

## 運用 TMS320C6713 開發風管噪音之主動減噪展示模型

### Development of an exhibition model for duct noise reduction utilizing TMS320C6713

黃玠理<sup>1</sup>

盧士一<sup>2</sup>

蕭俊祥<sup>3</sup>

張振平<sup>4</sup>

#### 摘 要

關鍵字：DSP、TMS320C6713 DSK、IIR 數位濾波、Filter-X LMS 演算法

本研究目的為開發以 DSP 為基礎之風管噪音主動控制展示模型，首先以壓克力材質製造截面積 10cmx10cm 且長度為 1m 風管，安裝 2 個揚聲器，分別做為噪音源與控制源，並使用噪音計作為誤差訊號偵測，同時，在本實作中組裝 1 個訊號放大器驅動控制揚聲器抵銷噪音。在本回饋控制系統中，控制器結合 IIR 數位濾波與 Filter-X LMS 演算法執行噪音抵銷。研究中完成以 TMS320C6713 DSK 為平台的主動控制，測試結果顯示對於 250Hz-1.4kHz 單頻音可達 30dB 至 40dB 以上之降噪效果，而在複頻音的測試亦有約 30dB 的效果。

#### A b s t r a c t

Keywords：DSP、TMS320C6713 DSK、IIR digital filter、Filter-X LMS algorithm

The purpose of this study is to develop a DSP based active noise control to reduce duct noise, and accomplish an exhibition model. The study approach was to use an acrylic made rectangular duct (10cm x 10cm x 1m), and install two loud speakers, which were used as noise and control sources, while a market available noise meter was adopted as error detection. In the meanwhile, it is also necessary to assemble an amplifier to magnify the signal from control board to drive loudspeaker for noise cancellation in current practice. The integrated feedback control, in which the IIR digital filter of signal was combined with the controller of Filter-X LMS algorithm, was adopted to implement noise cancellation. A TMS320C6713 DSK based controller for ANC was accomplished during this study, and the testing results indicated that a 30dB-40dB reduction was measured for tonal noise with application of FXLMS algorithm, while a 30dB reduction for the signal of multiple frequencies.

#### 一、前言

現今的社會噪音也是一種污染，人人都希望能有個安靜且舒適的工作及住家環境。但是當我們遇到噪音時，解決的方式仍舊是採取傳統被動式減噪，如耳塞或是隔音棉…

<sup>1</sup> 作者一，台北科技大學機械系研究生

<sup>2</sup> 作者二，中山醫學大學助理教授(通訊作者)

<sup>3</sup> 作者三，台北科技大學機械系教授

<sup>4</sup> 作者四，勞工安全衛生研究所研究員/組長

等等。傳統的噪音消除絕大部分都是屬於被動式減噪，而被動式減噪在一般情況來說都可以達到很好的效果，雖然被動式減噪對中頻和高頻的處理較佳，相較之下對於低頻的處理則較差。反觀主動式噪音控制(Active Noise Control, 簡稱 ANC)[1][2]解決被動式減噪對於低頻的處理不佳與實用性的考量，雖然市面上已有相關的產品，但是一般人卻不甚了解其減噪原理；因此本文中所架設的透明壓克力風管之噪音主動控制展示模型，藉此讓更多人實際體驗與感受到主動式減噪的效果與能應用的場合。

考慮到主動式控制需要強大的即時運算能力，並且更有效率、彈性在研發及偵錯上。故本研究選擇搭配德州儀器(Texas Instruments)設計使用在高精準應用，像是超高音質的音樂、醫療設備…等，所開發的浮點式數位訊號處理器(Digital Signal Processor, 簡稱 DSP)[3]的 TMS320C6713 DSK，加上 DSP 整合發展工具[4]。此外，內建類比/數位(A/D)、數位/類比(D/A)轉換器的特性，可以減少硬體上自行架設、以及提升系統一致性與完整性。

Paul Lueg[5]，在 1936 年首先提出主動式控制的概念，主動式噪音控制內容說明兩音源在相互交疊的區域裡，聲音並不一定會在同一區域增強；倘若產生振幅相等、相位角差 180 度的反噪音時，兩音波會相互產生破壞性干涉，以抵消主噪音進而達成減噪的效果。在此時也提出前饋式噪音控制的理論。Olson 和 May[6]，在 1953 年提出了迴授式主動噪音控制架構，只採用單一誤差感測器訊號傳回，並通過一個振幅與相位之響應經過設計的放大器送至控制揚聲器以消除噪音。

Burgess[7]，在 1981 年提出最小均方法(Least Mean Square, 簡稱 LMS)與有限脈衝響應濾波器(Finite Impulse Response Filter, 簡稱 FIR Filter)。Burgess 利用電腦模擬 LMS 演算與 FIR 模擬對窄頻(Narrow Band)噪音的減噪效果實驗，結果不管是單頻或多頻的噪音，均能有效地將噪音降低。Ericksson，在 1987 年以無限脈衝響應濾波器(Infinite Impulse Response Filter, 簡稱 IIR Filter)的結構，利用遞迴最小均方法(Recursive Least Mean Square, 簡稱 RLMS)演算來控制，也相同地能有效減少噪音。

一般噪音系統由於噪音源的改變或系統的內部與外在環境的改變，而有相當的不確定性，因此適應性控制為必要的控制方法。所以，Morgan[1]提出以 Filtered-X LMS 演算法消除在管路中第二路徑轉移函數對控制系統的不穩定性，此法更加強了整個控制架構，相對的也將 Filtered-X LMS 演算法更廣泛地使用在主動式噪音控制領域。

文中第二節將對控制理論與控制器的設計作介紹，包括前饋式與迴授式 Filtered-X LMS 演算法。第三節會針對實驗的軟硬體架構，以及 TMS320C6713 DSK 作詳細介紹。第四節將是實驗結果與討論。最後第五節將總結，並討論未來研究展望。

## 二、控制理論與控制器設計

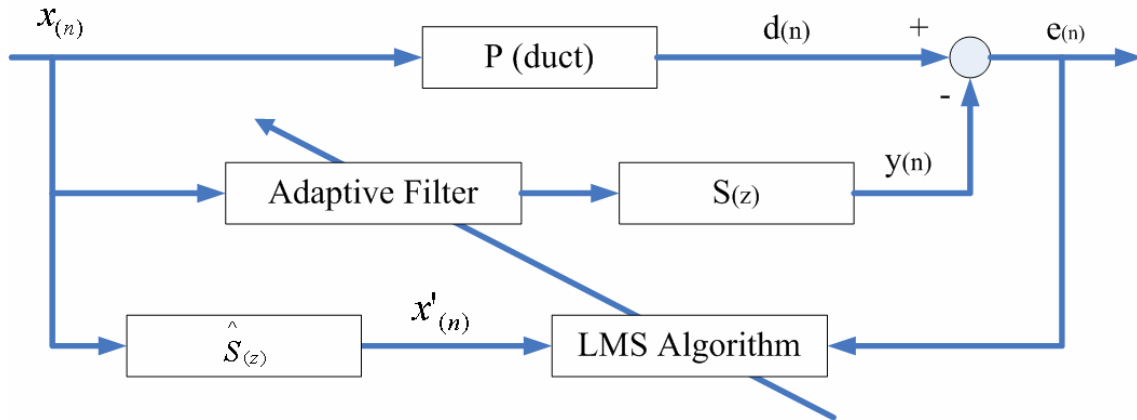
### (一) 前饋式 Filtered-X LMS 演算法

前饋式 Filtered-X LMS 演算法，如圖一所示。

在主動式噪音控制中，最被廣泛使用的適應性演算法：最小均方演算法[7]為基礎。然而，系統實際運行時，卻存在著第二路徑(secondary path)的影響。所謂的第二路徑效應，包含有數位類比轉換(D/A)、低通濾波器、放大器、揚聲器到噪音計的路徑、類比

數位轉換(A/D)···等等。為了彌補這些第二路徑的影響，控制訊號  $y(n)$  到誤差訊號  $e(n)$  的路徑中加入第二路徑轉移函數  $S(n)$ 。不過在引進第二路徑轉移函數  $S(n)$  後，系統通常會造成不穩定的發生。為了解決這個問題，在參考訊號  $x(n)$  到更新權重係數的 LMS 演算法途中，加入相同的濾波器  $\hat{S}(n)$  (identical filter)，即  $\hat{S}(n) \approx S(n)$ 。而公式如(1)所示。

$$W(n+1) = W(n) + \mu X'(n)e(n) \quad (1)$$

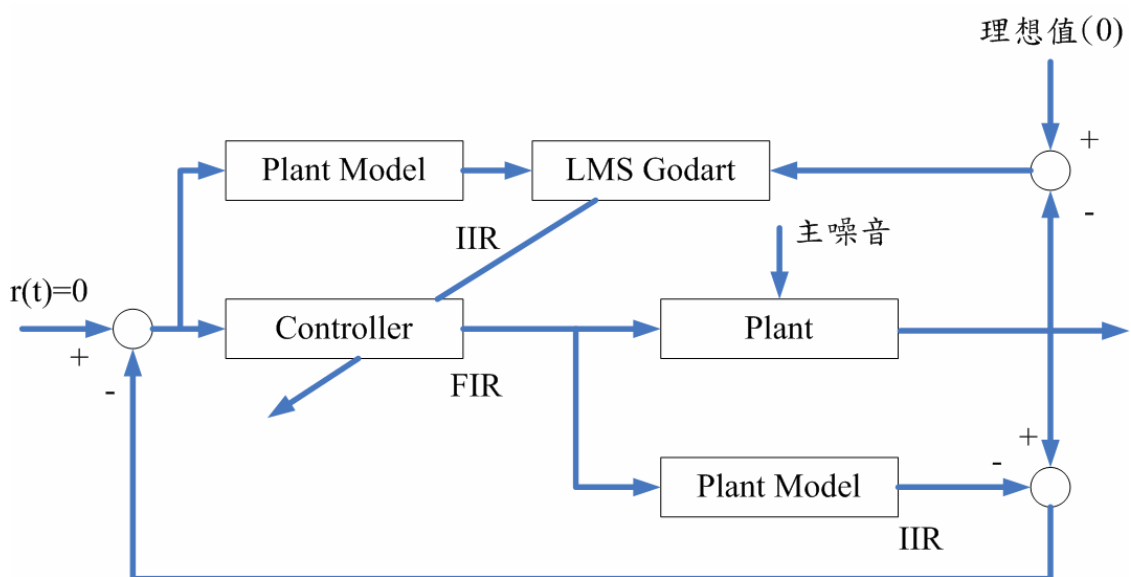


圖一 前饋式 Filter-X LMS 演算法控制方塊圖

## (二) 迴授式 Filtered-X LMS 演算法

本文採用迴授式主動噪音控制系統示意圖，如圖二所示。

採用適應性濾波器作為控制器，模擬受控場模型(plant model)使用無限脈衝響應濾波器，控制器(controller)使用有限脈衝響應濾波器。其中，控制器採用 Filtered-X LMS 演算法更新控制器的權重，而受控場模型則使用離線鑑別的方式得到固定權重與權重個數。

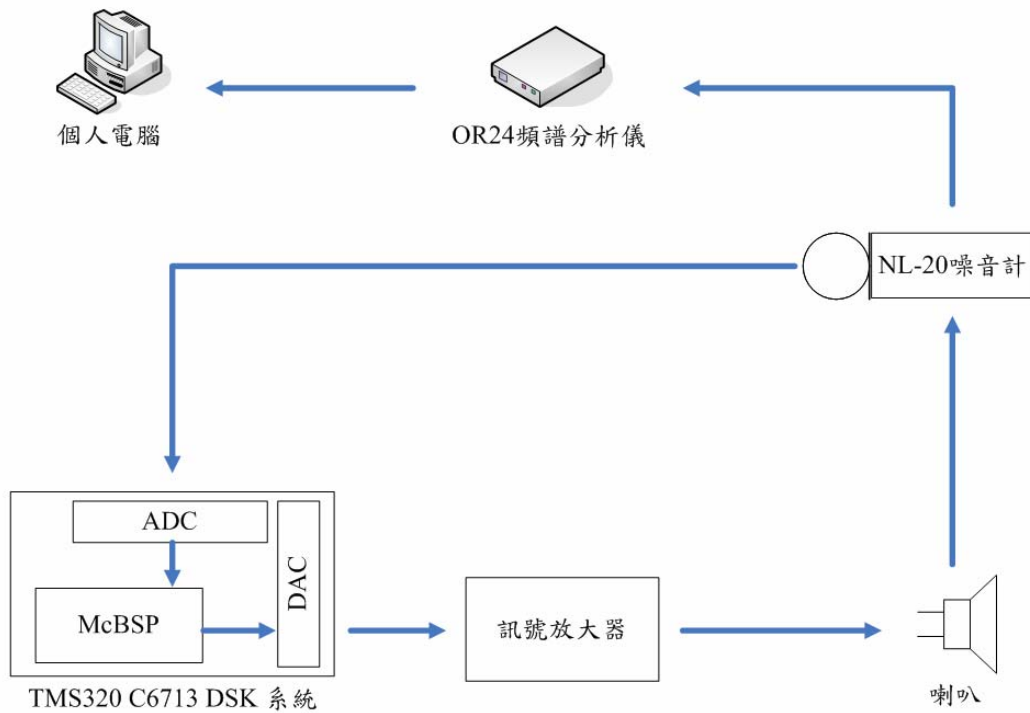


圖二 迴授式主動噪音控制系統示意圖

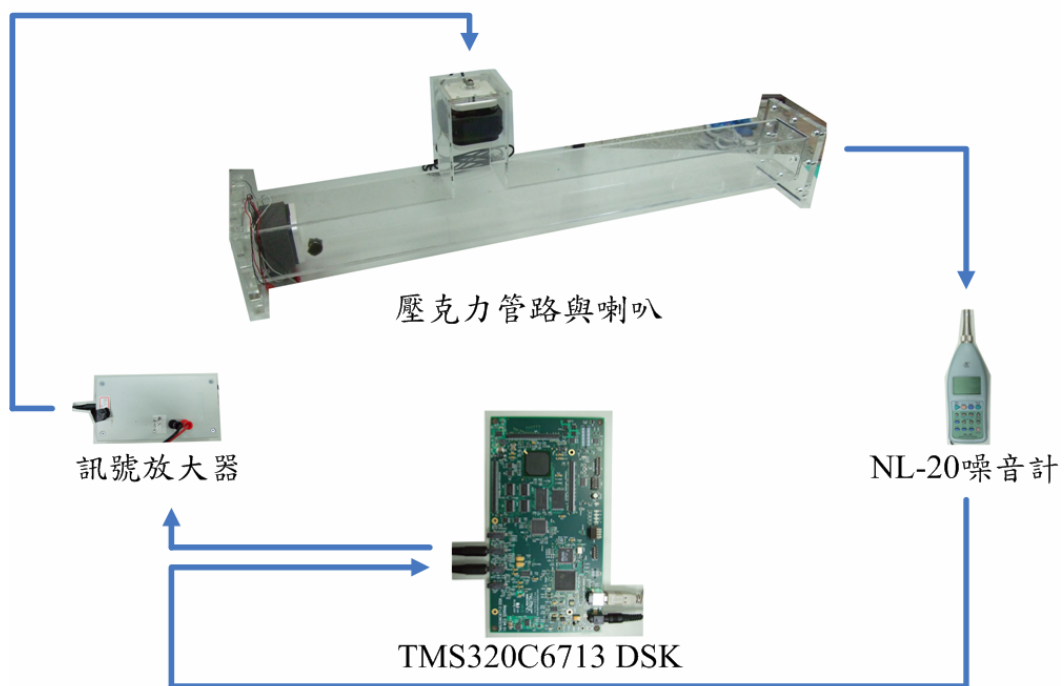
### 三、實驗軟硬體架構與流程

完整的實驗設備與流程示意圖如下圖，圖三所示；系統實際硬體照片如圖四所示。

內容包含有：(一) NL-20 噪音計、喇叭、訊號放大器與 TMS320C6713 DSK，(二) 類比介面電路(Analog Interface Circuit，簡稱 AIC)[8]，(三) 高速串聯埠介面(Multichannel Buffered Serial Ports，簡稱 McBSPs)[9]，(四) DSP 函式庫(TI C67x DSPLIB)[10]。



圖三 迴授式系統架構圖



圖四 系統實際硬體照片圖

### (一) NL-20 噪音計、喇叭、訊號放大器與 TMS320C6713 DSK

將 NL-20 噪音計擷取到的噪音訊號經由 DSP 內建的 A/D 轉換電路經過 McBSPs 輸入 TMS320C6713 DSK 的 CPU 內做運算處理，同時也將訊號送至 OR24 頻譜分析儀中；接著利用 D/A 轉換電路經過 McBSPs 將處理好的控制訊號輸出至訊號放大器，推動喇叭產生反噪音去抵銷主噪音。

### (二) 類比介面電路

噪音計產生的類比訊號無法直接由 DSP 系統做處理，必須先經過 A/D 轉換成數位訊號才能做訊號處理。根據得到的數位訊號先由 DSP 運算後送出振幅相同、相位角差 180 度的反向波，再將其轉換成類比訊號送至訊號放大器。

TMS320C6713 DSK 使用整合 A/D 與 D/A 的類比介面電路 TLV320AIC23 晶片[8]來轉換。AIC23 晶片提供 16、20、24 和 32 的取樣位元數，以及 8、16、24、32、44.1、48 和 96kHz 的取樣頻率。且內部可程式放大器最高可以放大至 100dB，提供使用者選擇。本系統所使用的為 16 的取樣位元數與 8kHz 的取樣頻率。而 AIC23 在輸入與輸出部分用上高速串聯埠介面，McBSP0 是負責送出 16 位元數的控制訊號至 AIC23；McBSP1 則是負責送出與接收音訊資料。[9][11]

### (三) 高速串聯埠介面

高速串聯埠是來處理非同步串聯資料的傳輸及接收，其各擁有兩組多通道高速串聯埠介面，可以做全雙工(full-duplex)通信，資料位元可以透過程式規劃為 8、12、20、24、32 位元數。而擁有雙緩衝器(double-buffered)，可以透過增強型直接記憶體存取(Enhanced Direct Memory Access，簡稱 EDMA)[12]以及 CPU 作資料雙向存取。本系統是使用 McBSP0 負責控制 AIC23 的暫存器，然後透過 McBSP1 來送出與接收 A/D 及 D/A 的資料。[13]

### (四) DSP 函式庫

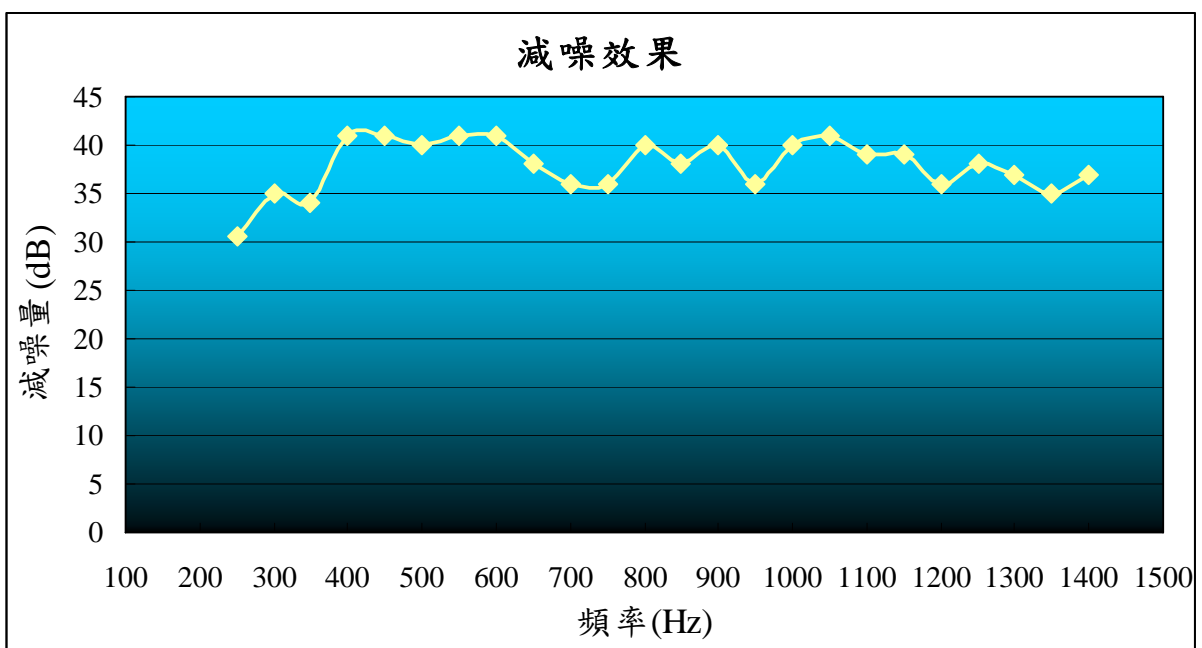
DSP 函式庫開發的目的，是為了讓 TMS320C67x 的硬體架構能更有效率的使用，其中包含：C 語言呼叫(C-callable)、組合最佳化(assembly-optimized)、通用訊號處理常式(general-purpose signal-processing routines)。使用這些常式能快速且最理想的執行即時(real-time)運算，而運算速度遠比採用標準 ANSI C 語言來的快；另外，如需應用這些常式只需匯入就能立即使用，可以大幅縮短 DSP 的開發應用時間。

德州儀器所提供的 DSP 函式庫加強了單精度(Single-precision)以及雙精度(Double-precision)函式，其中包括幾大項：適應濾波器(Adaptive filtering)、快速傅利葉轉換(Fast Fourier Transform，簡稱 FFT)、濾波與迴旋積分(Filtering and convolution)、數學(Math)、矩陣(Matrix)、混雜(Miscellaneous)，而各大項中還有細分出一些提供使用者選擇應用，在此不多做介紹。[10] 在本系統中，原本只採用傳統 C 語言迴圈的寫法，但是遇到權重個數較高的 Filtered-X LMS 演算法和階數較高的離線鑑別做運算時，必須應用許多的 DSP 函式撰寫中斷服務程式，才能充分的發揮 TMS320C6713 高速運算的能力。讓原本無法順利執行結束的中斷服務程式，能從容的處理完畢，甚至可以再提高系統取樣頻率。

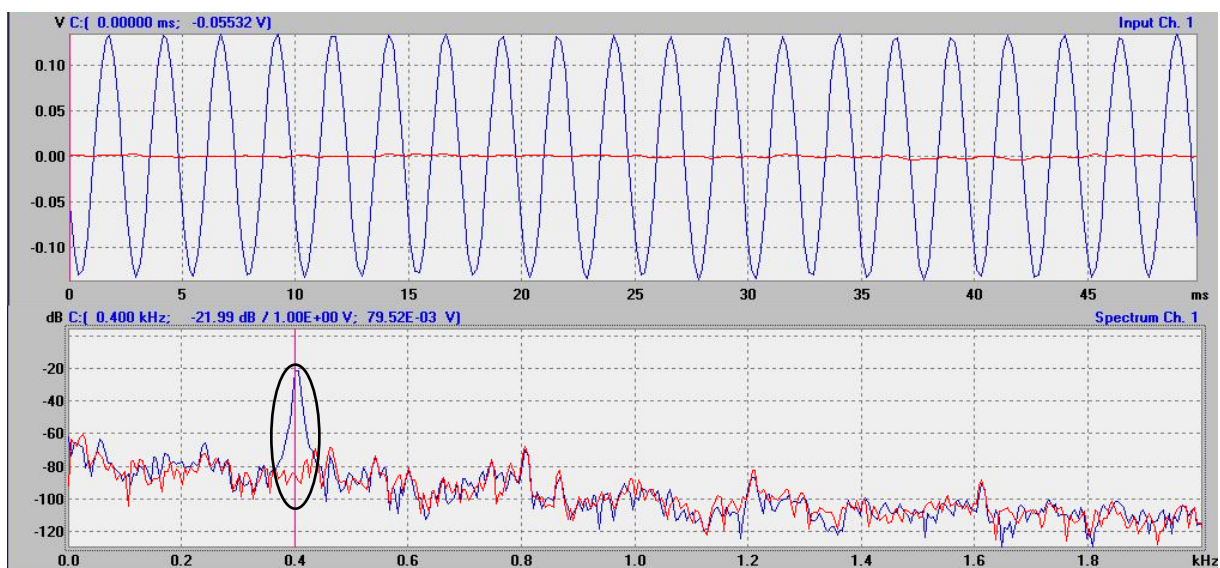
#### 四、實驗結果

以下實驗是在控制濾波器  $W(z)$  其權重個數 200 個，130 個輸入權重，70 個輸出權出遞回權重；取樣頻率 8KHz，學習率為 0.2 下所得到的結果。噪音音源分為單頻與複頻，單頻音為 250Hz 到 1400Hz，複頻音為 200Hz 加上 700Hz、300Hz 加上 500Hz、400Hz 加上 600Hz。

圖五為單頻音為 250Hz 到 1400Hz 的效果圖，其中縱軸為減噪量的效果、橫軸為對應的頻率，圖中黃線則是所對應的減噪量；可以得到有 30dB-40dB 以上的減噪量。圖六則為單頻噪音 400Hz 時，其中藍色線條為控制前，紅色線條為控制後；上方為時域圖，下方則為頻域圖。如圖所示，可以看出在黑色劃圈的 400Hz 處有將近 40dB 的減噪量；換言之，則是降至背景噪音。



圖五 單頻噪音 250Hz 到 1400Hz 的效果圖



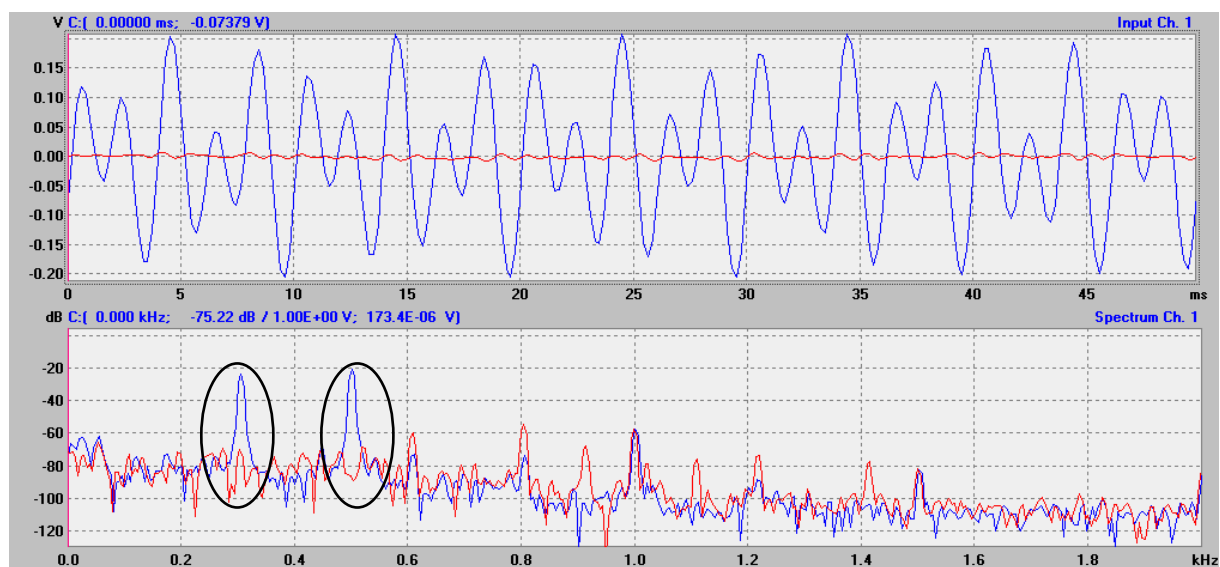
圖六 單頻噪音 400Hz 控制後時域圖與頻域圖



表一為複頻噪音的減噪效果表，可以明顯的表示出複頻噪音減噪量平均約有 30dB，可以降下接近背景噪音。而圖七則為複頻噪音 300Hz 加上 500Hz，其中藍色線條為控制前，紅色線條為控制後；上方為時域圖，下方則為頻域圖。如圖所示，可以看出複頻噪音在兩個黑色劃圈的 300Hz 以及 500Hz 處有將近 30dB 的減噪量；換言之，大約可以降至接近背景噪音。

表一 複頻的減噪效果表

頻率(Hz)	減噪前(dB)	減噪後(dB)	減噪量(dB)
200+700	100	64.8	35.2
300+500	100	70.8	29.2
400+600	100	67.1	32.9



圖七 複頻噪音 300Hz 加上 500Hz 控制後時域圖與頻域圖

## 五、結論與未來展望

以德州儀器的 TMS320C6713 DSK 作為主動式控制的核心，不但可以替代早期多採用 PC Base 來完成的主動式控制，如引擎排氣管噪音之主動式消音器研究[14]、管路噪音減噪[15]、兩軸旋轉平台於基座干擾下主動式減振[16]、變頻式冷氣壓縮機的噪音抑制[17]…等等。另一方面，以往使用單晶片開發主動式控制，如以 DSP 實現之主動式耳機開發[18]，不免要使用自行製作的 A/D 與 D/A 電路，使得轉換的解析度比單晶片的解析度低。若採用 TMS320C6713 DSK 內建類比介面電路不但可以省去自行製作電路，還可以提升一致性、高取樣、高解析度以及達到系統體積減小的目的。除此之外，擁有強大的 DSP 函式庫，使得實驗中龐大的程式運算都能順利解決，令開發者更為輕鬆。

測試結果顯示對於 250Hz-1.4kHz 單頻音可達 30dB-40dB 以上降噪效果，在複頻音的測試亦有約 30dB 左右的效果，且都能降至背景噪音。文中也證明在消除複頻噪音時，比起以往 PC Base 的實驗結果都還要來的優秀。因此，TMS320C6713 DSK 在發展主動

式控制上是非常適合的。未來的研究方向可以加強演算法的研究，並應用在更多主動式控制的場合上；期望能把 TMS320C6713 DSK 做更為廣泛發展與應用。

## 六、致謝

本案感謝勞委會勞工安全衛生研究所的大力支持，所完成之模型將配合其作為未來相關教育訓練與宣導之展示模型。

## 七、參考文獻

1. S.M.Kuo and D.R.Morgan, "Active Noise Control System" John Wiley & Sons, Inc. ,U.S.A.,1996.
2. S.M.Kuo and D.R.Morgan, "Active Noise Control :A Tutorial Review" IEEE, vol.87,no.6,1999.
3. Texas Instrument Inc., "TMS320C6713 Floating-Point Digital Signal Processor", Dec 2004.
4. Rulph Chassaing, "Digital Signal Processing and Applications with the C6713 and C6416 DSK", 2005.
5. H.F Olson and E.G., "Electronic sound absorber", *Journal of the Acoustic Society of America* 25, pp. 1130-11, May 1953.
6. M.Jessel, G. Mangiante, "Active Sound Absorbers in an Air Duct", *Journal of Sound and vibration*, vol.23, pp. 383-390, 1972.
7. J.C. Burgess, "Active Adaptive Sound Control in a duct: A Couputer Simulation", *J. Acoustics. Soc. Am.*, vol. 70 no. 3,pp. 715-726, 1981.
8. Texas Instrument Inc., "TLV320AIC23 Stereo Audio CODEC , 8- to 96-kHz , with Integrated Headphone Amplifier Data Manual", July 2001.
9. 王逸如、陳信宏,「數位信號處理的新利器—TMS320C6x(修定版)」, 2004。
10. Texas Instrument Inc., "TMS320C67x DSP Library Programmer' s Reference Guide" , March 2006.
11. Rulph Chassaing, " Digital Signal Processing and Applications with the C6713 and C6416 DSK", 2005.
12. Texas Instrument Inc., "TMS320C6000 DSP Enhanced Direct Memory Access (EDMA) Controller Reference Guide" , November 2006.
13. 吳賢財,「德州儀器 C6000 DSP 入門實務」, 1993。
14. 沈建宏,「引擎排氣管噪音之主動式消音氣研究」, 2002。
15. 駱政男,「應用複合式控制針對管路噪音減噪之研究」, 2004。
16. 鄭如傑,「應用兩軸旋轉平台於基座干擾下之主動式減振研究」, 2005。
17. 黃俊儒,「變頻式冷氣壓縮機之噪音抑制探討」, 2005。
18. 張鴻杰,「以 DSP 實現之主動式耳機開發」, 2006。