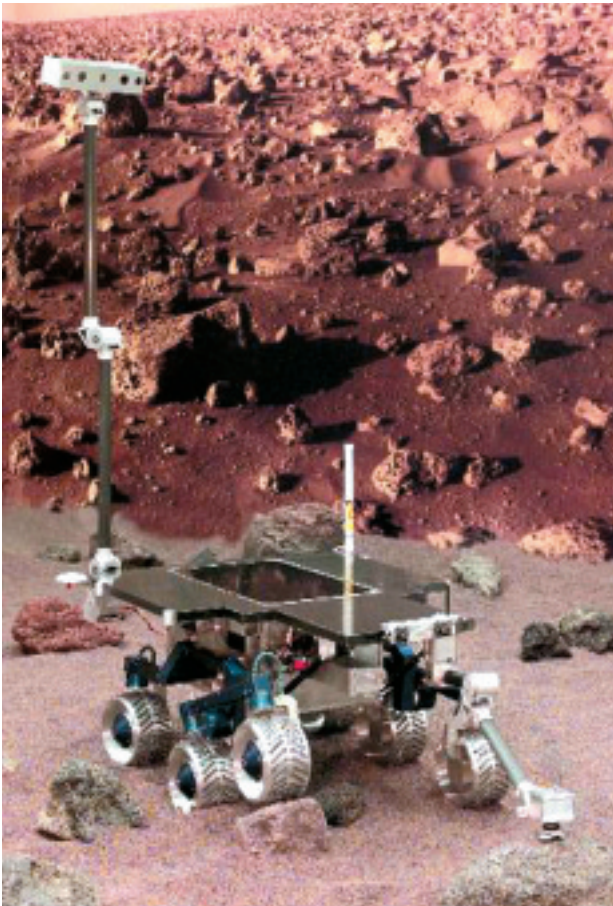
超音波馬達成本較高。超音波馬達雖然結構簡單，但是目前的壓電陶瓷材料價格較高。此外，還需要配合使用較好的摩擦材料以及高頻的驅動器來使壓電陶瓷產生高頻振動，而良好的高頻驅動器在設計上較為複雜，所以價格也偏高。這些也是導致現今超音波馬達價格比電磁馬達高的主要原因。

根據超音波馬達的特點，在某些場合，例如低轉速時要有高轉矩輸出、間歇性的運動、空間形狀受限制、安靜以及其他特殊需求的場所，使用超音波馬達會比電磁馬達更為合適。目前我們已經可以在照相機、手表、汽車、醫療設備、航太工業、精密定位設備、機器人、微型機械等領域裡找到超音波馬達的蹤跡。在未來，超音波馬達甚至有可能取代部分的微、小型電磁馬達。

超音波馬達的應用

讓我們來了解超音波馬達目前有哪些成功的應用吧！日本的CANON公司最早將超音波馬達使用在照相機的透鏡驅動上，因為超音波馬達可以做成中空的结构，使得對焦系统的結構變得簡單。而且由於直接驅動的特性，沒有減速齒輪的慣性以及噪音。此外，當電源切斷時，馬達會立即停止不再移動，





NASA所設計的無人探測船原型，其機械手臂使用超音波馬達做為驅動源。

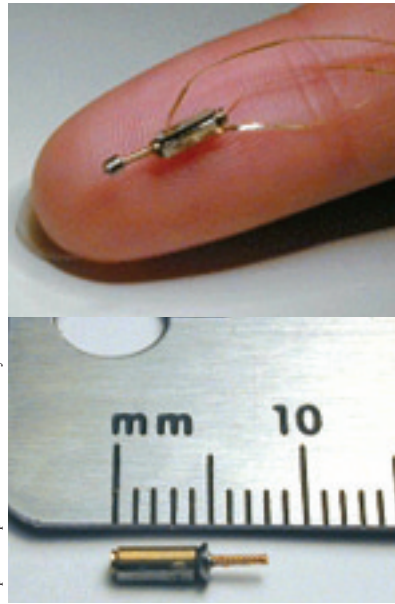
具有高度的制動性，不但對焦快速而且準確，大大提升了照相機的對焦性能。

這麼好用的馬達當然不會只由CANON公司所獨享，其他如NIKON、MINOLTA、OLYMPUS等公司都推出使用超音波馬達驅動的鏡頭。

另外，SIGMA公司在大口徑的望遠鏡中也使用到超音波馬達。

日本SEIKO公司已研發出小型的超音波馬達，其大小分別為直徑4.5毫米、厚度2.5毫米和直徑8毫米、厚度4.5毫米兩種。它們可用於手表上的日曆驅動和振動提示功能，並且已有一系列的产品。

使用超音波馬達驅動的照相機鏡頭。



<http://www.psu.edu/ur/heartdevices/tiny MOTOR.htm>

超音波馬達的尺寸可以做得非常小，圖中的超音波馬達長度只有五毫米，未來可以應用在生物科技、醫療科技與軍事工業中。這個馬達是使用圓柱形的壓電陶瓷，將其面積等分成四分並塗上電極，當通過適當的驅動電壓後，圓柱的頂端便會產生均勻的旋轉運動。

超音波馬達因為體積小、重量輕、比同尺寸的電磁馬達能夠輸出更大的力，又不受磁場影響，舉凡在太空梭、無人探測船、人造衛星……等上面，超音波馬達都有很大的發展空間。美國航空暨太空總署已經成功地將超音波馬達應用在無人探測船的機械手臂上，所使用的超音波馬達比同功能的電磁馬達減輕了40%的重量！

另外，北京清華大學亦研製了世界上最小的超音波馬達，直徑只有1毫米，長5毫米，重量僅有36毫克。在未來或許可以發展出微型機器人，能夠攜帶藥物或微型機械，在人類的身體中進行如血管清除及藥物投射等工作。

除了以上的應用以外，由於超音波馬達的位移解析度可以達到次微米甚至是奈米級的精度，所以未來在一些精密儀器、醫療設備以及半導體製造設備中，超音波馬達會是個不錯的選擇！

看到這裡，各位是不是對超音波馬達有了基本的認識呢？原理其實非常的簡單，而且也有其獨特的地方，然而綜合超音波馬達的特性以及成本上的考量，目前還是不可能完全地取代電磁馬達。不過如果結構設計合理，應用場合選擇得當，超音波馬達可以和電磁馬達相互截長補短，獲得更廣泛而有效的應用。 □

蔡明祺 蕭仕偉 謝旻甫
成功大學機械工程學系