

應用主動式噪音控制技術於勞 工作業空間降噪效能之探討

.....

**Development of an Active Noise Control Technology for Noise
Reduction in the Working Space**



應用主動式噪音控制技術於勞工作業空
間降噪效能之探討

**Development of an Active Noise Control
Technology for Noise Reduction in the
Working Space**

應用主動式噪音控制技術於勞工作業空
間降噪效能之探討

**Development of an Active Noise Control
Technology for Noise Reduction in the
Working Space**

研究主持人：李昆哲、林仲廉

計畫執行單位：勞動部勞動及職業安全衛生研究所

研究期間：中華民國 107 年 5 月 19 日至 107 年 11 月 30 日

本研究報告公開予各單位參考
惟不代表勞動部政策立場

行政院勞動部勞動及職業安全衛生研究所

中華民國 108 年 6 月

摘要

職業性聽力損失是國內職場環境最普遍的職業危害，由於佩戴耳罩會對勞工耳朵及頭部產生壓力，這種不舒適感使勞工不願意佩戴或無法全程佩戴，降低保護聽力的效果。因此本研究之目的為建立場域型主動降噪裝置，使用時勞工無須佩戴任何抗噪耳機或耳塞，只需進入靜音區，此場域型主動降噪裝置即可讓勞工感受噪音降低來達到聽力保護的效果。本研究之核心為完成建置挖土機駕駛艙及 22.8 KV 變壓器中控室之場域型主動式噪音控制之系統雛型，實驗顯示於挖土機駕駛艙普遍頭部正常活動範圍的噪音消除結果都在 15 dBC 或 10 dBA 以上。而在 22.8 KV 變壓器中控室於操作者在耳朵位置能夠消除將近 20 dBA 的噪音。另外本研究也提出場域型主動式噪音控制裝置與其他噪音環境監測之系統相容性評估，包括人身物聯網穿戴裝置之感測資訊、環境噪音偵測系統，並據此融合雲端應用整合服務平台之資訊，達成「智慧型音環境控制管理系統架構」之運作概念。

關鍵詞：噪音、主動噪音控制、靜音區

Abstract

Occupational hearing loss is the most common form of occupational hazard in work places. The worker's prolonged exposure to the high noise environment will easily lead to loss of hearing ability. It also lead to the health hazards in worker physiology and psycholog. Because the full cover type earmuffs lead to ear and head pressure in users, many workers prefer not to wear them, reducing the effect of hearing protection. Therefore, this project plans to develop an active noise control system with a quiet zone for work spaces. Two types of work spaces were selected as the test examples for this project, including the earth moving machine and the 22.8 KV transformer control room. Given the characteristics of the audio spectrum classification, this study carried out active noise control algorithms to set up quiet zones for such work spaces. Experimental results demonstrated noise reduction of up to 15 dBC or 10 dBA in earth moving machine, and 20 dBA noise reduction in 22.8 KV transformer control room in the space right next to workers' ears. In addition, this project also proposes an intelligent sound environment control management concept which integrates wearing devices, noise environmental monitoring, for the potential study of the smart life environment research issue. Consequently, the proposed innovative methodologies investigated in this study has the potential to be developed commercially. In addition to providing useful noise reduction tools, it can also promote assistive human comfortable devices for the market.

Keywords: Noise, Active Noise Control, Quiet Zone

目次

| | |
|-------------------------------------|-----|
| 摘 要..... | i |
| Abstract | ii |
| 目次..... | iii |
| 圖目次..... | iv |
| 表目次..... | v |
| 第一章 計畫概述..... | 1 |
| 第一節 前言..... | 1 |
| 第二節 學術文獻回顧..... | 2 |
| 第三節 目的..... | 5 |
| 第二章 主動式噪音控制之演算法及進行演算效能比較分析..... | 6 |
| 第一節 窄頻前饋型演算法..... | 6 |
| 第二節 演算效能分析..... | 9 |
| 第三章 場域型主動式噪音控制裝置之系統規劃..... | 12 |
| 第一節 場域型規劃..... | 12 |
| 第二節 實驗測試..... | 17 |
| 第四章 主動式噪音控制裝置與其他噪音環境監測之系統相容性評估..... | 32 |
| 第五章 結論與建議..... | 34 |
| 第一節 結論..... | 34 |
| 第二節 建議..... | 35 |
| 誌謝..... | 38 |
| 參考文獻..... | 39 |

圖目次

| | |
|---|----|
| 圖 1 窄頻前饋式 ANC 方塊圖..... | 6 |
| 圖 2 次級路徑響應估測方法..... | 8 |
| 圖 3 主級路徑 $P(Z)$ 和次級路徑 $S(Z)$ 頻率響應..... | 9 |
| 圖 4 時域降噪效果..... | 11 |
| 圖 5 各平行系統之反噪音訊號..... | 11 |
| 圖 6 挖土機引擎噪音量測..... | 13 |
| 圖 7 高轉速分貝值..... | 13 |
| 圖 8 挖土機駕駛艙 (A)側面 (B)配置示意圖..... | 14 |
| 圖 9 挖土機噪音量測於艙內座椅頭枕位置，艙門開(紅)與艙門關(藍)..... | 15 |
| 圖 10 22.8KV 變壓器噪音 (A) 外觀 (B) 變壓器 (C) 噪音分貝值(C-WEIGHTING) (D) 噪音分貝值(A-WEIGHTING) (E) 噪音錄製情形..... | 16 |
| 圖 11 變壓器噪音頻譜..... | 17 |
| 圖 12 挖土機駕駛艙內場域型 ANC 實驗系統，(A)次級喇叭在駕駛後方(上) (B)喇叭在 駕駛上方(下)..... | 18 |
| 圖 13 ANC 系統降噪效果於誤差麥克風(喇叭(NO.1)放置在駕駛後方)..... | 19 |
| 圖 14 ANC 系統降噪效果於人耳位置量測(喇叭(NO.1)放置在駕駛後方)..... | 20 |
| 圖 15 ANC 系統降噪效果於誤差麥克風(喇叭放置在駕駛上方)..... | 21 |
| 圖 16 ANC 系統降噪效果於人耳位置量測(喇叭放置在駕駛上方)..... | 21 |
| 圖 17 駕駛艙內場域型 ANC 系統，次級喇叭(NO.2)在駕駛上方..... | 22 |
| 圖 18 ANC 系統降噪效果於誤差麥克風(喇叭(NO.2)放置在駕駛上方)..... | 23 |
| 圖 19 ANC 系統降噪效果於人耳位置量測(喇叭(NO.2)放置在駕駛上方)..... | 23 |
| 圖 20 挖土機車廂 ANC 元件定位..... | 24 |
| 圖 21 控制結果 (A)低轉速 (B)中轉速 (C)高轉速 (藍：控制前、紅：控制後 DBC)..... | 26 |
| 圖 22 變壓器降噪實驗 (A)實驗配置圖 (B) 中控室配置示意圖..... | 28 |
| 圖 23 次級路徑響應圖..... | 28 |
| 圖 24 實驗結果圖(藍：控制前、紅：控制後)..... | 29 |
| 圖 25 實驗結果分貝值(A-WEIGHTING) (A) 右耳控制前 (B) 右耳控制後 (C) 左耳控制 前 (D) 左耳控制後..... | 30 |
| 圖 26 控制結果(藍：控制前、紅：控制後，dBA)..... | 31 |

表目次

| | |
|-----------------|----|
| 表 1 控制所用參數..... | 29 |
|-----------------|----|

第一章 計畫概述

第一節 前言

職業安全衛生相關法令對於勞工於噪音作業場所之聽力保護已有相當明確之條文規定，其規範之精神依序以工程控制、行政管理或佩戴防護具來減少勞工噪音的暴露量。職業安全衛生設施規則第三百條更詳細規範，雇主對於發生噪音之工作場所，應有工程改善、暴露限值、標示周知、防音防護具等必要作為，多面向的防止勞工因過度噪音暴露而導致聽力損失。依國內現行普遍的作法，雇主在評估或執行噪音工程改善前，會先使勞工佩戴聽力防護具(如：耳塞、耳罩)來降低外界噪音，然而耳罩佩戴時會對耳朵乃至於頭部產生壓力，長期使用會感受不舒服，勞工多半選擇不佩戴或無法全程佩戴，故工作時仍然會暴露在噪音的危害之中，降低防音防護具保護聽力的效果，故有必要對此提出其他可行的改善方案。

凡是不悅耳的聲音，都可稱為噪音。勞工所暴露的噪音環境，是指音量太大，會危害人體健康的聲音，一般我們以音量的分貝(decibel, dB)來表示，若是有考量到人耳聽覺感受的因素，則在單位的表示上會以A 權衡分貝值(dBA)來表示。普遍來說辦公室內的環境音量約介於 50 dBA 到 60 dBA 之間；正常情況下說話聲音大小約 60 dBA 到 70 dBA 之間；道路交通噪音約 85 dBA 左右；汽車喇叭與地下鐵噪音約 100 dBA；警報器、噴射機起飛音量則約為 120 dBA，根據世界衛生組織(World Health Organization, WHO)的資料，身處 85 dBA 的環境超過八小時會造成聽力受損，100 dBA 只需要十五分鐘、120 dBA 只需九秒就會造成傷害。噪音除了會永久損傷聽力以外，生理上也會引起諸多疾病，例如壓力荷爾蒙分泌增加，因而提早老化。尤其是孕婦，更因壓力荷爾蒙的分泌，造成新生兒體重過輕或早產，自律神經失調，引起肌肉緊繃、心肌梗塞、中風等。而心裡上容易引起憤怒，使血壓升高。同時因壓力荷爾蒙分泌，讓心情鬱悶、容

易暴躁。

職業性聽力損失是國內職場環境最普遍的職業危害，是由於勞工長時間暴露於高音壓的噪音環境下，其容易導致聽力損失，也會衍生對勞工生理與心理上之健康危害。鑑於耳罩佩戴時會對勞工耳朵及頭部產生壓力，不舒適感易使勞工不佩戴或無法全程佩戴，降低保護聽力的效果。故本研究擬開發採用數位式控制技術之場域型主動噪音控制(Active Noise Control, ANC)裝置，針對勞工特定作業位置及現場噪音環境頻譜屬性，利用噪音擷取與回授計算，產生反噪音進行噪音的破壞性干涉與控制，以降低勞工所受之噪音暴露，並作為未來勞動及職業安全衛生研究所整合噪音作業環境監測之雛型。

第二節 學術文獻回顧

隨著工業發展的進步與變遷，發動機、風扇、鼓風機、變壓器和壓縮機等機具被大量使用，使得噪音問題日趨嚴重。在運輸系統，例如：車輛、火車、飛機和船舶，亦有相當程度的噪音問題。而發電廠、車站、軌道系統更會造成大範圍的噪音汙染。暴露在強大的噪音之下，對人類的聽覺會造成暫時性的聽覺改變，若長期處於大量噪音環境，極可能會造成永久的聽力損失[1]。因此，在職業安全衛生設施規則中有規範，勞工工作場所因機械設備所發生之聲音超過九十分貝時，雇主應採取工程控制、減少勞工噪音暴露時間，且任何時間不得暴露於峰值超過一百四十分貝之衝擊性噪音或一百五十分貝之連續性噪音；對於勞工八小時日時量平均音壓級超過八十五分貝或暴露劑量超過百分之五十時，雇主應使勞工戴用有效之耳塞、耳罩等防音防護具之規定[2]。

一般來說，最常被使用的噪音抑制方式為被動式噪音控制法，為使用各式吸、隔音(振)材料針對噪音源及傳遞路徑以吸收或隔絕的方式處理噪音問題，或是針對受音端使用耳塞、耳罩等防音防護具來降低人耳所接受到的音量。然而，此類噪音控制方法能處理的聲音頻率高低，與材料厚度成反比。簡單來說，

使用少量(較薄)的吸音材料對於高頻噪音相當有效，但對於低頻率噪音，則需耗費大量成本與空間(較厚重、體積較大之材料)才能看出效果[3]。另外，以耳塞、耳罩等隔絕的方式來處理噪音，將對噪音與其他聲音無差別地消除，例如：交談與意外發生時的警告聲，輕則使得人與人之間的交談受到限制，重則形成嚴重的工安問題。1936年，Lueg 提出主動噪音控制技術[4]，數十年來，隨著聲學技術與數位訊號處理器的發展[5]-[7]，此技術逐漸受到重視，功能更強大且低成本的處理器成為主動噪音控制技術發展的重要基礎，並且也開發出許多成熟的產品。主動噪音控制的概念是利用物理上的聲波疊加原理，使用揚聲器即時產生出與所欲抵消噪音大小相同，但相位相反的反噪音，使得噪音與反噪音形成破壞性干涉，進而互相抵消，而主動噪音控制技術也被驗證能有效的處理環境中的低頻噪音[8]，更不乏針對工業場所產生之噪音進行主動噪音控制系統開發之應用研究[9]-[11]。

最常見的主動噪音控制方法，會使用有限脈衝響應(Finite Impulse Response, FIR)濾波器結合最小均方(Least Mean Square, LMS)適應性演算法以及衍生的 Filtered-X LMS(FXLMS) 適應性演算法來實現[12]-[15]，以因應在實際應用中，隨時改變的使用環境與噪音頻率、振幅與相位等成分。現今的主動噪音控制技術主要有三大演算法，分別為前饋式(Feedforward)、回饋式(Feedback)以及結合上述兩種方法的混合式(Hybrid)[16]。前饋式演算法於噪音源頭端，利用感應器取得噪音訊號，通常使用麥克風、加速規或轉速計，經過數位運算處理後，再由後端的次級喇叭播放反噪音予以消除，並使用誤差麥克風，將系統誤差回授至演算法以修正系統之濾波器參數。此架構為最廣泛應用在管路型工業噪音的降噪演算法上[13][17]-[20]。而回饋式演算法於噪音源頭端並無任何感測器，而是利用系統輸出與誤差訊號估測出噪音成分，但此演算法只能處理可預測之噪音，此架構常被利用於具有穩定週期性噪音的裝置，如：風扇等[21]-[23]；混合式則結合上述兩種演算法的特性，進一步消除噪音，在保溫箱的噪音控制應用上則有不錯的效果[1]。

另外，有一些研究是利用多通道主動噪音控制演算法[16]，使用多個喇叭與麥克風及多個適應性濾波器，可將系統的噪音控制範圍擴大。這種方法對於

實現本研究所發展的場域式噪音消除，將能更擴大靜音區[24]，讓使用者的頭部活動範圍均符合噪音降低的目標。近幾年利用多通道演算法對於擴大靜音區的研究則不多，Kottayi 等人發表的研究將主動噪音控制系統設計在手機上，讓使用者使用手機時能在耳朵附近產生靜音區[25]，新加坡的研究團隊則討論在主動噪音控制系統中，類比元件失真狀況下的靜音區及 ANC 系統性能[26]，台灣的研究團隊過去也曾作過頭枕系統的靜音區研究，效果也十分理想[27]，日本的研究團隊也有涉獵此議題，並將之使用在工廠噪音的防治上，效果也相當不錯[28]。

傳統上，靜音區都是一個球狀的區域，紐西蘭的研究團隊則是利用聲學演算法，強調可以透過運算，任意的改變靜音區的形狀，在一些運用上有不錯成效[29]。美國達拉斯的研究團隊 Ganguly 等人則是運用多通道的回饋式架構，研究降低噪音並且擴大靜音區的方法[30]。Kwan 等人是將主動噪音控制技術應用在太空艙中，為太空人產生一個小範圍的靜音區[31]。Buck 等人考慮到非穩定的寬頻噪音干擾與頭部移動對於靜音區的影響，並將主動噪音控制系統實現在飛機座椅的頭枕上[32]，Zhang 等人則是利用演算法在一個控制範圍內消除主要噪音[33]。這些研究皆是以場域噪音消除的觀念為出發點，其所欲達成的目標皆是在耳朵旁產生一個夠大的靜音區，並且讓使用者配戴 ANC 耳機時，較不會感到緊迫，以提高使用者的舒適度。

基本上，利用主動的方式來進行噪音處理主要有三大類方法，分別是在噪音源頭消除、在噪音傳遞過程中消除，如果噪音已經四散開來了，那只能在耳朵(接受端)進行場域式消除。本研究即以此場域式消除為出發點，針對不同勞動場所的噪音特性，如在中央控制室或建設機械駕駛艙內設計噪音控制實驗，以進行在勞工耳朵旁的噪音消除。此外，主動噪音控制的實施除了演算法外，需要搭配麥克風、喇叭及訊號處理器、周邊電路等類比元件，這些元件的線性化程度、延遲效果、相對位置也扮演重要的角色[16]。

近幾年也有一些主動噪音控制相關應用的論文值得重視；包含 Zhao 等人提出變壓器的低頻噪音問題研究[34]，Patel 所提出有關聲音品質的問題研究等[35]。

其他舉凡理論研究的論文也相當豐富，包含許多學者關心的子頻域分割問題[36]-[38]、次級路徑線上偵測問題[39]-[40]、以及針對窄頻噪音的主動噪音控制設計研究[41]-[42]等，均有不少學者涉獵。這些理論研究雖然現階段實用機會不大，但卻也在主動噪音控制學理上提出貢獻，解決了一些數學上的問題，讓主動噪音控制的研究更周延、更全面；假以時日，相信會有更多應用契機。

第三節 目的

本研究目的為開發場域型主動噪音控制裝置，若勞工作業位置固定，則可以在勞工聽覺帶附近形成類似噪音保護罩的空間(靜音區)，不會影響勞工之作業，也不會有如同佩戴耳罩時對耳朵及頭部產生的壓迫感。今年度研究主旨如下：

- 一、蒐集與分析主動噪音控制技術相關文獻，提出適用於本案主動式噪音降噪技術之規劃方案。
- 二、編寫 1 種主動式噪音控制演算法及進行演算效能分析。
- 三、完成建置場域型主動式噪音控制之系統雛型。
- 四、完成場域型主動式噪音控制之實驗室測試，包含降噪效能評估、系統修正設計。
- 五、完成 2 場次工作場域實地或實驗室模擬測試，依勞工作業空間裝置主動噪音控制裝置，測試其降噪效果。
- 六、完成場域型主動式噪音控制裝置與其他噪音環境監測、勞工生理監測之系統相容性評估。

第二章 主動式噪音控制之演算法及進行演算效能比較分析

第一節 窄頻前饋型演算法

對於引擎、馬達機具運轉產生的噪音，可以利用諸如轉速計等非聲學感測器來讀取轉速信號，來計算所對應頻率的窄頻噪音當作參考信號，減少使用參考麥克風所衍生的次級喇叭聲學回饋問題，這樣的系統適合利用窄頻前饋式 ANC 演算法來進行處理。這個演算法乃在 FXLMS 演算法的基礎下，將非聲學感測器所得到的窄頻訊號拆分成以單一頻率為主的多個參考訊號，好處尚包含可針對單一頻率做參數調整，使得所需濾波器階數降低，可以提升系統收斂速度，同時也因每一通道僅處理單一頻率噪音，可有效提升系統降噪性能。針對每一參考訊號做 FXLMS 的運算，可得到多個頻率運算後的輸出，將這些輸出訊號相加後輸出給喇叭，再由麥克風接收引擎噪音與喇叭訊號做迴授，直到誤差訊號收斂為止，其方塊圖如圖 1。

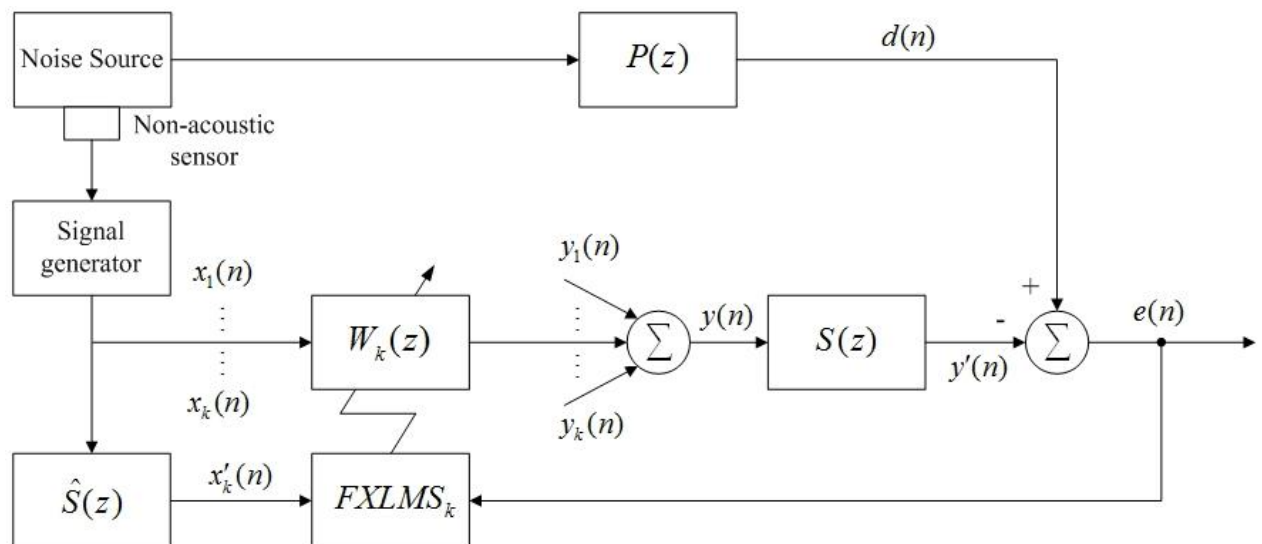


圖 1 窄頻前饋式 ANC 方塊圖

圖1的方塊圖中，參考訊號 $x(n)$ 可拆分成多個弦波訊號 $x_1(n)$ 、 $x_2(n)$ 到 $x_k(n)$ ，其中

$$x_p(n) = A_p \cos(\omega_p n), p = 1, 2, \dots, k \quad (1)$$

其中 k 為弦波訊號總數。

而輸出訊號 $y(n)$ 為適應性濾波器 $W_p(z)$ 之濾波器後累加得到

$$y(n) = \sum_{p=1}^k \sum_{l=0}^{L-1} w_{pl}(n) x_p(n-l) \quad (2)$$

參考訊號 $x_p(n)$ 經過次級路徑後為 $x'_p(n)$

$$x'_p(n) = \sum_{m=0}^{M-1} \hat{s}_m(n) x_p(n-m), p = 1, \dots, k \quad (3)$$

其中 $\hat{s}_m(n)$ 為 M 階次級路徑濾波器 $\hat{S}(z)$ 的係數， $\hat{S}(z)$ 為次級路徑 $S(z)$ 的近似值，次級路徑包含、功率放大器、次級喇叭置誤差麥克風之聲學路徑、麥克風前置放大器、低通濾波器、A/D之信號總成，由圖2之方式，以系統判別的原理求得。 $P(z)$ 則為噪音傳遞主級路徑。

而對於系統控制器參數的調整，則以FXLMS演算法進行，修正法如下：

$$w_{pl}(n+1) = w_{pl}(n) + \mu_p x'_p(n-l) e(n), l = 0, 1, \dots, L-1; p = 1, 2, \dots, k \quad (4)$$

藉由不斷地更新與調整(4)式中的濾波器係數直到系統收斂，完成ANC系統的運算，其中 L 為濾波器階數， μ 為步階寬度(Step Size)。

由於本方法使用平行運算的觀念，所以收斂速度極快，同時，依理論消除單一頻率噪音只需一階濾波器係數，因此濾波器的設計複雜度也跟著降低

許多；噪音消除能力也會比較好。與傳統方法相較，本方法對於因馬達、引擎運轉所導致的噪音特別有效，收斂速度也比較快；但缺點則是轉速信號不易取得，需有製造商協助進行量測。

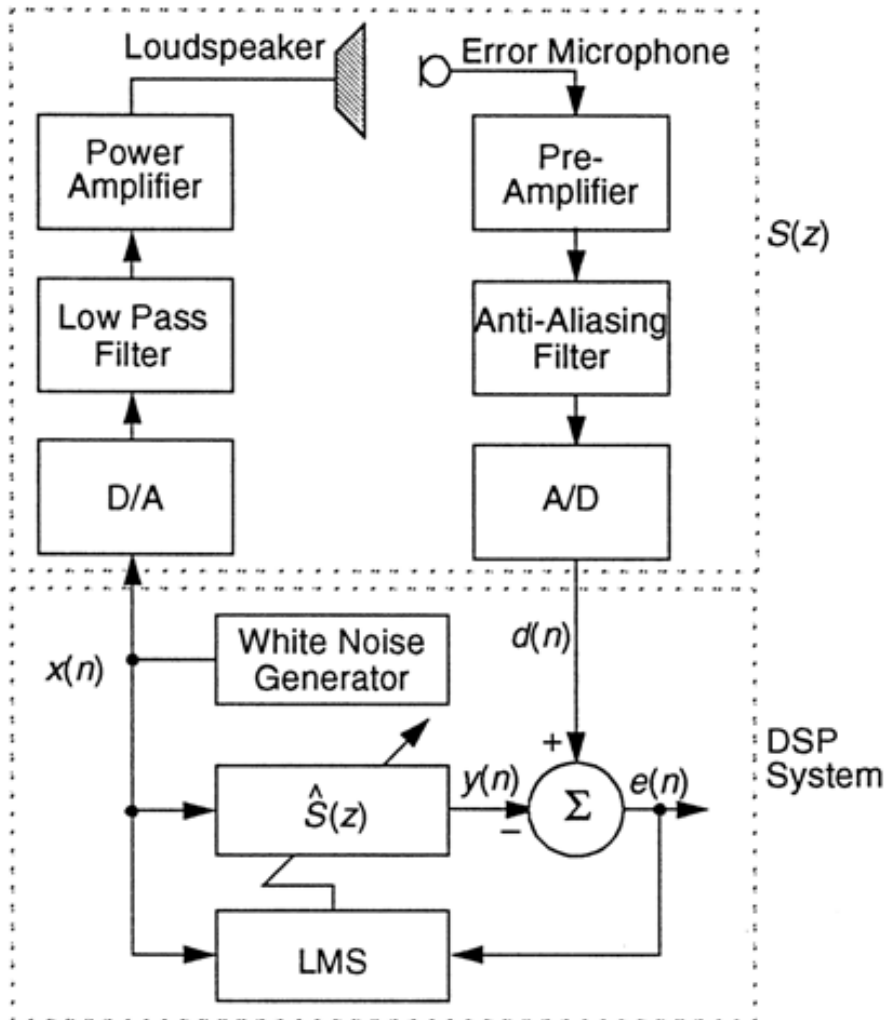
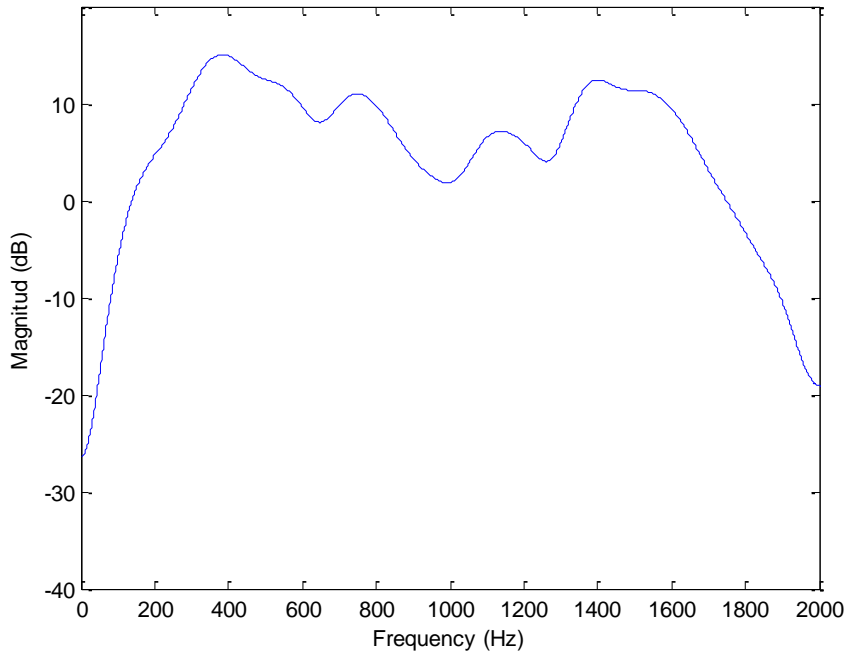


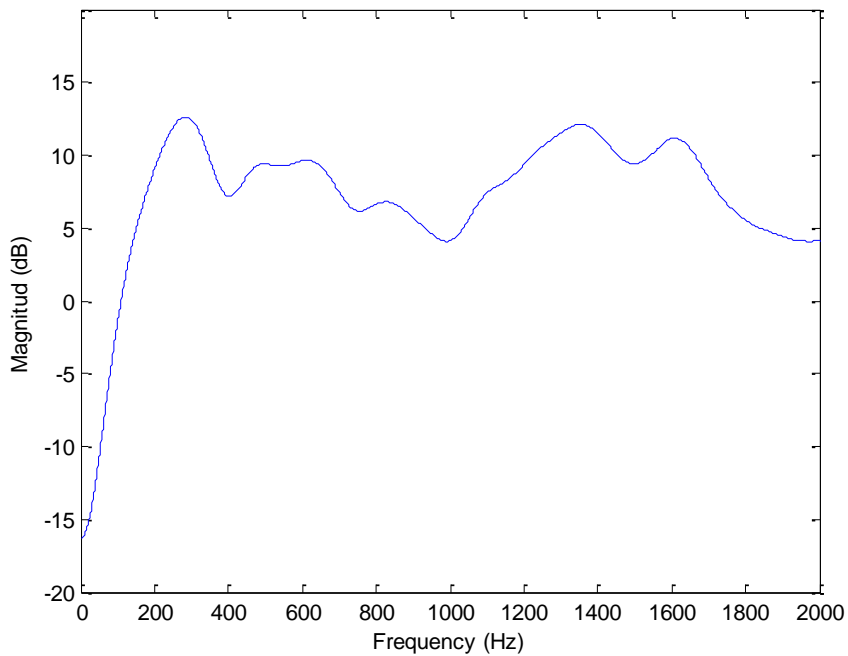
圖 2 次級路徑響應估測方法

第二節 演算效能分析

利用電腦 Matlab 軟體來驗證所發展之窄頻前饋型演算法的性能。其中 $P(z)$ 與 $S(z)$ (定義如前一節說明)為 64 階的 FIR 濾波器，其頻率響應如圖 3。



(a)



(b)

圖 3 主級路徑 $P(z)$ 和次級路徑 $S(z)$ 頻率響應

其中，圖 3 所使用參數為實際場域量測而得，以驗證本計算方法成效。本演算法使用模擬參數設計如下：

- Algorithm : Narrowband parallel Feedforward ANC
- 濾波器階數 5；步階長度=0.1；取樣頻率 4000
- 噪音源：250 Hz+500 Hz+750 Hz with white noise

在圖 4 中，藍線為欲消除的窄頻噪音訊號，透過窄頻前饋式演算法，可以發現噪音被明顯的降低，殘留噪音為紅線。為了更清楚看出窄頻前饋式演算法的功能，圖 5 的綠、黑、紅三色分別代表各平行系統所產生之反噪音訊號，可以發現，個別的反噪音訊號是對應其單一頻率作消除，每個系統都是獨立平行的，最後再相加由喇叭放出。窄頻前饋式演算法的特點就是將複雜的窄頻噪音，由各個獨立的系統分別處理一個單頻訊號，因此傳統上前饋式或是回饋式演算法需要幾十或幾百階的濾波器階數，在窄頻前饋式系統上各濾波器階數只需要不到十階即可實現降噪，可大幅減少系統運算時間。值得一提的是，演算法本身可針對不同窄頻噪音頻率進行運算，惟須注意系統 $P(z)$ 與 $S(z)$ 的頻率響應效應，並據以調整控制器參數，以達最佳控制之效果。

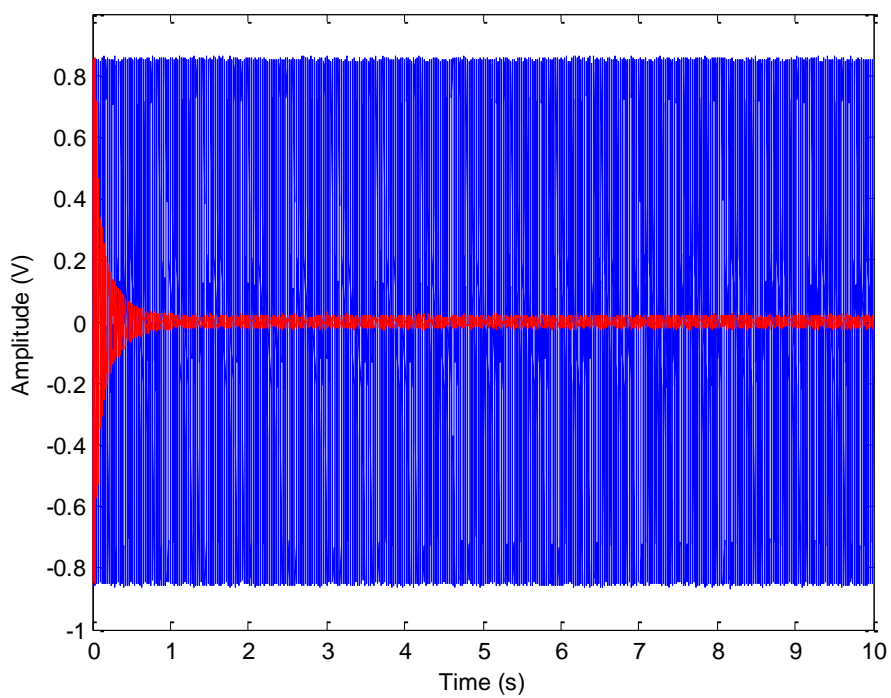


圖 4 時域降噪效果

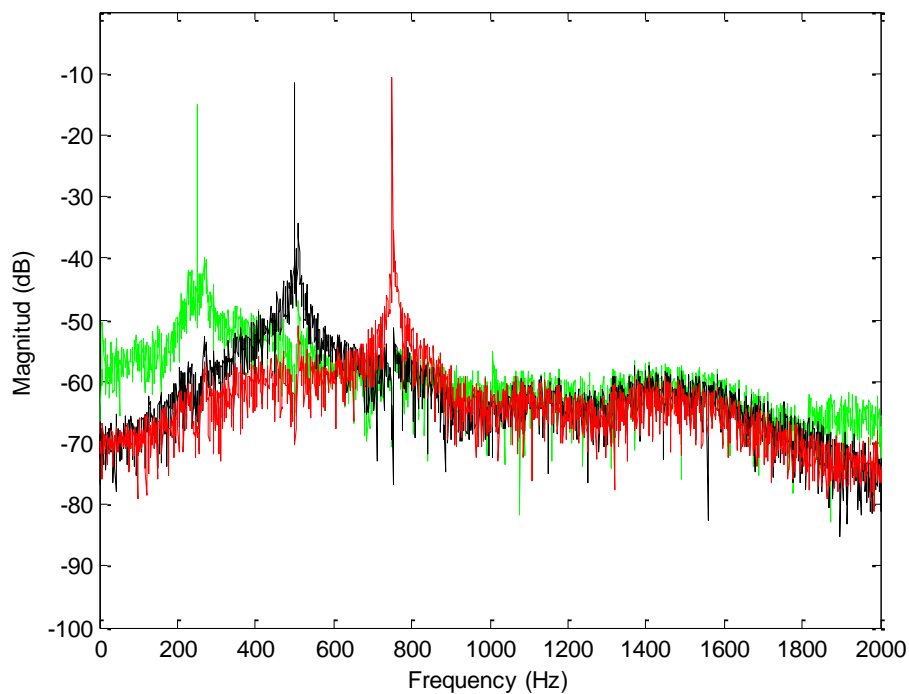


圖 5 各平行系統之反噪音訊號

第三章 場域型主動式噪音控制裝置之系統規劃

第一節 場域型規劃

一、挖土機駕駛艙

本研究擬以挖土機引擎噪音消除(圖 6)為例(暫無考量挖土機實際運作之情形)，在駕駛艙內建置主動式降噪系統，本系統之挖土機型號為 FUSO 40 型，車齡 20 年，相關系統規劃如下：

本研究至現場實際錄製挖土機引擎噪音，現階段並無挖土機製造商協同研究，故無法得知實際引擎轉速，僅知操作時低轉速約 600 rpm、中轉速約 1200 rpm、高轉速約 1800 rpm，目前的實驗僅能以麥克風(Shure MX183)錄製實際挖土機引擎噪音，在引擎高、中、低三種轉速下，引擎的噪音最大音量以噪音計(泰仕 TES-1350A；IEC 651 Type 2)量測，分別大約為 102、101、94 dBC 左右(如圖 7)。所以本研究在實驗的部分，將一個喇叭(BOK CS-252)放置於一個挖土機駕駛艙後方，如圖 8，模擬實際引擎位置，並由此喇叭播放錄製的引擎高、中、低三種轉速噪音，並將音量放大到對應之音量，以模擬實際噪音。以下說明本研究的量測與實驗方式：

- (一) 利用噪音計在挖土機周圍找尋最大噪音位置。
- (二) 利用麥克風及數位錄音機錄製一段噪音。
- (三) 在實驗室建立挖土機車廂。
- (四) 在挖土機車廂相對適當位置放置喇叭播放所錄製噪音。
- (五) 利用噪音計數據，將該喇叭音量調至與現場錄製時相同。
- (六) 進行相關主動式噪音控制實驗。



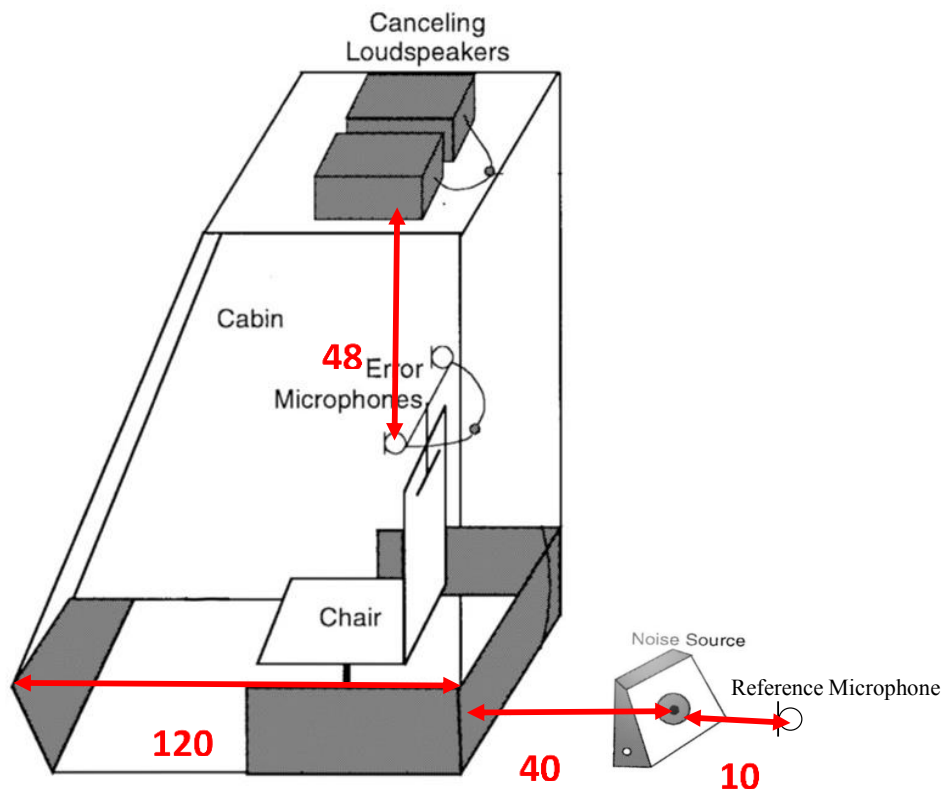
圖 6 挖土機引擎噪音量測



圖 7 高轉速分貝值



(a)



(b)

圖 8 挖土機駕駛艙 (a)側面 (b)配置示意圖 (單位：公分)

在進行實驗前，先初步量測所取得之挖土機駕駛艙本身的(被動式)隔音效果，從圖 9 可以發現，當座艙關閉後，引擎噪音在座椅頭枕位置量測在大約 400 Hz 以上都有些微的下降，而 200 Hz 以下則沒有明顯效果。200 Hz 以下這部分較低頻且能量較高的噪音，也是主動噪音控制主要要處理的範圍。而圖 9 之縱軸係以音壓信號強度做分貝計算。另外，圖 9 中之低轉速的基頻較不明顯，則可能是因為機件老舊或齒輪箱有問題等因素造成。

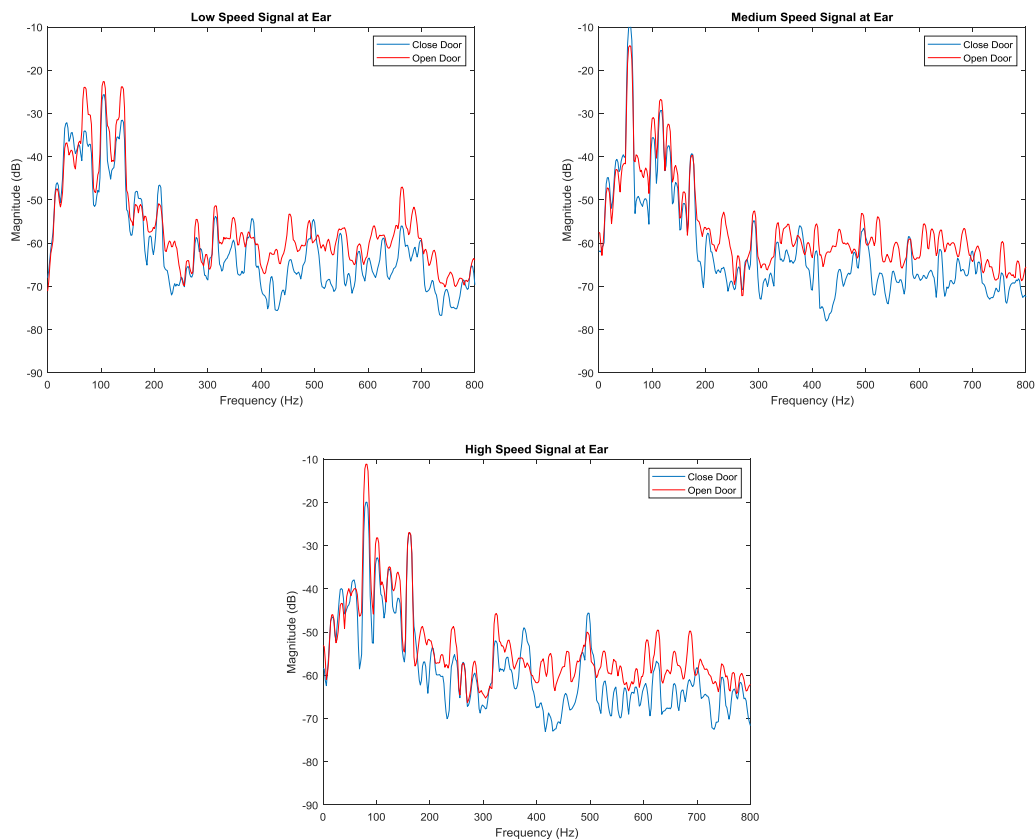


圖 9 挖土機噪音量測於艙內座椅頭枕位置，艙門開(紅)與艙門關(藍)

二、22.8 KV 變壓器中控室

本研究擬以消除中控室裡變壓器產生之噪音為例(圖 10)，在中控室內建置主動式降噪系統，系統規劃如下：

本研究至現場實際錄製 22.8 KV 變壓器噪音，在變壓器正常運轉狀態下，變壓器的噪音最大音量以噪音計(泰仕 TES-1350A；IEC 651 Type 2)量測大約為 86.8 dBC 左右(如圖 10(c))；以 A-weighting 檔位量測則為 77.9 dBA(如圖 10(d))。並以麥克風(Shure MX183)實地錄製之變壓器噪音，回到實驗室進行場域式噪音控制模擬試驗。變壓器噪音為典型窄頻噪音，所錄得的樣本經分析為 120 Hz 倍頻之窄頻噪音，如圖 11 所示，而圖 11 之縱軸係以音壓信號強度做分貝計算。

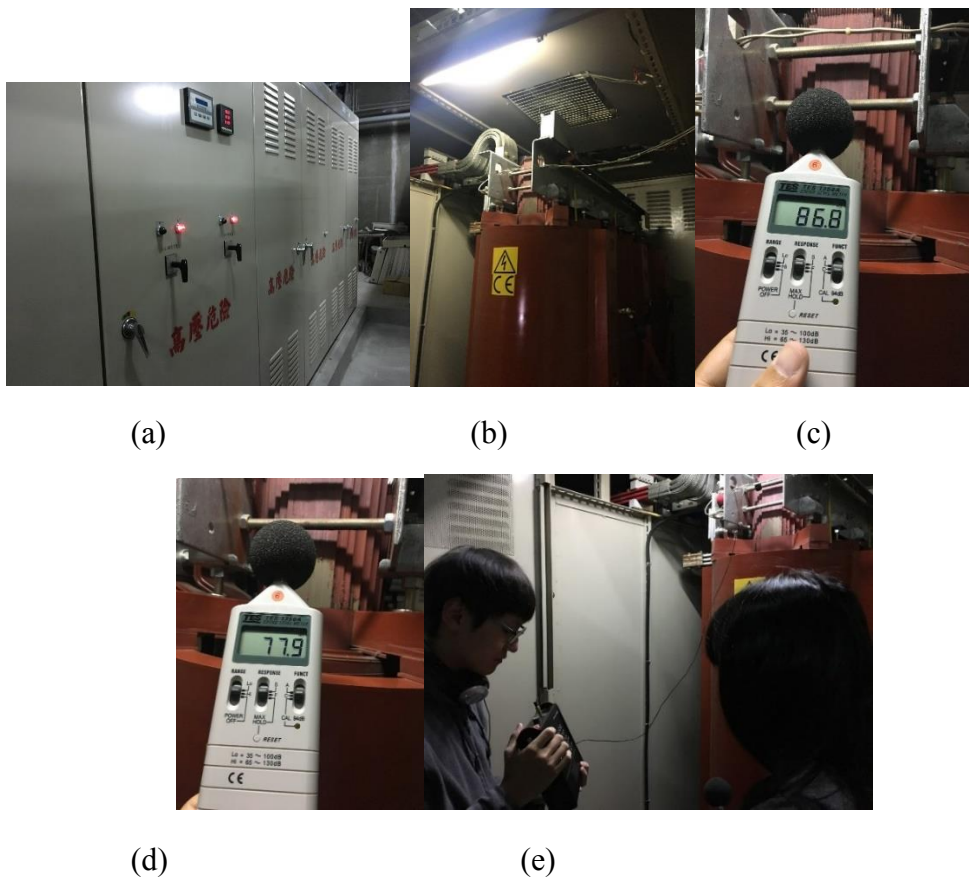


圖 10 22.8KV 變壓器噪音 (a) 外觀 (b) 變壓器 (c) 噪音分貝值(C-weighting) (d) 噪音分貝值(A-weighting) (e) 噪音錄製情形

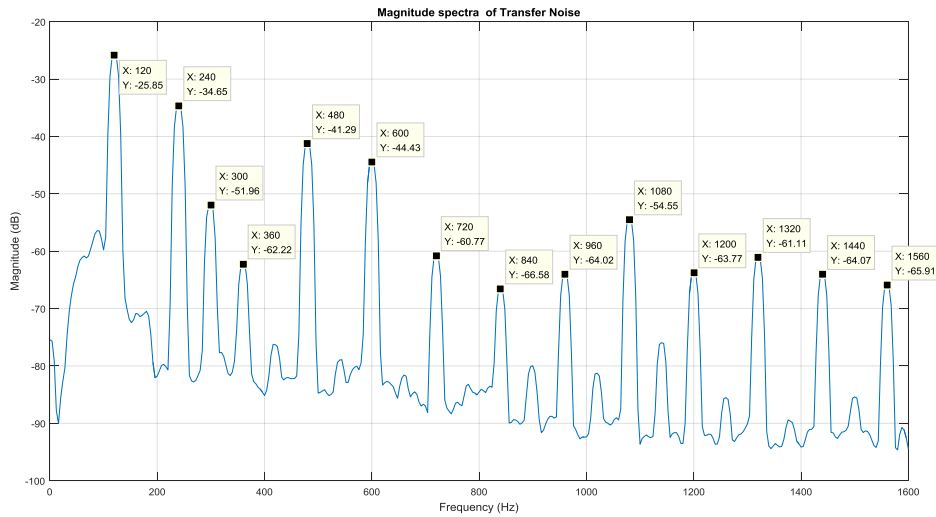
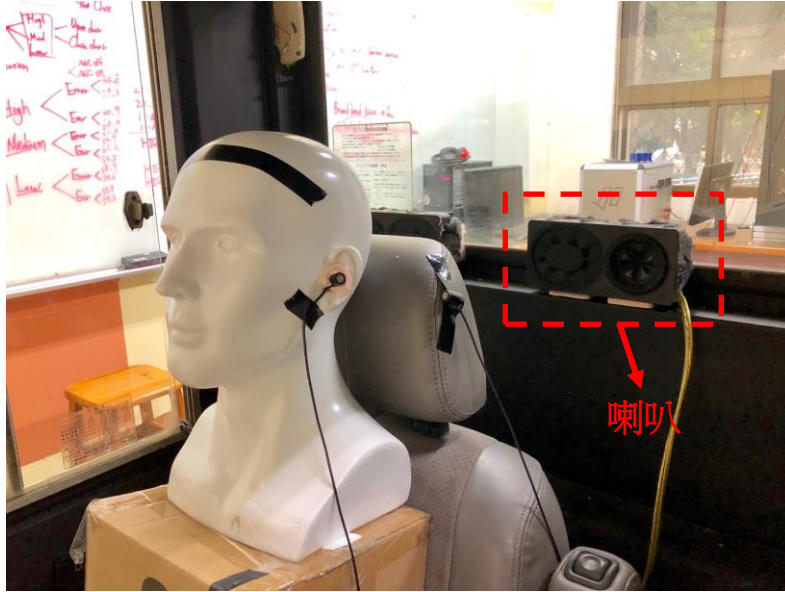


圖 11 變壓器噪音頻譜

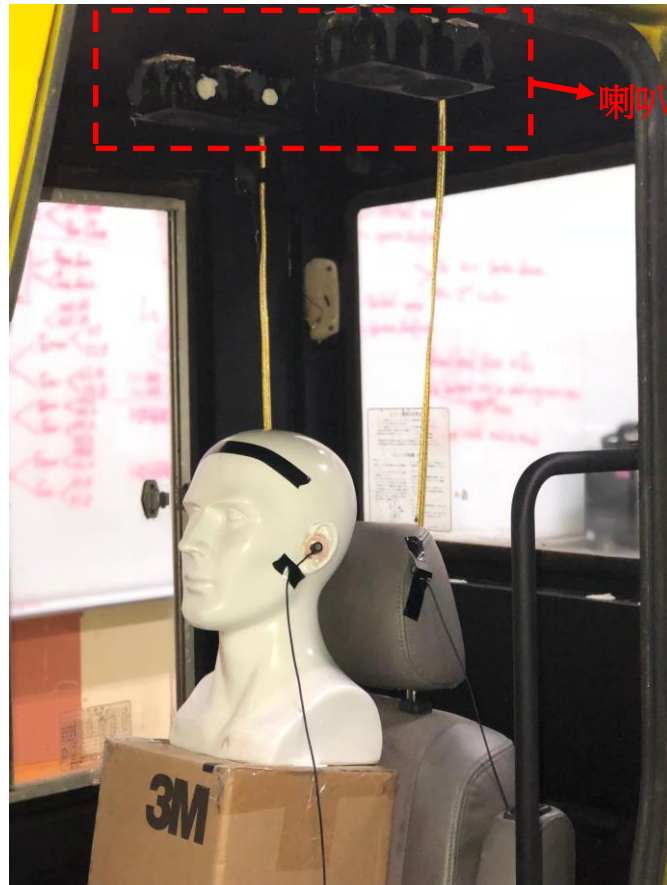
第二節 實驗測試

一、挖土機駕駛艙

挖土機駕駛艙降噪實驗使用 $1 \times 2 \times 2$ 的多通道 ANC 系統，實驗時包含一個參考麥克風(Shure MX183)、兩個誤差麥克風(Shure MX183)和兩個次級喇叭(TB W6-2253S)。本研究規劃的實驗配置方式如圖 12，將誤差麥克風分別放置於椅子頭枕的左右兩側，並測試反噪音喇叭的位置分別於椅子後方與駕駛的頭頂上方，營造場域型 ANC 發展環境，並在假人頭耳朵內埋入麥克風(Shure MX183)，了解駕駛座位的噪音狀況，希望能利用前饋式的 ANC 系統技術，降低駕駛者位置所受到的引擎噪音干擾。次級喇叭的固定方式為使用鋁架進行固定，原則上只要不要過度的影響次級喇叭聲音傳導的路徑，透過本系統內的適應性濾波器便能夠維持目前的降噪效果。由於演算法內使用到適應性濾波器，故即使噪音頻率改變，輸出信號震幅也可隨之改變。



(a)



(b)

圖 12 挖土機駕駛艙內場域型 ANC 實驗系統，(a)次級喇叭在駕駛後方(上)
(b)喇叭在駕駛上方(下)

首先選用第一組次級喇叭(No. 1, TB T3-2190)。在次級喇叭放置於駕駛後方的實驗中，當 ANC 系統開啟時，在不同轉速下，誤差麥克風所得到的降噪效果如圖 13，放置麥克風於人耳位置量測耳朵感受的降噪效果如圖 14。將次級喇叭放置於駕駛後方時，誤差麥克風位置的降噪效果在高中低轉速下效果尚佳，但在人耳位置除中轉速外，並沒有明顯降噪，部分頻率甚至還有不減反增的現象，如圖 14 所示。這種現象的原因推測是椅子頭枕不大，當假人頭放上去時，頭部相對大小及耳朵形狀影響了反噪音的行進方式，造成耳朵及頭枕位置的消音結果差異很大。

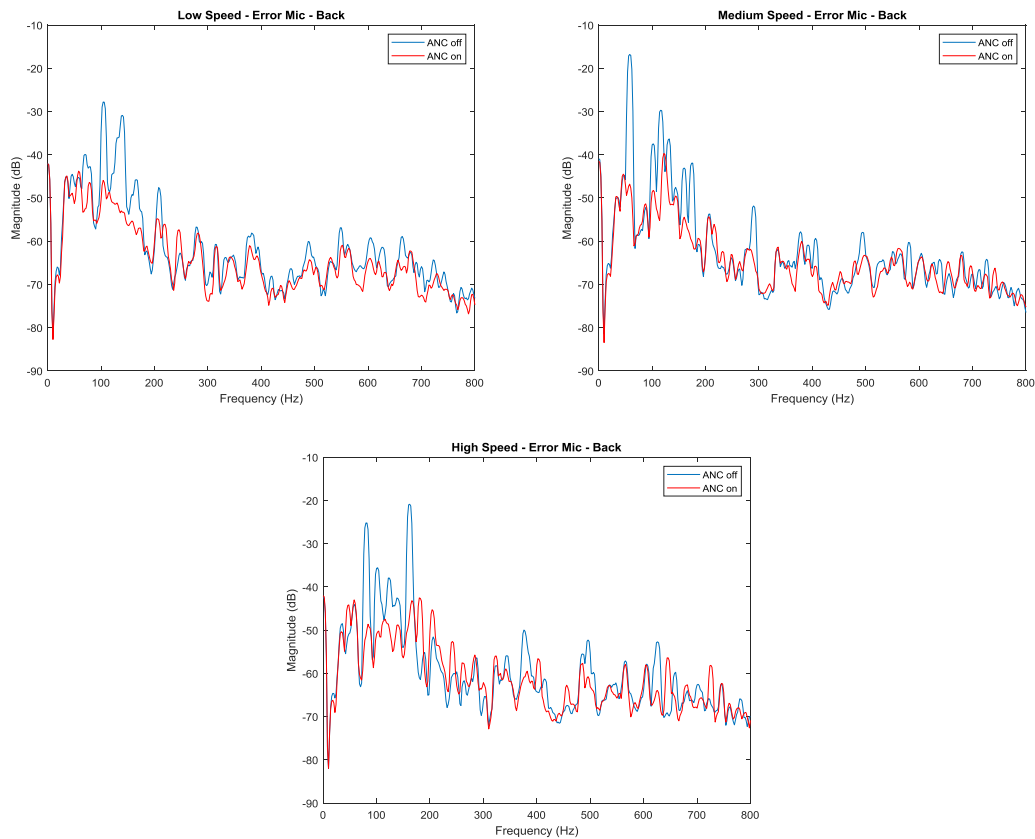


圖 13 ANC 系統降噪效果於誤差麥克風(喇叭(No.1)放置在駕駛後方)

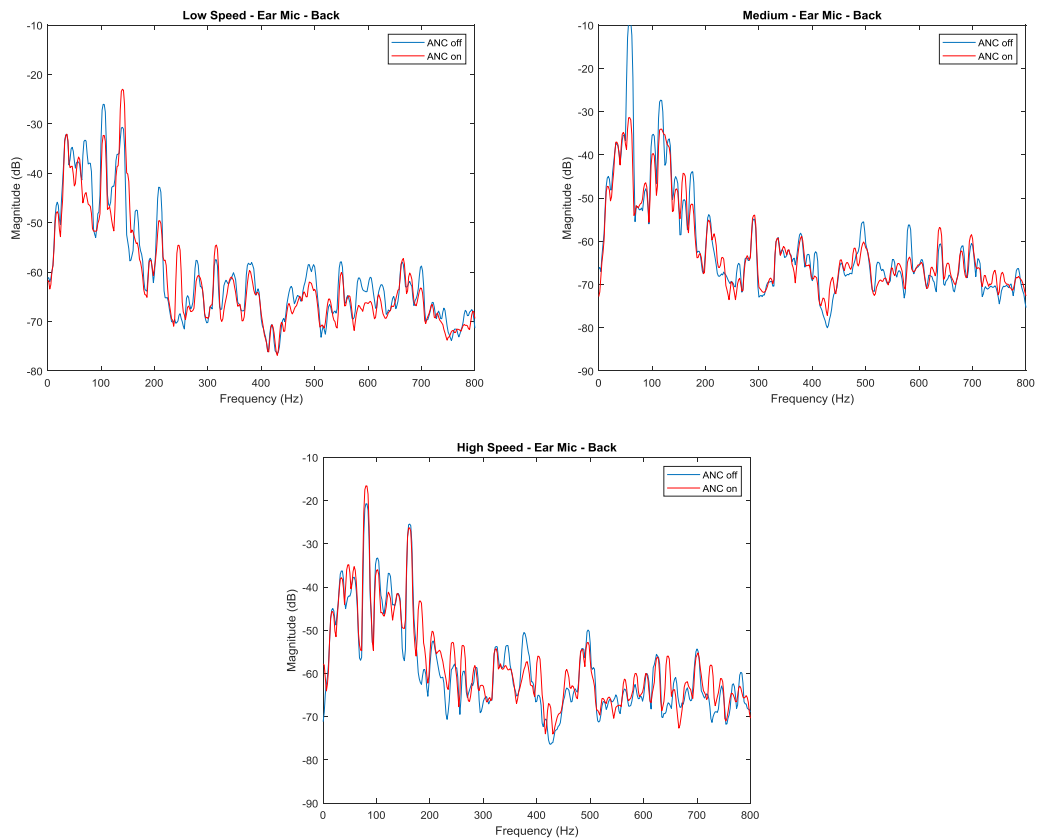


圖 14 ANC 系統降噪效果於人耳位置量測(喇叭(No.1)放置在駕駛後方)

基於上述結果，將第一組次級喇叭(No.1)的位置移至駕駛座上方，在不同轉速下，誤差麥克風所得到的降噪效果如圖 15，另外放置一個麥克風於人耳位置量測實際的降噪效果如圖 16。發現當 ANC 系統開啟時，誤差麥克風的降噪效果與前一個實驗相比有提升。然而，最大的差別是在人耳位置的量測，效果明顯比前一個實驗較好。

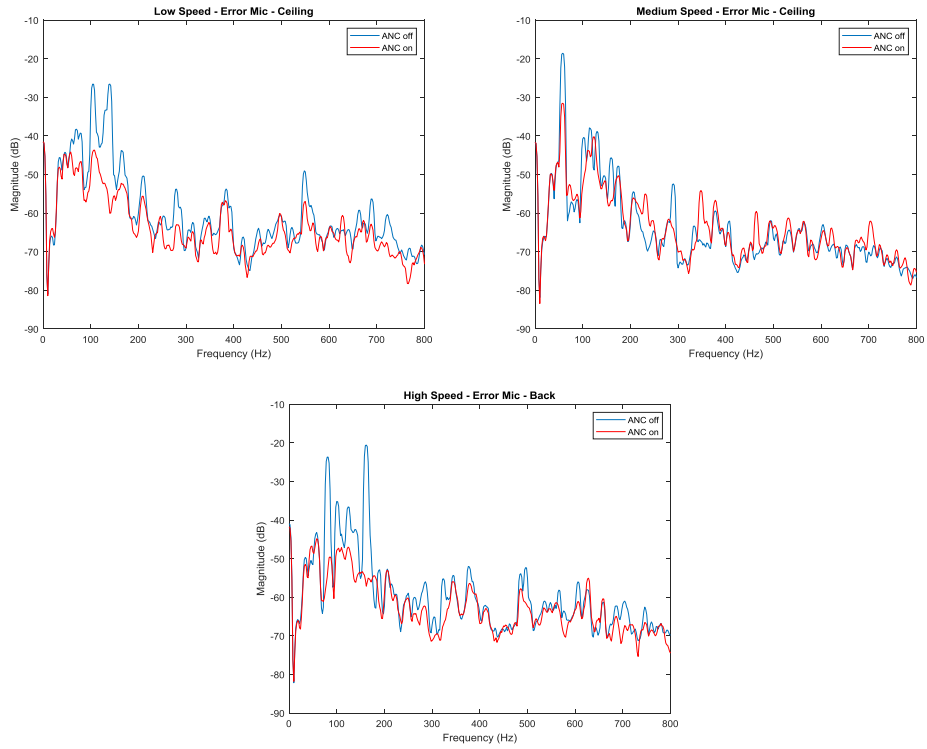


圖 15 ANC 系統降噪效果於誤差麥克風(喇叭放置在駕駛上方)

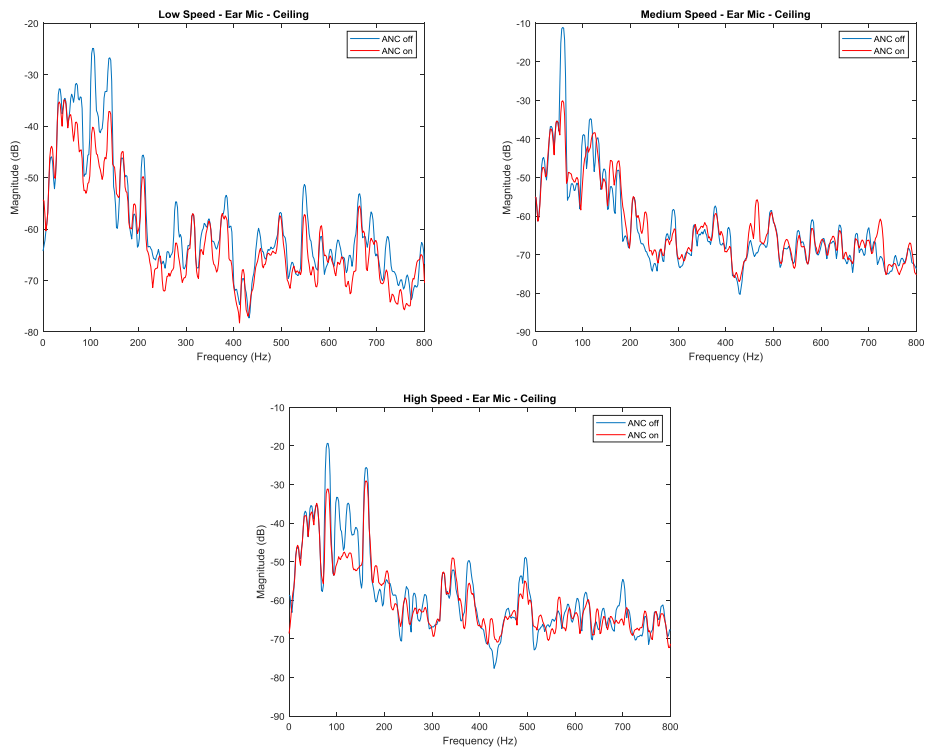


圖 16 ANC 系統降噪效果於人耳位置量測(喇叭放置在駕駛上方)

由上述結果，可以發現將次級喇叭架設於駕駛座上方之效果較好，因此，在相同的次級喇叭位置換上另一組次級喇叭(No.2, TB W6-2253S)進行第三次實驗，配置如圖 17。當 ANC 開啟時，誤差麥克風與耳朵位置的降噪效果如圖 18 與圖 19。在這幾次實驗中，都是以誤差麥克風作為系統的回饋訊號，然而，當 ANC 開啟時，在耳朵的位置都有 5 dBA 以上的降噪效果，驗證了場域型主動噪音控制的可行性。

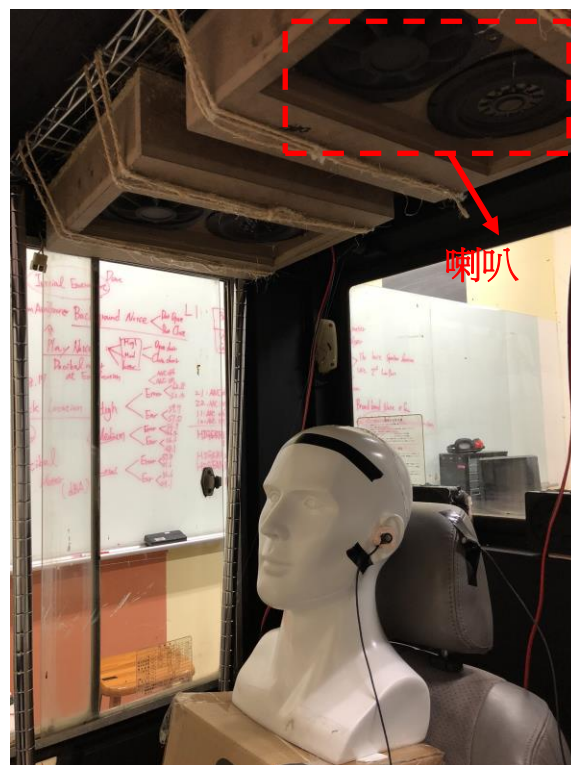


圖 17 駕駛艙內場域型 ANC 系統，次級喇叭(No.2)在駕駛上方

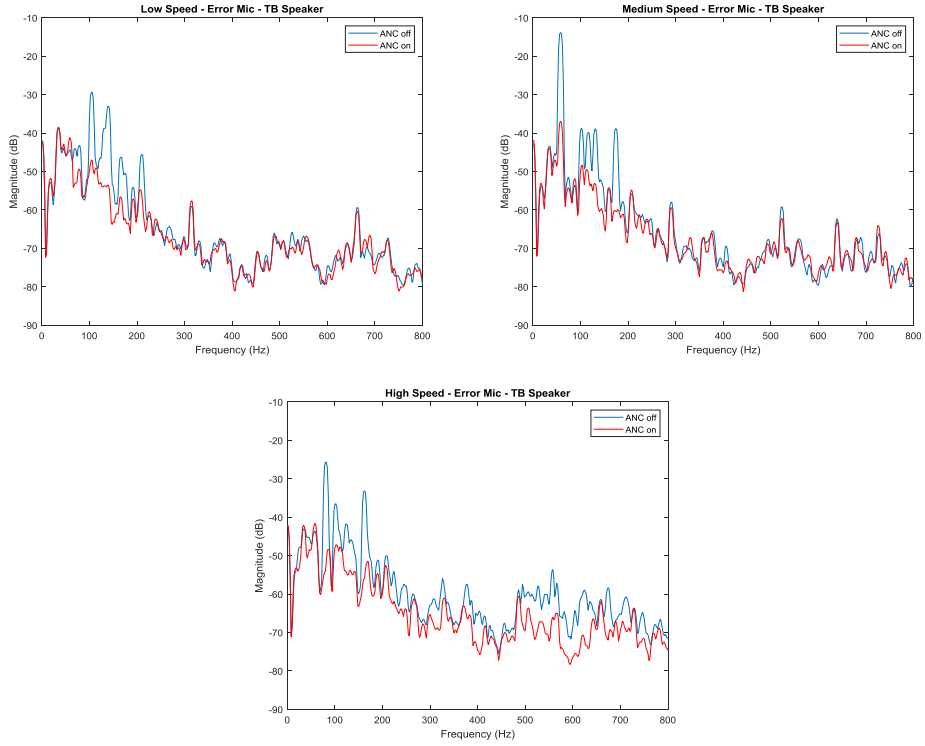


圖 18 ANC 系統降噪效果於誤差麥克風(喇叭(No.2)放置在駕駛上方)

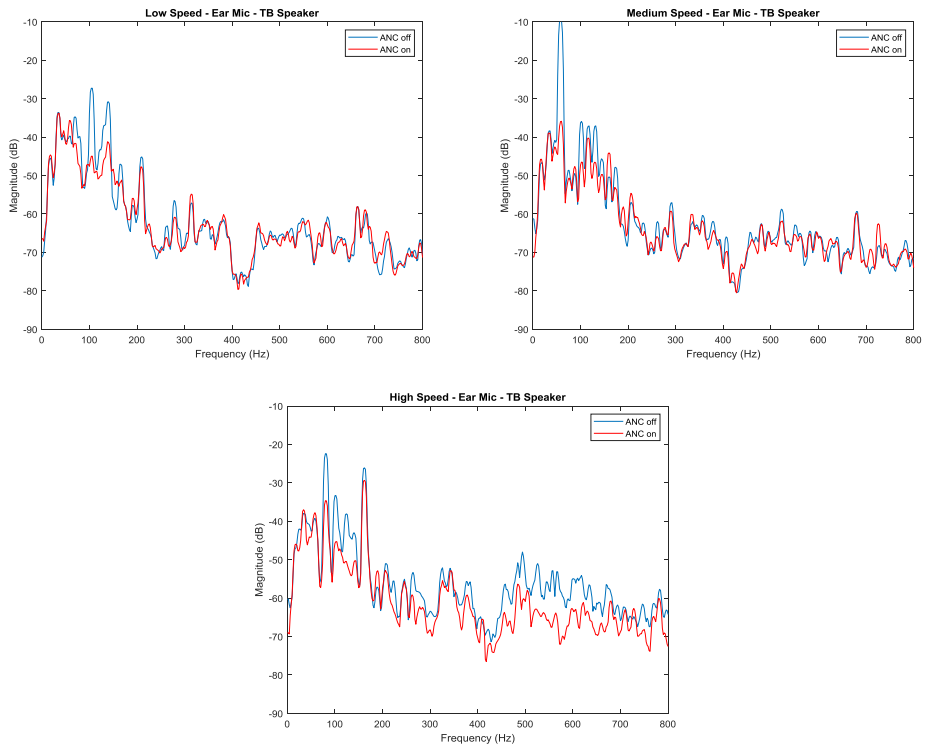


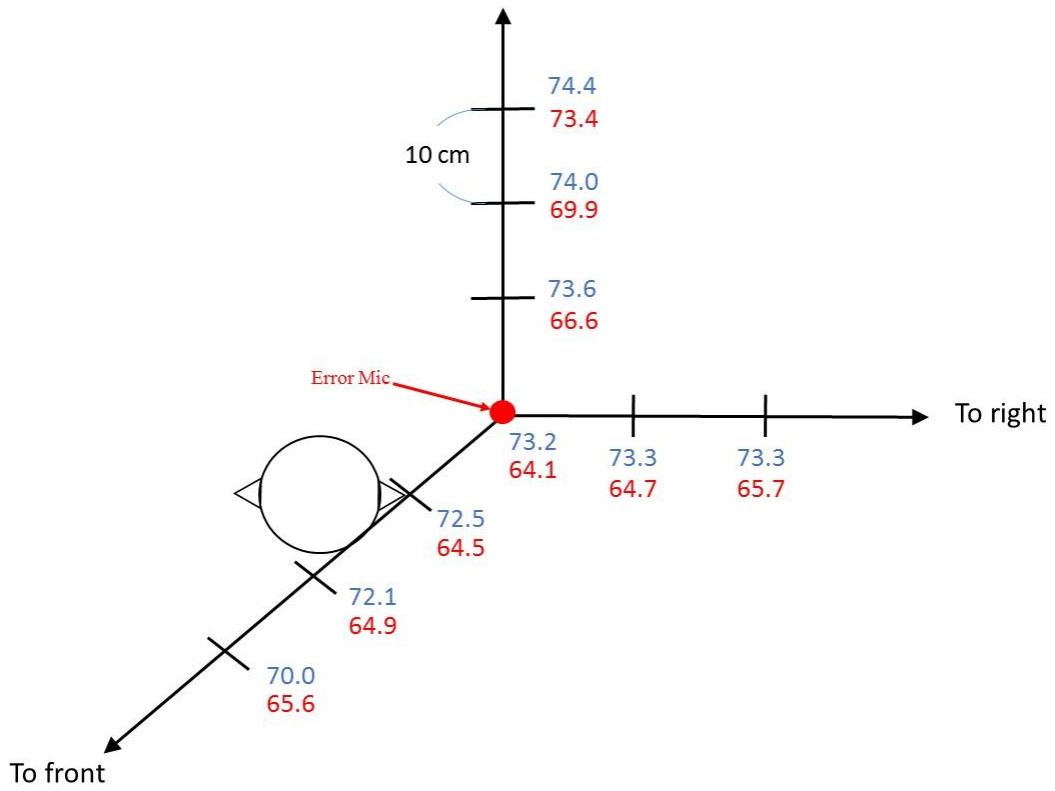
圖 19 ANC 系統降噪效果於人耳位置量測(喇叭(No.2)放置在駕駛上方)

確認最適合之次級喇叭位置後，將次級喇叭及麥克風位置固定，並將所有相關元件定位至最佳位置，如下圖 20 所示，同時，也可以減少元件位置因振動所衍生的降噪結果不佳的問題。

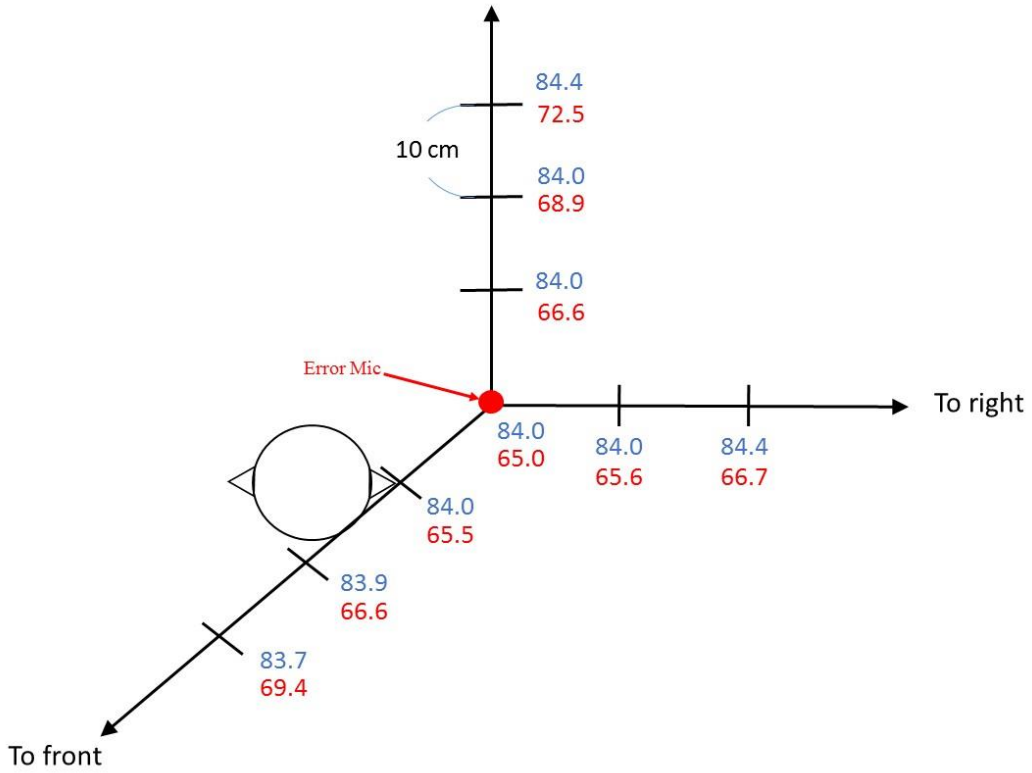


圖 20 挖土機車廂 ANC 元件定位

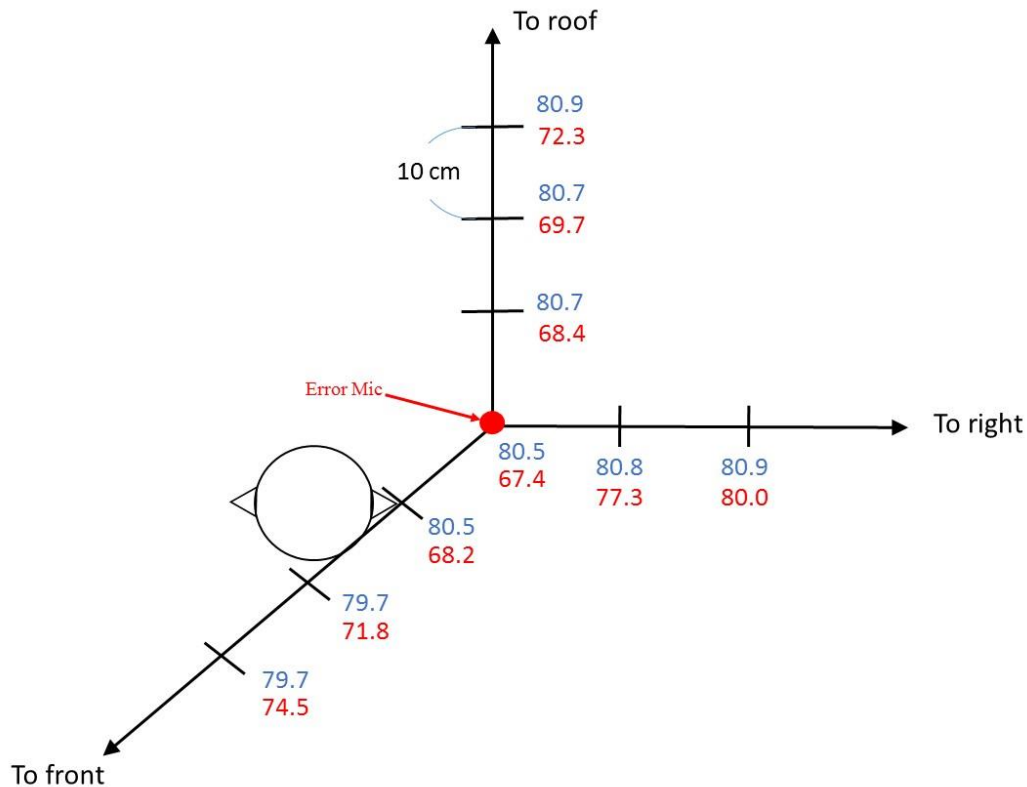
所有元件定位好後，將測試用之假人頭移除，再進行一次實驗，以人耳前方、左側、上方每 10 公分量測一次噪音控制前後的差異，而為了解全頻降噪能量，選用噪音計單位改換為 dBC；藍色數字為控制前，紅色數字為控制後，各轉速下之降噪結果如圖 21 所示，普遍頭部正常活動範圍的噪音消除結果都在 15 dBC 或 10 dBA 以上。



(a) 低轉速



(b) 中轉速



(c) 高轉速

圖 21 控制結果 (a)低轉速 (b)中轉速 (c)高轉速 (藍：控制前、紅：控制後 dBC)

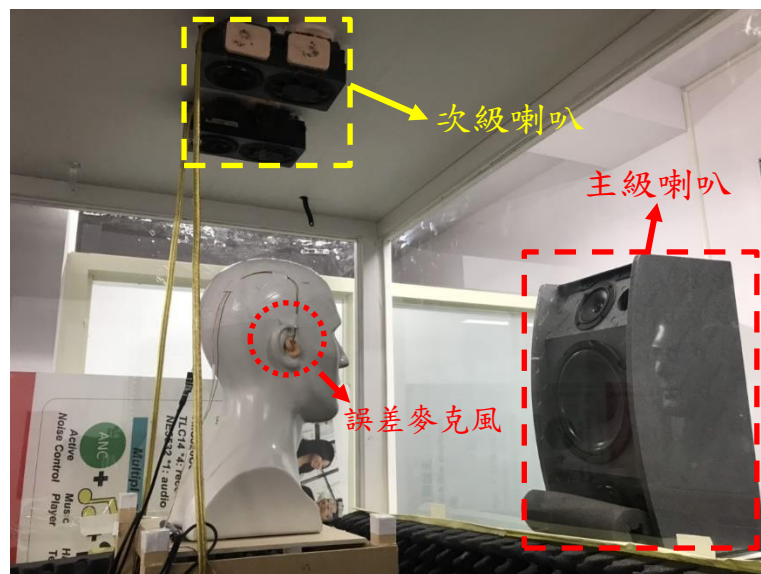
以上實驗結果乃利用實際錄製挖土機噪音，在實驗室進行降噪實驗。以目前所能借用之挖土機來說，降噪效果算是不錯。後續如有挖土機製造商有意願進行合作，則可利用其所提供之引擎轉速信號，搭配麥克風量測實際環境噪音，配合所開發之窄頻前饋式 ANC 系統，提升挖土機駕駛車廂的降噪性能。

二、變壓器中控室

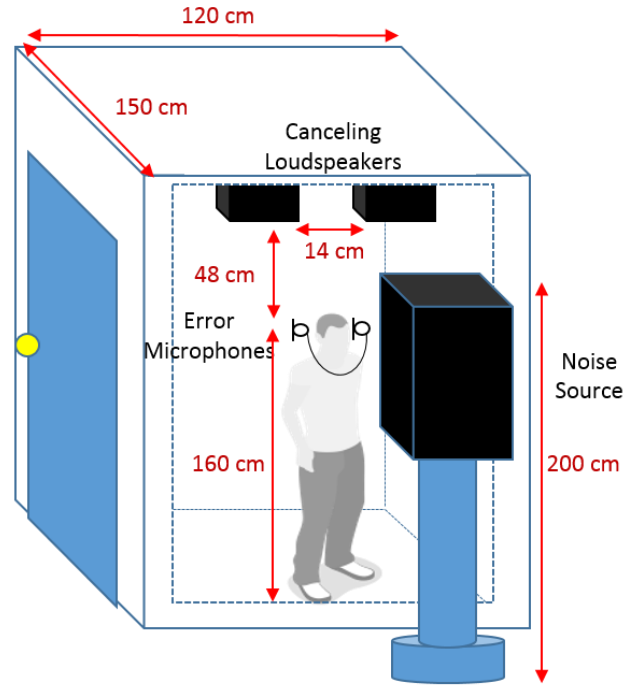
為完成在中控室內變壓器產生噪音的場域式降噪模擬試驗，在實驗室建置一個 120 公分(寬)×150 公分(長)×200 公分(高)之中控室，將一個喇叭 (BOK, CS-252)放置於中控室前方，並由此喇叭播放錄製的變壓器噪音，並將該音量放大到所錄製對應音量，以模擬實際噪音。本研究目前規劃的實

驗配置方式如圖 22，首先將誤差麥克風(Knowles SPU0414HR5H-SB)分別放置於假人頭的左右耳兩側，並將次級噪音喇叭(TB, T3-2190)的位置架設於假人頭的頭頂上方，營造場域型 ANC 發展環境，希望能利用回饋式的 ANC 系統技術，在中控室內降低變壓器噪音。由於變壓器運作時的噪音乃固定頻率、固定大小，所以當 ANC 系統降低噪音後，可以移除假人耳中的誤差麥克風，同時濾波器參數可以不再變動。因此，中控室的控制人員無需配戴物件，在中控制內即有很好的噪音消除效果，並且有很大的靜音區。

以 160 公分操作人員為例(如圖 22(b))，確認並固定喇叭以及誤差麥克風於假人耳中的位置後，量測並確認次級噪音喇叭與誤差麥克風間的次級路徑(如圖 23)，並調整最適合之控制參數(表 1)，由於噪音頻譜約至 1600 Hz，故選用取樣率 4000 Hz，低通截止頻率 1600 Hz。



(a)



(b)

圖 22 變壓器降噪實驗 (a)實驗配置圖 (b) 中控室配置示意圖

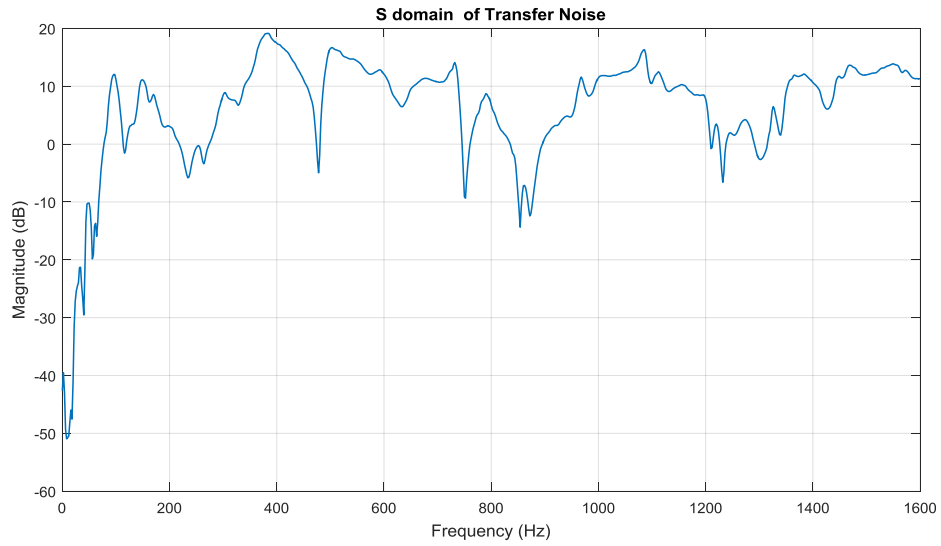


圖 23 次級路徑響應圖

表 1 控制所用參數

| | |
|------------------------------|--------|
| Weight length | 200 |
| Estimated second path length | 150 |
| Step size | 0.01 |
| Cutoff frequency | 1.6kHz |
| Sampling rate | 4kHz |

目前的實驗結果(如圖 24)可看出變壓器噪音的窄頻訊號幾乎都被消除，若以噪音計量測，則控制前後之降噪效果分別為右耳 16.3 dBA、左耳 18.9 dBA(如圖 25)。以人耳前方、左側、上方每 5 公分量測一次噪音控制前後的差異；藍色數字為控制前，紅色數字為控制後，所得降噪結果繪製成圖 26，結果如下。

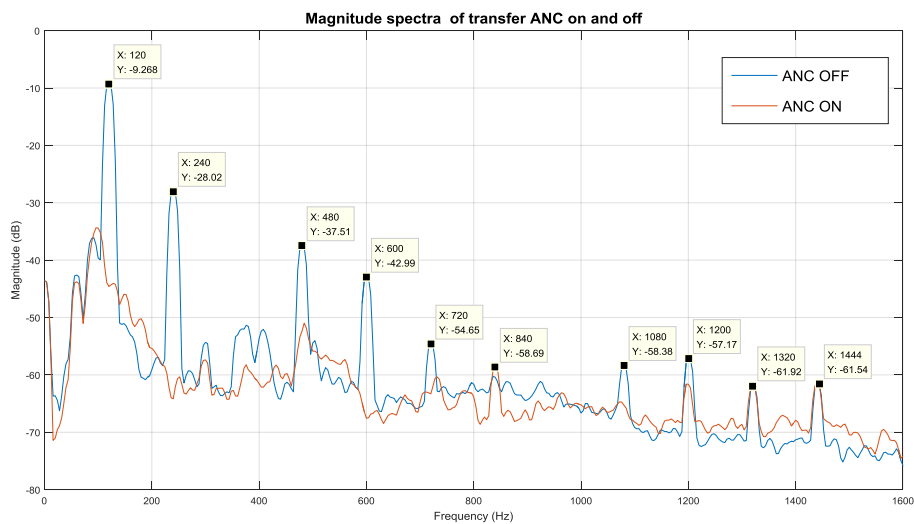
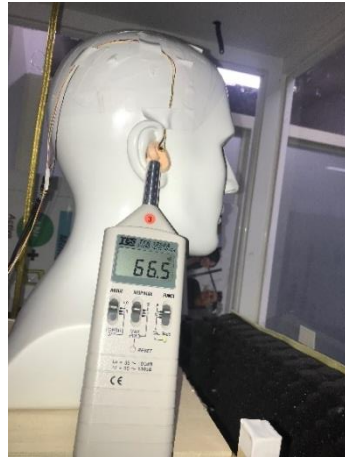


圖 24 實驗結果圖(藍：控制前、紅：控制後)



(a)右耳 ANC OFF



(b)右耳 ANC ON



(c)左耳 ANC OFF



(d)左耳 ANC ON

圖 25 實驗結果分貝值(A-weighting) (a) 右耳控制前 (b) 右耳控制後 (c) 左耳控制前 (d) 左耳控制後

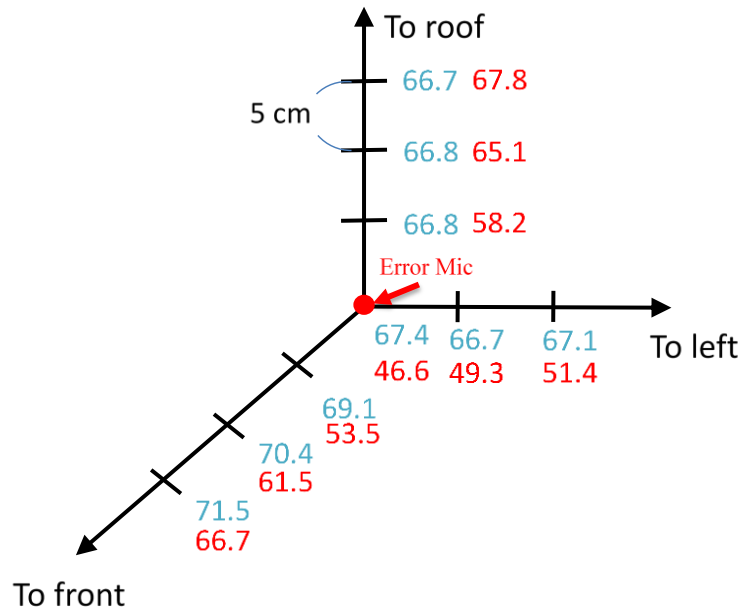


圖 26 控制結果(藍：控制前、紅：控制後，dBA)

以上實驗結果乃利用實際錄製變壓器噪音，在實驗室中控室內進行降噪實驗，目前在耳朵位置能夠消除將近 20 dBA 的噪音，同時本法的設置方式也可以客製化，針對需求決定靜音區。系統的施作步驟可歸納於下：

- (一) 決定中控室靜音區最佳位置高度
- (二) 在該位置裝設誤差麥克風
- (三) 實施 ANC，待系統收斂，並調整參數至最佳狀態
- (四) 不再改變系統濾波器參數、移除誤差麥克風
- (五) 完成場域式 ANC 裝置設計

目前靜音區大小受限中控室場地，如要有更多、更大靜音區則須利用多通道 ANC 方式，使用更多次級喇叭、及誤差麥克風。然而在有參考麥克風的狀況下，前饋式主動降噪系統仍然可以依環境噪音的改變進行有效的場域噪音控制。

第四章 主動式噪音控制裝置與其他噪音環境監測之系統相容性評估

本研究所開發之場域型主動式噪音控制裝置係採用數位式控制技術之場域型主動噪音控制裝置，針對勞工特定作業位置及現場噪音環境頻譜屬性，利用噪音擷取與回授計算，產生反噪音進行噪音的破壞性干涉與控制，以達到工作場所降噪之功能。因此嚴格而言，本研究所探討之目標乃為智慧化生活空間之一部份，智慧化生活空間的目標，就是希望能由量測技術、環境物理、控制技術等等，建置適合勞動者在勞動空間環境的舒適度，以本研究而言能夠貢獻的地方則在勞動者所在場域之音環境舒適性及人耳聽覺保護之環境設定。然而要達到這樣的目標則有賴於穿戴式裝置系統及噪音環境監測感測器之配合。

近年來物聯網風起雲湧的趨勢，不僅各國政府相繼透過政策推動物聯網產業，整個物聯網供應鏈上、中、下游廠商也都卯足全力投入市場搶攻商機。所謂「物聯網」，是藉由多種技術共同實現的新型態網路科技概念，包括寬頻網路、感測技術、無線射頻辨識技術(RFID)、高精度感測、網際網路通訊協定第6版(IPv6)、衛星通訊、即時無線傳輸、標準化機器對機器、奈米級高智能嵌入等技術。進一步而言，物聯網其實與雲端運算有非常直接的關係。由於雲端運算是將所有資訊放置資料中心裡，然後在網路上存取使用，這種「IT 即服務」的概念，就是實現物聯網最重要的關鍵，因為唯有雲端運算技術夠成熟，物聯網所談的萬物在網路相連的理想，才能夠被達成。

搭配著穿戴式裝置技術與物聯網技術之概念，「聽戴式裝置」(Hearables)一詞也吸引市場的注意。根據 WiFore Consulting 預測，聽戴式裝置將成為成長最迅速的穿戴式市場，在 2020 年引爆一個超過 160 億美元的市場。因此以「聽戴式裝置」搭配噪音環境監測之系統，也就可能成為建構勞動者所在場域之環境舒適性及聽覺保護之新嘗試做法。若能發展與個人輔具結合之裝置，將相關

系統元件嵌入輔具內(如：安全帽)，即具備「聽戴式裝置」之特性，則可以成為帶著走的穿戴式裝置(非耳罩)，這種穿戴式降噪裝置尚具有隨時偵測噪音，並可立即進行主動式降噪之運算。

綜觀現有技術成果與未來發展，要發展智慧化生活空間於音環境舒適性及人耳聽覺保護之環境而言，則有幾項技術仍待克服，例如抗噪晶片之開發、收音麥克風與喇叭之網路傳輸的訊號傳遞、虛擬偵測技術的開發...等等。這其中特別是抗噪晶片的開發，更是與其他穿戴式裝置進行系統整合，發展新型智慧型之感測與控制之穿戴式裝置之關鍵零組件。而抗噪晶片之開發必須與 IC 設計與製程之技術整合，才能開發新型之晶片。同時未來抗噪晶片也必須符合七大技術功效「全頻率抗噪」、「節省電力」、「消除寬頻帶的噪音」、「可使用數量較少傳感器」、「減小體積」、「降噪效果顯著，反應時間快」以及「同時有穩定之音樂音量」之功效及目的。因此未來抗噪晶片之技術如能將麥克風、喇叭、低通濾波器、AD/DA 等類比元件整合成一片微小化晶片，並佐以晶片之無線通訊與資料傳送，使成為具有物聯網功能之晶片，可以即時蒐集職場噪音值及降噪效果，輔以大數據之分析，則對於噪音環境之監控，將有非常大之助益。

第五章 結論與建議

第一節 結論

本研究提出窄頻前饋型演算法並進行演算效能分析，該方法使用平行運算的觀念，所以收斂速度極快，同時，依理論消除單一頻率噪音只需一階濾波器係數，因此濾波器的設計複雜度也跟著降低許多；噪音消除能力也會比較好。與傳統方法相較，本方法對於因馬達、引擎運轉所導致的噪音特別有效，收斂速度也比較快；但缺點則是轉速信號不易取得，需有製造商協助進行量測。

另外本研究核心為完成建置挖土機駕駛艙及 22.8 KV 變壓器中控室之場域型主動式噪音控制之系統雛型，並完成工作場域實地量測與實驗室模擬測試，依勞工作業空間建置主動式噪音控制裝置，測試其降噪效果。在實地場域的測試中，實驗顯示於挖土機駕駛艙頭部正常活動範圍的噪音消除結果都在 15 dBC 或 10 dBA 以上。而在 22.8 KV 變壓器中控室於操作者在耳朵位置能夠消除將近 20 dBA 的噪音。本研究之亮點為在模擬之工作場域應用 ANC 演算法，成功界定靜音區域，應用場域則聚焦於營建機械及中控室之場域型噪音控制技術，該技術具有創新性及市場潛力，其創新之處在於採用主動式噪音降噪技術，降低工作場域中之低頻噪音。未來可嘗試進一步應用至實際工作場域中，使勞動者不需配戴防音防護具而達到噪音降噪功能，達到聽力保護的效果。

而本研究也提出場域型主動式噪音控制裝置與其他噪音環境監測之系統相容性評估，包括人身物聯網穿戴裝置之感測資訊、環境噪音偵測系統，並據此運用雲端應用整合服務平台之資訊融合，達成「智慧型音環境控制管理系統架構」之運作概念。

第二節 建議

以主動式噪音控制技術而言，目前仍然是以音樂娛樂用途之應用較多(如：主動抗噪耳機及耳罩)，而在實際場域的應用案例仍不多見，主要仍以系統雛形開發為主，原因係除了建置成本及維護成本較高以外，面對複雜的環境音源，其控制系統之穩定性也仍待提升。而在實務應用上，目前仍然較適用於小範圍空間之噪音改善(如：小型會議室空間、小型中央控制室、空調系統通風管及車輛駕駛室)，且針對持續且穩定之噪音源(頻率特性為中低頻)較能有效控制(如：抽水馬達、引擎之運轉噪音)。

綜合本研究之成果及相關研究議題檢視，特提供下列技術開發層面及實務應用層面之研究方向建議：

一、技術開發層面：

- (一) 抗噪晶片之開發：目前數位式之降噪設備需要搭配數位訊號處理卡(digital signal processing, DSP)，體積重量稍嫌過大，必須開發晶片式之訊號處理晶片，才可以將系統微小化，達到商品化之要求，「走到哪裡、降噪到那裡」之目標。
- (二) 收音麥克風與喇叭之間的訊號傳遞，必須走向無線傳輸：在場域式之降噪設施，收音麥克風與喇叭之間的訊號傳遞，必須走向無線傳輸才能避免過多訊號實體線，干擾現場作業環境。
- (三) 智慧型演算法之精進：目前主動式噪音控制系統受限於硬體之規格，在實務之應用多侷限於前饋式演算法與回饋式演算法，多數智慧型的演算法僅能以電腦模擬實現，而在實務應用上則存在很多限制，無法落實驗證。這最重要原因當然是前饋式演算法與回饋式演算法其演算法單純簡單可以快速反應，而智慧型的演算法決策邏輯判斷較多，硬體訊號的擷

取與控制卡的運算，無法快速應答，造成實驗驗證的困難，因此如何精進演算法與優化硬體規格也是一項重要發展方向。同時因為人工智慧已成為現今科技的顯學，特別是在全頻率抗噪、消除寬頻帶的噪音、增快反應時間、以及輸出穩定之音量等等研究議題上，可再強化相關之研究。

- (四) 虛擬偵測技術的開發：ANC 以消除誤差麥克風周邊噪音為主，並無法以消除耳內噪音為目標，主因為無法取得耳內噪音作為信號回饋，虛擬偵測技術則以 Kemar 人耳模型為依歸，由 ANC 系統補償誤差麥克風與人耳之間的頻率響應差，使得 ANC 系統能夠直接以消除耳內噪音為目標，如此可進一步保護人耳聽覺細胞。

二、實務應用層面：

- (一) 引進人體工學與聽力科學之概念，發展新型態之個人防護輔具：引進人體工學設計概念，發展美觀實用的個人防護輔具，讓勞動者願意戴，喜歡戴。因此未來相關的研究發展可以結合生物感測器以及環境中監測器所測得的資訊(如現場噪音值)，針對當下情境提供使用者相關資訊。例如即時傳遞勞動職場現場噪音值，並監控勞動者本身之生理行為，以及了解勞動職場之噪音環境是否已危害勞動者本身之健康。
- (二) 應用場域之開發：ANC 之技術除了可以與個人輔具(如安全帽)一起使用，成為嵌入式之設備，另外也可以發展場域式之降噪策略。在個人防護具方面，如噪音環境下的通訊功能，包含回聲消除(Echo Cancellation，加上通訊功能時，喇叭撥放對方聲音時仍會被己方麥克風收到回音)、音訊整合(Audio Integration，使高頻音訊與低頻噪音可以同時處理)等技術開發，都具有非常大的技術潛力。另外，在場域式之 ANC 開發，可針對不同的勞動職場特性，發展多元化客製化的場域型主動式噪音控制裝置，例如針對建設機械、廚房排油煙機、軍用設施設備(如戰車、飛彈

發射)、船上輪機、農業機械、航空噪音、風力發電之風機...等等新型場域之應用開發，都有值得一試之研究價值。

綜合上述幾點技術發展方向，亦可稱為主動式噪音降噪技術之發展方向，可以規劃短、中、長期之時程發展，逐一克服，先由系統雛型之建構，再提升系統穩定度，進而邁入系統微小化，逐步達成降低成本與商品化之要求。

誌謝

本案感謝健行科技大學林教授仲廉、中原大學張教授政元、郭教授森懋等協助研究，謹此敬表謝忱。

參考文獻

- [1] Y. Kajikawa, W. S. Gan, S. M. Kuo, "Recent advances on active noise control: open issues and innovative applications", *APSIPA Trans. Sig. Inf. Process.*, vol. 1, pp. 1-21, Aug. 2012.
- [2] 職業安全衛生設施規則，
<http://www.rootlaw.com.tw/LawArticle.aspx?LawID=A040290070001200-1030701&ShowType=Ref&FLNO=300000>
- [3] 白明憲，聲學理論與應用-主動式噪音控制，全華科技圖書股份有限公司，1999.
- [4] P. Lueg, Process of silencing sound oscillations, U.S. Patent 2043416, June 9, 1936.
- [5] S. M. Kuo, W. S. Gan, *Digital Signal Processors: Architectures, Implementations, and Applications*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2005.
- [6] S. M. Kuo, B. H. Lee, *Real-time Digital Signal Processing: Implementations and Applications*, Wiley, West Sussex, 2006.
- [7] W. S. Gan, S. M. Kuo, *Embedded Signal Processing with the Micro Signal Architecture*, Wiley-IEEE Press, Hoboken, NJ, 2007.
- [8] S. Wise, G. Leventhall "Active Noise Control As a Solution to Low Frequency Noise Problems," *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, vol. 29, no. 3, pp. 129-137, 2010.
- [9] K. P. Raghunathan, S. M. Kuo, W. S. Gan "Active Noise Control for Motorcycle Helmets," *The 2010 International Conference, on Green Circuits and Systems*, pp. 170-174, 2010.
- [10] T. M. N. Huda, S. F. Islam "Active Noise Control for Industrial Applications," *2009 First Asian Himalayas International Conference on Internet*, pp. 1-5, 2009.
- [11] M. Tamamura, E. Shibata "Application of Active Noise Control for Engine Related Cabin Noise," *JSAE Review*, vol.17, no.1, pp. 37-43, 1996.
- [12] B. Widrow, S. D. Stearns, *Adaptive Signal Processing*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1985.
- [13] C. Burgess, Active adaptive sound control in a duct: a computer simulation. *J. Acoust. Soc. Am.*, 70 (3) (1981), 715–726.
- [14] S. Haykin, *Adaptive Filter Theory*, 4th ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2002.

- [15] K. A. Lee, W. S. Gan, S. M. Kuo, *Subband Adaptive Filtering: Theory and Implementation*, Wiley, West Sussex, 2009.
- [16] S. M. Kuo, D. R. Morgan, *Active Noise Control Systems – Algorithms and DSP Implementations*, Wiley, New York, 1996.
- [17] V. Toochinda, C.V. Hollot and Y. Chait “On Selecting Sensor and Actuator Locations for ANC in Ducts,” *Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control* Orlando, Florida USA, vol. 3, pp. 2593-2598, December 2001.
- [18] Y. Sawada, A. Ohsumi “Active Noise Control of Sound Wave in a One-dimensional Duct,” *Proceedings of The American Control Conference*, Chicago Illinois, vol. 5, pp. 3013-3017, June 2000.
- [19] L. Burian, P. Fuchs “A Simple Active Noise Control in Acoustic Duct,” *Proceedings of the 2005 European Conference on Circuit Theory and Design*, vol. 3, pp. 265-268, 2005.
- [20] M. K. Zia, A. Ahmed and M. Tufail, “A Duct Based Experimental Setup for Active Noise Control,” *12th International Conference on Frontiers of Information Technology*, pp. 139-143, 2014.
- [21] R. H. Thomas, R. A. Burdisso, C. R. Fuller, and W. F. O’Brien,” Active control of fan noise from a turbofan engine,” *Journal of American Institute of Aeronautics and Astronautics*, vol. 32, no. 1, pp. 23–30, 1994.
- [22] C. H. Gerhold, “Active control of fan-generated tone noise,” *Journal of American Institute of Aeronautics and Astronautics*, vol. 35, no. 1, pp. 17–22, 1997.
- [23] D. A. Quinlan, “Application of active control to axial flow fans,” *Journal of Noise Control Engineering*, vol. 39, no. 3, pp. 95–101, 1992.
- [24] B. V. Mason, K. Naghshineh, G. K. Toth, BroadBCnd, wide-area active control of sound radiation from vibrating structures using local surface-mounted radiation suppression devices, *Proceedings of Noise Con (1994)*, pp. 467-472
- [25] S. Kottayi, R. Althomali, T. M. Thasleema and N. K. Narayanan, "Active noise control for creating a quiet zone around mobile phone," *2016 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP)*, Melmaruvathur, 2016, pp. 0073-0077.
- [26] D. Shi, C. Shi and W. S. Gan, "Effect of the audio amplifier's distortion on feedforward active noise control," *2017 Asia-Pacific Signal and Information*

- Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC)*, Kuala Lumpur, 2017, pp. 469-473.
- [27] A. Siswanto, C. Y. Chang and S. M. Kuo, "Active noise control for headrests," *2015 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA)*, Hong Kong, 2015, pp. 688-692.
- [28] S. Hirose and Y. Kajikawa, "Effectiveness of headrest ANC system with virtual sensing technique for factory noise," *2017 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC)*, Kuala Lumpur, 2017, pp. 464-468.
- [29] I. T. Ardekani and W. H. Abdulla, "Active noise control in three dimensions," *IEEE Trans. Control System Technology*, vol. 22, no. 6, pp. 2150-2159, 2014.
- [30] A. Ganguly, I. Panahi and F. Dufour, "Exploring feedBCck active noise control with ambisonics," *IEEE Dallas Circuits and Systems Conference (DCAS)*, pp. 1-4, 2015.
- [31] C. Kwan, J. Zhou, J. Qiao, G. Liu and B. Ayhan, "A high performance approach to local active noise reduction," *IEEE 55th Conf. Decision and Control (CDC)*, pp. 347-352, 2016.
- [32] J. Buck, S. Jukkert and D. Sachau, "Performance evaluation of an active headrest considering non-stationary broadBCnd disturbances and head movement," *Journal of Acoustic Society of America (JASA)*, vol. 143, pp. 2571-2579, 2018.
- [33] J. Zhang, T. D. Abhayapala, W. Zhang, P. N. Samarasinghe and S. Jiang, "Active noise control over space: a wave domain approach," *IEEE. Trans. Audio, Speech and Language Processing*, vol. 26, No. 4, 2018.
- [34] T. Zhao, J. Liang, L. Zou and L. Zhang, "A New FXLMS Algorithm With Offline and Online Secondary-Path Modeling Scheme for Active Noise Control of Power Transformers," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 8, pp. 6432-6442, Aug. 2017.
- [35] V. Patel, J. Cheer and N. V. George, "Modified Phase-Scheduled-Command FxLMS Algorithm for Active Sound Profiling," in *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, vol. 25, no. 9, pp. 1799-1808, Sept. 2017.
- [36] J. Cheer and S. Daley, "An Investigation of Delayless Subband Adaptive Filtering for Multi-Input Multi-Output Active Noise Control Applications," in *IEEE/ACM*

Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, vol. 25, no. 2, pp. 359-373, Feb. 2017.

- [37] J. H. Kim, J. Kim, J. H. Jeon and S. W. Nam, "Delayless Individual-Weighting-Factors Sign Subband Adaptive Filter With Band-Dependent Variable Step-Sizes," in *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, vol. 25, no. 7, pp. 1526-1534, July 2017.
- [38] M. Gao, J. Lu and X. Qiu, "A Simplified Subband ANC Algorithm Without Secondary Path Modeling," in *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, vol. 24, no. 7, pp. 1164-1174, July 2016.
- [39] I. T. Ardekani, J. P. Kaipio, A. Nasiri, H. Sharifzadeh and W. H. Abdulla, "A Statistical Inverse Problem Approach to Online Secondary Path Modeling in Active Noise Control," in *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, vol. 24, no. 1, pp. 54-64, Jan. 2016.
- [40] Y. Ma and Y. Xiao, "A New Strategy for Online Secondary-Path Modeling of Narrowband Active Noise Control," in *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, vol. 25, no. 2, pp. 420-434, Feb. 2017.
- [41] J. Liu and X. Chen, "Adaptive Compensation of Mismatch in Narrowband Active Noise Equalizer Systems," in *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, vol. 24, no. 12, pp. 2390-2399, Dec. 2016.
- [42] S. Ahmed and M. T. Akhtar, "Gain Scheduling of Auxiliary Noise and Variable Step-Size for Online Acoustic Feedback Cancellation in Narrow-Band Active Noise Control Systems," in *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, vol. 25, no. 2, pp. 333-343, Feb. 2017.

應用主動式噪音控制技術於勞工作業空間降噪效能之探討

著（編、譯）者：李昆哲、林仲廉

出版機關：勞動部勞動及職業安全衛生研究所

22143 新北市汐止區橫科路 407 巷 99 號

電話：02-26607600 <http://www.ilosh.gov.tw/>

出版年月：中華民國 108 年 6 月

版（刷）次：1 版 1 刷

定價：400 元

展售處：

五南文化廣場

台中市中區中山路 6 號

電話：04-22260330

國家書店松江門市

台北市松江路 209 號 1 樓

電話:02-25180207

- 本書同時登載於本所網站之「研究成果／各年度研究報告」，網址為：
<https://laws.ilosh.gov.tw/ioshcustom/Web/YearlyReserachReports/Default>
- 授權部分引用及教學目的使用之公開播放與口述，並請注意需註明資料來源；有關重製、公開傳輸、全文引用、編輯改作、具有營利目的公開播放行為需取得本所同意或書面授權。

GPN: 1010801323

ISBN: 978-986-05-9265-8

勞動部勞動及職業安全衛生研究所

INSTITUTE OF LABOR, OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH, MINISTRY OF LABOR



地址：新北市汐止區橫科路407巷99號

電話：(02) 26607600

傳真：(02) 26607732

網址：<http://www.ilosh.gov.tw>

ISBN 978-986-05-9265-8



9 789860 592658

GPN:1010801323

定價：新台幣400元