

利用駐波式超聲場之創新空氣懸浮微粒過濾技術設計與開發

王聖禾

南臺科技大學 機械工程系

Sunhur0315@stust.edu.tw

摘要

隨著科技發展，各國開始注意空氣汙染造成的危害；尤以懸浮微粒（PM₁₀、PM_{2.5}）會對人呼吸道與心血管疾病造成危害，因此懸浮微粒的清除與過濾近幾年成為各國積極開發目標。由於懸浮微粒的來源大部分來自於工業工廠的廢氣排放，導致工廠廢氣清淨與過濾設備的需求日趨增加。目前工業界最常見懸浮微粒的處理方式為採用袋濾集塵器（baghouse dust collector），透過纖維薄膜的袋狀過濾器，可有效抑制微小粒徑粉塵之排放。然而過濾的懸浮微粒將會堵塞濾布的過濾孔隙，同時微粒間的表面作用力將導致粉塵黏著於濾網上，阻礙廢氣的過濾與排出，導致過濾效率隨時間減少。有鑑於此，本論文提出透過建立超音波聲音懸浮之非接觸微重力技術，利用所設計的壓電振動子產生超聲波，互相耦合產生出一套高強度且穩定的駐波式超聲場懸浮架構。使廢氣內的懸浮微粒可聚集在駐波的節點上，實現抑制懸浮微粒的空氣清淨效果。本論文所提出的超聲場粉塵移除技術可實現非接觸分離粉塵與氣體，不須濾網需求即可達到微粒抑制成效，可避免因懸浮微粒黏著濾網導致過濾效率低落。

關鍵詞：壓電振動子、超聲波懸浮技術、非接觸空氣清淨、超音波聲壓耦合

Design and Achievement of a Novel Suspended Particle Elimination Method with Standing-wave Type of Ultrasonic Acoustic Levitation Technology

Sheng-He Wang

Department of Mechanical Engineering, Southern Taiwan University of Science and Technology

Abstract

With the development of industrial technologies, air pollutions are always a very critical issue, especially the harmfulness of suspended particles, such as PM₁₀, PM_{2.5}, etc., which could endanger human health and result in respiratory and cardiovascular diseases. Therefore, developing the methods of suspended particles removal and purifier has become a significant topic of research. According to the analysis of suspended particulate sources, in Taiwan, the greatest resource is the exhaust emissions generated from the industrial production processes and factories (23%). As for the equipment of exhaust emission purification, a dust collector baghouse is the most popular method to remove suspended particles for its advantages of simple structure, low cost, and high filtering efficiency. However, the filtered suspended particles will block the filter pores of the filter cloth, and the surface force between the particles will cause the dust to stick to the filter screen, which hinders the filtration and discharge of exhaust gas, and causes the filtration efficiency to decrease over time. In order to filter out ultra-fine particles, a non-contact microgravity technology by acoustic levitation was proposed in this paper. A piezoelectric transducer was utilized to generate ultrasonic waves. According to the plane-wave transmission theory, the location of a reflection plate can be estimated to build a stable and strong strength field of standing-wave acoustic levitation structure. With the use of the standing-wave acoustic levitation structure, the suspended particles in the

Received: Aug. 18, 2021; first revised: Sep. 23, 2021; accepted: Oct. 2021.

Corresponding author: S.H. Wang, Department of Mechanical Engineering, Southern Taiwan University of Science and Technology, Tainan 710031, Taiwan.

exhaust gas can be fixed at the nodes of the standing wave, and the ultra-fine dust can be separated from the exhaust emissions to reach the effect of air purification. Therefore, in this paper, a contactless purification technology with ultrasonic sound pressure can realize non-contact separation of dust and gas and achieve particle suppression effect without the need of a filter. This can avoid the problem of low filtration efficiency caused by the adhesion of suspended particles.

Keywords: Suspended Particle, Non-contact Purification Technology, Acoustic Levitation, Ultrasonic Acoustic Source, Microgravity Technology

壹、前言

近代的科技提供人類富足舒適的生活，然而隨著科技發展所帶來的環境污染，反而危及人類的健康與生存，因此與身體健康相關議題越來越受到人們重視。其中空氣為人類及生物賴以生存的重要元素之一，尤以成人每分鐘空氣呼吸量約為 7~14 公升，甚至於劇烈運動時，每分鐘呼吸量更超過 50 公升空氣[1]。由此可知每日所呼吸空氣之品質極有可能造成身體危害、空氣污染也為當前各國共同面對的嚴肅課題。空氣污染物可根據其相態分為氣狀污染物與粒狀污染物。常見的氣狀污染物有氮氧化物 (NO_x)、硫氧化物 (SO_x)、臭氧 (O₃)、揮發性有機物 (VOCs) 等[2]。暴露於這些氣狀污染物可能導致健康危害，如：臭氧會刺激呼吸道系統，而當暴露於臭氧高濃度時，與呼吸道疾病相關之死亡風險也會上升 (Jerrett et al. 2009) [3]。而粒狀污染物則包括 PM₁₀、PM_{2.5} 等不同粒徑大小之懸浮微粒。懸浮微粒可能對人體產生之危害：皮膚過敏、呼吸道發癢與心血管疾病 (Kim et al. 2016; Oberdorster 2001; Peters et al. 1997) [4-6]。由美國學者研究證實每增加 10 μg/m³ PM_{2.5} 濃度，非意外死亡與缺血性心臟病之風險比 (hazard ratio) 分別為 1.10 與 1.30，還會使肺癌死亡率增加 8% [7]，根據聯合國世界衛生組織 (World Health Organization, WHO) 在 2018 年之研究指出，在 2016 年約有 700 萬人的死因與室內與室外空氣污染相關[8]。並同時研究指出死亡率與肺癌死亡率分別升高 4%、6% 以及 8% (Pope III et al. 2002) [9]。而肺癌也是台灣近年成長速度最快的癌症，到了 2013 年，肺癌已經大幅領先，取代肝癌成為癌症第一大殺手。由此可知懸浮微粒係空氣汙染中危害人體健康最重要的影響因素，細懸浮微粒是粒徑小於 2.5 微米的粒子，由於人體很容易吸入細小的微粒，而且吸入後還會堵塞肺泡，甚而穿過肺泡進入血管，進而影響呼吸系統或其他器官。吸入微粒對健康的危害如圖 1 所示，造成操作人員頭痛、眼睛紅腫、流鼻血、喉嚨痛，嚴重者造成哮喘等呼吸道疾病[10]，因此微粒的體積越小，健康風險就會越高。由此可知 PM_{2.5} 係造成身體危害最嚴重的空氣汙染物，有鑒於此，世界衛生組織 (WHO) 制定細懸浮微粒指標，PM_{2.5} 濃度必須低於 10 μg/m³，若數值愈超標，則代表環境愈糟[8]。然而據環保署指出，我國細懸浮微粒 (PM_{2.5}) 年平均濃度中，約 34%~40% 自境外傳輸，也就是鄰近國家的空氣汙染物隨著大氣環流或季風傳到我國。另約 60%~66% 來自境內污染源，包括工業源 (如電力設施、鍋爐、鋼鐵業、石化業、水泥業、化學製品製造)、移動污染源 (如交通工具) 及其他污染源 (如餐飲油煙、營建揚塵、露天燃燒) [11]。而依我國空氣汙染物排放清冊資料統計[11]，全國之 PM_{2.5} 總排放量為 73,855 公噸/年，其中工業為 16,865 公噸/年，占全國 PM_{2.5} 排放量比率為 23%。此外，以大氣汙染狀況嚴重的中國，於 2017 年開始亦要求工廠的粉塵排放量從 30 μg/m³ 逐漸降低至 10 μg/m³ [12]。由此可知，清除或過濾工廠有害物質的排放逐漸成為各國空氣汙染防制的重要議題。

貳、目前工廠廢氣粉塵清淨方式

早期工業界處理廢氣懸浮物係採用旋風集塵方式 (cyclone dust collector)，其基本原理示意圖如圖 1 所示[13]。當氣體進入集塵器內部時被迫旋轉，透過離心力，懸浮物將偏離原本廢氣流動方向，往徑外方向運動，最後到達旋風集塵器的內壁而被收集，當粉塵累積到一定量後因重力及外部的振動力量掉到底部的漏斗裡。旋風集塵器依進氣方式分成上部進氣式 (圖 1a)、及下部進氣式 (圖 1b) 等二種型式。旋風集塵方式結構簡單，容易設置且所佔空間小，是一種低成本的集塵設備，然而由於透過旋轉運動的慣性使懸浮物與氣流分離，因此僅適用於 $15\sim 40\mu\text{m}$ 較大粒徑的懸浮微粒，對於直徑在 $10\mu\text{m}$ 以下的微粒去除效果不佳[14]，造成旋風集塵方式的除塵效率低，不符合目前空氣品質的標準。

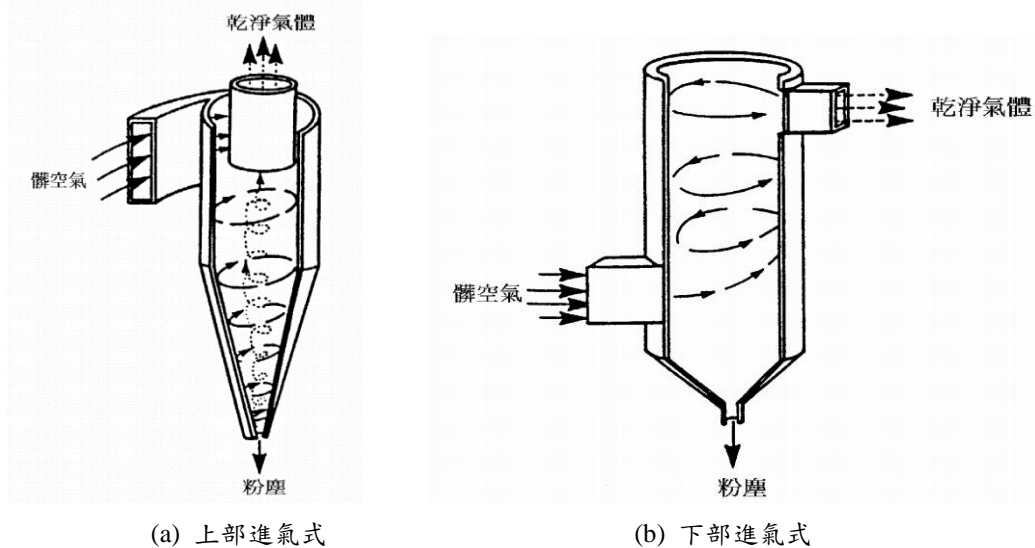


圖 1 旋風集塵方式[13]

由於透過濾網隔絕微粒的清淨方式其架構簡單，無需額外高壓電氣設備，清淨成本低等優勢，因而成為目前工廠廢氣處理最常見的懸浮微粒清除方式。為便於處理過濾後的粉塵，濾網大都採用玻璃或鐵氟龍纖維薄膜製成的袋狀過濾器，因此稱之為袋濾集塵器或濾袋屋，其內部架構如圖 2 所示。工廠的廢氣流經袋濾集塵器，穿過纖維薄膜的濾袋，廢氣的懸浮微粒將會被纖維濾布擋住，並收集在濾袋內部，乾淨空氣便可從濾袋外部逸出，最後粉塵將能從濾袋自由的掉到下方的排放裝置 (收集斗) [15]。為能處理工廠 24 小時排放廢氣的過濾，濾布濾材需連續重複使用，袋濾集塵器也需定期自動清除附著於濾布的微粒；依據清除方式分成機械振盪式 (mechanical shaker baghouse)、脈衝噴氣式 (pulse jet baghouse) 及反洗空氣式 (reverse air baghouse) 三種[16]，其架構圖如圖 3 所示。

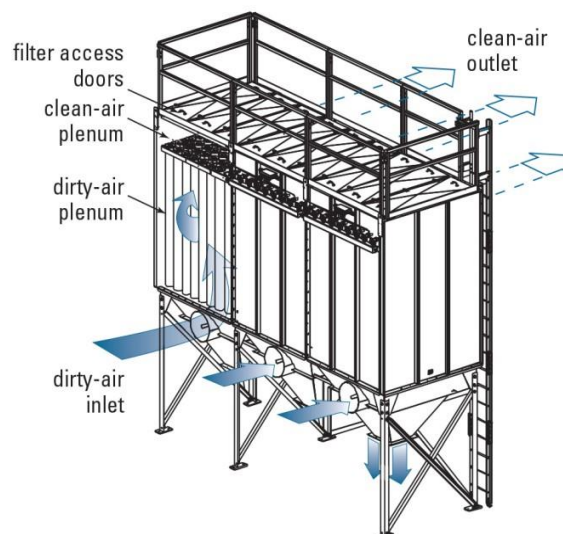
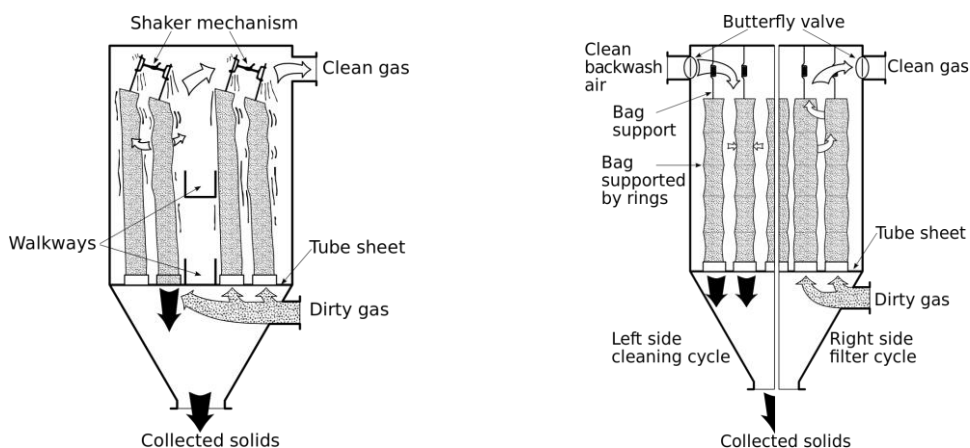
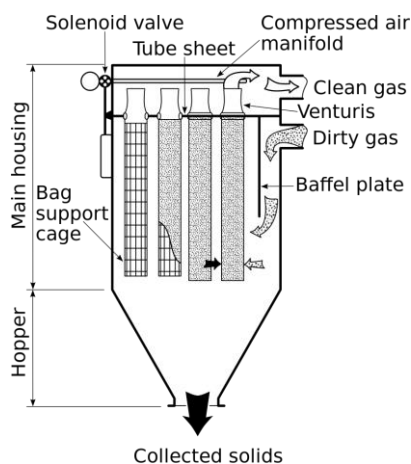


圖 2 袋濾集塵器架構



(a) 機械振盪式(mechanical shaker baghouse)

(b) 反洗空氣式(reverse air baghouse)



(c) 脈衝噴氣式(pulse jet baghouse)

圖 3 袋濾集塵器清除粉塵架構[17]

在機械振動式清除方式中（圖 3a），骯髒的氣體進入集塵室的底部並通過過濾器，灰塵聚集在集塵袋的內表面。為能透過機械振動清除集塵袋內表面的微粒，一般將集塵袋頂部連結單槓與凸輪機構，藉著透過馬達傳動凸輪使得集塵袋產生振動來抖落粉塵。機械振動清除方式結構簡單且維修方便，但透過機械振動可能會在集塵袋產生靜電而引起火花，因此不能使用在微粒濃度高的場合[18]。於反洗空氣清除方式（如圖 3b 所示）透過隔板分隔成 2 區允許個別清除粉塵，當開始清潔循環，要清潔的隔室中的過濾已停止。通過反方向向隔壁隔間的集塵袋中注入清潔空氣來清潔袋子，從而對隔室加壓。壓力使濾袋部分塌陷，導致粉塵掉入下面的漏斗中。在清潔週期結束時，反向氣流停止，隔間返回主流。由於反洗空氣清除方式分隔成 2 區個別清除，可連續運行清除動作而不會中斷廢氣過濾；且反向清潔的空氣未離子化，可消除集塵袋內部的靜電荷，進而避免靜電火花的產生[17, 19]。然而需要分隔 2 區，並需調控清潔空氣反向注入隔室，因此反洗空氣清除方式的空間需求大；且為防止在清潔週期的逆壓導致集塵袋倒塌和織物擦傷，因此集塵袋需透過金屬籠（過濾籠）支撐，導致濾材成本的上升[17, 19]。

脈衝噴氣清除方式（如圖 3c 所示）為透過閥門控制，透過高速切換閥門（約 0.1 秒）壓縮空氣產生高壓吹淨空氣，透過高壓空氣噴射集塵袋，並使濾袋的表面產生脈衝振動，透過該脈衝振動波於表面傳遞，則附著於集塵袋的粉塵將可因震動而掉落至底部。脈衝噴氣清除方式具有前述 2 者清除方式的優勢，可連續清除動作而不中斷廢氣過濾流程，且空間需求不大，但空氣噴嘴必須正確對準，以便脈衝指向集塵袋的中心，錯位將會導致濾袋頂部破裂[19]。

以上可知，袋濾集塵器的清潔係透過振動、壓力方式，加上粉塵自身重量，藉此將粉塵脫離並抖落集塵袋。然而隨著科技的發展，人們對空氣懸浮微粒的要求越來越嚴格，尤其發現細微粒達到 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 對人體健康的危害甚深，使得近幾年亞洲各國紛紛要求工廠廢氣清淨達到 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 過濾等級，進而對造成對抑制工廠細微粒排放的過濾器需求日益增加。根據尺寸比例率 (scaling laws) 可知當物體尺寸越小，物體的表面作用力將會超過本身重力[20-21]。圖 4 顯示在夾持不同尺寸的物體，物體與夾具之間的作用力大小，由圖可知當物體尺寸小於 10^{-5} 公尺，物體之間表面作用力如靜電力 (electrostatic forces)、凡得瓦力 (Van der Waals force)、表面張力 (surface tension force) 等將會超過本身重量，造成黏著問題 (Stiction Problem) 而使得物體無法順利被夾持與放置[22]。同樣的問題亦發生在細懸浮微粒 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 的過濾， PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 係指粒徑小於等於 10 或 2.5 微米 (μm , 10-6m)，雖可透過濾布種類與編織的密度達到微米級以下的過濾，同樣由於達到微米等級，因微粒表面作用力超過重力，使得無法透過振動方式利用粉塵自身重量脫離濾布，且細微粒將堵塞濾布的過濾孔隙，導致粉塵清淨效率的低落、無法長時間運作。有鑑於此，各國工廠廢氣集塵器的製造商積極找尋可解決的方案，希冀找尋無須濾網即可達到抑制或過濾細懸浮微粒的效果。

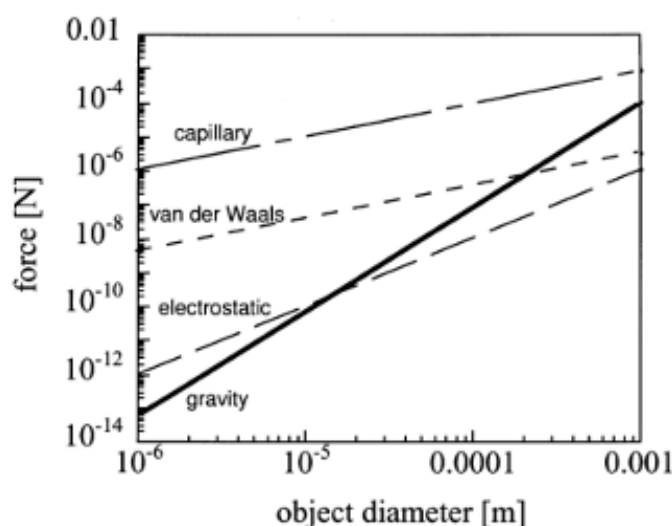


圖 4 依物體尺寸所產生的作用力[20-21]

參、駐波式非接觸超聲場之介紹

為能克服傳統振動方法無法清除濾網孔隙的微粒，本文提出透過無容器之非接觸微重力技術。藉由微重力讓粉塵與氣體分離，且粉塵未跟濾網接觸，便不會有表面作用力的影響而導致粉塵黏著於濾網上。目前所發展的非接觸漂浮技術種類有氣浮 (aerodynamic levitation)、磁浮 (magnetic levitation)、聲浮 (acoustic Levitation)、光浮 (optical Levitation) [23]，其中發展較為成熟的有氣浮和磁浮二種非接觸技術，但基於不同之操作原理，各有其應用場合上的限制。如磁浮是利用電磁力來克服漂浮物的重力，會限制僅應用在具有磁性或導磁性材料上[24]；而氣浮則是利用泵，噴出高壓的空氣來克服漂浮物的重力，卻因氣壓無法均勻施力在漂浮物的表面上，容易產生力量偏移，因此只能漂浮外型簡單且對稱的物件 (如平板)[25]；其中聲波漂浮技術 (coustic levitation) 是利用駐波式超音波聲場 (anding-wave ultrasonic acoustic field) 來增加其聲壓，達到能夠克服物體的重量而漂浮，此技術具有不受漂浮物材質與外型限制之優點。本計畫預期透過駐波式超聲場非接觸技術，實現一套空氣懸浮微粒非接觸清淨系統。

聲音懸浮最早在 1975 年由 Whymark 提出[26]，並於 1866 年由德國的 August Kundt 發現圓管內會產生駐波[27]，因而證實聲浮現象之存在。駐波型聲壓懸浮的原理類似於雷射的共振腔，但因聲源的聲壓

很小，較不易支撐物件的重量，便需靠裝設反射裝置；利用波疊加原理來使其聲波在不斷的反射與干涉後，將聲壓不斷的提升，最後當聲壓能抵銷物件的重力時，物件就能夠漂浮。一般駐波型聲壓漂浮的結構如圖 5 所示，包含振動源及反射板，可存在開放或是密閉式的空間。當振動源做高頻振動時，其表面將產生聲波，此聲波傳遞經由反射板反射後，會與振動源所產生的聲波互相干涉，而增加其振幅。根據波的疊加理論，其所合成的波形為駐波，因此在振動源與反射板之間的聲壓分佈也呈現為駐波形式。在駐波上的各質點振盪的幅度皆不相等，所以將振幅為零的點稱為節點或波節 (node) [27]，即節點位置的聲壓為零，離節點越遠其聲壓越大。從牛頓運動第一定律可知，物件會在其聲壓可克服本身重力的位置漂浮，因此每一個節點附近都可以讓物件漂浮，此外由於駐波的節點是固定的，所以物體會在特定位置上漂浮。

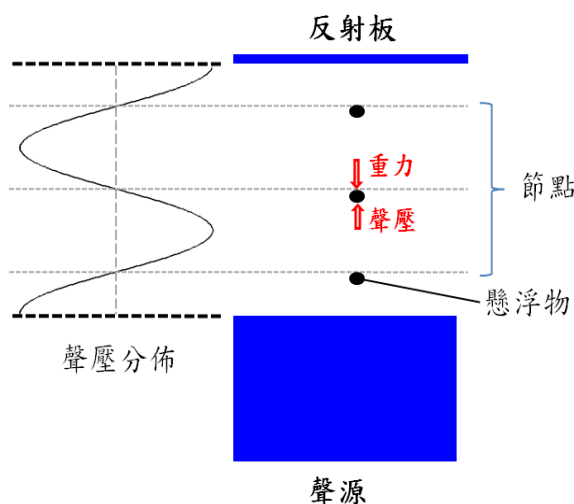


圖 5 駐波型聲壓懸浮的原理

肆、駐波式非接觸超聲場分析與模擬

一、駐波式超聲場理論分析

根據前述的單軸聲浮原理，為能克服物體的重量，聲壓懸浮需操控在駐波共振條件以獲得最大聲壓分佈。為能便於分析操作條件，因此考慮在聲場中的超音波皆為平面波形式。假設忽略流體（空氣）的熱傳導效應，並且沒有其他外力作用在流體上，則聲波可用連續波方程式來表示[28]；

$$\nabla^2 \phi - \frac{1}{c_0^2} \frac{d^2 \phi}{dt^2} = 0 \quad (1)$$

其中 c_0 為聲音在流體行進的速度。而聲波的速度勢 (Velocity potential) ϕ 可由梯度函數 (Gradient function) ∇ 計算獲得，並依據直角座標形式個別微分計算 ($\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$)。因此依據速度勢的關係，聲波的壓力與速度可分別計算獲得。

$$\text{聲壓： } P = -\rho_0 \frac{d\phi}{dt} \quad (2)$$

$$\text{聲速： } v = \nabla \phi \quad (3)$$

其中 ρ_0 為流體的密度。圖 6 為駐波式聲浮架構的操作條件，假設超音波聲源的表面位置為 $z=0$ ，距離聲

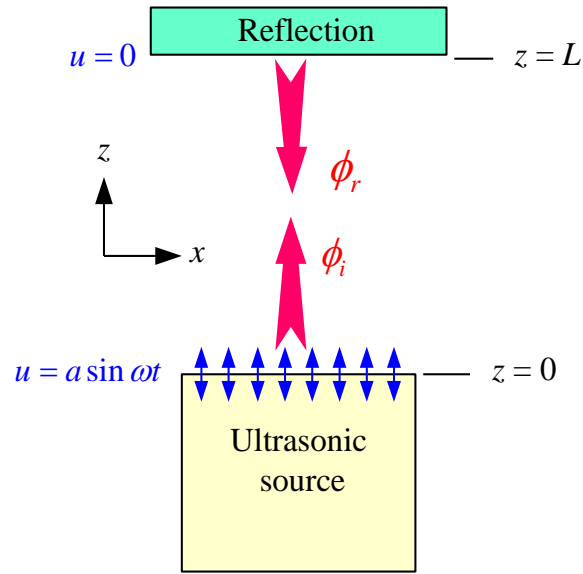


圖 6 駐波型平面聲波理論的邊界條件

源表面為 L 的位置裝設一個反射板 ($z=L$)，僅考慮平面聲波在垂直方向上 (z 方向) 移動。因此從超音波聲源發射的入射波和從反射板回彈的反射波，這 2 者的速度勢分別可表示為 ϕ_i 和 ϕ_r 。根據亥姆霍茲方程式 (Helmholtz equation)，入射波和反射波的速度勢可分別表示為：

$$\phi_i = A_I \exp[i(\omega t - kz)] \tag{4}$$

$$\phi_r = A_R \exp[i(\omega t - k(L - z))] \tag{5}$$

其中 ω 為超音波聲源表面振動的頻率、 k 為波動常數 ($k = \frac{\omega}{c}$)、以及 A_I 和 A_R 分別為入射波和反射波速度勢的振幅大小。由於在駐波式超聲場係透過入射波和反射波耦合而成，依據平面波疊加原理 (Superposition principle)，駐波聲場的速度勢可表示為：

$$\phi = \phi_i + \phi_r \tag{6}$$

同時，依據超音波聲源與反射板的表面震動速度，其邊界條件可如下定義：

$$\frac{\partial u}{\partial t} \Big|_{z=0} = a \omega \cos \omega t, \quad \frac{\partial u}{\partial t} \Big|_{z=L} = 0 \tag{7}$$

其中 a 為聲源表面的震動振幅。因此依據方程式 (7) 的邊界條件，駐波聲場的速度勢可計算獲得：

$$\phi = \frac{a \omega}{-k \sin kL} \cos \omega t \cos kz \tag{8}$$

同樣，依據方程式 (2) 速度勢與聲壓的關係，可以計算出駐波聲場的聲壓分佈如下：

$$\hat{P} = \frac{\rho_0 a \omega^2}{-k \sin kL} \cos kz \tag{9}$$

由方程式 (9) 可知，駐波聲場的聲壓分佈為弦波形式 ($\cos kz$)，且聲壓大小受流體密度 (ρ_0)、聲源振幅 (a)、和反射板距離 (L) 所影響。由於駐波超聲場達到共振可以獲得最大聲壓分佈，所以由方程式 (9) 可知要獲得最大聲壓值的共振條件為 $\sin kL = 0$ 。依據弦波的分佈，反射板與超音波聲源的距離條件可計算獲得

$$L = \frac{n\pi}{k} = \frac{n}{2}\lambda, \quad n = 1, 2, 3, 4 \dots \quad (10)$$

除了達到共振所需要的間距外，由於超聲場分佈為駐波型式，聲場內部的壓力分佈曲線可以發現具有聲壓為零的點，稱為節點（pressure node）。透過力平衡觀念，物體的重力可以被聲壓抵銷，進而懸浮在節點位置。而依據方程式（9）的駐波聲壓分佈可以獲得聲壓為零的節點位置為：

$$L_p = \frac{(2n+1)\pi}{2k} = \frac{2n+1}{4}\lambda, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (11)$$

二、駐波式超聲場模擬分析

除透過平面聲波理論計算超聲場共振條件外，為能分析超聲場的懸浮特性，本文利用有限元素分析軟體ANSYS來模擬聲場的聲壓分佈。超音波聲源為圓盤外型的面積振動，整個超聲場可假設為圓柱的對稱架構，可將模擬分析簡化為2D半平面的模型，其模擬架構如圖7所示。其中反射板與振動源材質模擬為鋁合金，於聲場模擬中，流體與結構的接觸面建立空氣與金屬的轉換介面（interface）。此外，為模擬聲波在開放空間行進，在模擬結構外圍定義為無限層，採用1/4圓的外型，任何的聲波到無限層能量都會被吸收。同時，考量近場聲波（near sound field）的影響，於聲源與反射板的表面需設計固體-流體的交互作用層（fluid-solid interaction, FSI）。

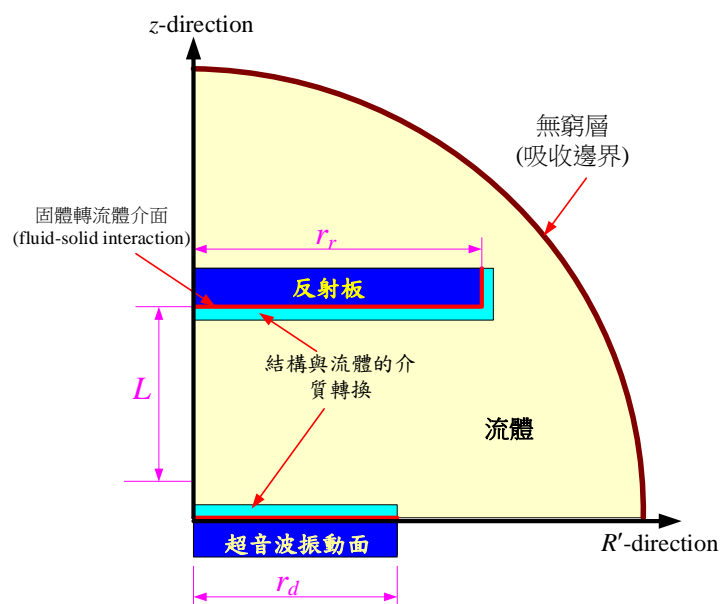


圖7 於ANSYS的有限元素分析模型

為能模擬駐波式超聲場的聲壓分佈，須先了解產生共振的操作條件。假設所選用的超音波聲源操作在28 kHz，並且聲音在室溫27 °C空氣中傳遞的速度 C_0 約為 347.6 m/s [29]，依據聲速與操作頻率的關係（ $\lambda = \frac{C_0}{f}$ ），則超音波在空氣中傳遞的波長可計算約為 12.4 mm。根據方程式（10），若希望所操作的駐波超聲場內部具有4個節點，則超聲源與反射板的距離可計算出約為24.8 mm。將以上產生駐波式超聲場的所有操作條件列於表1。

依據表1的操作條件，駐波式超聲場的聲壓分佈可透過有限元素分析軟體 ANSYS 模擬，其模擬結果如圖8所示。由圖8可知，各種顏色顯示壓力的分佈，其中紅色、藍色分別表示正聲壓與負聲壓。可觀察到聲壓分佈呈帶狀分布，且每一個帶狀聲壓中間呈現綠色，代表該區域壓力與背景環境一樣，即表示聲壓為零的節點。此外，每一個帶狀聲壓的顏色呈現鐘形分佈，代表物體可以懸浮在節點位置上。同

時，由模擬的顏色分佈可得知，在高度達 24.8 mm 的超聲場範圍內，顯示共有 4 個節點（綠色分佈），由此可獲得符合理論分析的結果。

表 1 駐波式超聲場之模擬條件

參數	數值
振動頻率 f	28 kHz
空氣中聲速 C_0	347.6m/s
振動振幅 a	4 μm
與反射鏡間距 L	24.8 mm
振動面半徑 r_d	23 mm
反射面半徑 r_s	50 mm

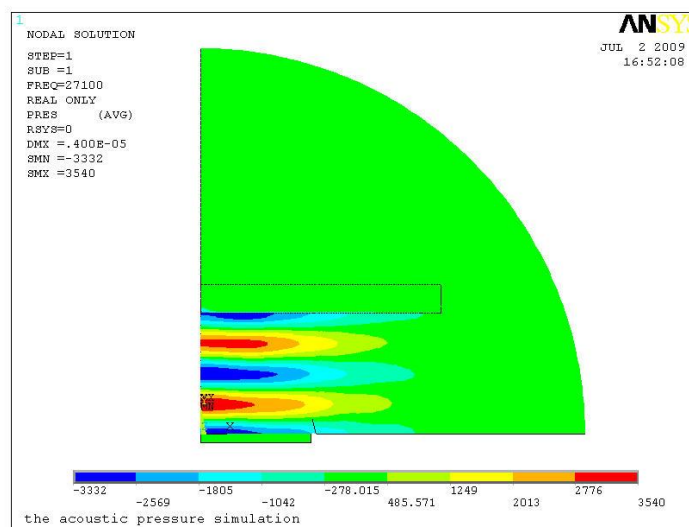


圖 8 駐波式超聲場之聲壓分佈模擬結果

同時透過模擬分析來驗證共振的條件，藉由之前設定的模擬模型與操作條件，在不同的超聲源與反射板間距情況下，於超聲場最大聲壓值的比較，其結果如圖9所示。可發現超聲源與反射板的間距會影響超聲場的耦合情況，導致聲壓分佈的變化。由於駐波式超聲場的共振行為可獲得最大的聲壓，依據圖9的模擬分析結果可知，獲得最大聲壓（共振）的間距約為 24.8 mm，此間距符合前述理論計算的 $L = \frac{n}{2} \lambda$ ，故可證明理論計算的正確性。

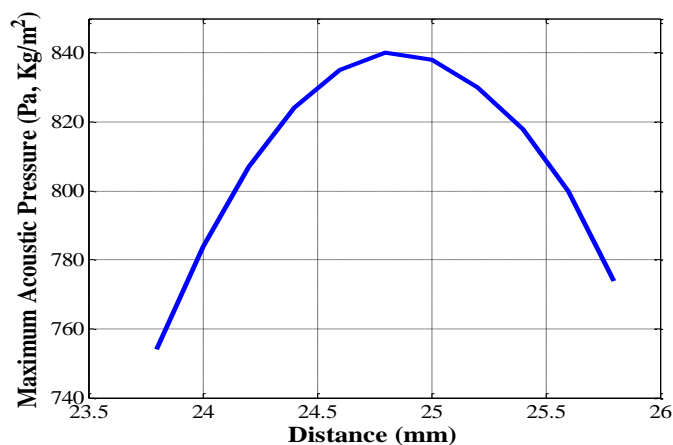


圖 9 超聲源與反射板的不同間距與最大聲壓值的比較

由上述平面聲波理論可知，駐波式超聲場的共振與反射板的間距 L 有關，而間距會影響駐波的強度以及駐波聲壓分佈的產生，但平面聲波理論並未考量近場聲波（near sound field）的影響，因此透過所建立的有限元素分析模型，比較不同間距下超聲場的聲壓分佈。模擬的聲場顯示正聲壓與負聲壓的分佈，且會隨時間變動，其變動曲線呈現正弦波，為方便分析懸浮特性，故將模擬的聲壓轉換成絕對值。同時於表1的模擬條件中，超音波聲源為放射 28 kHz 的高頻聲波，依據超音波於空氣中傳遞的速度 C_0 ，可估算超聲場內部的聲音波長約為 12.4 mm。為能分析反射板間距對聲浮特性的影響，本文分別採用一個節點（6.2 mm）、二個節點（12.4 mm）、與三個節點（18.6 mm）等不同間距來進行分析比較，其並將超聲場中央的聲壓分佈顯示如圖10所示。其中x軸為與振動源表面的距離，y軸為聲壓的絕對值。圖10（a）係間距約為6.2mm之模擬結果。由聲壓分佈可發現隨離開振動源表面聲壓逐漸降低，而在距離 1.6 mm 左右聲壓達到最低，之後聲壓又慢慢增加；由於節點為聲壓最低的點，因此由模擬結果可發現 6.3 mm 間距的超聲場具有一個懸浮點，符合平面聲波計算結果。惟振動源表面聲壓與節點聲壓的差距並沒有很大，可推論於一個節點的超聲場懸浮特性不佳。當反射板間距達到二個節點（12.4 mm）時，從圖10（b）的聲壓模擬分佈可發現，該超聲場具有二個聲壓較低的懸浮點，而第一個節點與周圍最大聲壓的差距較大，可得知該節點可穩定懸浮物體，惟第二節點的聲壓較大，與周遭最大聲壓的差距較小，顯示該節點無法穩定懸浮。而當反射板間距更進一步增加到三個節點（18.6 mm）時，從圖10（c）的聲壓模擬分佈可發現，該超聲場可明顯發現具有三個聲壓較低的懸浮點，聲壓分佈也較接近弦波的絕對值，每一個節點與周遭聲壓差異明顯，可顯示該聲場較接近平面波分佈。此外，3個節點皆可以穩定懸浮，因此後續該間距（三個節點）可用於超音波聲浮架構的建立，並實際測試非接觸式空氣懸浮微粒移除效果。

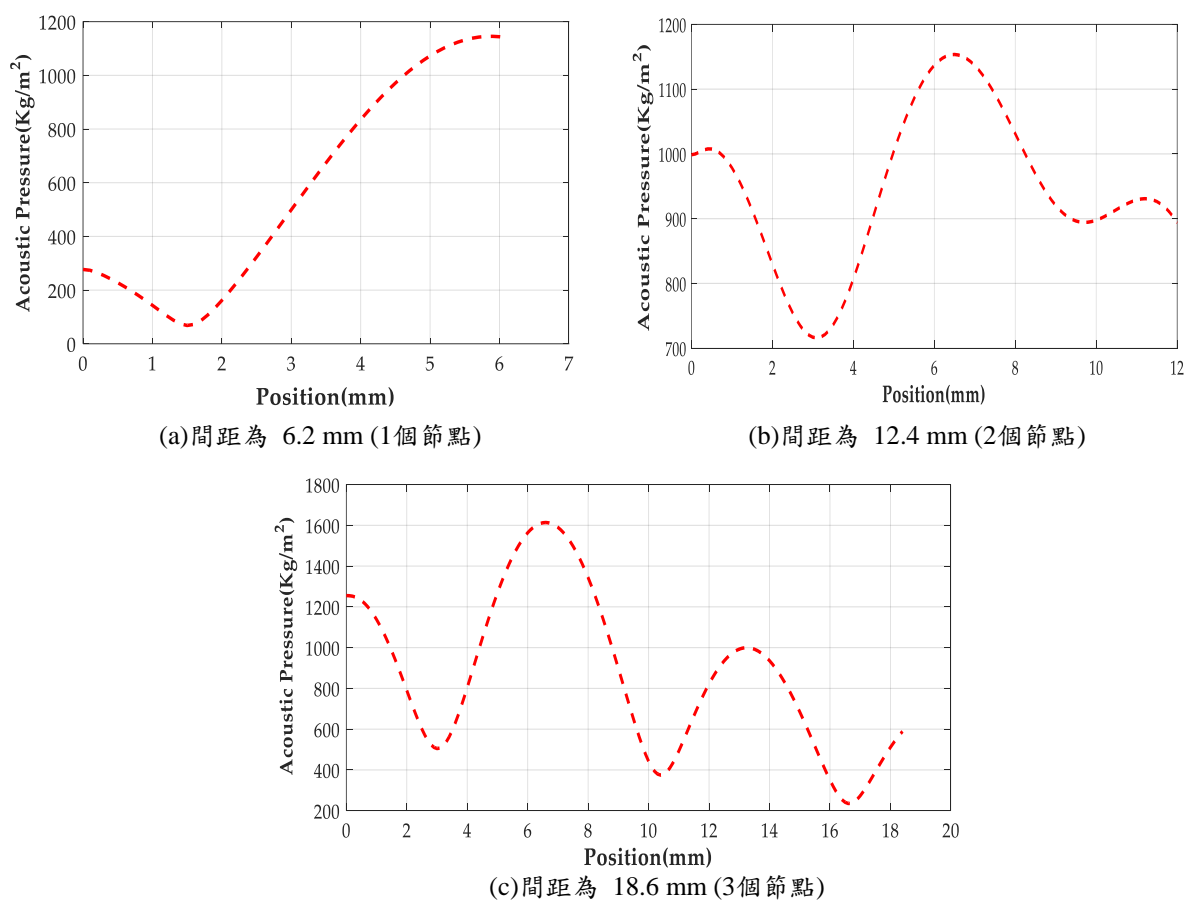


圖 10 改變節點數量，於不同間距下聲壓的分佈

伍、非接觸超聲場懸浮微粒移除實測

本文提出藉由超聲波懸浮技術實現非接觸式空氣懸浮微粒移除技術。首先，建立一套超音波聲浮架構，包含可固定超音波振動子之工作平台，以及反射面的調整平台，其架構如圖 11 所示。依據所需懸浮點（節點）數量，達到耦合最佳的駐波式超聲場強度，調整出至最適當之間距。此外，為避免要隔離的空氣微粒受外部氣流干擾，在所建置的超聲場周圍建置腔體，實現一個穩定之實驗可控環境。

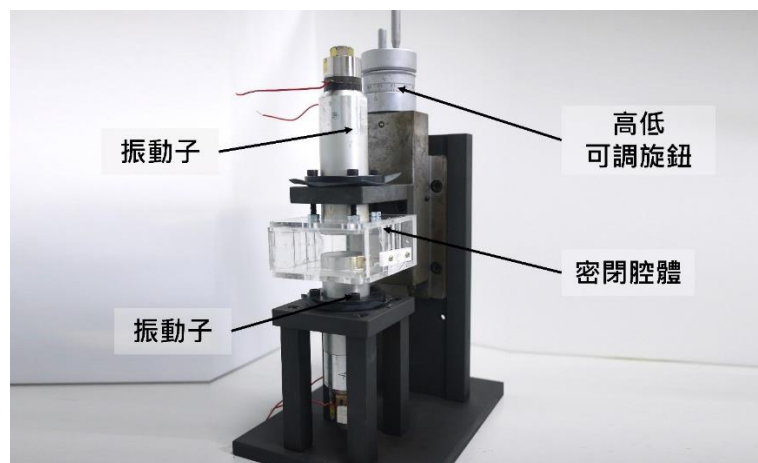
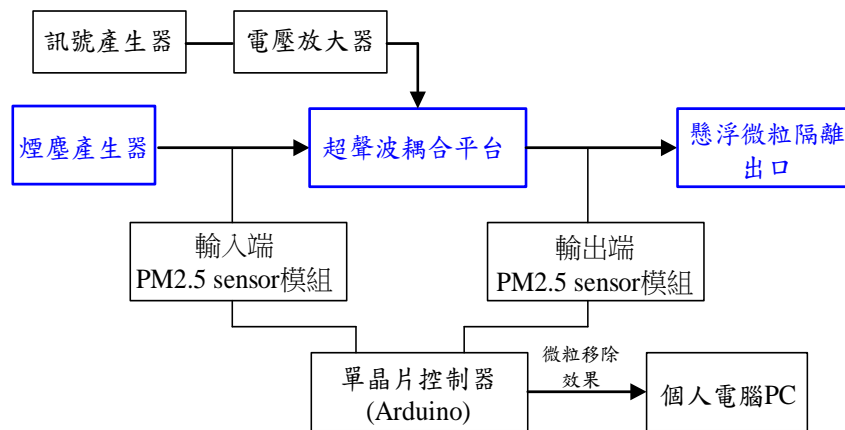


圖 11 所設計之超音波聲浮架構

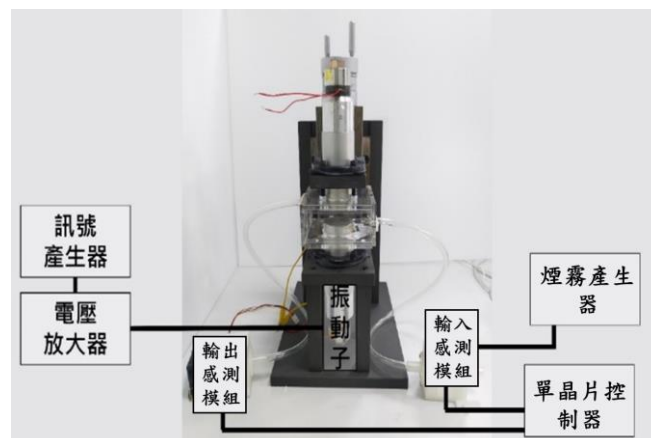
為驗證本文所提出超聲波懸浮技術可實現於非接觸式空氣懸浮微粒移除技術，需製造出具懸浮微粒的人工煙塵空氣。本文提出的非接觸式空氣懸浮微粒移除架構如圖 12 所示，透過線香來當作 $PM_{2.5}$ 懸浮微粒之來源，且利用鼓風扇可將人工煙塵空氣吹入所建置的超聲場，並透過調速電路，可調控鼓風扇產生的空氣壓力，以確保最佳的粉塵移除效率。而為量測本技術之懸浮微粒移除效果，於煙塵空氣輸入處裝設 $PM_{2.5}$ 濃度感測器 (SHARP GP2Y1010AU0F)。為偵測懸浮微粒的移除效率，藉由透過抽風風扇將所過濾的空氣流進 $PM_{2.5}$ 濃度感測器；為避免被外部空氣稀釋而造成量測誤差，透過空氣傳輸管連結至 3D 列印方式所製造封閉腔體，由於傳輸管的管徑太小會造成煙塵空氣不易輸送至所建立的超聲波耦合平台，導致微粒移除效率監測不易。經由實測，當管徑超過 12mm，煙塵空氣可於 5 sec 傳送至平台的出口，因此後續實驗採用管徑 12mm 的傳輸管來獲得最佳的空氣傳送效率，以利計算粉塵的移除效率。

依據前述的各模組架構，可建立所設計之創新式非接觸懸浮微粒移除平台，其整體實體照片如圖 12 (b) 所示，又其內部各模組之間的關係如圖 12 (a) 所示。先透過煙塵空氣調控機構將所產生煙塵的空氣，經 $PM_{2.5}$ 濃度感測器獲得輸入來源的 $PM_{2.5}$ 濃度，並透過鼓風機將煙塵空氣吹入所設計的駐波式超聲場，最後透過出口處之 $PM_{2.5}$ 濃度感應模組。透過抽風風扇將經超聲場所過濾的空氣輸出，同時亦經過 $PM_{2.5}$ 濃度感測器來獲得過濾後的 $PM_{2.5}$ 濃度，藉此判斷空氣清淨的效率。為得知空氣清淨的效果如何，我們利用單晶片板來紀錄感測器的量測數值；經過數值之計算轉換，可以有線或是無線方式，於終端得知量測結果，也可肩負系統之弱電系統的電源供給。

根據前述聲浮特性的測試結果，分析出影響聲浮特性的因素有兩大部分：第一項為超音波振動子的操作條件。其包括施加的電壓以及頻率，將會影響振動子所產生的平面超音波性能。第二項影響因素為與反射板的間距。距離會影響駐波的強度以及產生與否，為求正確效果，我們將振動子輸出的頻率與電壓固定，令其有固定之輸出功率，利用可調平台調整距離，來驗證節點數的增多與衰減下，粉塵清除的效果與持續時間。為確保實驗準確性，在啟動駐波式超聲場前先行確認前後感測器的量測數值已經達到平衡並相同，同時在超聲場作動時入口處需維持高濃度 $PM_{2.5}$ ，以驗證其空氣清淨之效果。圖 13 為非接觸空氣微粒移除實測結果。超音波振動子的驅動條件為輸入 26.8 kHz 的高頻弦波訊號，依據超音波於



(a) 硬體架構關係圖



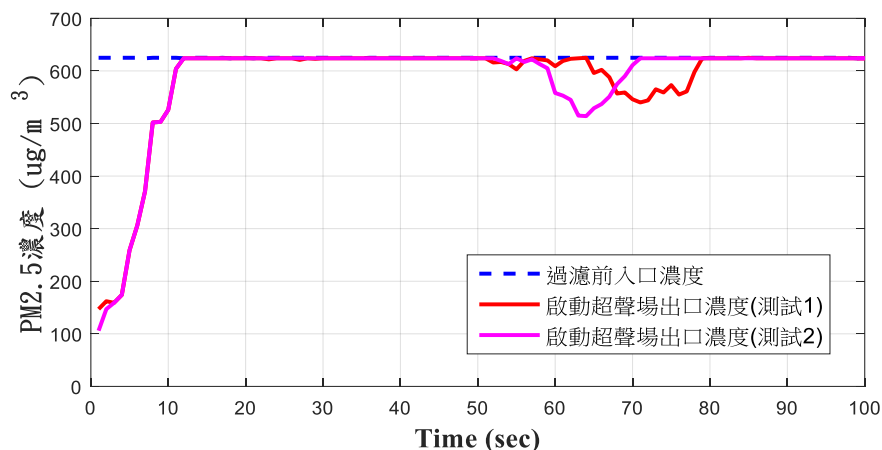
(b) 整體實驗架構圖

圖12 所設計之創新式非接觸懸浮微粒移除裝置

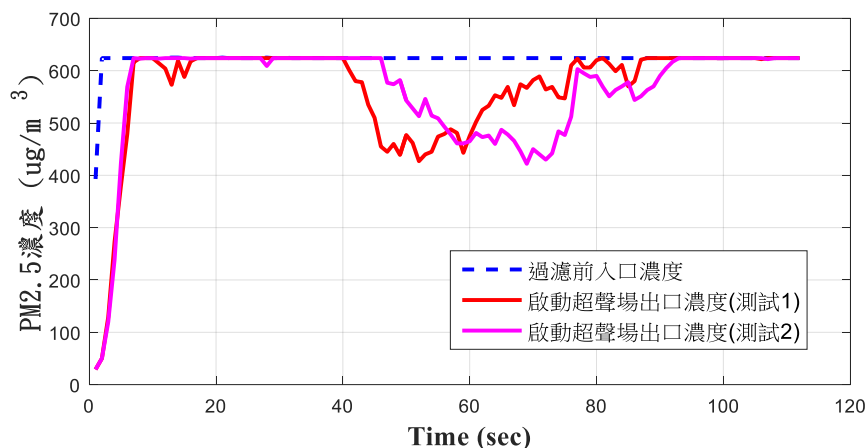
空氣中傳遞的速度，可估算振動子所產生的超音波波長約為 13 mm；考量與反射板間距對聲浮特性的影響參數，分別採用一個節點（6.5 mm）、二個節點（13 mm）、與三個節點（19.5 mm）等不同間距來觀察微粒移除的效果。由圖 13 可知，藍色虛線為入口處 PM_{2.5} 的濃度，確保煙塵空氣持續輸入至超聲耦合平台；同時為能分析所設計超聲場的微粒移除能力，總共測試 2 次，懸浮濃度變化分別顯示為紅色與紫色曲線。由圖（a）~（c）比較不同間距之微粒移除特性得知，當啟動駐波式超聲場可發現出口處之 PM_{2.5} 微粒濃度有明顯下降，表示駐波式超聲場確實可以將懸浮微粒固定於節點上，達到微粒移除之效果。

圖13（a）係間距約為 6.5 mm 之量測結果，由於該聲場僅有一個懸浮點，可得知當懸浮微粒濃度達到飽和之後，於50秒部分啟動非接觸超聲場移除裝置，能觀察到懸浮微粒濃度有些微抖動後開始有下降的趨勢。由圖10模擬結果可知，一個節點距離的耦合聲壓不大，使得懸浮物很快就飽和而導致無法持續懸浮效果，導致微粒移除效果並不持久，以及最大可清除量也較小。經由觀察二次測試的結果顯示，微粒移除能力差不多。接著，當間距增加至約 13 mm（圖13（b）），亦表示超聲場的懸浮點增加至兩個，當時間約38秒部分啟動超聲場後，第一次測試結果顯示懸浮微粒濃度可陡降至 420 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)，於20秒後慢慢達到懸浮物飽和後，懸浮微粒濃度的指標開始回升，過40秒後失去微粒隔離的效果；同樣第二次測試時，可發現稍微延遲2秒才開始微粒移除效果，但最低懸浮微粒濃度與清淨時間皆差不多。最後將間距調整至約 19.5 mm，將超聲場的懸浮點增加至三個後，由圖10模擬結果可知，三個節點的超聲場聲壓分佈較為明顯。當懸浮微粒濃度達到飽和後的32秒部分啟動超聲場，可觀測到懸浮微粒濃度可陡降至480 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)，且保持較長時間的低微粒濃度狀況，也導致懸浮點很快達到懸浮物飽和，造成約20秒後懸浮

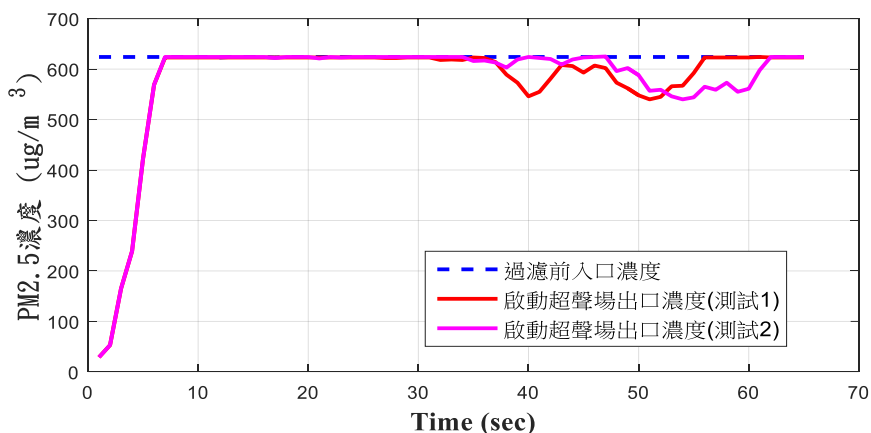
微粒濃度指標快速回升，從而無法長時間保持微粒隔離效果；而進行第二次測試時發現清淨時間有稍微增加5秒，但最低懸浮微粒濃度差不多，代表三個節點的超聲場容易受環境因素影響微粒移除能力。一方面，再持續增加反射板距離時，微粒隔離效果無法符合前述實測結果。以上，從三種不同節點距離的測試可以得知，間距為13mm（兩個懸浮點）的清淨效果與持續時間是最好的，擁有最大的潔淨能力與持續時間。



(a) 間距 6.5 mm (1個節點)



(b) 間距 13 mm (2個節點)



(c) 間距 19.5 mm (3個節點)

圖13 非接觸空氣微粒移除實測結果

由實測結果可知(圖 13)，透過線香產生具煙塵的空氣，並透過鼓風機送入所設計之駐波式超聲場腔體之方式，根據實際量測後端出口的 PM2.5 濃度數值可驗證：當啟動駐波式超聲場可發現出口處之 PM2.5 微粒濃度有明顯下降，其微粒移除能力整理如表 2 所示。由比較表可知，駐波式超聲場確實可以將懸浮微粒固定於節點上，達到微粒移除之效果。而透過同樣操作條件進行 3 次測試，顯示超聲場微粒移除技術具有一定的再現性；同時透過比較分析可知，間距越長、節點越多對於微粒移除效果表現越好。但是間距太長又會使超音波功率衰減，導致耦合超聲場容易受環境因素影響，使得微粒移除的效果亦明顯衰減。透過本文的理論計算可實際建立一套超音波聲浮架構，與實測證實駐波式超聲場於空氣清淨效果的可行性。透過所開發的創新式非接觸空氣清淨裝置可以無需濾網達到懸浮微粒移除效果，可實質發展於工廠廢氣過濾等無法更換濾網之空氣清淨應用，且能更進一步強化非接觸空氣清淨效果，未來也可於超聲場節點位置裝設抽取裝置，把懸浮於節點位置之微粒移除，以避免系統飽和而導致清淨效果降低。

表2 不同間距於空氣清淨效果

間距	最低 PM2.5 濃度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			清淨持續時間(sec)			清淨效率
	測試1	測試2	測試3	測試1	測試2	測試3	
6.5mm	540	510	520	17	20	21	低
13mm	420	420	440	45	46	44	高
19.5mm	480	470	450	18	22	20	中

陸、結論

空氣的污染日漸嚴重，尤其是空氣中的懸浮微粒 (PM_{2.5})，對人體之上呼吸道與黏膜組織會造成嚴重的傷害，此空污議題近年來受到人們的重視，進而促使空氣清淨機市場的蓬勃發展。為能清除空氣中的懸浮微粒，常見的方式為透過濾網過濾微粒，然而濾網往往常有多孔隙而引發微生物汙染，或是耗材的未完全回收造成的汙染。一方面關於工廠的廢氣處理問題，近年來亦針對 PM_{2.5} 懸浮微粒制定許多法規要求，但工廠廢氣清淨系統不易更換濾網，導致廢氣處理的效果逐漸降低。

有鑑於此，本文提出利用駐波式超聲波懸浮技術，可將空氣中微粒懸浮固定於駐波式超聲場的節點上，達到傳統如濾網之捕捉效果。文中藉由平面聲波理論與有限元素模擬分析可獲得駐波式超聲場的操作條件與懸浮特性，最後實際開發出一套創新式非接觸懸浮微粒移除系統，透過線香將具煙塵的空氣透過鼓風機送入所設計之駐波式超聲場腔體，並於後端出口量測懸浮微粒濃度數值。根據實際量測之結果，當啟動駐波式超聲場可發現出口處之 PM_{2.5} 微粒濃度有明顯下降。實測結果，當反射板間距設定為二個節點 (13 mm) 與三個節點 (19.5 mm) 時，懸浮微粒濃度可由飽和的 620 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 陡降至 420 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)，表示駐波式超聲場確實可以將懸浮微粒固定於節點上，達到微粒移除之效果；移除時間大約經過 20 秒後會因懸浮物超過懸浮乘載，而導致懸浮微粒濃度指標回升。此外經由實測發現當間距越長、節點越多對於微粒移除效果表現越好，但是間距太長又會導致超音波功率衰減導致耦合超聲場強度變弱，使得微粒移除的效果亦明顯衰減。本作品證實駐波式超聲場於空氣清淨效果的可行性，透過所開發的創新式非接觸空氣清淨裝置可不須濾網即達到懸浮微粒移除效果，將來也有助於處理工廠廢氣過濾問題時，應用於無法更換濾網之際的空氣清淨。

參考文獻

- [1] 邱宜君 (2015)。只要呼吸就不能倖免，**康健雜誌**，197。
- [2] 空氣污染防治法施行細則，行政院環境保護署環署空字第 0920045523 號令修正(民 92 年 7 月 23 日)。
- [3] M. Jerrett, R.T. Burnett, C.A. Pope, K. Ito, G. Thurston, D. Krewski, Y.L. Shi, E. Calle, and M. Thun. (2009). Long-term ozone exposure and mortality. *N. Engl. J. Med.*, 360, 1085–1095.
- [4] R.L. Peck, S.A. Grinshpun, M. Yermakov, M.B. Rao, J. Kim, and T. Reponen. (2016). Efficiency of portable HEPA air purifiers against traffic related combustion particles. *Build Environ.*, 98, 21–29.
- [5] G. Oberdorster. (2001). Pulmonary effects of inhaled ultrafine particles. *Int Arch Occup Environ Health*, 74, 1–8.
- [6] A. Peters, H.E. Wichmann, T. Tuch, J. Heinrich, and J. Heyder. (1997). Respiratory effects are associated with the number of ultrafine particles. *Am J Respir Crit Care Med.*, 155, 1376–1383.
- [7] C.A. Pope, M. Ezzati, and D.W. Dockery. (2009). Fine-particulate air pollution and life expectancy in the United States. *N. Engl. J. Med.*, 360, 376–386.
- [8] WHO. (2016). *Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease*. World Health Organization.
- [9] C.A. Pope III, R.T. Burnett, M.J. Thun, E.E. Calle, D. Krewski, K. Ito, and G.D. Thurston. (2002). Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *Jama*, 287(9), 1132–1141.
- [10] 林宏泉 (2010)。校園負離子濃度與綠化量之探討以中華大學為例 (碩士論文)。中華大學，新竹市。
- [11] 行政院環境保護署空保處 (2015)。環保署公布全國各類污染源 PM_{2.5} 排放量 (民 104 年 4 月 28 日)。
- [12] 吳漢 (2015)。An analysis of the effectiveness of China's air pollution control。 **展望與探索**，13 (7)，14–25。
- [13] 劉福順、谷春榮、徐冰、許世根與王鐵 (1996)。旋風分離器的設計選型及工程應用。**中國環境監測**，12 (5)，55–57。
- [14] S.I. Kuznetsov, V.D. Mikhailik, and S.A. Rusanov. (2012). Modeling of the hydrodynamics of a cyclonic rotational dust collector of increased efficiency. *J. Eng. Phys. Thermophys.*, 85(2), 349–355.
- [15] A.F. Hollingshead. (2008, May 18–22). Dust collector design and safety. *2008 IEEE Cement Industry Technical Conference* (pp.35–47). Miami, FL, United States.
- [16] H.-N. Wang and J. Hu. (2011, Apr. 22–24). Development and research on highly efficiency wet dust collector. *2011 International Conference on Electric Technology and Civil Engineering (ICETCE)*, Lushan, China. <https://doi.org/10.1109/ICETCE.2011.5776071>
- [17] Sophiajoanne. In *Wikipedia, Baghouse*. <https://en.wikipedia.org/wiki/Baghouse>
- [18] K.L. Cashdollar. (2000). Overview of dust explosibility characteristics. *J. Loss Prev. Process Ind.*, 13(3-5), 183–199.
- [19] 鄭宗岳與林鴻祥 (2018)。空氣污染防治理論及設計。新文京出版社。

- [20] R.S. Fearing. (1995, Aug. 5–9). Survey of sticking effects for micro parts handling. *International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Pittsburgh, PA, United States. <https://doi.org/10.1109/IROS.1995.526162>
- [21] F. Arai, D. Ando, T. Fukuda, Y. Nonoda, and T. Oota. (1995, Aug. 5–9). Micro manipulation based on micro physics-strategy based on attractive force reduction and stress measurement. *International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Pittsburgh, PA, United States. <https://doi.org/10.1109/IROS.1995.526166>
- [22] A.J.S. Salmeron, R.L. Tarazon, R.G. Diana, and C.R. Viala. (2005). Recent development in micro-handling systems for micro-manufacturing. *J. Mater. Process. Technol.*, 167, 499–507.
- [23] V. Vandaele, P. Lambert, and A. Delchambre. (2005). Non-contact handling in microassembly: Acoustical levitation. *Precis. Eng.*, 29, 491–505.
- [24] E. V. West, A. Yamamoto, and T. Higuchi. (2009). Automatic object release in magnetic and electrostatic levitation systems. *Precis. Eng.*, 33, 217–228.
- [25] G.J. Laurent, A. Delettre, and N. Le. (2011). A new aerodynamic traction principle for handling products on an air cushion. *IEEE Trans. Robot.*, 27, 379–384.
- [26] J.R. Gao, C.D. Cao and B. Wei. (1999). Containerless processing of materials by acoustic levitation. *Adv. Space Res.*, 24, 1293–1297.
- [27] W.J. Xie and B. Wei. (2001). Parametric study of single-axis acoustic levitation. *Appl. Phys. Lett.*, 79, 881–883. <https://doi.org/10.1063/1.1391398>
- [28] E.H. Trinh and C.J. Hsu. (1986). Acoustic levitation methods for density measurements. *J. Acoust. Soc. Am.*, 80, 1757–1761.
- [29] Y. Tian and R.E. Apfe. (1996). A novel multiple drop levitator for the study of drop arrays. *J Aerosol Sci.*, 27, 721–737.