

智慧型數位超音波控制器技術

Intelligent Ultrasonic Control Technology

曾賢正^{1*}、李宛龍¹、余祥華²、古鎮南³、劉家榮⁴、Andres David Gaona Roman⁵、陳文泉⁶

¹ 工研院機械所 控制核心技術組 機電控制整合部 研究員

² 國立中山大學 電機工程學系 副教授

³ 工研院機械所 半導體設備技術組 硬脆材料設備技術部 研究員

⁴ 工研院機械所 控制核心技術組 機電控制整合部 研發經理

⁵ 工研院機械所 控制核心技術組 機電控制整合部 副研究員

⁶ 工研院機械所 控制核心技術組 機電控制整合部 組長

摘要：超音波在醫療、軍用和工程領域中都被廣泛應用，如腹部超音波、超音波熱療、聲納等。而工程領域中，超音波焊接與切削為常見的加工技術。超音波焊接是利用高頻振盪摩擦生熱，促使加工件產生高熱融化，大幅縮短產品製造時間並可節省成本。超音波切削在加工時可有效降低切削力，使刀具負荷降低，進而提升刀具的壽命。且刀具規律振動，可提升加工工件表面品質，有效提升加工精度。工研院所開發之超音波控制器，自動追頻技術和功率控制技術，可免除因被動元件偏差需調整操作頻率，加上功率補償提高輸出穩定性，可達到良好加工效果。

Abstract : Ultrasound is widely used in medical, military and industry fields, such as abdominal ultrasound, ultrasonic hyperthermia, sonar, etc.. In the industry field, both ultrasonic welding and cutting are common processing techniques. Ultrasonic welding uses high-frequency vibration to generate frictional heat, which generates high-heat melting the parts, reduces manufacturing time and saves costs. Ultrasonic cutting can effectively reduce the cutting force and the tool load on harder metals, thereby increasing the life of the tool. The regular vibration of the tool can improve the surface quality of the processed workpiece and effectively improve the processing accuracy. This research article is about automatic frequency tracking technology in ultrasonic controller and ultrasonic controller power control technology developed by the Industrial Technology Research Institute, which can eliminate the need to measure the deviation value of passive components and the output of power compensation before the machine to improve stability and achieve good processing results.

關鍵詞：超音波、熔接、切削

Keywords : Ultrasonic, Welding, Cutting

前言

音波是一種縱波，它可透過分子運動而有波動的傳播產生，像似在空氣、液體或固體中振動傳播，所以音波無法在真空中進行傳播。如圖 1 所示，音波與超音波是以頻率來區分，音波之頻率在 20 Hz ~ 20 kHz 是普通人耳可聽到的聲音，

而超音波是聲音頻率高到人耳聽不到的聲音。但是超音波在工程技術上的定義就不一樣，只要是利用音波的特性來傳遞信息或處理相關的物質時，都可以稱為超音波。而目前常被使用的超音波頻率範圍為 kHz ~ MHz。超音波的應用可分成三個領域，20 kHz 至 100 kHz 是功率超音波（Power

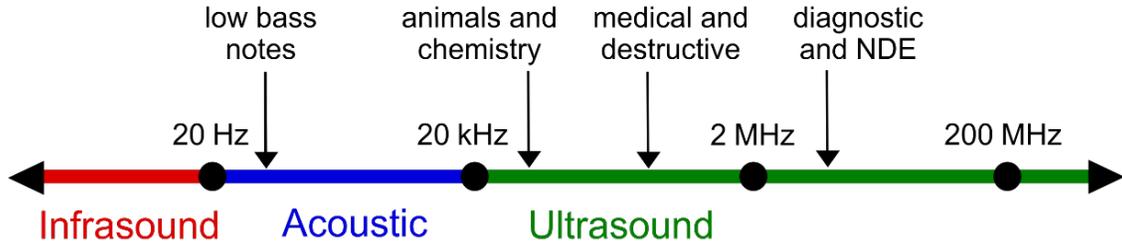


圖 1 超音波頻率分布 (資料來源 Wikimedia Commons)

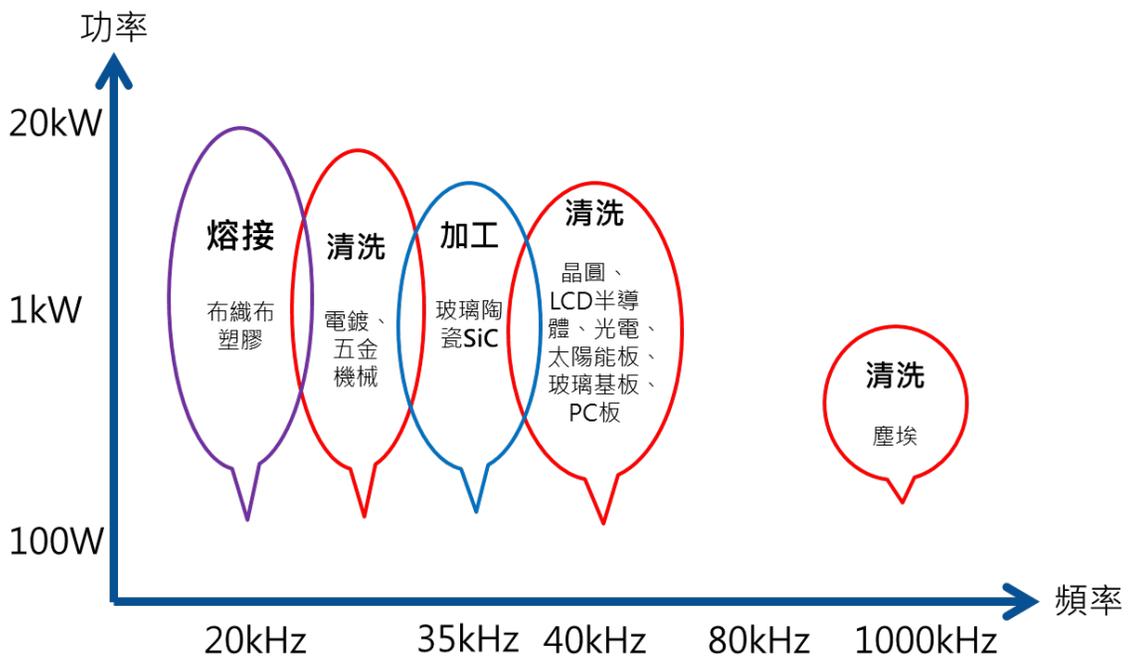


圖 2 超音波工業上應用

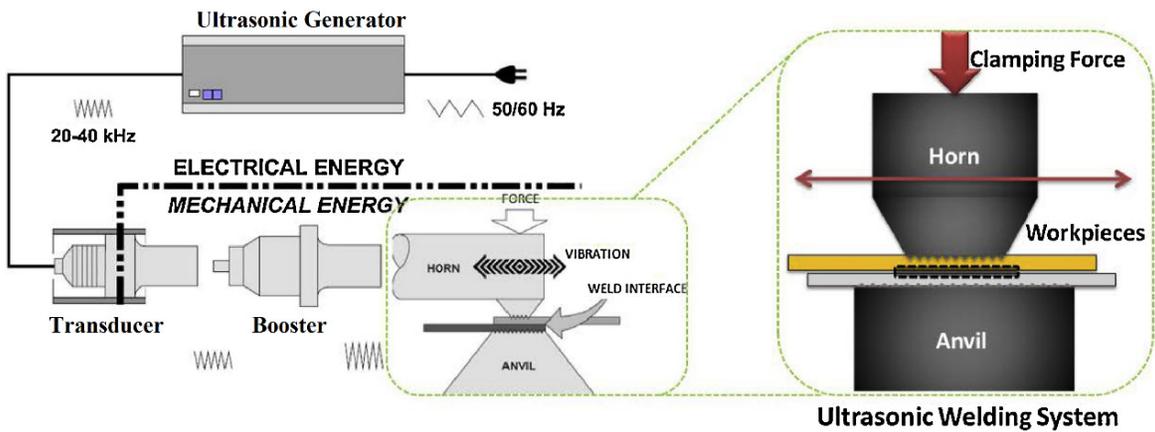


圖 3 超音波系統硬體架構圖 (資料來源 Journal of Manufacturing Systems)

ultrasound)、100 kHz 至 1 MHz 是高頻超音波 (High frequency ultrasound) 以及 1 MHz 至 500 MHz 是診斷超音波 (Diagnostic ultrasound)。超音波頻率設定會依據不同的應用而有所不同，其工業上分類大致如圖 2 所示。就超音波清洗而言，主要是在於固體的破壞效果，清洗越細微的東西，所需頻率越高，而清洗較巨大的東西則較適合使用低頻的超音波來做清洗，因此清洗用的超音波頻率範圍較廣，約在 20 kHz 至 100 kHz 範圍之間。超音波熔接需要通過摩擦的方式將振動能量轉換成熱能，將加工物融化，因此其適合的頻率是在 20 kHz 至 40 kHz 範圍之間。

超音波機械硬體架構

如圖 3 所示，超音波系統硬體架構主要零件可分為：超音波發振器 (Ultrasonic generator)、超音波換能器 (Converter 或 Transducer)、超音波增幅器 (Booster) 與焊頭 (Horn 或 Sonotrode)，其功能為機電能量轉換、超音波能量傳遞及超音波強度放大等。

超音波發振器除了將輸入電源轉為超音波頻率所需的高壓外，還包含過載保護系統、功率調

整輸出及振幅補償功能。

超音波換能器是由許多壓電陶瓷元件 (Polycrystalline ceramic elements) 夾緊製成，透過交流電施加在陶瓷元件上，將電能轉變成機械振動能量。其原理是利用逆壓電效應，將電振盪轉換為機械縱向振動，也就是超音波振動，再傳遞到超音波增幅器及焊頭。

超音波增幅器是用來安裝在換能器與焊頭之間固定裝置，用來增加或減少焊頭的增益，也就是超音波振動的幅度，通常由鋁或鈦合金所製成。

超音波焊頭通常連接在超音波換能器上，藉由焊頭傳導將機械振動傳遞至加工件上，將能量集中在加工的區域。焊頭的大小會因不同的超音波頻率而不同，頻率越高，音波波長越短，焊頭就越小。製作焊頭的材料通常是鋁或鈦合金所製成，這兩種金屬均具有出色的聲學特性，以及極小的衰減傳輸超音波能量。

超音波的產生

壓電材料具有結晶之非對稱性，會使晶體呈現等效的電荷分離現象，像似石英晶體、陶瓷類的鈦酸鋇 (PZT)、電氣石或是薄膜類的氧化鋅

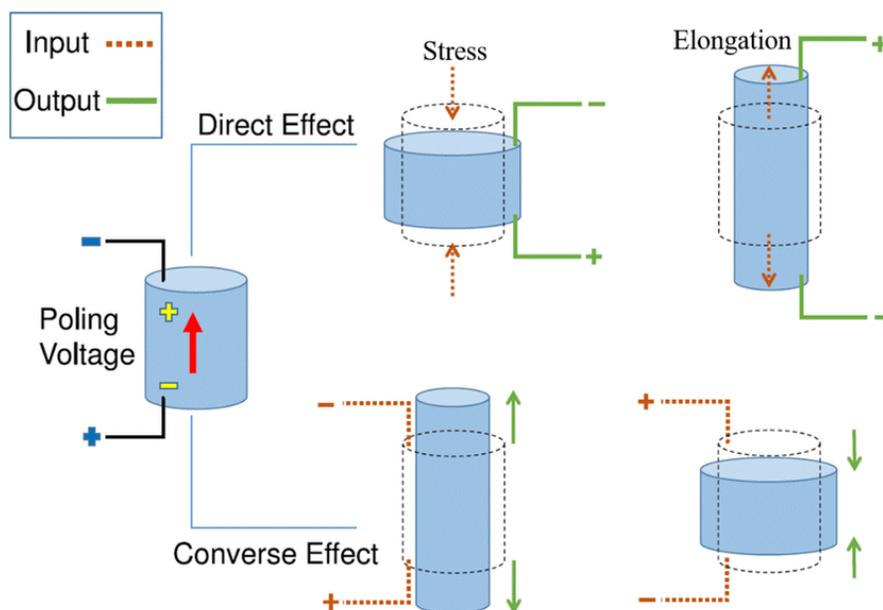


圖 4 壓電效應 (資料來源 Polymers)

(ZnO)，在晶體中有特定大小的電偶極距 (Dipole moment)。隨外加應力或應變的變化，則結構會變形，原子會被推擠，產生電偶極距改變，使壓電材料兩端產生電荷堆積並產生電壓，壓力越大電壓越大，將機械能轉變成電能，這就是正壓電效應 (Direct piezoelectric effect)。如果使用相同的壓電材料並對其施加電壓，則該晶體會因此膨脹或收縮，從而將電能轉換為機械能如圖 4 所示，此為逆壓電效應 (Converse piezoelectric effect)。

利用逆壓電效應，對壓電材料的表面施予電壓。當施予正電壓時，壓電材料會因此被壓縮。如施予負電壓，壓電材料會因此拉伸而不是被壓縮。因此，當施予固定頻率的交流電至壓電材料表面，材料的形變會因為正負電壓而膨脹，收縮的交互變化，而交流電的頻率就等於機械能量變化的頻率即為振動頻率。當振動時，透過周圍的空氣，液體或固體傳導而產生超音波。

超音波發振器將 50/60 Hz 電流轉換成 15 kHz、20 kHz、30 kHz 或 40 kHz 電能，高頻電能再去推動超音波換能器；當高頻電能施加至超音波換能器內的壓電陶瓷元件 (Polycrystalline ceramic elements) 時產生相應的電場，導致陶瓷元件的厚度發生變化，讓電陶瓷元件在固定的週期膨脹及收縮的交互變化，也就是將高頻電能轉變為同等頻率的機械振動能量，機械振動再經過增幅器傳遞到焊頭，再藉由焊頭的傳導將振動能量傳到焊接工件。工件因振動摩擦而轉換成熱能，將工件熔化並結合。超音波不僅可以被用來焊接熱塑性塑料，還可以加工織物和薄膜。

超音波的應用

超音波的應用可分成兩種：非破壞性超音波和破壞性超音波。非破壞性超音波是發射超音波也接收反射波；破壞性超音波是只發射不接收。這兩種超音波在醫學、軍事或製造業都各有許多用途。

非破壞性超音波是透過發射超音波以及接收反射波，即可進行分析大小、厚度、缺陷等。主

要的應用有：

- 超音波掃描：在醫療方面，人們利用超音波穿過人體再藉由音波的反射程度不同，在接收反射波後，利用電腦的精密計算，在螢幕上呈現身體內的組織構造影像，利於供醫生判斷正常或異常。一般超音波影像的超音波頻率通常界於 2 MHz ~ 15 MHz，頻率愈高解析度愈高，但穿透深度也就越低。在工程方面，可用來檢測鍛件、焊縫及鑄件工件內部較小的裂紋、夾渣、縮孔、未焊透等缺陷。

- 聲納：向海底發射超音波，並接收來自海水中的各種目標物 (包括海底) 反射回音。依照回音強度大小，來判別在海水中的群體結構 (如魚群及海底狀態) 大小。

- 超音波測距：發射器對特定的方向發射 40 kHz 超音波，利用音波在空氣中的傳播速度，測量音波在發射後遇到物件反射回來的時間，根據發射和接收到的時間差，就可計算出發射點到物件的實際距離。主要應用於井深、管道長度、倒車雷達等。

破壞性超音波是透過發射高能量的超音波去影響或改變對目標點的狀態或結構。主要應用有：

- 超音波清洗：用超音波能量在水中所產生的空穴效應 (Cavitation)，在液體中以高頻率的高速振盪中傳導，推動介質的作用會使液體中壓力變化而產生無數微小真空氣泡，當真空氣泡再受到振盪壓破爆裂時所產生強大的衝擊力，可將清洗物的表面以及死角縫隙的污垢打散，達到增強洗淨的效果。

- 超音波霧化：透過驅動電路產生超音波頻率的驅動電壓，加至在壓電陶瓷片上，壓電陶瓷片會產生超音波的振盪，振盪能量在液體中以壓電陶瓷片的垂直方向傳播，振盪頻率不斷反覆的振動，最上方的表面液體受到大能量的影響，相互衝撞、拉斷液體的表面張力，使液體分子結構打散形成霧狀粒子，此即為霧化的原理。一般應用在加濕器、呼吸器官疾病治療 (藥液霧化)、水氧機等。

- 超音波熱療：當超音波進入人體組織時轉變成熱能，熱效應能促進血液循環、可使肌腱、韌帶、骨膜、筋膜等受傷組織的膠原纖維恢復彈性、去除彼此間的沾粘。熱療之頻率範圍大多介於 0.7 MHz ~ 3 MHz。如將頻率提高至 900 MHz 到 10 GHz，可高溫殺死癌細胞，將探針引導到位，超音波透過探針的尖端發射高頻電流，產生高熱量，並可破壞特定區域內的細胞。
- 超音波熔接：超音波熔接不需要使用到任何的溶劑及黏著劑即可做快速、高品質的熔接。由換能器所產生的 20 kHz ~ 40 kHz 的機械運動振動頻率，藉由超音波焊頭傳遞能源開始振盪。在振動能量下，工件的接觸面被焊頭以高頻率的摩擦而產生熱能，工件的接觸面因振動位移摩擦生熱而熔融，可讓塑膠、金屬等物質融合在一起，當冷卻後即可獲得堅固而均質的熔接。

超音波核心模組關鍵技術開發

口罩熔接

因新冠肺炎疫情大流行，防疫口罩需求增加，因此口罩生產設備需求倍增。為滿足需求，機台產能由每日 8 小時運作延長至 23 小時不停生產，導致機台零組件壽命縮短為原來 1/3。口罩生產設備長時間連續運作，易讓振盪子溫升導致工作頻率飄移，造成輸出功率不穩定。若功率輸出過小或熔接間隙過大，在振幅不足的狀況下，熔接效果不佳造成口罩黏合不良品倍增；反之，功率輸出過大或熔接間隙太小，易導致阻抗劇烈變化造成功率晶體燒毀，甚至產生振盪片破裂之問題。傳統超音波控器功率及頻率輸出皆採用手動調整，其可靠度無法符合需求。

因此工研院著手進行口罩機設備核心模組關鍵技術開發，讓國內口罩機設備之生產品質具國際水準，提升口罩生產設備效率及穩定度。除此之外，對準智慧化需求保留彈性擴充可能性，藉由串接智慧感測器達到智慧製造目標，提供口罩

生產效率及品質穩定，進而帶動口罩機設備業者競爭力全面提升。

以超音波控制模組的升級策略，並搭配智慧化監控能力，促使超音波設備在固定負載之下進行熔接加工驗證，實現功率控制與頻率追隨穩定機台焊頭熔接加工，可避免無送料焊接時功率過載，提供口罩生產效率及品質穩定，以推動國內設備業者數位化轉型升級。以下就振盪子組件及焊頭設計與超音波控制器設計兩部份進行介紹。

振盪子增幅器與焊頭構型模擬分析與設計

此部分為振盪子優化設計，建構振盪子組件及焊頭模擬分析。藉由智慧設計與整合模擬分析技術的導入，解決換能器 24 小時連續熔接溫升之可靠度的問題，藉此提升轉換效率並降低變形量，以提高熔接效能及穩定度，並增加焊接衝擊次數，達到增加生產效率及產能之目的。

使用 3D 繪圖軟體 Solidworks 及修改模型程式 Design Modeler，進行超音波振盪子模型輸入、檢查並修改模型。再將模型匯入有限元素法工程分析 ANSYS Workbench 軟體，進行網格產生並作調整、確定邊界條件、模態分析 (Modal)、簡諧響應分析 (Harmonic response)、分析結果評估。

模擬 4 片 PZT 超音波振盪子形式，將幾何模型與指定各部件的材料性質匯入分析軟體後，再透過 ANSYS 網格處理工具 ANSYS Meshing，來進行網格劃分，如圖 5 先匯入模態與簡諧響應分析模組，加入固定支撐面、調整 PZT 介面電壓 (量測廠商的既有的類比控制模組為 1500 V)、調整 PZT 承受壓縮力量等邊界條件，於 19 kHz ~ 21 kHz 下分析出 4 階自然頻率模態，其中頻率 19522 Hz 為垂直方向的模態。PZT 承受壓縮力量 25 Mpa 時，如圖 6 所示，振幅值較接近市售產品實測值。

透過 Keyence LK-G5001V 雷射位移感測器，來量測超音波熔接時工作狀態。利用市售超音波發振器進行工作狀態量測，檔位 1 頻率 20 kHz 振幅值為 31 μm ；檔位 4 頻率 20 kHz 振幅值為 33 μm 。由模擬結果和實際測量的結果可以發現，PZT 片的壓縮力道是一個關鍵參數，藉由壓縮力

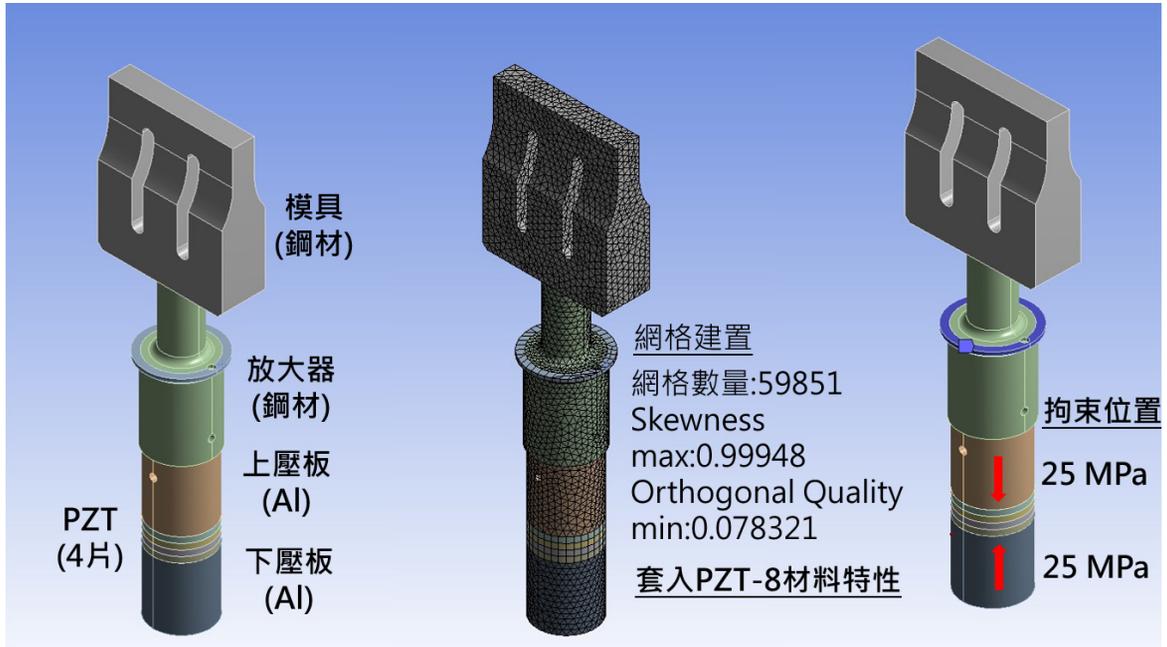


圖 5 超音波振盪子 4 片的模型材料、網格與邊界條件

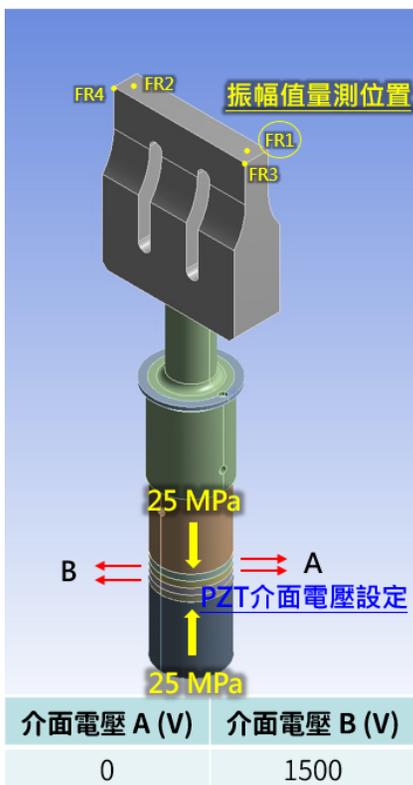


圖 6 超音波振盪子模態分析結果

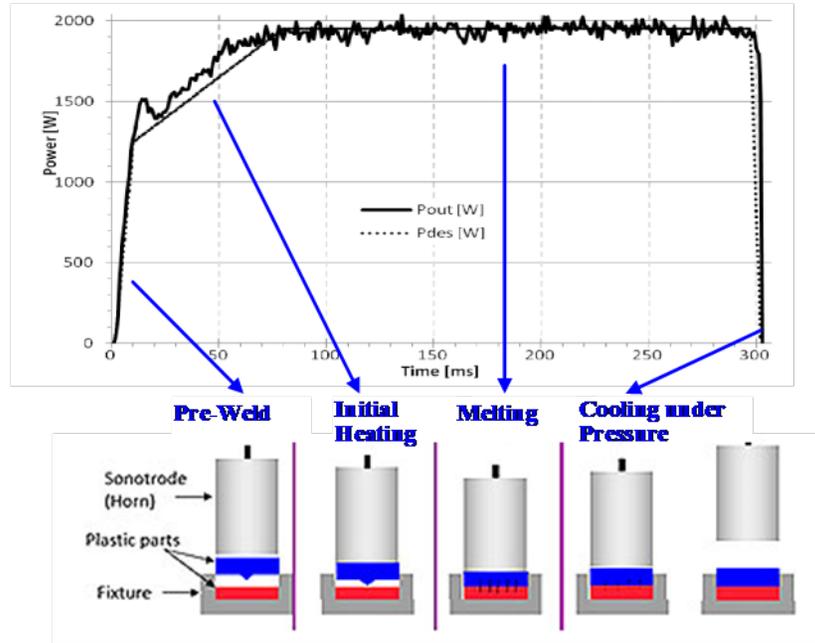


圖 7 不同壓合與融接時期所需的輸入功率曲線圖 [9]

道（固鎖力）可以呈現出不同的振幅，未來可以藉由固鎖力道的調整來產生不同的振幅，將可以提供製造商相關參考，以優化最後性能參數。

功率控制與頻率追隨控超音波發振器開發

此部分就自主化超音波控制器開發，建立控制模組電路設計與輸出功率與頻率控制技術進行介紹。超音波換能器阻抗特性會隨機械負載及溫度變化改變，所以超音波控制器需即時改變驅

動頻率以準確地追隨合適之操作點。超音波熔接成功與否的其中一個重要關鍵，是必須準確的控制驅動頻率。在大部分頻率，換能器有如電容性阻抗，驅動電流領先電壓 $\theta = 90$ 度，實功 $V_{rms} I_{rms} \cos\theta$ 為零。因此，要有效的傳送功率給換能器轉換成機械能，需控制驅動頻率在換能器阻抗的零相位點 $\theta = 0$ 附近（共振點或反共振點）。若超音波熔接會驅動在反共振點附近，其阻抗值最大，

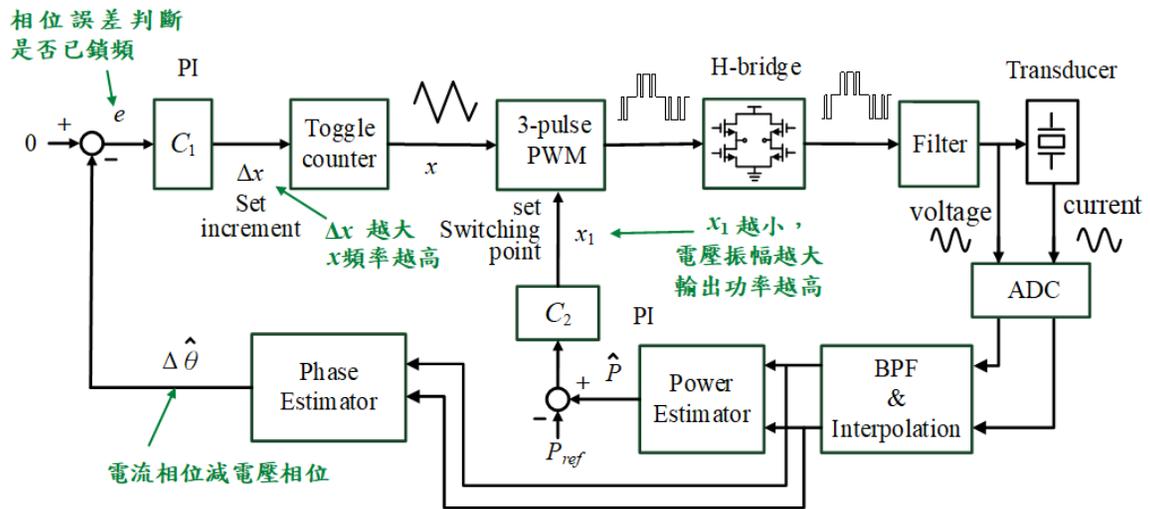


圖 8 頻率與功率回授控制架構（ C_1 為鎖相頻率控制器， C_2 為功率控制器）

高電壓低電流驅動，有助於降低導通損耗，提升效率並降低換能器溫度。

超音波熔接驅動控制器還需要隨著壓合的動作，同步控制驅動功率。典型的驅動功率曲線如圖 7。在此例中，壓合時間約為 0.3 秒，為有效的融接工件，在不同的壓合時期需有不同溫度；而溫度正比於驅動功率，所以功率控制就變得非常重要。若未直接控制驅動功率，有可能會發生接合點焊兩片纖維增強熱塑性材料（No energy director），在某不固定時間功率與溫度突增，造成過熱與聚合物崩解。因此高品質的驅動控制器需根據事先規劃的較佳的功率曲線，感測壓合的動作並同步控制驅動功率。

圖 8 為頻率與功率控制系統方塊圖。外迴路為鎖相頻率控制，偵測電流與電壓的相位差，調整驅動頻率，使相位為零；內迴路為功率控制，根據電壓與電流來估測平均功率，藉由改變 PWM 的 Duty Cycle 來改變電壓振幅，來控制功率。而功率級全橋功率電晶體，輸出端接濾波器後連接超音波換能器。

控制初始時以小功率驅動，未壓合時機械負

載小阻尼小，控制誤差大。當鎖相誤差 e 突然變小，代表有壓合動作，啟動功率控制，增大功率到指定值。預設融接時間到了，則降低功率停止驅動。短暫休息後，又開始小功率驅動同時偵測負載變動，等待下一次壓合動作。

圖 9(a) 口罩本體是用市售超音波控制器所熔接，而圖 9(b)、(c)、(d) 及 (e) 為工研院開發之 UW-20 智慧型數位超音波控制器以不同功率所熔接的口罩本體成品。由口罩邊印痕可以看出，操作在低段（檔位 4）功率，即可達到市售超音波發振器熔接的效果。圖 10 為工研院開發之超音波控制器，圖 11 驗證在檔位 4 可達與市售發振器相同振幅。因此推論操作在更高功率操作下應可提升至 200 片 / 分鐘的產能，進而帶動口罩機設備業者競爭力全面提升。

除了口罩熔接外，工研院開發之智慧型數位超音波控制器亦可提供汽車塑膠件（儀錶板、車燈）等防水及氣密需求應用。如圖 12 所示，當超音波控制器實功輸出 150 瓦時，塑膠熔接用焊頭振幅可達 55 μm 。

切削加工

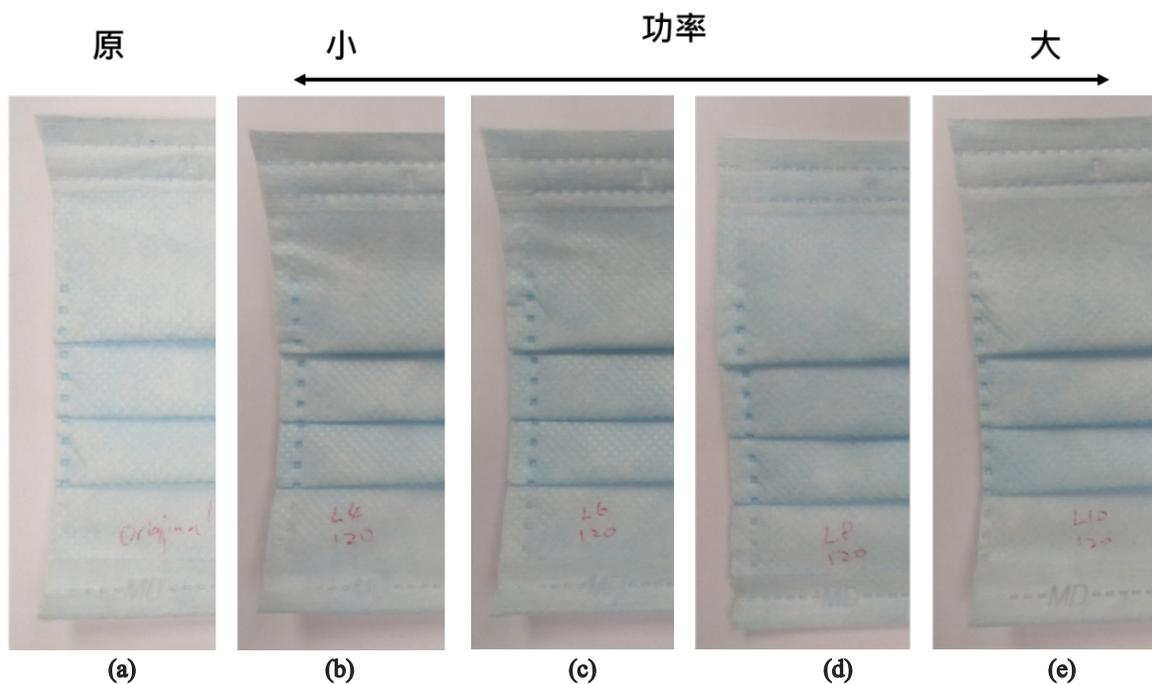


圖 9 口罩本體熔接測試



圖 10 工研院 UW-20 智慧型數位超音波控制器

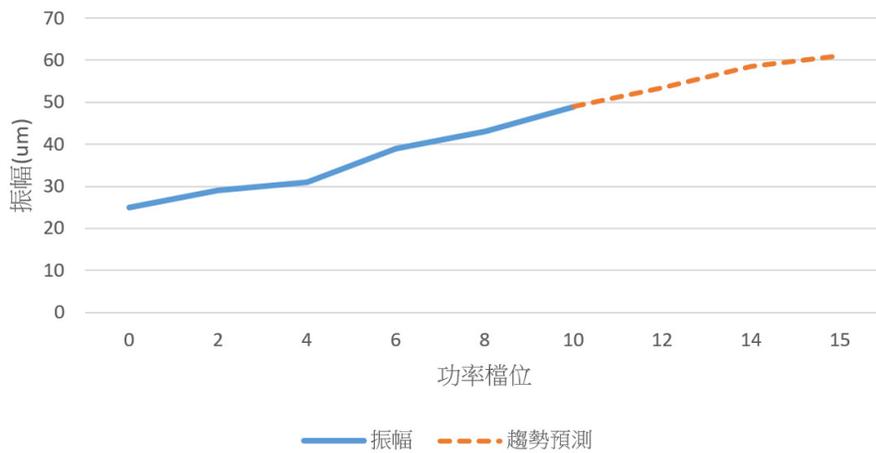


圖 11 工研院 UW-20 口罩熔接振幅量測

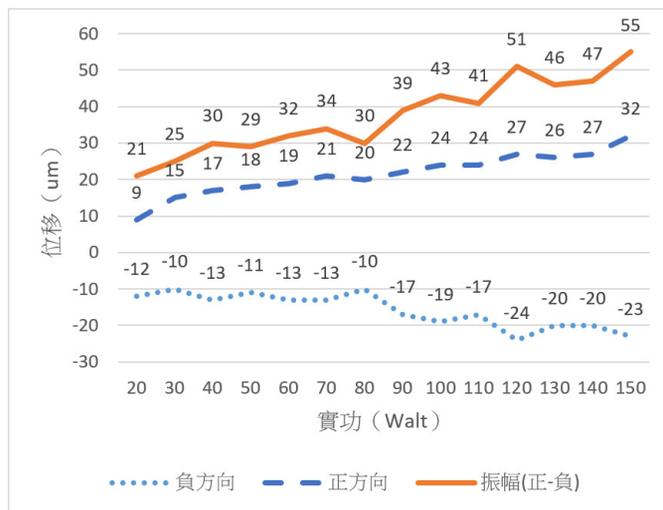


圖 12 工研院 UW-20 塑膠熔接振幅量測

相較於傳統切削加工，超音波加工可有效降低切削力，使刀具負荷降低，進而提升刀具的壽命。刀具（或工件）有規律強迫振動取代了工具和工件無規律的自激振動，亦可提升加工工件表面品質，有效提升加工精度。

有別於汰換既有設備升級至超音波輔助之機台，無線傳電超音波刀把可直接與現有的工具機主軸連接，進行超音波加工；相較於接觸式傳電主軸透過傳統電刷導電方式將高壓、高頻交流電流傳入轉動件，易因碳刷的磨耗等因素而限制了主軸的轉速。無線傳電方式可有效改善因高速旋轉過程中電刷摩擦產生溫度過高之現象，大幅提升超音波主軸的加工效能並突破其轉速之限制，

同時也能大幅增加使用的操作效率與加工時的穩定性。

加工過程中由於切削負載變化、刀具磨耗及溫升影響，造成超音波刀把阻抗特性變化，導致振動量不穩定。加上刀把共振頻率改變，迫使無線傳電操作頻率改變，導致一次側能量無法有效率地傳遞至二次側。因此無線傳電頻率操作設計及控制，將成為超音波控制器及刀把研發的關鍵因素。

無線傳電超音波刀把一二次側阻抗量測結果如圖 13 所示，圖 13(a) 一次側阻抗呈現典型的電感阻抗，僅在 32.15 kHz 附近（換能器的共振點附近）其相位及大小有些微變化，難以作為鎖頻的

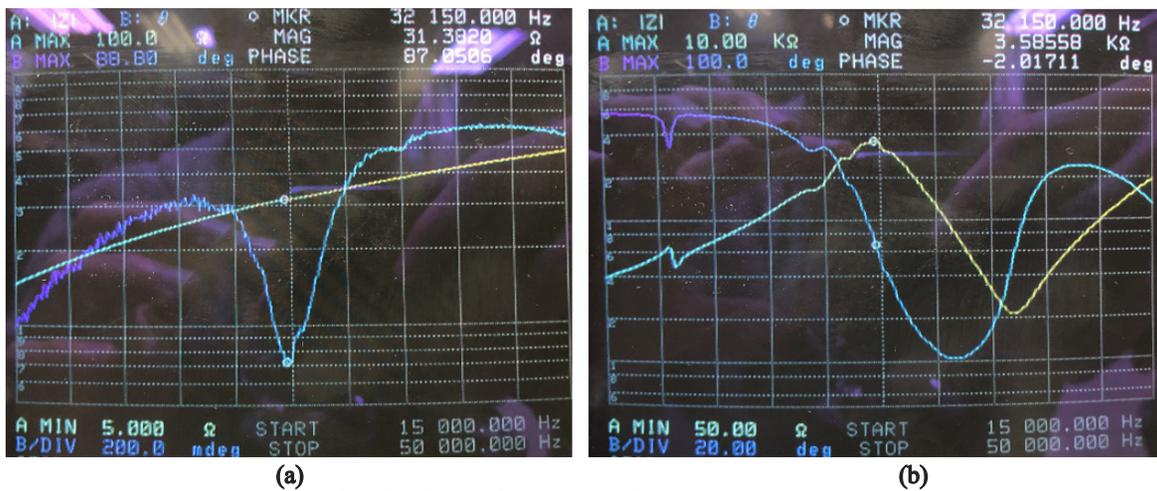


圖 13 無線傳電超音波刀把側阻抗圖 (a) 一次側 (b) 二次側

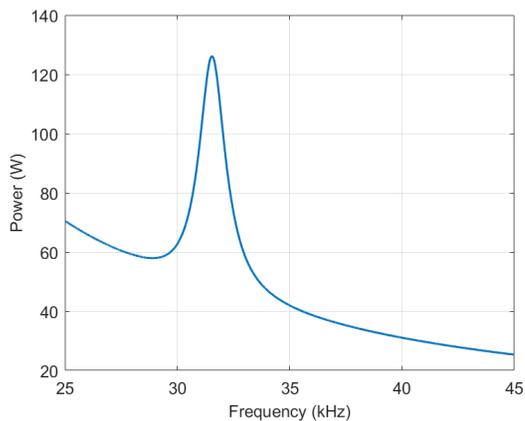


圖 14 200 Vrms 電壓驅動頻率 - 功率圖

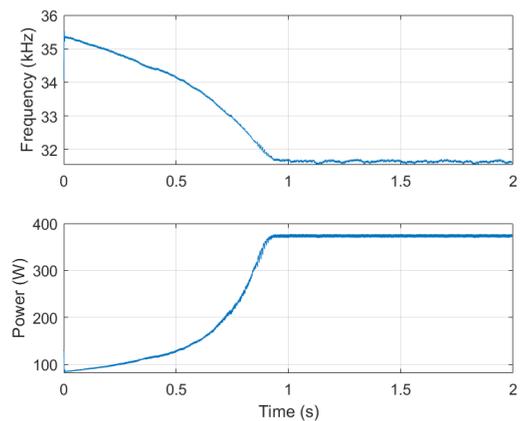


圖 15 最大功率追蹤演算法模擬

依據。如圖 14 若以固定電壓但不同頻率驅動，在換能器的共振頻率附近可得驅動功率峰值，故使用最大功率追蹤控制作為鎖頻的方法。

以最大 PWM duty (modulation index=1) 驅動，模擬最大功率追蹤演算法，如圖 15 所示，不到 1 秒鐘鎖頻在最大功率處，約 32.15 kHz。此頻率驅動電壓與電流的弦波振幅 308 V 及 10.3 A，但因為低功率因數（抗相位很接近 90 度），最大功率僅有 375 W。

結論

透過掌握陶瓷壓電片特性，未來能將振盪子外型微小化、振幅提升，以利精密控制技術精進，提供各式應用不同共振頻率及頻寬之客製化振盪子。超音波控制器自動追頻技術，免除廠商出機前量測被動元件偏差值及測試電路是否能匹配振盪子，而使用者也無須於操作前參考電流表調整操作頻率。另外，超音波控制器功率控制技術，透過閉迴路補償輸出功率，可提高長時間運作下穩定性，以達良好加工效果。

誌謝

本計畫承工業技術研究院的支持，計畫編號 K101W18E00，使本計畫得以順利進行，特此致上感謝之意。

參考文獻

- [1] <https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%B6%85%E8%81%B2%E6%B3%A2>
- [2] <https://webbuilder.asiannet.com/ftp/460/index-09105.htm>
- [3] <https://www.omegasonics.com/ultrasonic-cleaning-2/how-ultrasonic-waves-produced/>
- [4] <https://www.novafon.tw/ultrasound-physical-therapy/>
- [5] <https://heho.com.tw/archives/44551>
- [6] <https://www.ntuh.gov.tw/cmio/Fpage.action?moid=2322&fid=2169>
- [7] <https://www.dukane.com/blog/2010/03/11/how-does-your-ultrasonic-probestack-work/>
- [8] *Journal of Manufacturing Systems*, Volume 48, Part B, July 2018, Pages 45-54
- [9] K. Kardys, et al., “Universal ultrasonic generator for welding,” *ACTA Physica Polonica A*, 2013.
- [10] Y. Wang, M.J. Draper, S.M. Denley, F.V.P. Robinson, P.R. Shepherd, “Control scheme evaluation for class-D amplifiers in a power-ultrasonic system,” *Proc. 6th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives*, 2012.
- [11] S.H. Yu and J.S. Hu, “Optimal Synthesis of a Fractional Delay FIR Filter in a Reproducing Kernel Hilbert Space,” *IEEE Signal Processing Letters*, Vol. 8, No. 6, pp. 160-162, June 2001.