具雙向吸收機制之聲學超材料吸音器

An acoustic metamaterial absorber featuring a bidirectional absorption mechanism.

詹子萱
明志科技大學材料工程系

黃宗鈺
明志科技大學材料工程系

摘要

本研究以聲學超材料吸音器概念為核心，提出一種具雙向吸收能力的創新吸音結構。相較於多數傳統吸音器主要針對單一入射方向進行能量耗散，本設計可在不同入射方向下維持有效聲音吸收表現，提升實際場域中面對多源噪音的適用性。而達成此雙向入射吸收的關鍵在於，首先我們所設計的聲學超材料吸音器導入準亥姆霍茲共振機制，透過共振腔體的等效聲學阻抗調控，使聲能有效耦入並於結構內部被耗散。再來，由於本結構在幾何配置上採鏡像對稱設計，且兩側邊界條件設定相同，使得入射聲波從 x 方向與 y 方向入射可感應到相同的聲阻抗，基於互易性與阻抗匹配原理，兩入射方向的反射行為一致，可確保雙向入射下吸音表現的方向一致性，進而達成雙向高效率吸音。具體成果顯示，所設計之吸音器在 990 Hz 時吸收係數可達 0.97，且整體厚度可達0.167λ，展現出以薄型結構達成高吸收的潛力。在試片製備方面，我們利用3D 列印製作之樂高式積木模組組成聲學超材料吸音器，可依不同目標頻段需求調整積木之排列與組合方式，以提升結構可調性，且無須對整體外觀與製程進行過多變動，強化其在實務應用上的快速改版與導入可行性。綜合而言，本研究所提出的雙向聲學超材料設計可克服傳統吸音器在多方向噪音環境中效能受限的問題，同時兼具配置彈性與空間整合優勢，為未來噪音控制技術與工程應用提供新的設計方向。

關鍵詞：聲學超材料、準亥姆霍茲共振器和雙向入射吸收。

Abstract

This study centers on the concept of acoustic metamaterial absorbers and proposes an innovative sound-absorbing structure with bidirectional absorption capability. Compared with most conventional absorbers that dissipate acoustic energy primarily for a single incidence direction, the proposed design maintains effective sound absorption under different incidence directions, thereby improving its applicability in practical environments with multi-source noise. The key to achieving bidirectional absorption is twofold. First, the designed acoustic metamaterial absorber incorporates a quasi–Helmholtz resonance mechanism. By tailoring the effective acoustic impedance of the resonant cavity, incident acoustic energy can be efficiently coupled into the structure and dissipated internally. Second, the structure adopts a mirror-symmetric geometric configuration, and identical boundary conditions are applied on both sides. As a result, acoustic waves incident from the x- and y-directions experience the same acoustic impedance. Based on reciprocity and impedance-matching principles, the reflection responses for the two incidence directions are identical, ensuring consistent absorption performance under bidirectional incidence and enabling high-efficiency bidirectional sound absorption. The results show that the proposed absorber achieves an absorption coefficient of 0.97 at 990 Hz, while maintaining an overall thickness of 0.167λ, demonstrating the potential to realize high absorption with a thin-profile structure. For sample fabrication, the acoustic metamaterial absorber was assembled using Lego-like modular blocks manufactured by 3D printing. The arrangement and combination of the blocks can be reconfigured to meet target frequency-band requirements,

enhancing structural tunability without substantial changes to the overall appearance or fabrication process, and improving feasibility for rapid iteration and practical deployment. Overall, the proposed bidirectional acoustic metamaterial design overcomes the performance limitations of conventional absorbers in multi-directional noise environments. With its flexible configuration and space-integration advantages, it offers a new design direction for future noise-control technologies and engineering applications.

Keyword: Acoustic metamaterials, quasi-Helmholtz resonator and bidirectional absorption.

1. 前言

隨著都市化與人口集中趨勢持續加劇，城市空間中交通運輸量與各式機械設備的使用頻率同步上升，使環境噪音在近年呈現更普遍。(World Health Organization 2011, Basner, Babisch et al. 2014, World Health Organization 2018)科技進步與經濟活動確實提升了生活效率與便利性，但相對地也讓道路運輸、軌道系統、工業設施與建築機電等噪音源更密集地分布於生活圈內(Schwela 2001, International Organization for Standardization 2004, Jarosińska, Héroux et al. 2018)。上述噪音多以長時間、連續性或週期性形式存在，且常伴隨中低頻或寬頻成分；在都市環境中，這類噪音不僅容易累積，也往往因傳播距離較長、遮蔽效果有限而更難透過一般隔音手段徹底改善，因而逐漸成為重要的環境壓力因子。

既有研究普遍指出，長期暴露於環境噪音將降低居住與工作空間的舒適性，並對人類健康造成多層面的負面影響。除了常見的聽覺疲勞、溝通干擾與情緒煩躁等問題外(Stansfeld and Matheson 2003, Münzel 2018)，環境噪音亦可能影響睡眠品質，使入睡困難、夜間覺醒增加，進而降低隔日的精神狀態與工作效率。同時，噪音干擾也與注意力維持困難、認知表現下降及學習效率受損等現象相關(Stansfeld, Berglund et al. 2005, Clark, Martin et al. 2006)，對日常生活與工作表現產生長期累積性的影響。更進一步而言，相關流行病學研究顯示，長期噪音暴露可能與心血管疾病、高血壓等健康風險上升存在關聯(Babisch, Beule et al. 2005, Sørensen, Hvidberg et al. 2011, Van Kempen and Babisch 2012)，並可能加劇慢性壓力反應，形成影響公共健康的潛在因素。因此，如何有效降低環境噪音帶來的生理與心理負擔，並提升生活環境品質，已成為現代都市中不可忽視的重要課題。

在既有噪音控制工程中，傳統吸音材料長期扮演核心角色，對於抑制空間內的背景噪音、降低混響與提升語音清晰度皆能提供穩定成效，因此廣泛部署於演講廳、音樂廳、教室、辦公空間及各類公共建築(Cox and d'Antonio 2016)，在材料上常採用多種聲學材料與結構配置，例如多孔材料，包含玻璃棉、聚氨酯泡棉等，或者是以織物覆層、微穿孔板與打孔板結構、以及腔體式共振吸收器等；其中，多孔與纖維材料較適合中高頻的廣帶抑制，而穿孔板或共振型結構則常被用來針對特定頻段補強吸收表現。

傳統吸音材料降噪效果主要來自於材料內部的黏滯耗散與熱耗散、孔隙結構造成的能量衰減，以及多層構造對聲波傳遞路徑的抑制，因而能在多數日常環境中有效改善噪音帶來的不適與干擾。

然而，傳統噪音控制方法的效能往往高度依賴材料厚度與內部孔隙路徑長度等幾何條件，亦即需要足夠的傳播距離與耗能路徑，才能將聲能逐步轉換並消散。為維持相近的降噪表現，通常必須增加材料厚度、擴大吸音層體積，或採用更深的背後空腔與多層結構來延長等效路徑。此一需求在工程實務上往往意味著更大的空間佔用、建築整合受限、重量與結構負擔增加，並可能影響室內配置與美觀規劃。因此，在低頻噪音控制情境中，傳統材料容易陷入「吸收不足」或必須以顯著厚度與體積換取效能的限制，進而凸顯對薄型化且具低頻有效性的替代方案之需求。

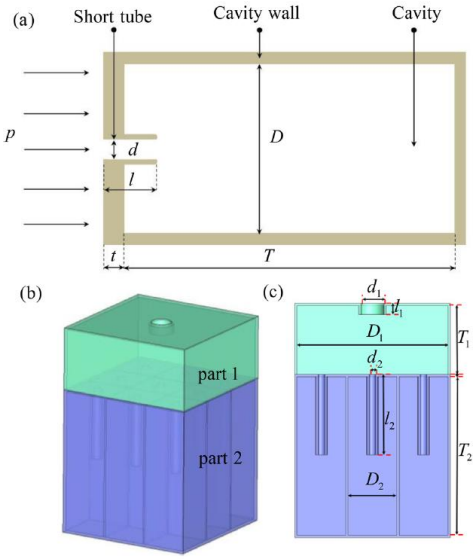
因此，在同時追求「高吸收效率」與「結構薄型化」的情境下，聲學超材料吸音器（acoustic metamaterial absorbers, AMAs）逐漸受到關注並快速發展。所謂超材料（metamaterials）係指一類由人工設計的複合介質，其宏觀物理表現主要由單元結構的幾何形貌與組構方式所決定，而非僅由材料本身的固有性質主導(Smith, Pendry et al. 2004, Liu and Zhang 2011)。藉由精準的幾何參數設計與結構配置，超材料得以呈現自然材料較難達成的等效物性，因而近年在電磁波、聲波與彈性波等領域皆有廣泛應用與研究。

聲學超材料多半會把單元結構的幾何尺度做得顯著小於目標頻段的波長，因而在聲波傳遞的描述上可用「集總元件」的方式近似，並透過此等效化觀點來調整可設計的聲學參數。若以吸音為核心目標，重點在於利用結構配置去塑形整體的等效聲阻抗，讓其更接近空氣的特性阻抗，從而減少界面反射、提高入射聲能進入吸收體的耦合比例。當聲能被有效導入單元內部後，便可藉由狹窄通道中的黏滯剪切損失、熱邊界層的熱交換耗散，或材料本身的黏彈性阻尼等途徑，逐步將聲能轉換為熱能以完成吸收。與傳統多孔介質或厚型吸

音材主要依靠足夠厚度與長行程路徑來累積損耗不同，聲學超材料可在厚度受限的情境下，透過強散效應，因此具備在次波長尺度仍能達到高效率吸音的優勢與應用潛力(Jiménez, Romero-García et al. 2017, Liu, Wu et al. 2020, Wang, Yang et al. 2022)。

型及微穿孔板型等類別，各類型結構均具有不同之設計概念與應用特性。

如**圖一**所示，亥姆霍茲共振型聲學超材料係由傳統亥姆霍茲共振器（Helmholtz resonator）延伸而來，通常由開口、頸部及背後空腔所組成。其吸音原理主要為當入射聲波進入開口後，頸部內空氣柱會表現出等效質量效應，而腔體內空氣則具有等效彈簧效應，兩者共同形成質量－彈簧系統，並在特定頻率下產生共振。當共振發生時，聲能會集中於結構內部，並藉由頸部及腔體中的熱黏滯損失轉換為熱能，進而實現聲能的高效耗散。



圖一、亥姆霍茲共振型聲學超材料示意圖(Duan, Shen et al. 2021)。

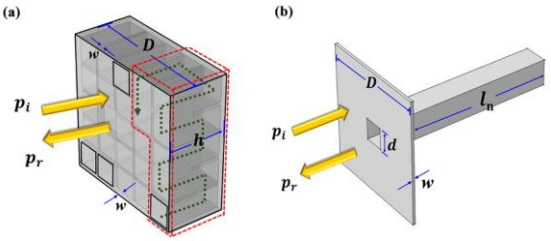
此類結構可於**次波長尺度**下實現顯著吸音能力，尤其在低頻吸音方面具有明顯潛力，因此廣泛應用於低頻噪音控制相關研究。

圖二為迷宮型聲學超材料（labyrinthine acoustic metamaterial），主要特徵為利用彎折、摺疊之內部通道設計，延長聲波於結構內之傳播路徑，使有限厚度內可形成較長之有效聲學路徑。此類結構通常可產生慢聲（slow sound）效應，使聲波在局域共振將能量集中於特定區域並放大耗

2. 聲學超材料吸音器種類介紹

近年來，常見之吸音型聲學超材料可依其結構特徵與作用原理概分為亥姆霍茲共振型、迷宮

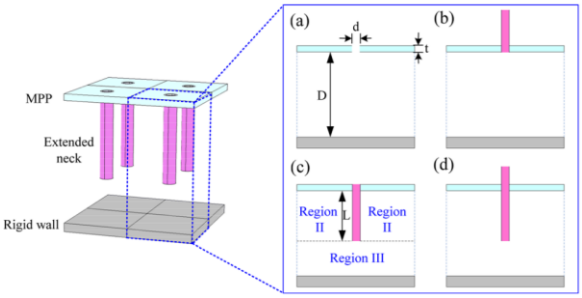
次波長尺寸下仍能獲得顯著相位延遲與能量耗散，因此在低頻聲波控制領域受到高度關注。



圖二、迷宮型聲學超材料示意圖(Gao, Lin et al. 2020)。

迷宮型結構可於較薄之結構厚度下達成低頻吸收或隔音效果，並具有高度幾何設計彈性，適合藉由改變通道長度、排列方式來調控共振頻率與聲波傳播特性。

如**圖三**所示，微穿孔板型聲學超材料（micro-perforated panel, MPP）主要由具有微小孔徑之薄板與其後方空腔所組成。其吸音機制係當聲波通過微孔時，孔道內空氣受到黏滯阻力與熱邊界層效應影響，產生能量耗散；同時，微穿孔板與背後空腔亦可形成類似共振系統，使聲能於特定頻率範圍內更有效地被吸收。因此，微穿孔板結構兼具共振吸收與黏滯耗散之特性。在吸音表現上，微穿孔板型結構可透過孔徑、穿孔率、板厚與空腔深度等參數調整其吸音表現。

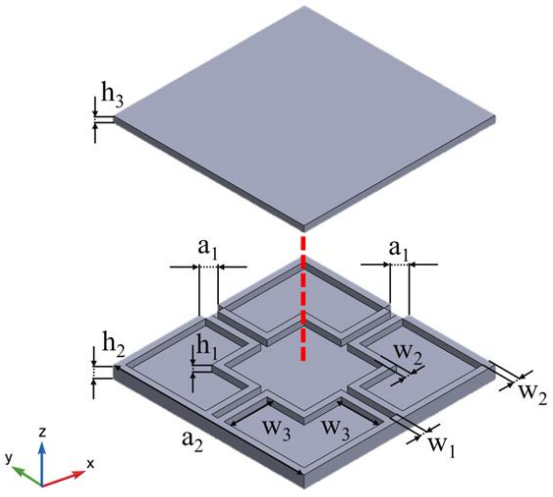


圖三、微穿孔板型聲學超材料示意圖(Ning, Wang et al. 2026)。

綜合上述，亥姆霍茲共振型、微穿孔板型及迷宮型聲學超材料皆可透過不同結構設計達到聲波調控與吸音效果，並各自具有不同之吸音機制與結構特性。然而，在實際都市與室內聲場中，噪音多來自交通、機電設備以及反射與繞射所形成之多重傳播路徑，聲波入射方向通常呈現多向性，而非理想化之單一正入射。若吸收結構僅對單側或特定入射方向具有良好阻抗匹配，則當入射方向改變時，其吸收效能可能明顯下降。因此，如何在維持高吸收性能之前提下，進一步將不同入射方向之聲波納入結構設計考量，成為本研究發展雙向入射聲學超材料吸音器之重要動機。基於上述理論與文獻分析，下一章將進一步介紹本研究所建立之模擬模型及其相關設定。

3. 模擬設定

本研究之吸音結構採雙向入口設計，整體幾何具鏡像對稱特性，以提升不同入射方向下的響應一致性。結構以6.2×6.2平方公分的正方形作為底部腔體之基準外形；聲波可由上下兩側的兩個入口耦入結構內部。內部腔體配置包含四個封閉式 L 型側腔與一個中央共振腔，透過腔體間的耦合與局部共振行為，促使聲能在有限厚度下有效導入並耗散，以達成聲能吸收之目的。其結構外觀與配置如**圖四**所示，而詳細參數則是如**表一**所示。



圖四、本研究提出之吸音器三維模型拆解圖。

表一、本研究提出之吸音器相關參數（單位皆為 mm）。

代號	參數	代號	參數
a_1	6	w_3	14
a_2	62	h_1	2
w_1	2	h_2	3
w_2	2	h_3	1

本研究使用 COMSOL Multiphysics 建立三維數值模型，結構材料採用3D 列印用樹酯，其材料參數設定如**表二**所示。聲場方面，入射聲波的壓力振幅為1 Pa；其邊界條件沿 x 和 y 方向以及 z 方向的介面設定為固定約束以模擬實際場景應用時固定之區域。

表二、樹酯之詳細參數。

名稱	代號	參數	單位
密度	Rho	880	Kg/m^3
楊氏係數	E	1.037×10^9	pa
蒲松比	nu	0.349	-

本研究之目標頻段選定主要基於實務噪音情境與聲學分析代表性之考量。人耳可聽頻率範圍約為 20–20,000 Hz，而 1,000 Hz 附近屬於可聽頻帶中的中頻區域，亦為常用之倍頻帶中心頻率之一，具有良好之頻段代表性。另一方面，道路交通噪音、空調通風系統以及部分機械設備運轉噪音之頻譜中，常可觀察到約 1,000Hz 附近之中頻成分，因此此頻段具有一定之實務應用意義。基於上述原因，本研究將以 1,000 Hz 為中心向兩側延伸進行分析，頻率掃描範圍設定為 900–1,100 Hz，作為結構吸音性能評估之依據。

本研究結構之吸音機制主要可視為一種局部共振（local resonance）行為，其中入口通道內之空氣柱可視為提供等效聲質量（acoustic mass），其物理意義為通道中的空氣在聲波驅動下所表現之慣性效應；而腔體內之可壓縮空氣則提供等效聲彈性（acoustic compliance），代表腔內空氣受壓縮或膨脹時所產生之回復能力。兩者共同形成一種類似亥姆霍茲共振器之質量－彈簧系統，其中等效聲質量對應於機械振動系統中的質量項，而等效聲彈性則

對應於彈簧所提供之回復力。當入射聲波頻率接近其共振頻率時，聲能得以有效耦入腔體內部，使局部聲壓與粒子速度顯著提升，並使狹窄通道與腔壁附近之熱－黏滯邊界層效應更加明顯。此時，由於流體黏滯摩擦及熱交換作用，部分聲學能量將轉換為熱能而被耗散，進而提升整體吸音表現。若以聲學阻抗觀點表示，吸收係數可寫為

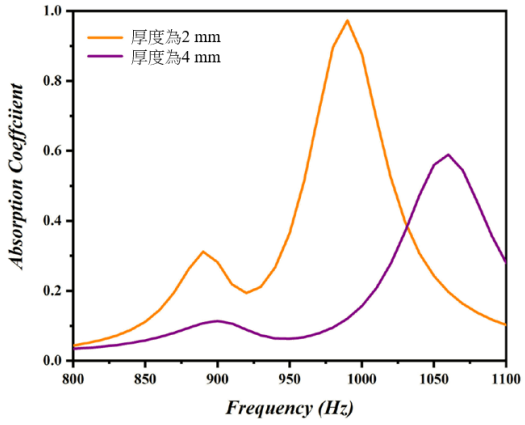
$$\alpha = 1 - |R|^2$$

其中 R為反射係數；當結構於共振附近達到較佳阻抗匹配時，反射聲能降低，代表更多入射聲能進入結構內部並經由熱－黏滯損失機制耗散。此外，就亥姆霍茲共振器之等效模型而言，其共振頻率可表示為

$$f_0 = \frac{c}{2\pi}\sqrt{\frac{S}{VL_{eff}}}$$

其中 c為空氣中聲速，S 為入口通道截面積，V 為腔體體積，而 L_{eff}為入口通道之等效長度。由此可知，入口通道與腔體幾何尺寸將共同決定其局部共振特性，並進一步影響吸音峰值位置與吸收表現。

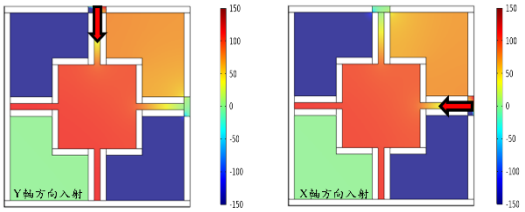
在模擬分析過程中發現，當腔體厚度改變時，結構之吸收表現亦隨之產生明顯變化，顯示厚度參數對共振響應與能量耗散機制具有直接影響。為進一步探討其影響趨勢，本研究比較不同腔體厚度條件下之吸收係數頻譜，如**圖五**所示，隨厚度變化，共振峰值位置與吸收強度均呈現差異，顯示腔體厚度為影響吸收特性之重要幾何參數。



圖五、厚度變化對應到的吸收圖譜變化。

其原因在於腔體厚度的改變會同時調整共振系統的等效腔體體積與頸部的等效聲質量，進而改變結構的共振頻率與等效聲阻抗匹配條件。因此當厚度變動時，聲能的耦入效率與腔內能量集中程度亦會隨之變化，導致吸收峰的幅度與中心頻率位置產生明顯差異。以**圖三**為例，當腔體厚度增加至 4 mm 時，吸收峰呈現衰減趨勢，且峰值位置相較基準模型出現向右偏移，顯示過大的厚度可能使阻抗匹配偏離最佳狀態，並降低共振條件下熱－黏滯耗散的有效程度，進而造成聲能耦入與轉換效率下降。相對地，當腔體厚度減小時，腔體體積與通道等效參數亦會同步改變，使共振條件重新調整，然而，若厚度進一步縮減，將增加製作上的困難度與結構穩定性風險，特別是在3D 列印成形與後處理過程中，過薄之壁厚可能導致變形或尺寸誤差累積。因此，在兼顧加工可行性與結構完整性的前提下，本研究並未無限制地降低厚度，而是將腔體厚度設定為2 mm 作為基準模型，並以此作為後續參數掃描之參考條件。

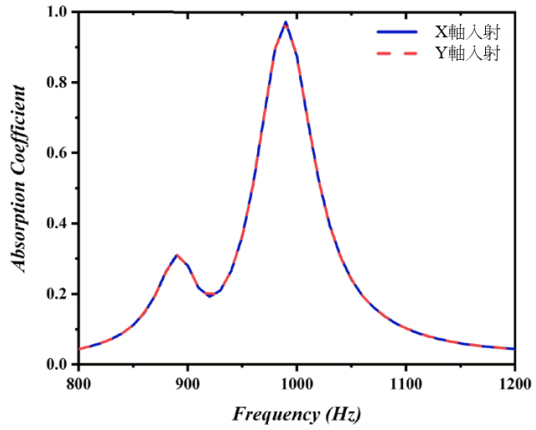
為進一步觀察不同入射方向下之聲場分布特徵，**圖六**顯示不同入射方向下的聲壓場分佈。兩種入射條件皆可觀察到聲壓於中央腔體及其入口通道附近明顯增強，代表聲能被有效耦入並形成局部共振。聲場在狹窄通道與腔壁附近產生較大的速度梯度，促使黏滯摩擦與熱邊界層交換加劇，進而將聲能轉換為熱能而被耗散。由於本結構於幾何與材料配置上具鏡像對稱性，x、y 軸方向入射所對應的等效輸入阻抗與共振耦合條件相近，因此兩方向下皆可維持相近的吸收頻譜及聲壓分布。



圖六、結構位於 990 Hz 及 X、Y 軸方向下的聲壓分布圖。

藉由此設計，所提出之聲學超材料吸音器在990 Hz 附近可達到約0.97的峰值吸收係數，頻寬約達92 Hz，顯示其具備良好的能量耗散能力與吸收效率。為驗證結構的雙向吸收特性，我們分別考慮聲波沿 x 軸與沿 y 軸入射的情況，如**圖七**所示，結果顯示兩種入射方向下的吸收峰位置與峰值幾

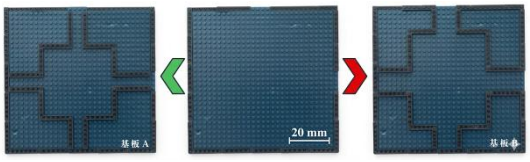
乎一致，說明該模型的對稱性不僅反映在幾何外觀上，也進一步體現在其聲學響應的一致性，因而可在不同入射方向下提供穩定且可預期的吸收性能。另一方面，將本研究使用之參數$w = 6$ cm、$c = 343$ m/s以及$f = 900$ Hz可得出本研究所設計的結構厚度約為工作波長的1/6，符合次波長結構。



圖七、本研究於900 ~ 1100 Hz 的吸收頻譜圖。

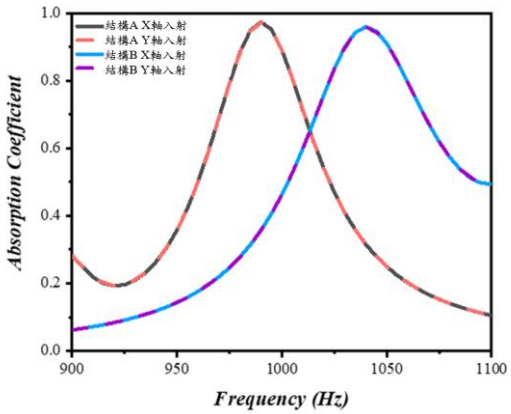
4. 聲學超材料吸音器之製作

在結構製作方面，本研究採用3D 列印方式製作具「樂高積木式」概念的模組化零件，並以堆疊組裝的形式，完成所提出之聲學超材料吸音器。此種模組化設計使各幾何單元可被獨立製作與替換，降低整體加工與修改的門檻，同時也有助於後續的快速迭代與性能驗證，若未來需要面臨不同頻段的吸收需求，可透過改變排列組合來達成目標頻段吸收，另外，如**圖八**所示，本研究之結構 A 與結構 B 皆由同一套模組化積木零件組成，且使用的積木件數相同；差異僅在於堆疊時的相對位置與排列方向不同，因此可在不新增零件種類的前提下，快速組裝出兩種配置選擇，以對應不同的配置需求並利於後續比較與驗證。



圖八、本研究以3D 列印完成之實體吸音器，並可透過堆疊積木之方式實現不同排列組合。

此外，如**圖九**所示，結構 A 與結構 B 於不同頻段皆可呈現接近1的吸收峰值，顯示本模組化設計具備頻段可調性，未來可依目標吸收頻帶之需求，透過更換配置來對應不同噪音頻譜，並提升應用彈性。



圖九、中央共振腔在不同排列配置下之吸收頻譜比較。

就實際應用而言，由於道路交通噪音、空調通風系統以及部分機械設備運轉噪音之頻譜中，常可觀察到中頻成分，因此本研究所提出之模組化吸音結構具備應用於相關噪音控制情境之潛力。

相較於傳統多孔吸音材料主要依賴材料孔隙所造成之黏滯損失與熱耗散效應來吸收聲能，本研究之模組化聲學超材料吸音器則透過幾何結構配置調控局部共振特性，以達成目標頻帶之吸音效果。由**圖十**比較結果可知，本研究結構不僅可於較低頻率下獲得較高之吸收峰值，亦在厚度、次波長特性及雙向吸收能力等方面展現優勢。相較之下，傳統多孔材料之吸音行為較受材料本質限制，於低頻吸收性能、結構緊湊性及方向性調控上較缺乏彈性。綜合而言，本研究所提出之模組化設計除具備可重組與可調頻之特性外，亦更具應用適應性與設計彈性。

比較	準亥姆霍茲共振結構	孔洞與材料特性結構
頻寬 (Hz)	65	400
吸收最大峰值	0.97	0.9
次波長長度 (mm)	0.167λ	2λ
雙向吸收	✓	✗
厚度 (mm)	4	300
工作原理	準亥姆霍茲共振	孔洞與材料特性

圖十、本研究聲學超材料吸音器與傳統多孔吸音材料之比較。

5. 結論

本研究以亥姆霍茲共振器的局部共振原理為核心，當聲波由空氣介質進入結構空腔後，腔內氣柱運動觸發共振，使聲能在腔體內集中，並透過通道與腔壁所造成的熱－黏滯損失逐步耗散，進而將聲能轉換為熱能以完成吸收。結果顯示，本研究所設計之吸收器在990 Hz 可達到0.97的高吸收峰值，顯示其具備接近完全吸收的效率；同時結構厚度僅約為工作波長的1/6（$t/\lambda \approx 0.167$），證明其具有明顯的次波長薄型化特徵，利於在空間受限的情境下進行整合與應用。

此外，本研究採用雙向開口且幾何對稱的設計概念，相較於傳統多為單一開口、吸收方向較受限的吸音結構，本設計可使聲波由不同入射方向耦入並激發相近的共振響應，因此在不同方向入射時仍能維持相近的吸收峰值與頻譜特徵，提升實際使用時的穩定性與適用性。另一方面，吸收行為亦可透過結構參數調整而進行頻率調控，例如改變腔體尺寸、頸部尺度或相關幾何參數，即可使吸收峰位置產生對應移動；若進一步整合多組不同參數的共振單元，則可形成多個吸收峰並拓展有效吸收頻帶，提供朝向寬頻吸收發展的設計方向。總結而言，本研究提出之聲學超材料吸收器兼具高吸收、薄型化與可調性，並為後續噪音控制與智慧裝置整合提供具體可行的基礎。

6. 參考文獻

1. Babisch, W., et al. (2005). "Traffic noise and risk of myocardial infarction." Epidemiology **16**(1): 33-40.
2. Basner, M., et al. (2014). "Auditory and non-auditory effects of noise on health." The lancet **383**(9925): 1325-1332.
3. Clark, C., et al. (2006). "Exposure-effect relations between aircraft and road traffic noise exposure at school and reading comprehension: the RANCH project." American journal of epidemiology **163**(1): 27-37.
4. Cox, T. and P. d'Antonio (2016). Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application, CRC press.
5. Duan, H., et al. (2021). "Acoustic multi-layer Helmholtz resonance metamaterials with multiple adjustable absorption peaks." Applied physics letters **118**(24).
6. Gao, Y.-x., et al. (2020). "Broadband thin sound absorber based on hybrid labyrinthine metastructures with optimally designed parameters." Scientific reports **10**(1): 10705.
7. International Organization for Standardization (2004). 16032. Acoustics-Measurement of sound pressure level from service equipment in buildings-Engineering method.
8. Jarosińska, D., et al. (2018). "Development of the WHO environmental noise guidelines for the European region: an introduction." International journal of environmental research and public health **15**(4): 813.
9. Jiménez, N., et al. (2017). "Rainbow-trapping absorbers: Broadband, perfect and asymmetric sound absorption by subwavelength panels for transmission problems." Scientific reports **7**(1): 13595.
10. Liu, C. R., et al. (2020). "Ultra-broadband acoustic absorption of a thin microperforated panel metamaterial with multi-order resonance." Composite Structures **246**: 112366.
11. Liu, Y. and X. Zhang (2011). "Metamaterials: a new frontier of science and technology." Chemical Society Reviews **40**(5): 2494-2507.
12. Münzel, T., et al. (2018). "Environmental noise and the cardiovascular system." Journal of the American College of Cardiology **71**(6): 688-697.
13. Ning, J., et al. (2026). "Low-frequency broadband sound absorption of micro-perforated panel absorber with different extended necks." The Journal of the Acoustical Society of America **159**(4): 2944-2952.
14. Sørensen, M., et al. (2011). "Exposure to road traffic and railway noise and associations with blood pressure and self-reported hypertension: a cohort study." Environmental health **10**(1): 92.
15. Schwela, D. H. (2001). "The new World Health

Organization guidelines for community noise." Noise Control Engineering Journal **49**(4): 193-198.

16. Smith, D. R., et al. (2004). "Metamaterials and negative refractive index." science **305**(5685): 788-792.
17. Stansfeld, S. A., et al. (2005). "Aircraft and road traffic noise and children's cognition and health: a cross-national study." The lancet **365**(9475): 1942-1949.
18. Stansfeld, S. A. and M. P. Matheson (2003). "Noise pollution: non-auditory effects on health." British medical bulletin **68**(1): 243-257.
19. Van Kempen, E. and W. Babisch (2012). "The quantitative relationship between road traffic noise and hypertension: a meta-analysis." Journal of hypertension **30**(6): 1075-1086.
20. Wang, E., et al. (2022). "Development and optimization of broadband acoustic metamaterial absorber based on parallel–connection square Helmholtz resonators." Materials **15**(10): 3417.
21. World Health Organization (2011). Burden of disease from environmental noise: Quantification of healthy life years lost in Europe, World Health Organization. Regional Office for Europe.
22. World Health Organization (2018). Environmental noise guidelines for the European region. Copenhagen, Denmark2004.