

國立臺灣大學工學院工程科學及海洋工程學系

碩士論文



Department of Engineering Science and Ocean Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master's Thesis

驅動超音波換能器之 E 類功率放大器及變壓器設計

Design of Class E Power Amplifiers and Transformers for Driving  
Ultrasonic Transducers

林裕峰

Yu-Feng Lin

指導教授：宋家驥 博士

Advisor: Chia-Chi Sung, Ph.D.

中華民國 114 年 1 月

January, 2025

## 誌謝



時光荏苒，碩士學位的學習旅程已接近尾聲。在此，我衷心感謝在這段求學歷程中曾經給予我支持、鼓勵和指導的所有人。

首先，我要特別感謝我的指導教授 宋家驥博士，在研究過程中，不僅在學術上提供了寶貴的建議與指導，還在我遇到困難時給予耐心和鼓勵，讓我能夠持續進步、克服挑戰。也要感謝 王昭男博士及 黃翊鈞博士擔任口試委員時對論文內容提出諸多建議及想法，使本論文更趨完善。

其次，我要感謝振動及超音波實驗室的學長 君豪、鵬丞、培佑、宜仲、智楷、丁睿、盛元、凱傑，在初入實驗室時給予的照顧。也感謝同學 柏諭、冠穎、伯瑜與其他學弟在共同研究的過程中，彼此討論與分享想法，攜手面對學術上的瓶頸，這段時光讓我收穫了珍貴的友誼與知識。

此外，我要感謝我的家人對我的無條件支持和陪伴。感謝父母在我求學期間給予生活上無微不至的照顧，從來不曾給我過任何壓力，讓我能夠全心投入學術研究。

最後，我要感謝每一位曾經在我人生旅途上留下足跡的人，是你們的鼓勵與關懷讓我走到今天。感謝你們的支持，我會銘記於心，未來也將繼續努力，不辜負所有人的期望。

林裕峰 謹誌

## 中文摘要



壓電效應於 1880 年由居禮兄弟(Pierre Curie and Jacques Curie)所發現，而超音波自十九世紀末期發展以來，已有多年的發展歷史。時至今日，超音波技術不論是超音波診斷儀、超音波清洗機、超音波測距儀皆已深入在我們的生活中。超音波可以傳遞於空氣、固體或液體等介質中，在應用上，超音波皆須使用換能器發射超音波。其中，介質為空氣之超音波，其換能器可分為開放式及封閉式換能器。開放式換能器能直接接觸空氣，其發射效率也較高，但有時因為必須防水、防塵或其他防護，換能器必須採封閉式的被保護於外殼中，造成能量傳遞的犧牲。

一般而言，在超音波發射系統中，最重要的就是功率放大器。應用於超音波之功率放大器大多為 D 類功率放大器，而 D 類功率放大器之輸出為方波。然而 E 類功率放大器之輸出為弦波，理論上在負載端擁有更好的效率及功率。因此，本論文以 E 類功率放大器進行設計，在固定直流電壓供應下，加入變壓器以驅動工作頻率為 40kHz 之封閉式空氣超音波換能器。本研究將先針對封閉式空氣超音波換能器，設計、模擬並實作 E 類功率放大器，而由於 E 類功率放大器之輸出功率由直流電源供應及負載大小決定。因此，在固定直流電源供應下，在換能器前端加入自行設計的變壓器後重新設計 E 類功率放大器，最後量測換能器在此電路驅動下之發射聲源聲壓。

關鍵字：超音波換能器、壓電效應、功率放大器、E 類功率放大器、變壓器、聲壓

# ABSTRACT

Piezoelectric effect was discovered in 1880 by Pierre Curie and Jacques Curie, and there had been many years of history since ultrasound began to develop in the 19<sup>th</sup> century. Up to this day, ultrasonic technique such as Ultrasound Identification (USID), ultrasonic cleaning and ultrasonic range finding are all in every aspect of our lives. Ultrasonic waves can be transmitted to air, solid and liquid media. In application, ultrasonic waves are transmitted by transducers. Among all, transducers that transmit ultrasonic waves in air can be divided into two types: open and closed. The open transducer can be exposed to air directly and has higher transmission efficiency. However, because of waterproofing, dustproofing and other protection, the transducer must be enclosed and protected in a shell, which causes loss of energy transmission.

Generally speaking, the most important thing in the ultrasonic transmitting system is the power amplifier. Most ultrasonic power amplifiers are Class D PAs and its output is square wave signal. However, the output of Class E PAs is sine wave signal, which means Class E PAs have better latter efficiency and power theoretically. Thus, this article will design a Class E PA and a transformer with fixed DC power supply to drive a 40kHz closed-type ultrasonic transducer. This research will perform design, simulation and actual production of Class E PAs focused on closed-type ultrasonic transducer. Moreover, due to the output power of Class E PAs depend on the DC power supply and the load, a transformer is added and the Class E PA is redesigned in case of the DC power supply is fixed. Finally, the acoustic pressure level of the transducer driven by the designed circuit is measured to establish a design process of transducer driver circuit.

Keywords: Ultrasonic Transducer, Piezoelectric Effect, Power Amplifier, Class E Power Amplifier, Transformer, Acoustic Pressure Level

# 目次

誌謝 .....	i
中文摘要 .....	ii
ABSTRACT .....	iii
目次 .....	iv
圖次 .....	vi
表次 .....	ix
Chapter 1 緒論 .....	1
1.1 研究動機與目的 .....	1
1.2 文獻回顧 .....	2
1.3 論文架構 .....	3
Chapter 2 背景理論 .....	4
2.1 超音波 .....	4
2.1.1 功率超音波與檢測超音波 .....	4
2.1.2 超音波衰減理論 .....	4
2.2 壓電超音波換能器 .....	6
2.2.1 壓電效應 .....	6
2.2.2 壓電超音波換能器 .....	6
2.2.3 超音波換能器等效電路 .....	7
2.3 功率放大器 .....	9
2.3.1 功率放大器種類 .....	9
2.3.2 D 類功率放大器 .....	10



2.3.3 E 類功率放大器 .....	11
2.4 變壓器 .....	14
Chapter 3 研究方法與實驗架構 .....	16
3.1 實驗儀器 .....	16
3.2 超音波換能器聲學特性量測 .....	21
3.2.1 阻抗量測 .....	21
3.2.2 聲源聲壓量測 .....	22
Chapter 4 電路設計及模擬 .....	30
4.1 E 類功率放大器設計及模擬 .....	30
4.2 變壓器設計及量測 .....	34
4.3 加入變壓器之 E 類功率放大器設計及模擬 .....	37
Chapter 5 實驗結果與討論 .....	41
5.1 電路板 .....	41
5.2 E 類功率放大器量測結果 .....	42
5.3 換能器端電壓量測結果 .....	44
5.4 換能器發射聲壓量測結果 .....	46
Chapter 6 結論與未來工作 .....	50
6.1 結論 .....	50
6.2 未來工作 .....	52
Reference .....	53

## 圖次



Fig. 1.1 D 類推挽式功率放大器 .....	2
Fig. 1.2 D 類全橋式功率放大器 .....	2
Fig. 2.1 正壓電效應/逆壓電效應示意圖 .....	6
Fig. 2.2 壓電超音波換能器結構圖 .....	7
Fig. 2.3 BVD 等效電路模型 .....	7
Fig. 2.4 切換式功率放大器電晶體波形圖 .....	9
Fig. 2.5 功率放大器效率比較圖 .....	10
Fig. 2.6 D 類功率放大器電路圖 .....	11
Fig. 2.7 E 類功率放大器架構圖 .....	11
Fig. 2.8 E 類功率放大器電路圖 .....	12
Fig. 2.9 變壓器示意圖 .....	14
Fig. 3.1 Agilent 4294A 阻抗分析儀 .....	16
Fig. 3.2 Keysight DSOX3034A 數位儲存示波器 .....	17
Fig. 3.3 Tektronix AFG 2021 任意函數產生器 .....	17
Fig. 3.4 Falco Systems WMA-300 高電壓放大器 .....	18
Fig. 3.5 GWINSTEK GPC-3030DQ 直流電源供應器 .....	18
Fig. 3.6 PCB 377C01 麥克風頻率響應圖 .....	19
Fig. 3.7 PCB 377C01 1/4" Free-Field Microphone & PCB 426B03 Preamplifier .....	19
Fig. 3.8 PCB482B11 感測器電源供應器 .....	19
Fig. 3.9 實驗支架 .....	20
Fig. 3.10 實驗支架示意圖 .....	20



Fig. 3.11 40kHz 封閉式空氣超音波換能器頻率響應及相位圖 .....	21
Fig. 3.12 換能器等效電路模型 .....	22
Fig. 3.13 聲源聲壓量測示意圖 .....	22
Fig. 3.14 驅動訊號與接收訊號@ $V_{pp} = 14.7V$ .....	23
Fig. 3.15 驅動訊號與接收訊號@ $V_{pp} = 36.3V$ .....	23
Fig. 3.16 麥克風接收聲壓與驅動電壓關係圖 .....	24
Fig. 3.17 廠商控制盒驅動聲源聲壓量測示意圖 .....	24
Fig. 3.18 廠商控制盒驅動訊號 .....	25
Fig. 3.19 廠商控制盒驅動訊號頻譜圖 .....	26
Fig. 3.20 麥克風接收訊號@ $d=30cm$ .....	26
Fig. 3.21 麥克風接收訊號@ $d=60cm$ .....	27
Fig. 3.22 麥克風接收訊號@ $d=90cm$ .....	27
Fig. 3.23 麥克風接收訊號@ $d=120cm$ .....	28
Fig. 3.24 麥克風接收訊號@ $d=150cm$ .....	28
Fig. 3.25 商控制盒驅動聲源聲壓量測圖 .....	29
Fig. 4.1 E 類功率放大器電路圖 .....	30
Fig. 4.2 E 類功率放大器電路模擬電路圖 .....	32
Fig. 4.3 E 類功率放大器 $V_{out}$ 圖 .....	33
Fig. 4.4 E 類功率放大器 $V_{out}$ 頻譜圖 .....	33
Fig. 4.5 鐵氧體磁芯 T60004L2030W676 .....	34
Fig. 4.6 變壓器實作圖 .....	35
Fig. 4.7 變壓器量測示意圖 .....	35



Fig. 4.8 變壓器兩側電壓圖 .....	36
Fig. 4.9 變壓器連接超音波換能器之阻抗及相位頻率響應圖 .....	37
Fig. 4.10 變壓器連接超音波換能器之等效電路 .....	37
Fig. 4.11 E 類功率放大器電路模擬電路圖 .....	39
Fig. 4.12 E 類功率放大器 $V_{out}$ 圖 .....	40
Fig. 4.13 E 類功率放大器 $V_{out}$ 頻譜圖 .....	40
Fig. 5.1 E 類功率放大器 PCB Layout .....	41
Fig. 5.2 E 類功率放大器實體電路圖 .....	41
Fig. 5.3 E 類功率放大器 $V_{out}$ 量測架構圖 .....	42
Fig. 5.4 E 類功率放大器 $V_{out}$ .....	42
Fig. 5.5 E 類功率放大器 $V_{out}$ 頻譜圖 .....	43
Fig. 5.6 換能器端電壓量測架構圖 .....	44
Fig. 5.7 換能器端電壓 .....	44
Fig. 5.8 換能器端電壓頻譜圖 .....	45
Fig. 5.9 設計電路驅動聲源聲壓量測示意圖 .....	46
Fig. 5.10 麥克風接收訊號@ $d=30\text{cm}$ .....	46
Fig. 5.11 麥克風接收訊號@ $d=60\text{cm}$ .....	47
Fig. 5.12 麥克風接收訊號@ $d=90\text{cm}$ .....	47
Fig. 5.13 麥克風接收訊號@ $d=120\text{cm}$ .....	48
Fig. 5.14 麥克風接收訊號@ $d=150\text{cm}$ .....	48
Fig. 5.15 設計電路驅動換能器聲源聲壓圖 .....	49
Fig. 6.1 換能器聲壓比較圖 .....	50

## 表次

Table 1 E 類功率放大器各元件公式表 .....	13
Table 2 等效電路各元件值 .....	22
Table 3 驅動電壓與麥克風接收電壓 .....	24
Table 4 麥克風接收電壓 .....	29
Table 5 E 類功率放大器電路元件值 .....	31
Table 6 E 類功率放大器電路實際元件值 .....	31
Table 7 E 類功率放大器電路元件值 .....	38
Table 8 E 類功率放大器電路實際元件值 .....	38
Table 9 麥克風接收電壓 .....	49
Table 10 不同驅動訊號頻譜波比較表 .....	51





# Chapter 1 緒論

## 1.1 研究動機與目的

超音波為一種大於 20kHz 之機械波，自十九世紀以來，超音波技術開始發展在水下聲納系統[1]。直至今日，超音波的利用也愈趨廣泛，包含超音波醫療診斷儀、超音波影像系統、超音波霧化技術、超音波乳化技術、超音波量測等等。其中，超音波偵測系統(Ultrasonic Detection System)便在先進駕駛系統(Advanced Driver Assistance Systems)中扮演了重要的角色，利用其成本低廉及不易受外在環境干擾等優勢，應用於主動式車距維持巡航系統(ACC)、後方來車預警防撞系統(RCW)、後方交通警示系統(RCTA)中[2]，以提供駕駛人外在環境變化分析，預先告知駕駛人可能發生的危險以避免意外事故發生。

在超音波偵測系統中，一般可以分為發射電路及接收電路兩部分，由於超音波訊號的傳播距離由輸出功率大小所決定，因此通常會使用功率放大器進行訊號發射。在超音波發射端功率放大器的設計上，文獻以 D 類功率放大器為主，而以 E 類功率放大器作為主題探討的文獻較少。然而，理論上 E 類功率放大器的效率應比 D 類功率放大器好[3]。因此，本論文針對封閉式超音波換能器，其偵測距離及範圍受到換能器性能及系統所設計的電路影響。為了提高超音波量測的距離及範圍，而本研究乃利用 E 類功率放大器及變壓器驅動工作頻率為 40kHz 之封閉式超音波換能器，利用電路模擬設計驅動電路，接著進行實際製作，再利用換能器聲學特性量測，目標設計出一提升偵測範圍之驅動電路。本論文將呈現此超音波驅動電路之設計流程，提供給其他超音波系統電路設計作為參考。



## 1.2 文獻回顧

在超音波這種高頻訊號下，在開關上的功率消耗會相較低頻訊號影響嚴重許多，因此，針對高頻超音波功率放大器多以切換式功率放大器作為設計主軸，其中，又大多以 D 類功率放大器[4]為主。而所謂切換式功率放大器，即以電晶體作為開關切換，當電晶體導通時，電流流過電晶體而電晶體上的電壓為零；當電晶體關閉時，電晶體上有電壓而無電流流過電晶體，以避免電壓和電流同時存在開關上，達到零電壓開關(Zero Voltage Switching)，達到減少切換損失、提高效率。如 Fig. 1.1 及 Fig 1.2 所示，在架構上，D 類功率放大器主要採用了推挽式(Push-Pull) [5] 以及全橋式(Full-Bridge)電路[6]。設計上，D 類功率放大器需要較多電晶體，推挽式需要兩個電晶體，而全橋式放大器需要四個電晶體。1975 年，Sokal 提出了 E 類功率放大器的設計方法[7]，提高了功率放大器的效率。

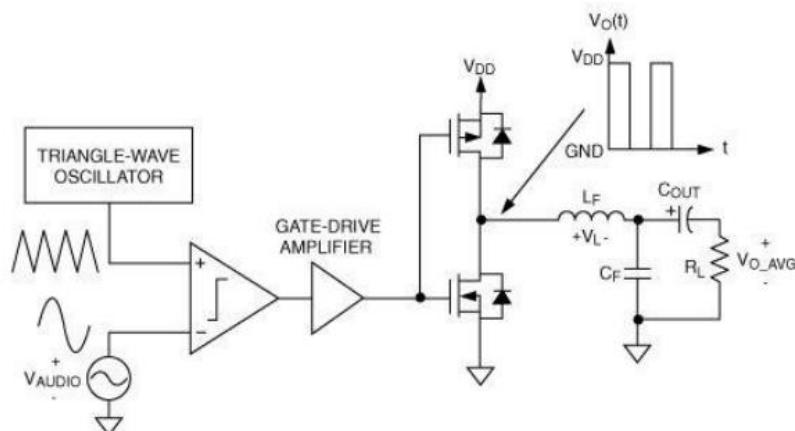


Fig. 1.1 D 類推挽式功率放大器[5]

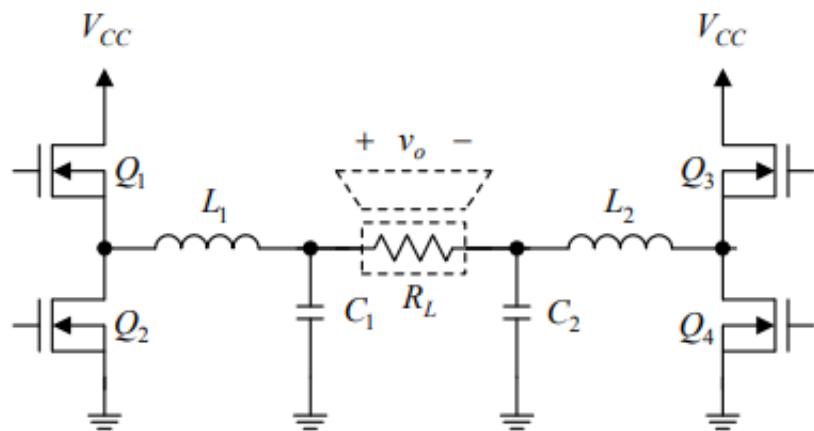


Fig. 1.2 D 類全橋式功率放大器[6]



### 1.3 論文架構

本論文共分為六個章節，各章節的簡要說明如下：

#### 第一章 緒論

此章節主要闡述本論文之研究動機與目的，說明了超音波功率放大器的發展背景，並針對本論文之各章節進行概要的簡介。

#### 第二章 背景理論

此章節介紹了本研究相關的理論、原理，首先介紹了超音波及其衰減理論、接著說明壓電超音波換能器的相關理論，最後對功率放大器及變壓器進行完整的原理推導。

#### 第三章 研究方法與實驗架構

此章節介紹了本論文之實驗所使用的儀器，並對超音波換能器進行聲學特性量測，包含超音波換能器的阻抗值及聲源聲壓量測。

#### 第四章 電路設計及模擬

此章節詳述了本文電路的設計與模擬，共可分四個部分。第一部分對E類功率放大器進行推導，第二部分以超音波換能器作為負載設計E類功率放大器並進行模擬，第三部分為變壓器設計及量測，第四部分為調整負載後E類功率放大器的重新設計及模擬。

#### 第五章 實驗結果與討論

此章節對第三章所設計之電路進行實作，首先量測E類功率放大器電壓輸出結果與模擬比較，再量測換能器端電壓量測結果，最後利用設計電路驅動超音波換能器量測發射聲壓、建立衰減曲線。

#### 第六章 結論與未來工作

此章節對本研究的實驗成果進行歸納及統整，並提出未來研究能夠進一步延伸的方向。



## Chapter 2 背景理論

本研究主要為利用 E 類功率放大電路及變壓器驅動封閉式空氣超音波換能器，並量測超音波換能器藉由壓電轉換效應產生之超音波隨距離衰減的聲壓。因此，本章節將先探討超音波理論，再說明壓電超音波換能器之工作原理，最後介紹功率放大器及變壓器的電路原理。

### 2.1 超音波

超音波泛指頻率超過人類耳朵所能聽到的最高頻率(通常為 20kHz)之聲波，是一種能在固體、液體及氣體中傳遞能量之機械波。超音波由於其高頻特性而被廣泛應用在醫療、非破壞性檢測、工業加工等領域中。其中根據發射的功率大小可分為功率超音波與檢測超音波兩大類。

#### 2.1.1 功率超音波與檢測超音波

功率超音波是指利用高功率超音波的能量，對物質進行加工、處理的技術。應用範圍包含超超音波清洗、粉碎、乳化。

而檢測超音波是指利用超音波的反射特性，對物體進行探測、成像，以獲取其內部結構、尺寸、缺陷等信息的技術，其通常使用小功率發射以降低雜訊比、提高靈敏度，常見應用於醫療診斷、工業無損檢測中。

#### 2.1.2 超音波衰減理論

超音波的傳遞會因介質特性及傳播過程產生衰減，主要可以分為下列五種衰減因子[8]:

##### (1) 幾何發散(Geometrical divergence):

幾何發散是指點聲源在自由聲場中產生的球面擴散現象。其衰減效應為幾何衰減。聲能隨波前從聲源傳播而分佈在直徑不斷增大的球面上所導致。式 (2-1) 顯示了聲源的聲功率級  $L_w$  與距離聲源  $r$  的聲壓級  $L_p(r)$  之關係式。方程式 (2-2) 為聲壓級隨聲源距離變化的關係式。根據方程式 (2-2)，可以推導出聲強或聲壓級  $L_p$  每當距離聲源加倍時會降低 6 dB。

$$L_p(r) = L_w + 10\log \left[ \frac{1}{4\pi r^2} \right] \quad (2-1)$$



(2-2)

$$L_p(r_2) = L_p(r_1) + 20 \log \left[ \frac{r_1}{r_2} \right]$$

#### (2) 空氣吸收(Atmospheric Absorption):

當聲音於空氣中傳播時，由於頻率、濕度、溫度及壓力造成的衰減。式(2-3)為平面聲波在距離  $x$  處的壓力  $P$  與初始壓力  $P_0$  的關係式。

$$P = P_0 e^{\frac{-ax}{2}} \quad (2-3)$$

其中  $a$  為吸收係數，與頻率、濕度、溫度及壓力有關，可表示為(2-4)式。

$$\alpha = f^2 \left[ \frac{\frac{1.84 \times 10^{-11}}{\frac{T_0^2 p_s}{T p_0}} + \frac{T_0}{T}^{2.5} * \left( \frac{0.10680 e^{-3352/T} f_{r,N}}{f^2 + f_{r,N}^2} + \frac{0.01278 e^{-2239.1/T} f_{r,O}}{f^2 + f_{r,O}^2} \right)}{\frac{T_0^2 p_s}{T p_0}} \right] \quad (2-4)$$

其中  $f$  為聲波頻率、 $T$  為大氣中之絕對溫度、 $T_0$  為參考之絕對溫度  $293.15\text{K}$ 。 $f_{r,N}$  及  $f_{r,O}$  分別為氮分子和氧分子振動相關的張弛頻率(Relaxation Frequency)、與大氣中的相對濕度有關。

#### (3) 地面效應(Ground Effect):

聲音可以直接從聲源傳播到接收端，也可以通過地面反射產生的次要傳播路徑傳播。此次要傳播路徑可能導致接收端的直接波與反射波之間的干涉效應。根據直接波與反射波的相對振幅與相位，干涉效應可以是建設性干涉或破壞性干涉。且地面反射並非全反射，因此必然存在能量損失，此衰減即為地面效應。

#### (4) 屏蔽效應(Screening):

當存在障礙物並滿足特定條件，便會發生繞射，使聲波傳遞至接收端時發生干涉，造成能量損失。

#### (5) 風及溫度梯度效應(Wind and Temperature Gradient Effects)

當氣溫隨高度降低且沒有風時，聲波會向上彎曲或折射。風速會根據聲源位於接收器的上風處或下風處、距地高度以及溫度逆溫的情況，分別增加或減小聲速。

本實驗根據上述五種超音波衰減因子，設計出一量測機構，減少地面效應、避免屏蔽效應，並在實驗室中排除風及溫度梯度效應、減少濕度、溫度及壓力的影響，量測出超音波因幾何發散造成的衰減。



## 2.2 壓電超音波換能器

### 2.2.1 壓電效應

壓電效應最早是在一百多年前由 Pierre Curie 和 Jacques Curie 兄弟發現的。他們發現當對電氣石、黃玉、石英等晶體施加機械應力時會產生電荷，並且這種電壓與應力成正比。當壓電材料受到機械負載時，會產生電荷，這種效應即為壓電效應。相反地，當壓電材料受到電壓作用時，其尺寸會發生變化，這種現象被稱為逆壓電效應，如 Fig. 2.1 [9]。

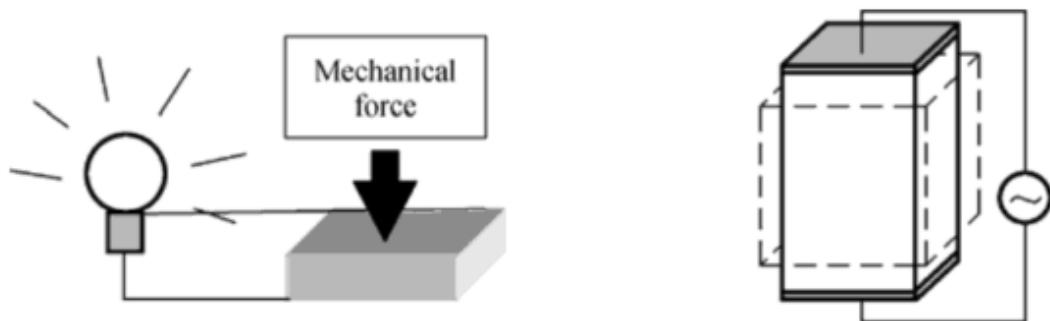


Fig. 2.1 正壓電效應/逆壓電效應示意圖

### 2.2.2 壓電超音波換能器

壓電超音波換能器是一種基於壓電效應的裝置，用於產生和接收超音波。當對壓電材料施加交流電信號時，材料會產生逆壓電效應，導致其反覆變形和振動，這種振動進一步將能量傳遞到接觸的介質中，從而產生聲波。典型的壓電超音波換能器結構如 Fig. 2.2[10]所示，包含以下部分：

- (1) **壓電元件**：產生壓電效應的核心元件，藉由正逆壓電效應轉換電能與機械能。通常由鉛鋯鈦酸鹽（PZT）等材料製成。本實用使用之實驗室自製換能器便使用 PZT 陶瓷壓電片製成。
- (2) **匹配層**：位於壓電元件和傳播介質（如水或空氣）之間，提高能量傳輸效率，減少聲波在不同介質界面上的反射損失。匹配層材料的聲阻抗應介於壓電元件和傳播介質之間，且匹配層的厚度通常設計為四分之一波長，這樣可以在反射波和入射波之間產生相長干涉，最大限度提高能量傳輸。

(3) 背膠層：位於壓電元件的背面（與發射方向相反的一側）。背膠層的主要功能是抑制壓電元件的後向振動，吸收多餘的聲波能量，並提高換能器的頻寬和解析度。背膠層的聲阻抗應與壓電元件相匹配，以達到最佳的吸收效果，且其材料需具有高聲衰減特性，以有效吸收後向振動能量。

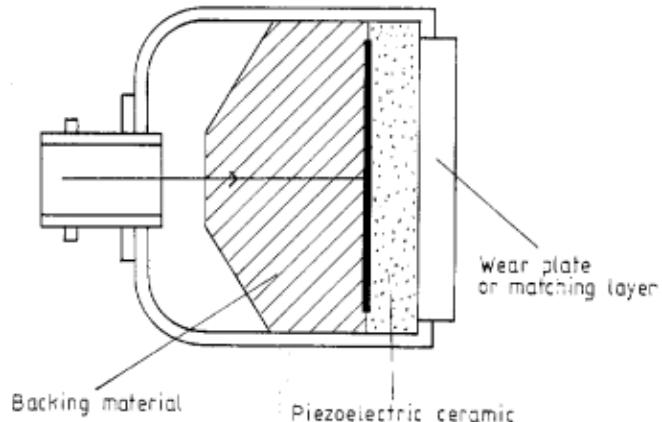


Fig. 2.2 壓電超音波換能器結構圖

### 2.2.3 超音波換能器等效電路

壓電超音波換能器的等效電路模型有助於理解其機電轉換特性及在不同工作條件下的行為。該模型將壓電換能器的機械和電學特性表示為電路元件的組合，便於進行模擬和設計。常見的等效電路模型包括 Butterworth-Van Dyke (BVD) 模型和 KLM 模型。BVD 模型適用於大多數基本設計，簡單且易於使用，特別適合描述換能器的共振特性；KLM 模型適用於更複雜的結構和高頻應用，能夠更精確地模擬波動傳播和阻抗匹配[11]。本研究之工作頻率固定為換能器的共振頻率 40kHz，故使用 BVD 模型作為等效電路模型，其電路圖如 Fig. 2.3。

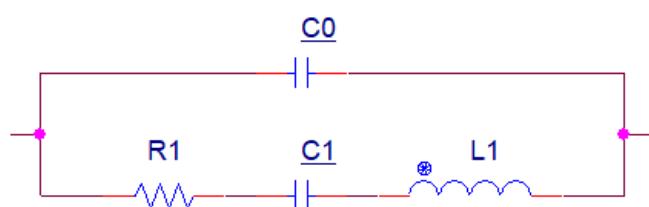


Fig. 2.3 BVD 等效電路模型



BVD 等效電路模型由兩個部分組成，上半部分為靜態電容  $C_0$ ，表示壓電元件兩極板之間的靜態電容；下半部分為機械振動等效部分，由串聯的電阻  $R_1$ 、電容  $C_1$  和電感  $L_1$  組成，分別等效機械損耗、機械彈性及機械質量。藉由此模型，我們可以將換能器之阻抗表示為式(2-5)

$$Z = A + jB = \frac{1}{\frac{1}{R_1 + j(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1})} + j\omega C_0} \quad (2-5)$$

為了使換能器發揮最大效率，訊號之工作頻率必須使換能器阻抗達到最小值，故可表示為式(2-6)

$$\frac{dZ}{d\omega} = 0 \quad (2-6)$$

則此時的頻率為

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \quad (2-7)$$



## 2.3 功率放大器

### 2.3.1 功率放大器種類

功率放大器依據其運作方式及特性，可以分為線性式功率放大器及切換式功率放大器兩大類型。線性式功率放大器的輸出與輸入信號呈線性關係，能夠忠實放大信號。線性式功率放大器根據不同偏壓點，又分為 A、B、AB、C 四類功率放大器。切換式功率放大器的電晶體作為開關使用，避免電壓和電流同時存在，當電晶體導通時，電流流過電晶體且電晶體上的電壓為零；當電晶體關閉時，電晶體上存在電壓但沒有電流流過電晶體，如 Fig. 2.4，因此切換式功率放大器理論上效率可以達到 100%，相較於線性式功率放大器有更好的效率，如 Fig. 2.5[12]。應用於超音波之功率放大器大多為 D 類功率放大器，而 E 類功率放大器又提高了 D 類功率放大器的效率。

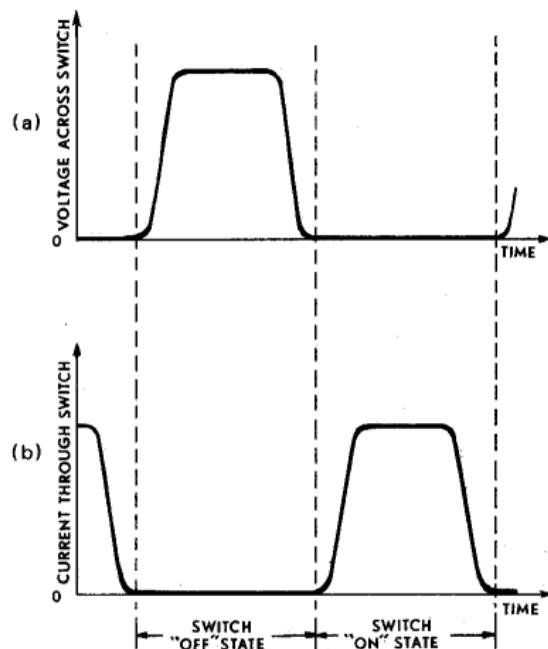


Fig. 2.4 切換式功率放大器電晶體波形圖 (a)電晶體上電壓 (b)電晶體上電流[7]

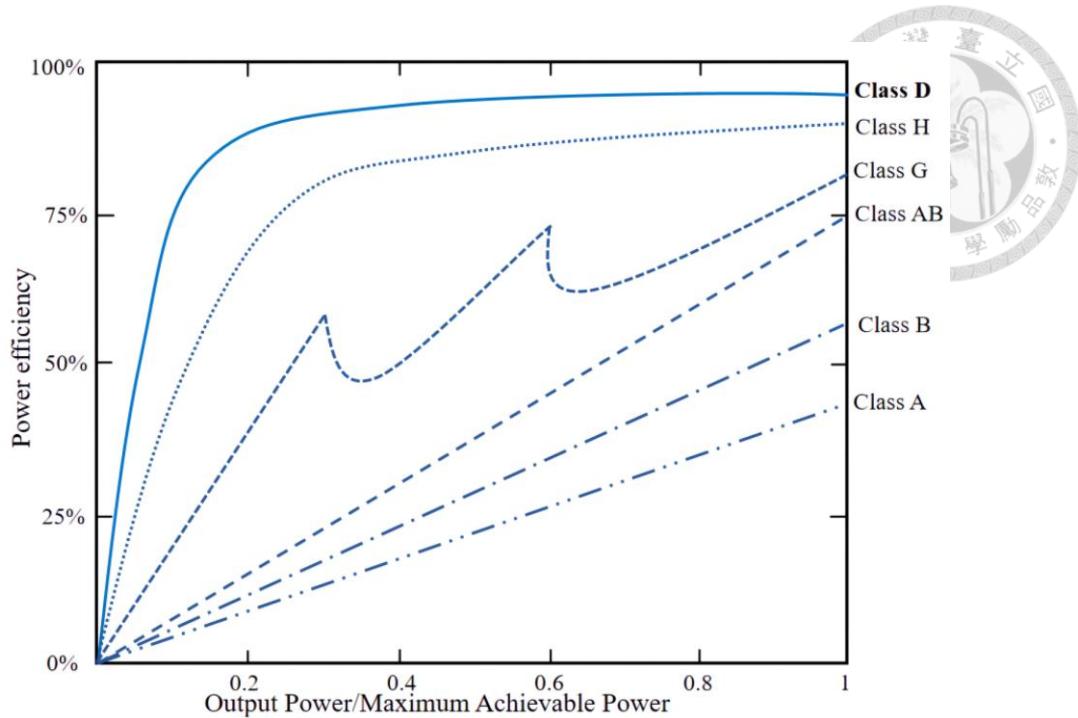


Fig. 2.5 功率放大器效率比較圖

### 2.3.2 D 類功率放大器

D 類功率放大器電路圖如 Fig. 2.6，是先將欲放大的類比音頻信號轉換成脈寬調變 (Pulse Width Modulation, PWM)，即將輸入的類比音頻信號與高頻載波訊號 (通常為固定頻率的方波或三角波) 做比較，從而產生一連串佔空比 (Duty Cycle) 或脈寬對應輸入信號振幅的方波信號。再經由電晶體將直流電源轉換成高頻 PWM 輸出，依電晶體使用數分為兩個電晶體的半橋式及四個電晶體的全橋式架構。最終在輸出端添加 LC 低通濾波器，以將高頻載波成分濾除，取得平滑且接近原始類比波形的音頻信號輸出。

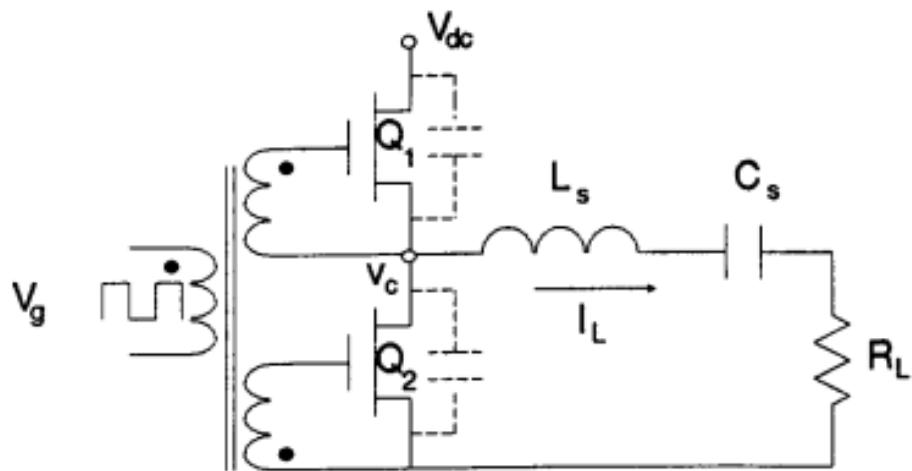


Fig. 2.6 D 類功率放大器電路圖[12]

### 2.3.3 E 類功率放大器

1975 年 Nathan O. Sokal 和 Aland D. Sokal 提出 E 類功率放大器，包含作為開關元件的電晶體、負載網路及負載，如 Fig. 2.7[7]。負載網路通常包含電感、電容以及諧振元件，設計目標是讓電晶體在開關轉換時，電晶體承受的電壓或電流應接近零(Zero Voltage Switching, ZVS 或 Zero Current Switching, ZCS) ，藉此降低開關損耗並達到高效率。

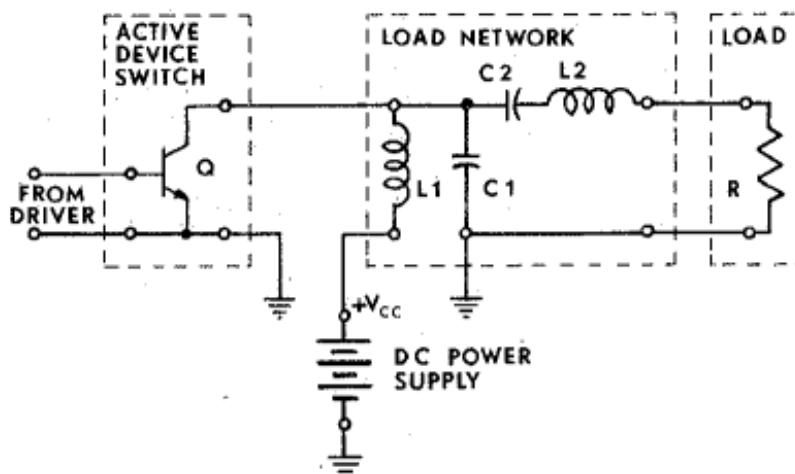


Fig. 2.7 E 類功率放大器架構圖



E 類功率放大器電路圖如 Fig. 2.8[13]，當滿足以下三個條件時，可推導得電路。

各元件值：

- (1) 電晶體視為理想開關，導通時間為半周期，開關導通時，電晶體內阻為零， $V_{ds}$  為零。
- (2) 在電晶體導通瞬間， $\frac{dV_{ds}}{dt} = 0$ 。
- (3) 負載網路的 Q 值無限大，使  $V_{ds}$  為零。

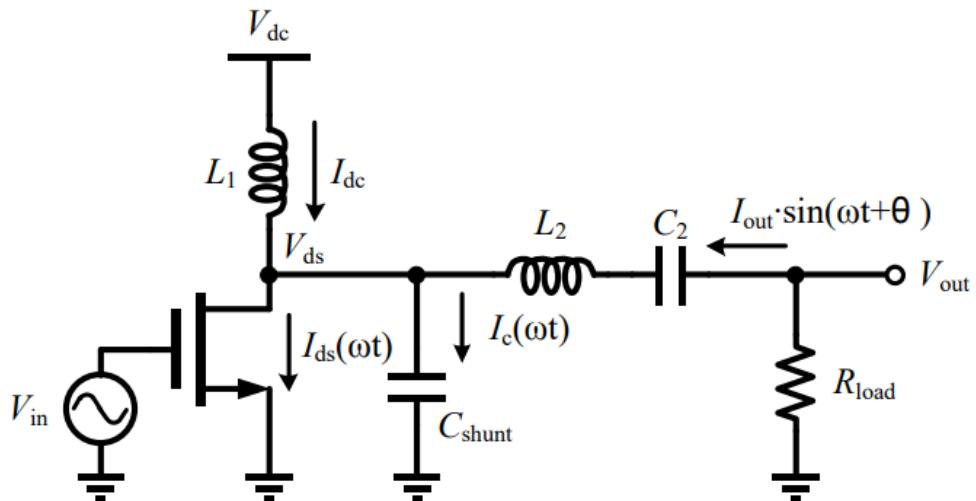


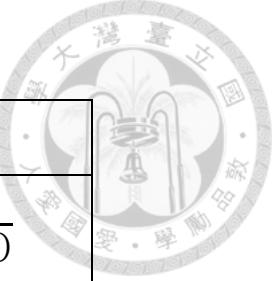
Fig. 2.8 E 類功率放大器電路圖

則輸出阻抗  $R_L$  由  $V_{dc}$  及輸出功率  $P_{out}$  決定，為

$$R_L = \frac{V_{dc}^2}{P_{out}} \left( \frac{2}{\frac{\pi^2}{4} + 1} \right) = \frac{8V_{dc}^2}{P_{out}(\pi^2 + 4)} \quad (2-8)$$

再藉由式(2-8)，及 Sokal 等人藉由其他理論分析及實驗量測，整理出各元件值並整理成 Table 1。

Table 1 E 類功率放大器各元件公式表



Component	Description	Value
$R_L$	Load Resistance	$\frac{8V_{dc}^2}{P_{out}(\pi^2 + 4)}$
$P_{out}$	Output Power	$\frac{8V_{dc}^2}{R_L(\pi^2 + 4)}$
$L_2$	Resonator Inductor	$\frac{8 * Q * V_{dc}^2}{P_{out} * \omega * (\pi^2 + 4)}$
$C_2$	Resonator Capacitor	$\frac{P_{out}(\pi^2 + 4)}{8 * \omega * Q * V_{dc}^2}$
$L_1$	RFC	$\frac{\pi * V_{dc}^2}{2 * \omega * P_{out}} * \frac{\pi^2 - 4}{\pi^2 + 4}$
$C_{shunt}$	Shunt Capacitor	$\frac{P_{out}}{\pi * \omega * V_{dc}^2}$



## 2.4 變壓器

變壓器是一種在兩個電路間改變或轉換電壓大小的電氣設備。在這個過程中，電流值也會被轉換。然而，兩個電路之間傳遞的功率在理想情況下並不改變，只是在轉換過程中通常會有少量損耗。這種能量傳遞僅能在交流電下發生。變壓器的運作原理基於法拉第在 1831 年提出的感應定律：他發現，當一個不斷變化的磁通連結到某電路時，該電路中會感應出電壓或稱電動勢(emf)。所感應到的電壓大小與變化磁通所連結的匝數成正比。因此，若有兩個電路被同一個磁通所連結，但兩個電路中的連結匝數不同，則在兩個電路中產生的感應電壓也會不同。Fig. 2.9 所示即為此情形：鐵心攜帶了共同的磁通，而  $V_1$  與  $V_2$  所代表的感應電壓之所以不同，是因為  $N_1$  與  $N_2$  (連結的匝數) 不同 [14]。

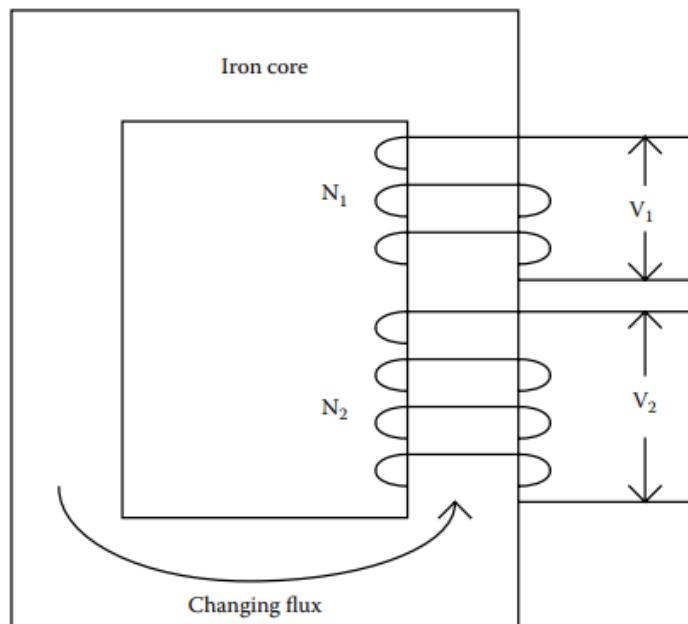


Fig. 2.9 變壓器示意圖

典型的變壓器是由兩組繞線圈(初級側及次級側)及磁芯組成。高頻變壓器的設計概念是降低在變壓器上的功率損耗，為了將大部分的功率傳遞到負載  $R_L$  上，變壓

器次級側(負載端)的感抗值 $L_2$ 要遠大於負載 $R_L$ 。依據此設計原則，將 $L_2$ 設計為 $R_L$ 等效阻抗的 15 倍[15]，藉由式 2-9 便可以得到變壓器次級側的感抗值 $L_2$ ，其中 $f_0$ 為工作頻率。

$$2\pi f_0 L_2 = R_L * 15 \quad (2-9)$$

再依據變壓器感抗值與匝數的關係式(式 2-10)，其中 $A_L$ 為變壓器材料鐵氧體磁芯的電感因數，配合所選材料的材料因數便可計算出變壓器次級側的匝數。

$$L_2 = A_L * N_2^2 \quad (2-10)$$

最後，根據變壓器的電壓比，依照式 2-11 變壓器的電壓比與匝數比關係式，得到變壓器初級側的匝數。

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2-11)$$

製作上，則需要考慮流過繞線線圈的電流值決定合適的線寬，變壓器的電流比與匝數比關係式如式 2-12。

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (2-12)$$

# Chapter 3 研究方法與實驗架構



本論文之主要目的為藉由改善換能器驅動電路，提升換能器之工作範圍。因此，首先將藉由實驗量測分析市面上現有產品之換能器驅動電壓及利用標準麥克風量測市售產品換能器之聲源聲壓，並以此作為後續設計及實作之比較基準。

本論文的研究方法將會分為軟體模擬及實驗量測兩大部分。首先，會先使用 LTspice 電路模擬軟體進行電路模擬，設計 E 類功率放大器，藉由提高及優化換能器驅動電壓以達到提升換能器工作範圍之目的，此部分關於 E 類功率放大器之推導及設計將在第四章中詳細說明。第二部分會在實作設計電路後，藉由實驗量測換能器驅動電壓之量測數據與模擬數值做驗證與比較，最後利用標準麥克風量測利用設計電路驅動換能器之聲源聲壓。

## 3.1 實驗儀器

### 1. Agilent 4294A 阻抗分析儀

Agilent 4294A 阻抗分析儀具有在廣泛的阻抗和頻率範圍中進行準確量測的功能，測試頻率範圍從 40Hz 至 110MHz，準確度為  $\pm 0.08\%$ ，能夠分析低損耗元件。實體照片如 Fig. 3.1 所示。



Fig. 3.1 Agilent 4294A 阻抗分析儀

### 2. Keysight DSOX3034A 數位儲存示波器

本研究所使用之數位儲存示波器型號為 Keysight DSOX3034A，其具有

350MHz 的頻寬、4 個類比通道，且最大取樣頻率為 4GSa/s，主要用來觀察各元件的電壓訊號以及標準麥克接收訊號，並將波形資料儲存為 csv 檔案以利藉由 MATLAB 程式進行頻譜分析。實體照片如 Fig. 3.2 所示。



Fig. 3.2 Keysight DSOX3034A 數位儲存示波器

### 3. Tektronix AFG 2021 任意函數產生器

本研究所使用之任意函數產生器型號為 Tektronix AFG 2021，其可以提供 20MHz 正弦波、10MHz 方波和脈衝波，具有 250MSa/s 之取樣率，在本研究中用於產生 40kHz 弦波給放大器放大訊號。實體照片如 Fig. 3.3 所示。



Fig. 3.3 Tektronix AFG 2021 任意函數產生器

### 4. Falco Systems WMA-300 高電壓放大器

Falco Systems WMA-300 高電壓放大器唯一寬頻帶實驗級電壓放大器，具有高輸出電壓、高輸出電流等特性，可用於驅動超聲換能器。本研究用於超聲波換

能器之發射聲源量測。實體照片如 Fig. 3.4 所示。



Fig. 3.4 Falco Systems WMA-300 高電壓放大器

## 5. GWINSTEK GPC-3030DQ 直流電源供應器

本研究所使用之直流電源供應器型號為 GWINSTEK GPC-3030DQ，用於供應 12V 直流電給廠商控制盒及 E 類功率放大器。實體照片如 Fig. 3.5 所示。



Fig. 3.5 GWINSTEK GPC-3030DQ 直流電源供應器

## 6. PCB 377C01 1/4" Free-Field Microphone & PCB 426B03 Preamplifier

PCB 377C01 麥克風接收頻率範圍為 4Hz 至 100kHz，如 Fig. 3.6 所示。其固有噪音為 42 dB(A) re 20  $\mu$ Pa，動態範圍 165 dB re 20  $\mu$ Pa (3% 失真極限)，靈敏度為 2.85mV/Pa，為一可於空氣中量測高頻超音波訊號之實驗室級精密麥克風。另外，為了放大接收到的訊號，在麥克風後端需要接上一前置放大器，其型號為 PCB 426B03。麥克風及前置放大器實體照片如 Fig. 3.7 所示。

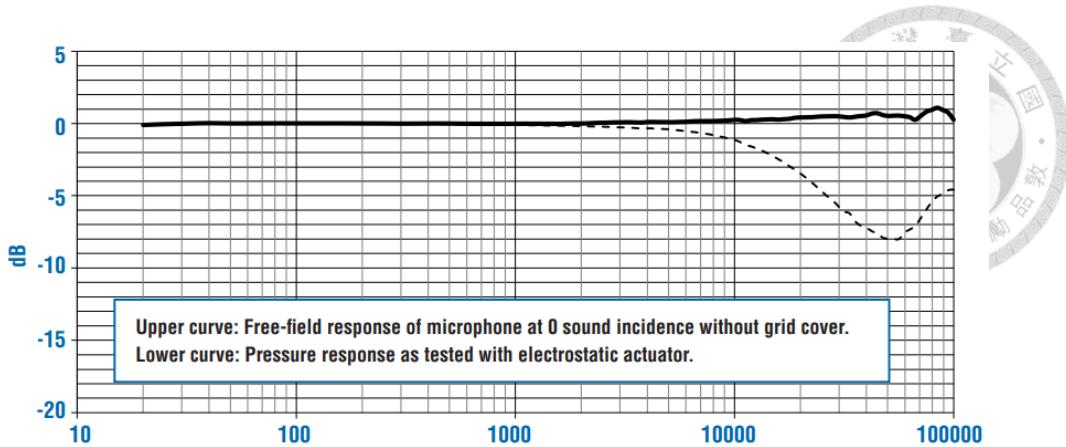


Fig. 3.6 PCB 377C01 麥克風頻率響應圖[16]



Fig. 3.7 PCB 377C01 1/4" Free-Field Microphone & PCB 426B03 Preamplifier

## 7. PCB 482B11 感測器電源供應器

PCB 482B11 為一單通道線路供電之感測器電源供應器，支援 ICP 傳感器訊號輸入、BNC 輸入及輸出連接，並有 1 倍、10 倍、100 倍電壓增益的功能。實體照片如 Fig. 3.8 所示。



Fig. 3.8 PCB482B11 感測器電源供應器

## 8. 實驗支架

分為兩部分，一部分為鋁擠支架，用來確保換能器發射聲波方向與麥克風接收方向

成一直線，且有軌道供調整距離。另一部分使用 3D 列印，方便換能器及麥克風安裝於鋁擠上。實體照片及示意圖如 Fig. 3.9 及 Fig. 3.10 所示。



Fig. 3.9 實驗支架實體圖

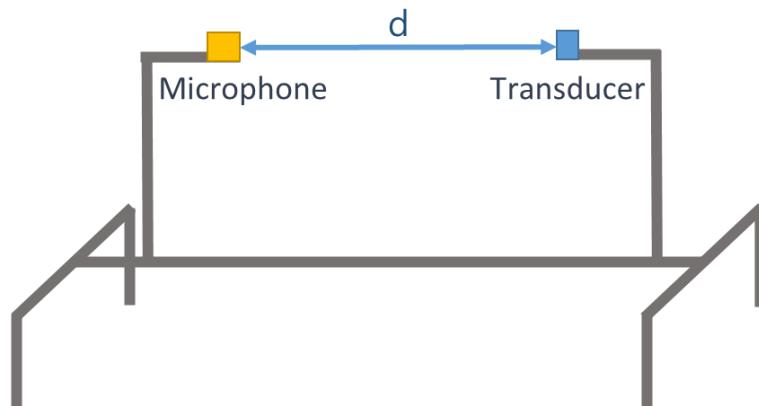


Fig. 3.10 實驗支架示意圖



## 3.2 超音波換能器聲學特性量測

本研究先針對市面上所使用之 40kHz 封閉式空氣超音波換能器系統進行量測，以了解現有系統之換能器聲學特性，供後續實驗設計、比較。在阻抗電性方面，使用 Agilent 4294A 阻抗分析儀量測換能器阻抗電性，分析其共振頻率、及其工作頻率下之等效阻抗。聲源聲壓量測方面，分別使用 Tektronix AFG 2021 任意函數產生器連接 Falco Systems WMA-300 高電壓放大器及使用廠商控制盒驅動換能器，再使用 PCB 377C01 1/4" Free-Field Microphone 在距離 30 cm 至 150 cm 下量測聲壓大小，並作衰減趨勢曲線。

### 3.2.1 阻抗量測

利用 Agilent 4294A 阻抗分析儀分析 40kHz 封閉式空氣超音波換能器阻抗及相位頻率響應圖，如 Fig. 3.10 所示。在採用如 Fig. 3.11 所示之等效電路模型下，其等效電路各元件值如 Table 2 所示。

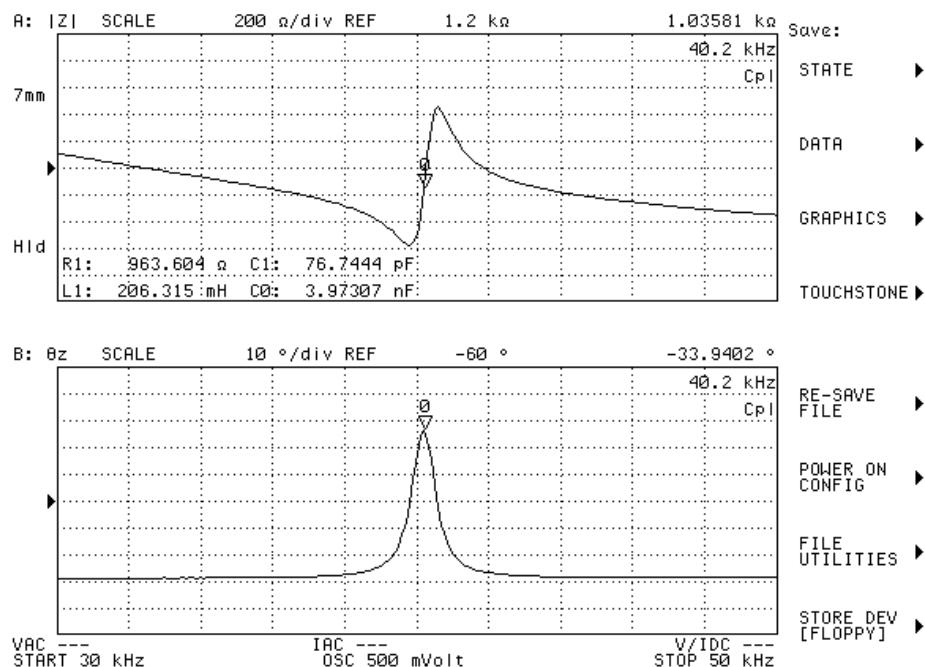


Fig. 3.11 40kHz 封閉式空氣超音波換能器頻率響應及相位圖

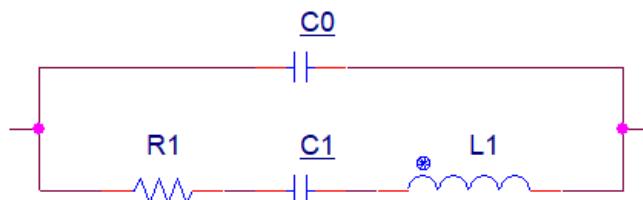


Fig. 3.12 换能器等效電路模型

Table 2 等效電路各元件值

名稱	數值
$C_0$	3.97307 nF
$R_1$	963.304Ω
$C_1$	76.7444 pF
$L_1$	963.604 mH

### 3.2.2 聲源聲壓量測

本量測分為兩部分，第一部分使用 Tektronix AFG 2021 任意函數產生器連接 Falco Systems WMA-300 高電壓放大器，量測換能器在固定距離下，不同驅動電壓與發射聲壓的關係，其實驗架設示意圖如 Fig. 3.12 所示。

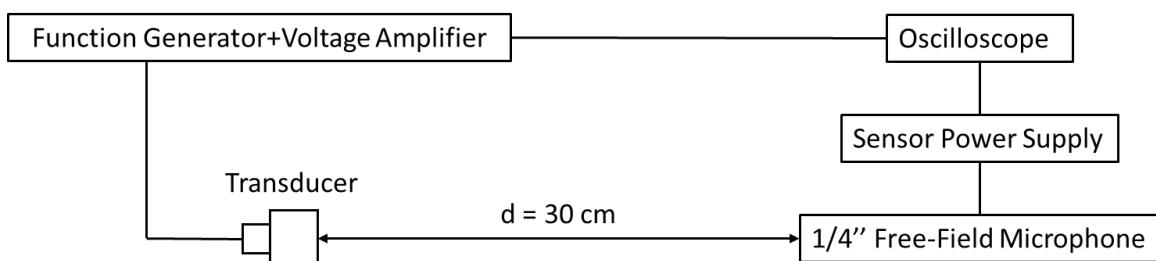


Fig. 3.13 聲源聲壓量測示意圖

利用示波器量測驅動訊號及麥克風接收訊號，如 Fig. 3.13 及 Fig. 3.14，逐步調高驅動訊號並各記錄五次接收訊號峰對峰值取平均後，再經由麥克風靈敏度 (2.85mV/Pa) 反向推算後得到 Table 3。最後依實驗數據得到麥克風接收聲壓與驅動電壓關係圖，如 Fig. 3.15。

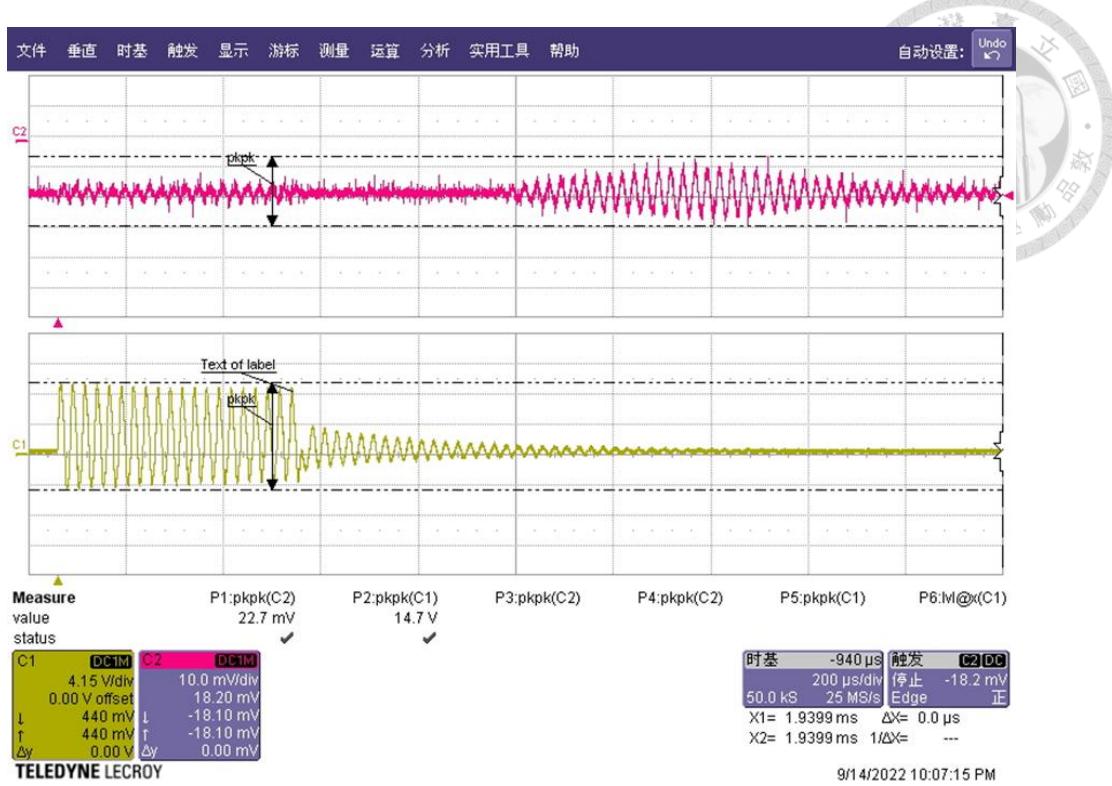


Fig. 3.14 驅動訊號(下)與接收訊號(上)@ $V_{pp} = 14.7V$

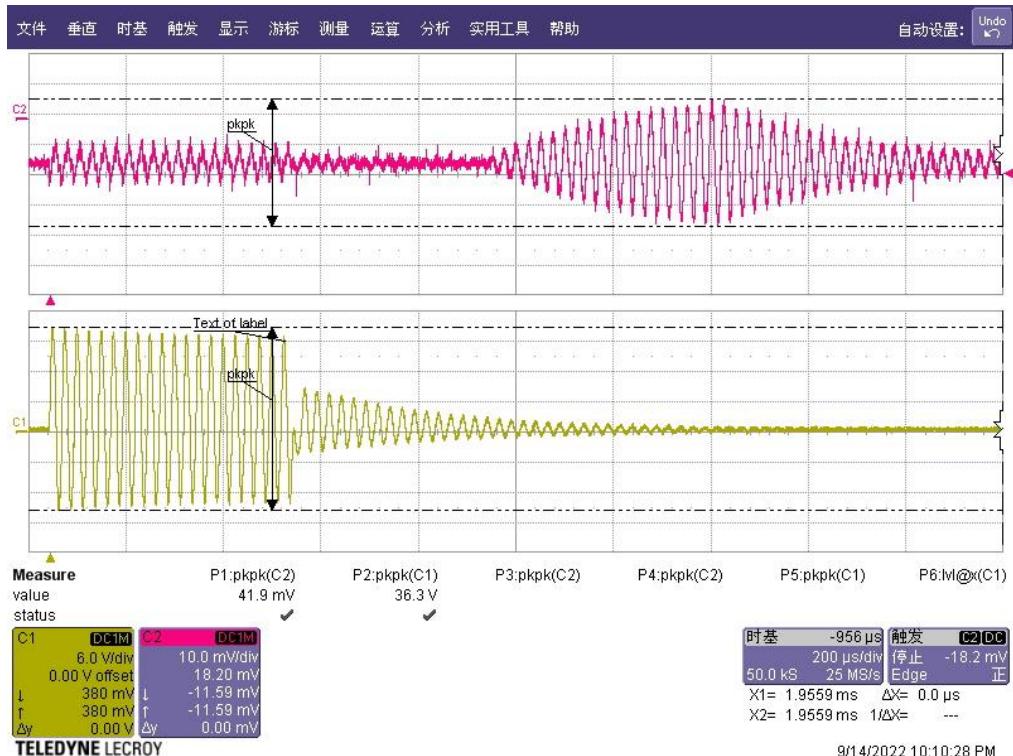


Fig. 3.15 驅動訊號(下)與接收訊號(上)@ $V_{pp} = 36.3V$

Table 3 驅動電壓與麥克風接收電壓

驅動電壓(V)	1	2	3	4	5	平均麥克風接收 V <sub>pp</sub> (mV)	聲壓(Pa)
14.7	22.7	23	21.8	21.1	24.6	22.64	7.94
36.3	41.9	42.2	46.1	43.5	43.5	43.44	15.24
64	71	70.4	71.7	70.4	72.3	71.16	24.97
78.9	91.5	85.8	88.3	87	83.2	87.16	30.58
98.6	115.8	113.3	112.6	115.2	116.5	114.68	40.24
120.5	142	136	134	138	134	136.8	48.00
146	168	168	155	152	165	161.6	56.70

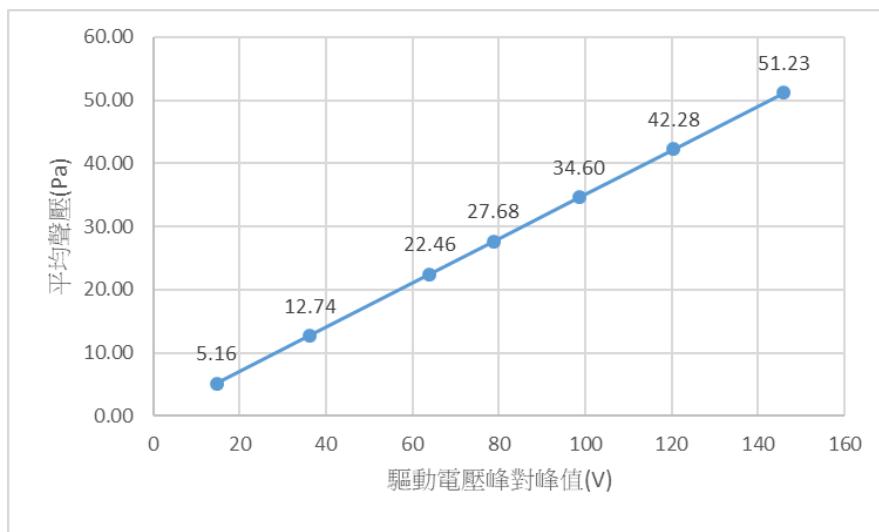


Fig. 3.16 麥克風接收聲壓與驅動電壓關係圖

第二部分使用廠商控制盒驅動換能器，量測換能器在相同驅動電壓、不同距離下之麥克風接收聲壓，其實驗架設示意圖如 Fig. 3.16 所示。

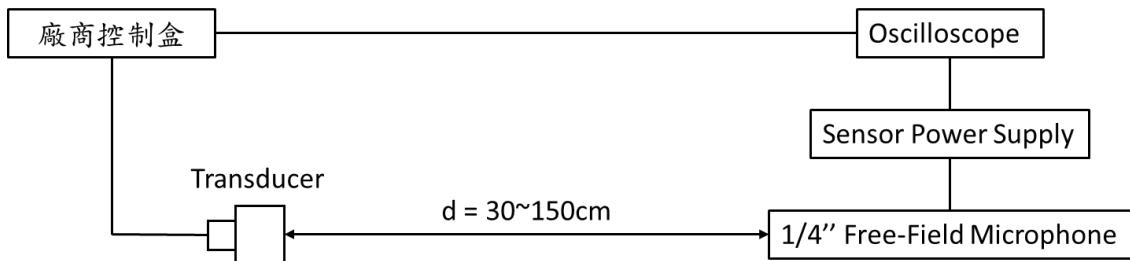


Fig. 3.17 廠商控制盒驅動聲源聲壓量測示意圖

首先，利用示波器量測廠商控制盒驅動訊號，如 Fig. 3.17，並利用 MATLAB 分析廠商控制盒驅動訊號，得到廠商控制盒驅動訊號頻譜圖，如 Fig. 3.18。麥克風接收訊號如 Fig. 3.19 至 Fig. 3.23，逐步增加麥克風距離並各記錄五次接收訊號峰對峰值取平均後，再經由麥克風靈敏度(2.85mV/Pa)反向推算後得到 Table 4。最後依實驗數據得到廠商控制盒驅動聲源聲壓圖，如 Fig. 3.24。

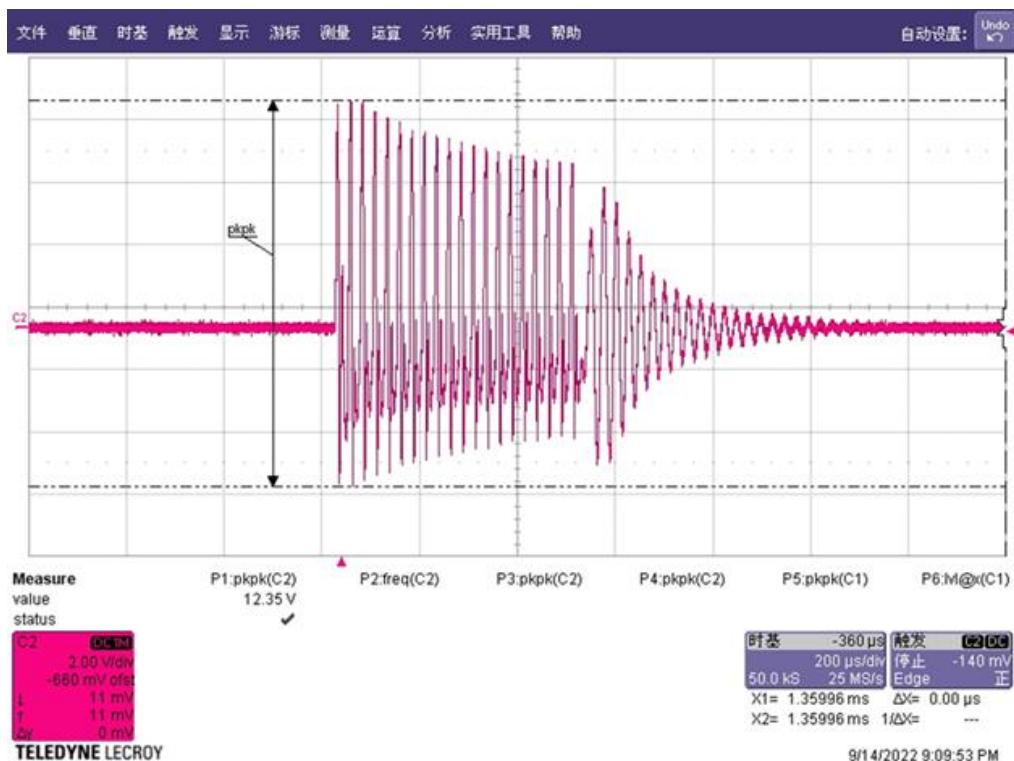


Fig. 3.18 廠商控制盒驅動訊號

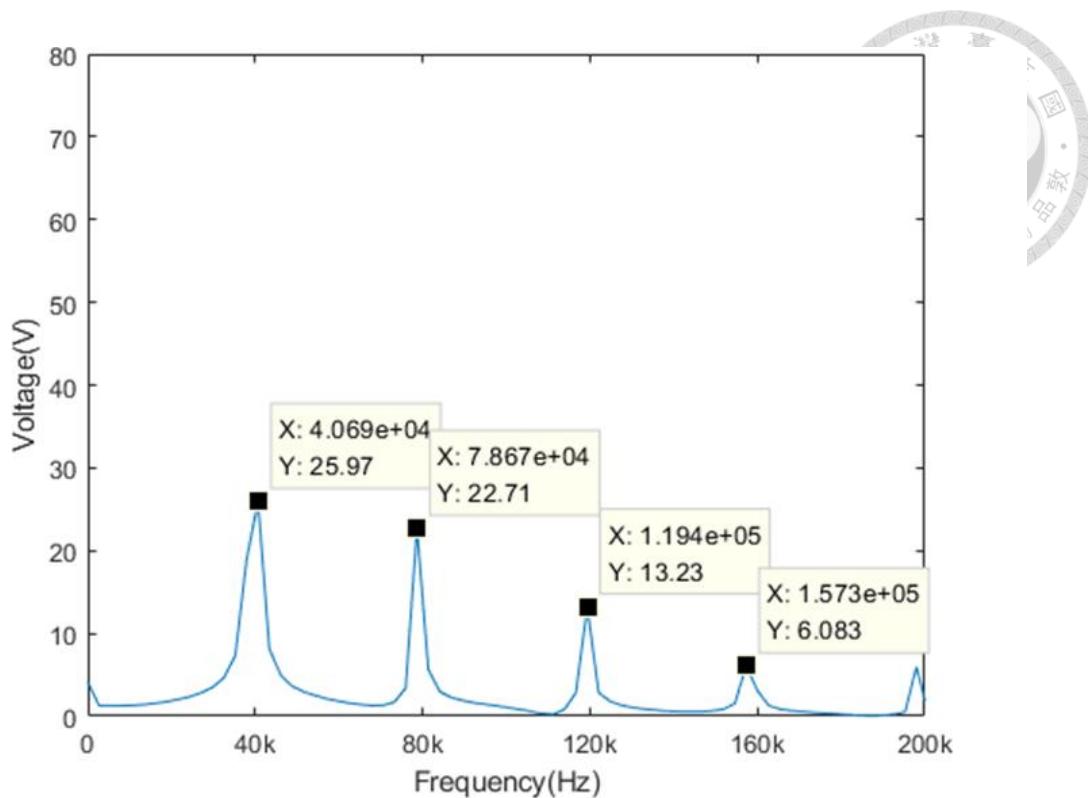


Fig. 3.19 廠商控制盒驅動訊號頻譜圖

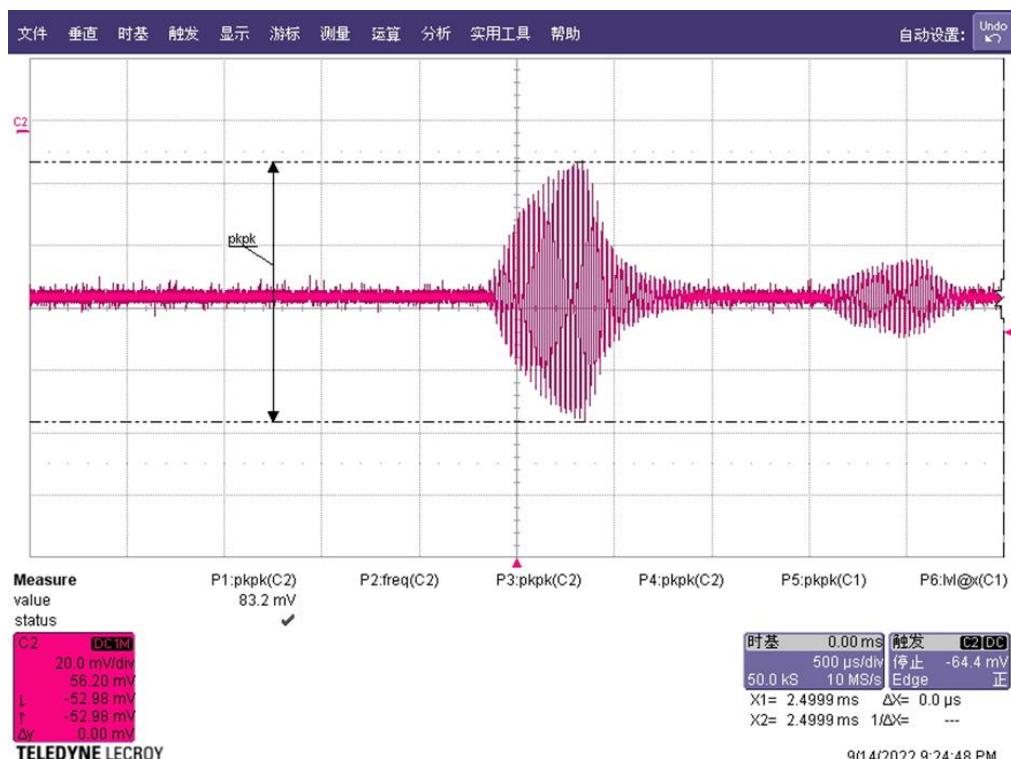


Fig. 3.20 麥克風接收訊號@ $d=30\text{cm}$

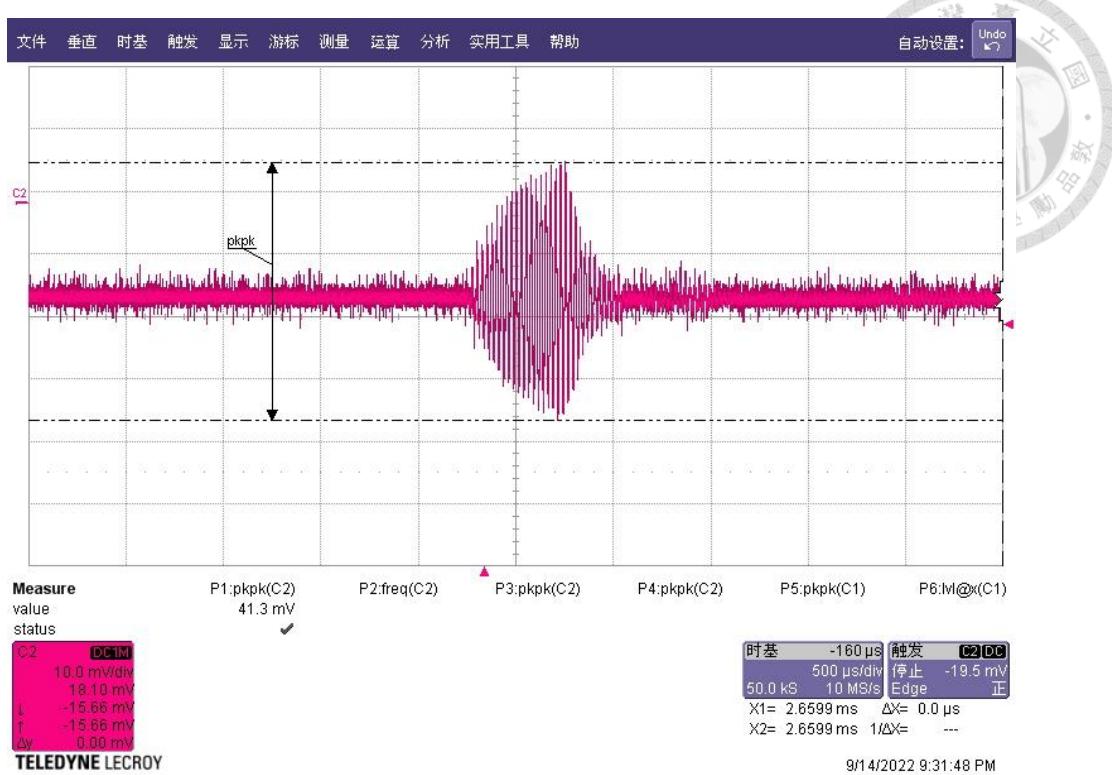


Fig. 3.21 麥克風接收訊號@ $d=60\text{cm}$

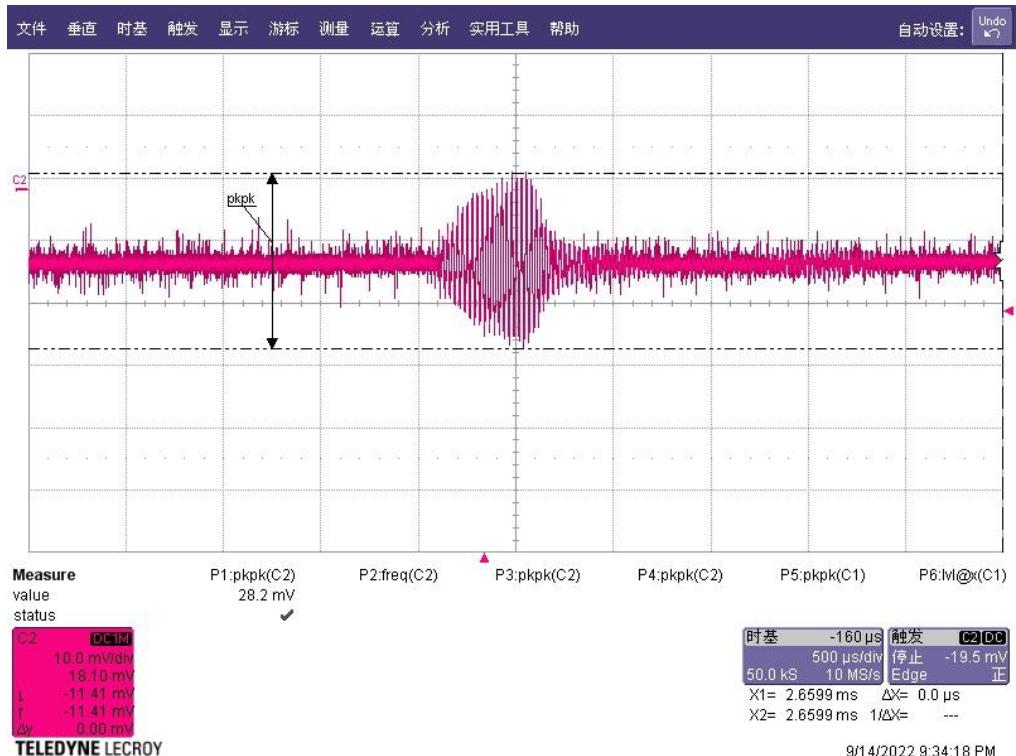


Fig. 3.22 麥克風接收訊號@ $d=90\text{cm}$

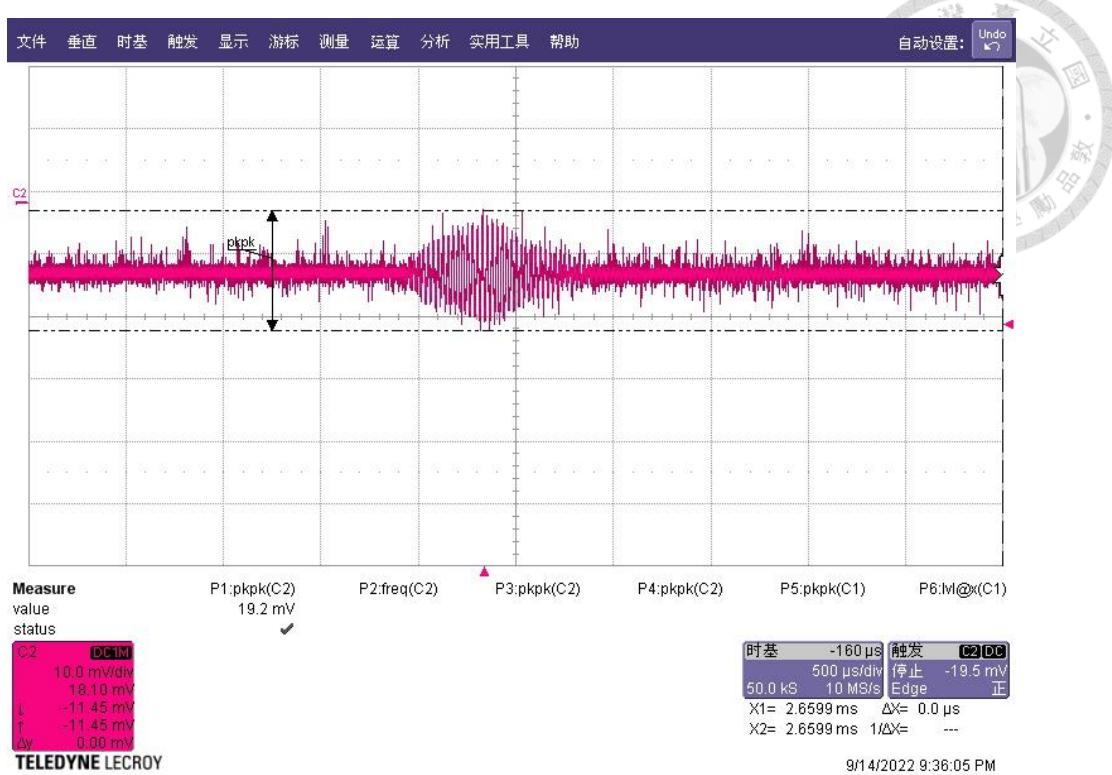


Fig. 3.23 麥克風接收訊號@ $d=120\text{cm}$

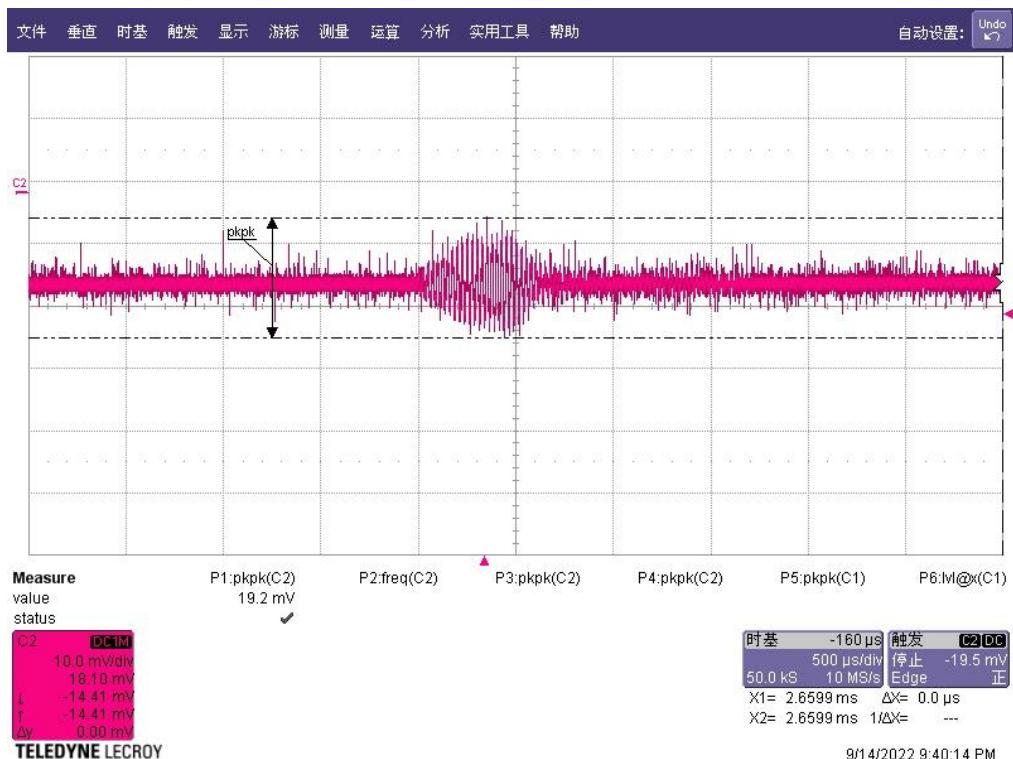


Fig. 3.24 麥克風接收訊號@ $d=150\text{cm}$

Table 4 麥克風接收電壓

d(cm)	驅動電壓(V)	1	2	3	4	5	平均麥克風接收 Vpp(mV)	聲壓 (Pa)
30	123.5	83.2	82.6	81.9	80	83.2	82.18	28.84
60	123.5	41.3	41	41.6	41	42.9	41.56	14.58
90	123.5	28.2	26.9	27.5	26.9	29.1	27.72	9.73
120	123.5	19.2	21.4	18.9	23.4	21.4	20.86	7.32
150	123.5	19.2	18.2	20.8	20.5	19.2	19.9	6.98

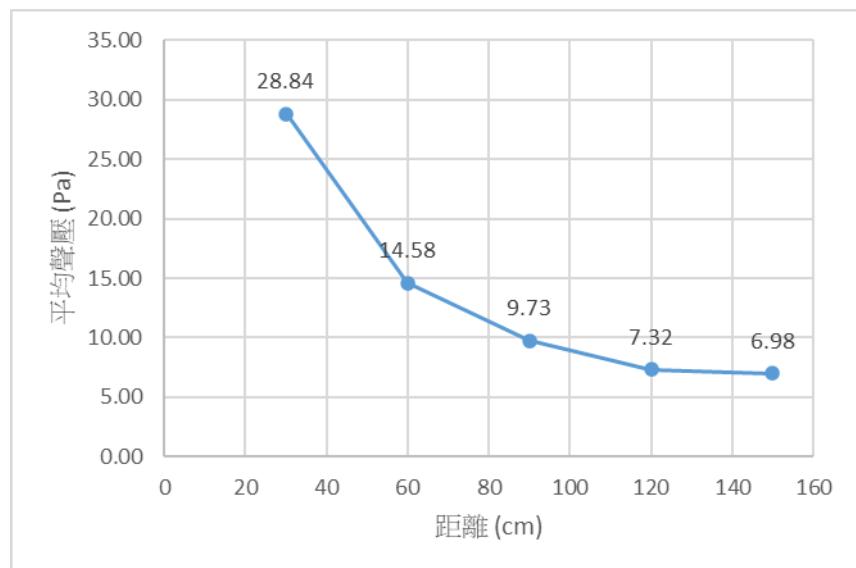


Fig. 3.25 廠商控制盒驅動聲源聲壓圖

# Chapter 4 電路設計及模擬



## 4.1 E 類功率放大器設計及模擬

E 類功率放大器電路圖如 Fig. 4.1,  $C_d$ 是一個耦合電容，主要功能為穩定電壓。

當電路中產生交流雜訊時，可透過此電容來濾除雜訊。依據 Sokal 的設計準則，必須先決定輸出功率  $P_{out}$  和負載  $R_L$ ，接著確保品質因數  $Q_L$  不低於 1.7879 才能讓電路正常運作。從 Fig. 3.10 可知，在工作頻率為 40kHz 時，本實驗之負載  $R_L$  换能器之阻抗為 1k 歐姆，且本實驗電路的直流電源為汽車電池供電的 12V，因此僅剩下電容和電感需要設計。在選定  $Q_L=2$  的情況下，各元件值依 Table 1 之公式計算，整理如 Table 5。

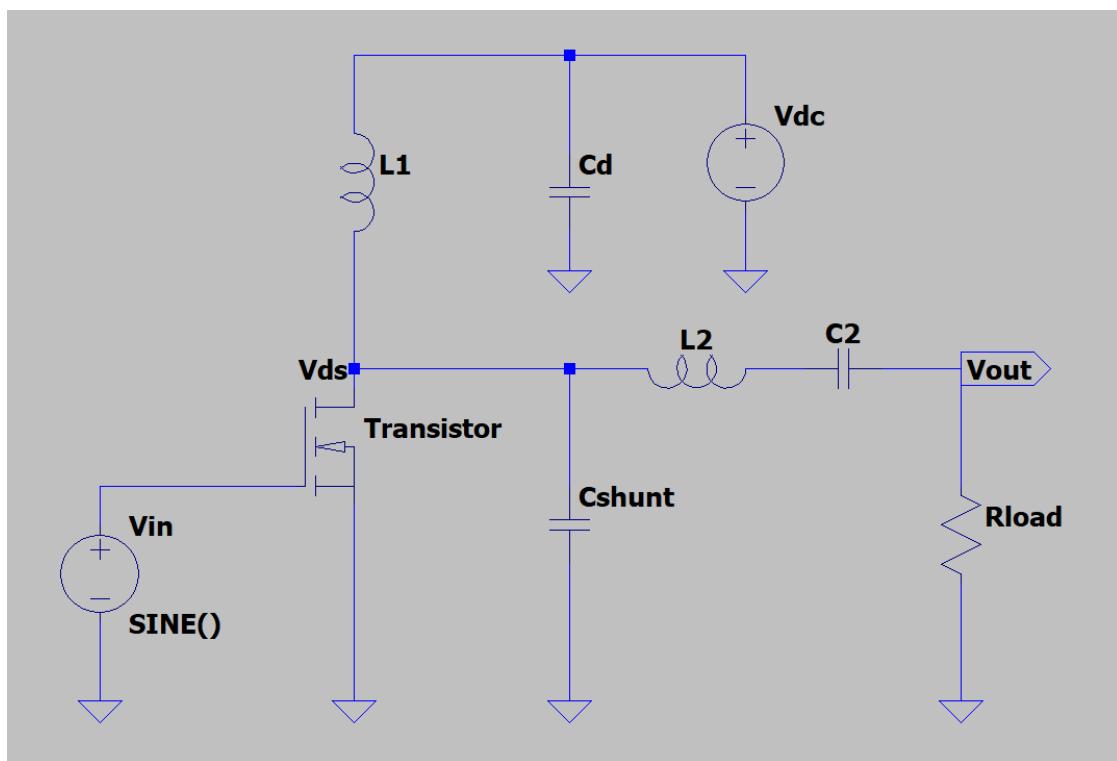
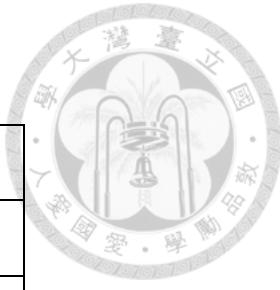


Fig. 4.1 E 類功率放大器電路圖

Table 5 E 類功率放大器電路元件值



Name	Description	Value
$R_L$	Loading	$1000\Omega$
$Q_L$	Q Value	2
$L_2$	Resonator Inductor	$7957.7471\mu\text{H}$
$C_2$	Resonator Capacitor	$1.9894\text{nF}$
$L_1$	RFC	$4585.6284\mu\text{H}$
$C_{shunt}$	Shunt Capacitor	$0.7305\text{nF}$
$C_d$	Decoupling Capacitor	$10\mu\text{F}$

本研究利用 LTspice 軟體進行電路模擬，在電晶體的挑選上挑選 RSR030N06，其最大  $V_{ds}$  值為 60V，大於三倍  $V_{dc}$ 。且在實作上，由於沒有完全符合 Table 5 的電感及電容值，因此電路的各元件值調整為最接近的市售規格，整理如 Table 6。

Table 6 E 類功率放大器電路實際元件值

Name	Value
$L_2$	$8000\mu\text{H}$
$C_2$	$2\text{nF}$
$L_1$	$4700\mu\text{H}$
$C_{shunt}$	$0.73\text{nF}$
$C_d$	$10\mu\text{F}$

E 類功率放大器模擬電路圖如 Fig. 4.2，將換能器之等效電路作為放大器之負載， $V_{in}$  設為振幅 5V，上升時間及下降時間接近理想(1ns)的連續脈衝，重複頻率為 40kHz，高電位時間為半週期且重覆無限次的連續脈衝。模擬時間為電路開始 0.1 秒後之 200 微秒。

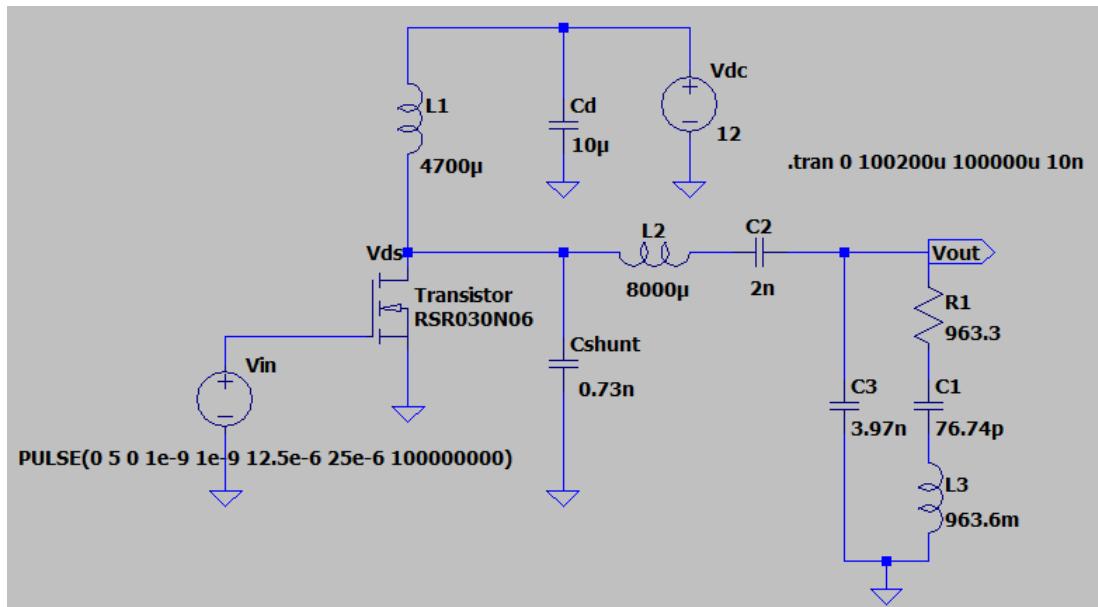


Fig. 4.2 E 類功率放大器電路模擬電路圖

E 類功率放大器  $V_{out}$  的波形圖和頻譜圖如 Fig. 4.3 及 Fig. 4.4，可以看到  $V_{out}$  之峰對峰值明顯小於廠商控制盒之驅動電壓(123.5V)。因此，嘗試在設計電路中加入變壓器增加驅動電壓。

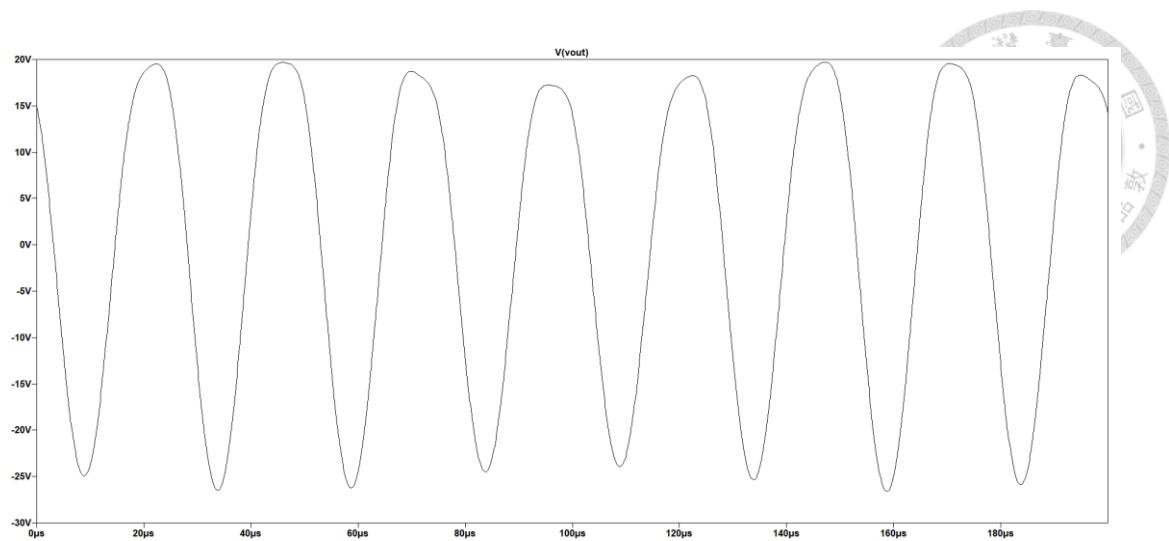


Fig. 4.3 E 類功率放大器  $V_{out}$  圖

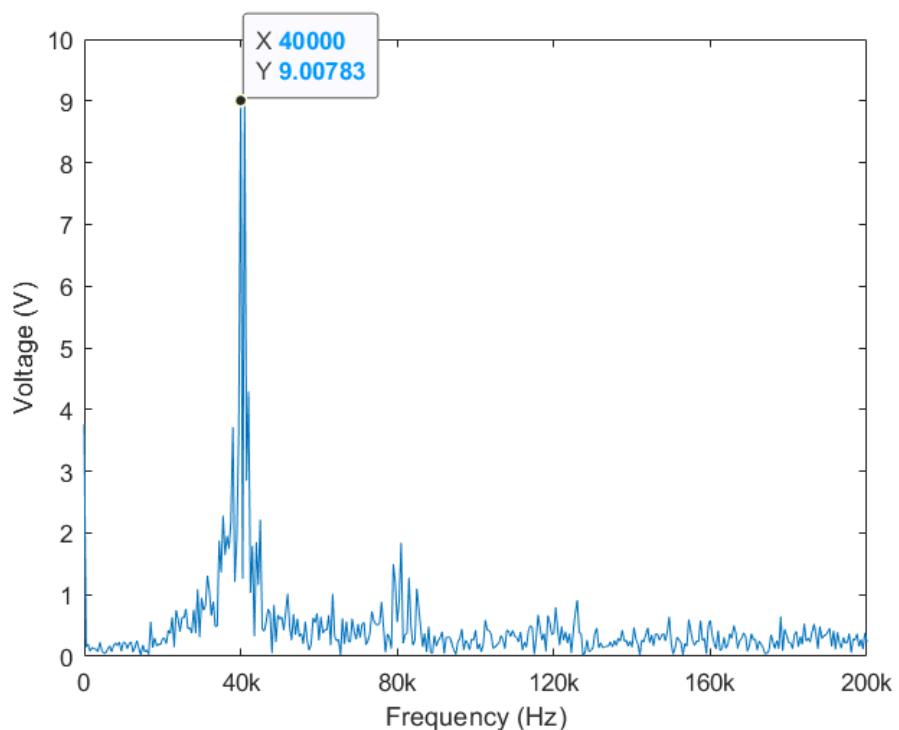


Fig. 4.4 E 類功率放大器  $V_{out}$  頻譜圖



## 4.2 變壓器設計及量測

在變壓器的設計中，先將次級側的阻抗值 $L_2$ 設計為大於 $R_L$ 等效阻抗的 15 倍，藉由式 4-1 計算，便可以得到變壓器次級側的最小感抗值 $L_2$ 。

$$L_2 > \frac{15R_L}{2\pi f_0} = \frac{15*1000}{2\pi*40000} = 59.68(\text{mH}) \quad (4-1)$$

接著挑選合適的鐵氧體磁芯，本研究使用 Fig. 4.5 之鐵氧體磁芯 T60004L2030W676，其電感因數 $A_L$ 為  $26.5\mu\text{H}$ 。根據式 4-2 至式 4-4，選定變壓器初級側及次級側匝數比為 12:48，設計一放大電壓四倍之變壓器，其初級側電感值 $L_1$ 為  $3.816\text{mH}$ 、次級側電感值 $L_2$ 為  $61.056\text{mH}$ ，符合式 4-1 之要求。

$$L = A_L * N^2 \quad (4-2)$$

$$L_1 = 26.5\mu\text{H} * 12^2 = 3.816\text{mH} \quad (4-3)$$

$$L_2 = 26.5\mu\text{H} * 48^2 = 61.056\text{mH} \quad (4-4)$$



Fig. 4.5 鐵氧體磁芯 T60004L2030W676

依此設計之變壓器實作圖如 Fig. 4.6，並利用此變壓器進行如 Fig. 4.7 之量測，由函數產生器提供  $1V_{pp}$ 、頻率為  $40\text{kHz}$  之弦波連接變壓器初級側、在變壓器次級側連接超音波換能器，並在變壓器兩端連接示波器量測變壓器兩端電壓值。

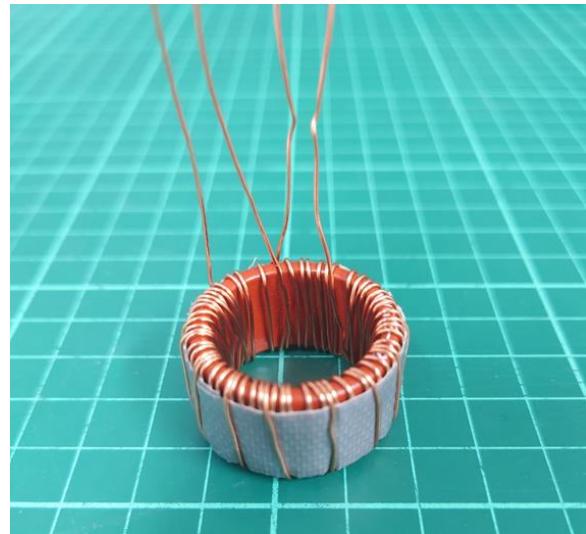


Fig. 4.6 變壓器實作圖

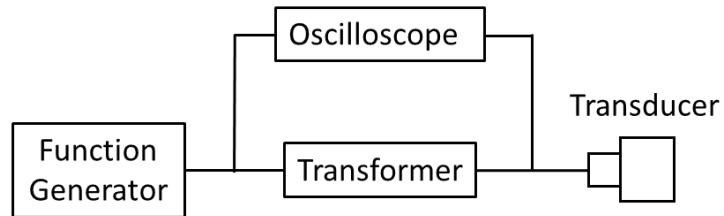


Fig. 4.7 變壓器量測示意圖

由 Fig. 4.8 可知變壓器初級側  $V_{pp}$  為 1.01V、次級側  $V_{pp}$  為 3.94V，大致符合設計之四倍放大。

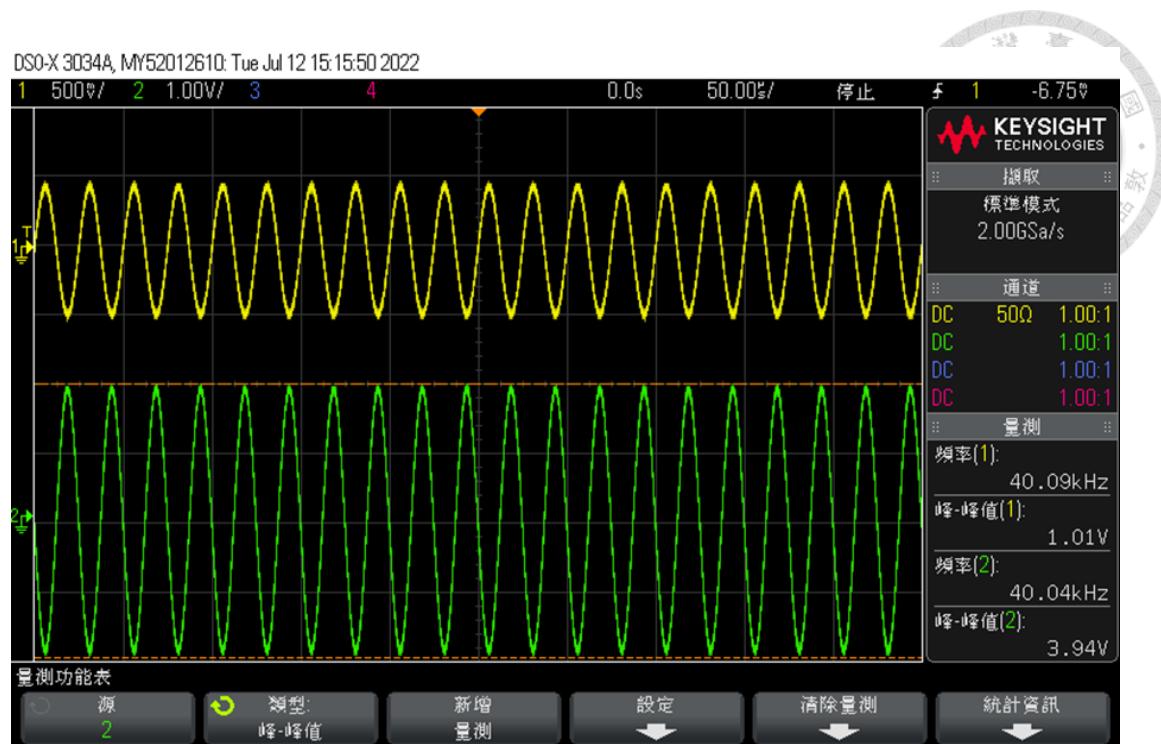


Fig. 4.8 變壓器兩側電壓圖

### 4.3 加入變壓器之 E 類功率放大器設計及模擬

再加入變壓器後，將變壓器串連超音波換能器、將兩者一同視為 E 類功率放大器之負載。因此，再次使用 Agilent 4294A 阻抗分析儀分析變壓器連接超音波換能器之阻抗及相位頻率響應圖，如 Fig. 4.9 所示，在工作頻率為 40kHz 時，其阻抗為  $60\Omega$ 。在採用 BVD 等效電路模型下，等效電路模型如 Fig. 4.10。

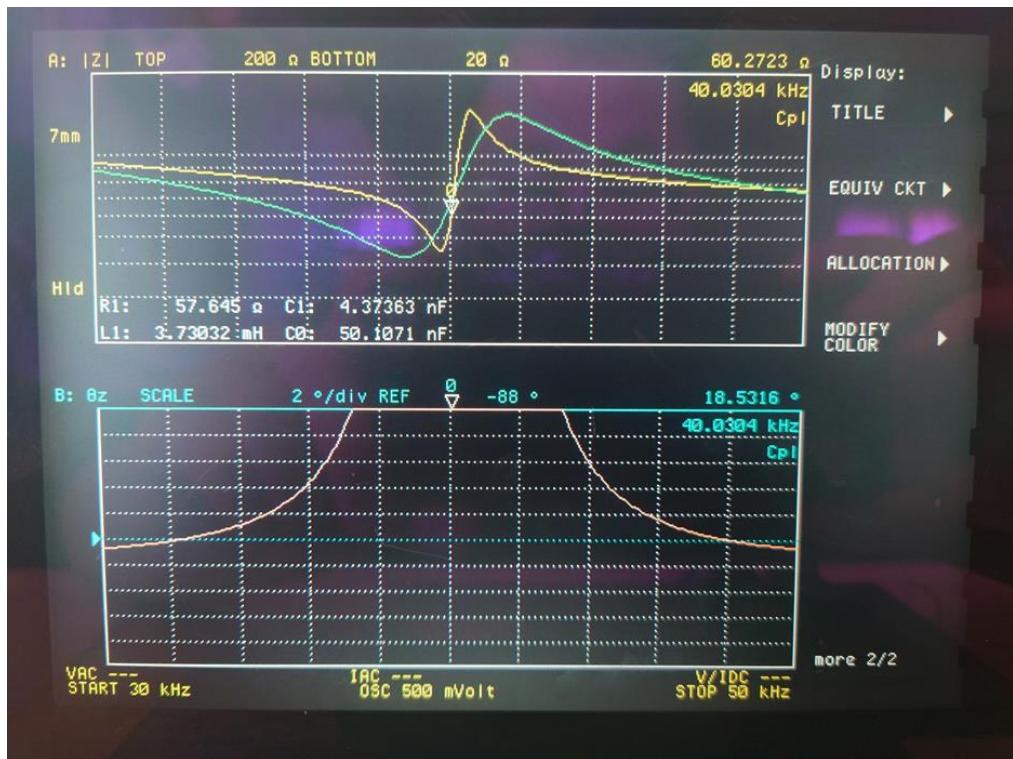


Fig. 4.9 變壓器連接超音波換能器之阻抗及相位頻率響應圖

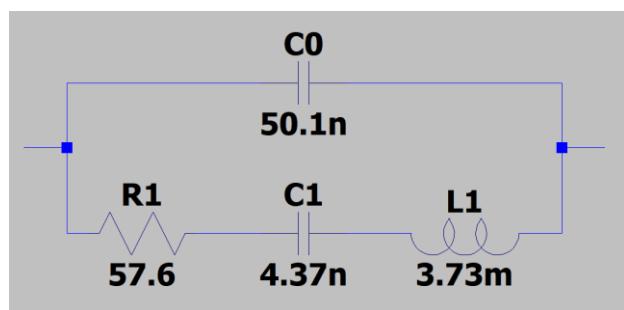


Fig. 4.10 變壓器連接超音波換能器之等效電路

將 E 類功率放大器之負載  $R_L$  調整為 60 歐姆，直流電源維持 12V。在選定  $Q_L=2$  的情況下，各元件值依 Table 1 之公式計算，調整如 Table 7。



Table 7 E 類功率放大器電路元件值

Name	Description	Value
$R_L$	Loading	$60\Omega$
$Q_L$	Q Value	2
$L_2$	Resonator Inductor	$477.4648\mu\text{H}$
$C_2$	Resonator Capacitor	$33.1572\text{nF}$
$L_1$	RFC	$275.1377\mu\text{H}$
$C_{shunt}$	Shunt Capacitor	$12.1754\text{nF}$
$C_d$	Decoupling Capacitor	$10\mu\text{F}$

將各元件值調整為最接近的市售規格，整理如 Table 8。

Table 8 E 類功率放大器電路實際元件值

Name	Value
$L_2$	$470\mu\text{H}$
$C_2$	$33\text{nF}$
$L_1$	$270\mu\text{H}$
$C_{shunt}$	$12\text{nF}$
$C_d$	$10\mu\text{F}$

調整後的 E 類功率放大器模擬電路圖如 Fig. 4.11，將 Fig. 4.10 之等效電路作

為放大器之負載， $V_{in}$ 為振幅 5V，上升時間及下降時間接近理想(1ns)的連續脈衝，重複頻率為 40kHz，高電位時間為半週期且重覆無限次的連續脈衝。模擬時間為電路開始 0.1 秒後之 200 微秒。

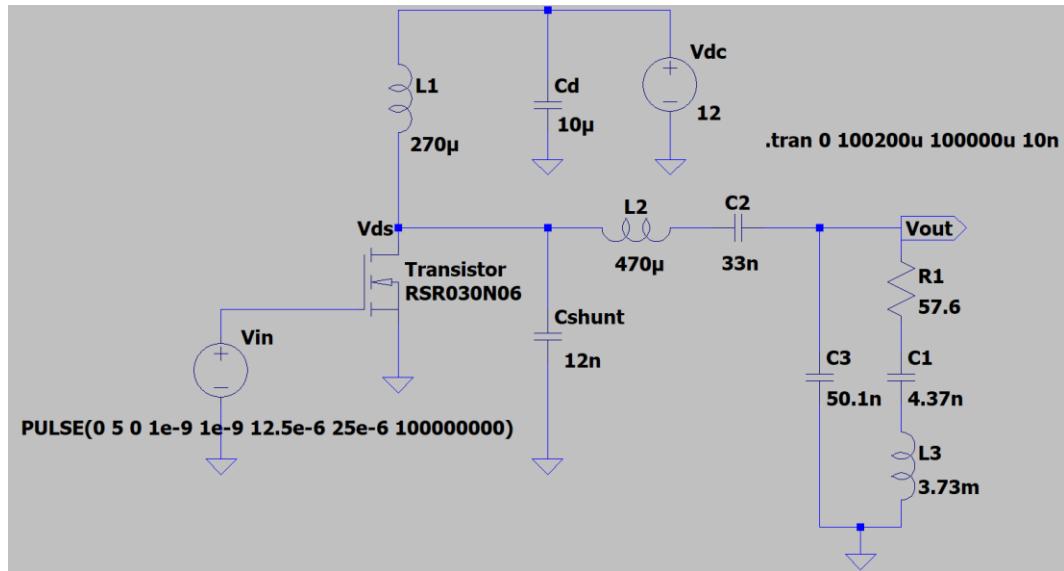


Fig. 4.11 E 類功率放大器電路模擬電路圖

模擬 E 類功率放大器  $V_{out}$  的波形圖和頻譜圖如 Fig. 4.12 及 Fig. 4.13。此處之  $V_{out}$  為變壓器初級側，峰對峰值大約為 33V，且根據頻譜圖可以看到 E 類功率放大器的輸出電壓保留很大成分的主頻頻率。

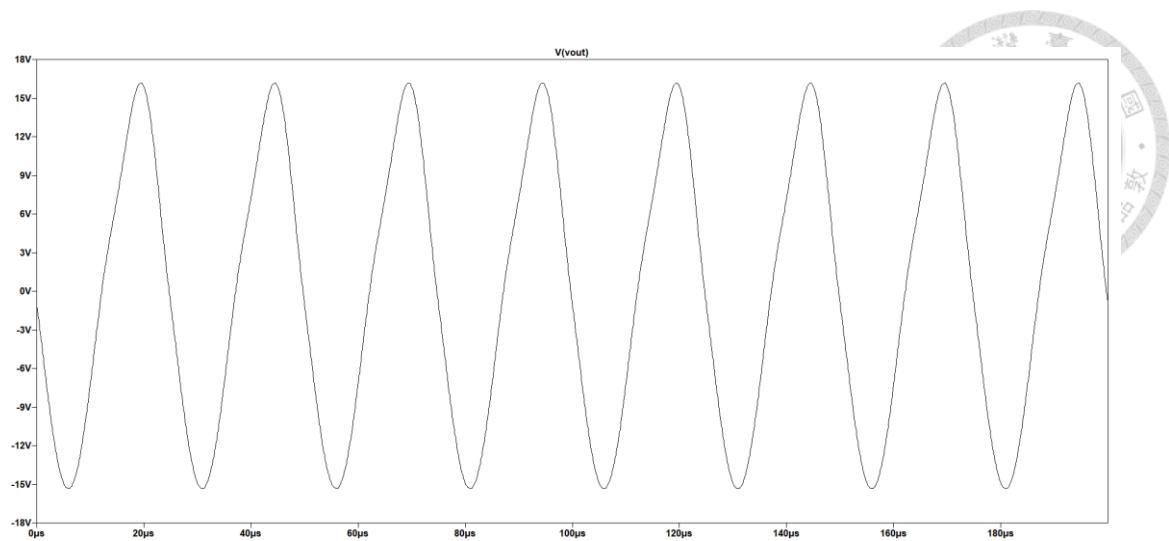


Fig. 4.12 E 類功率放大器  $V_{out}$  圖

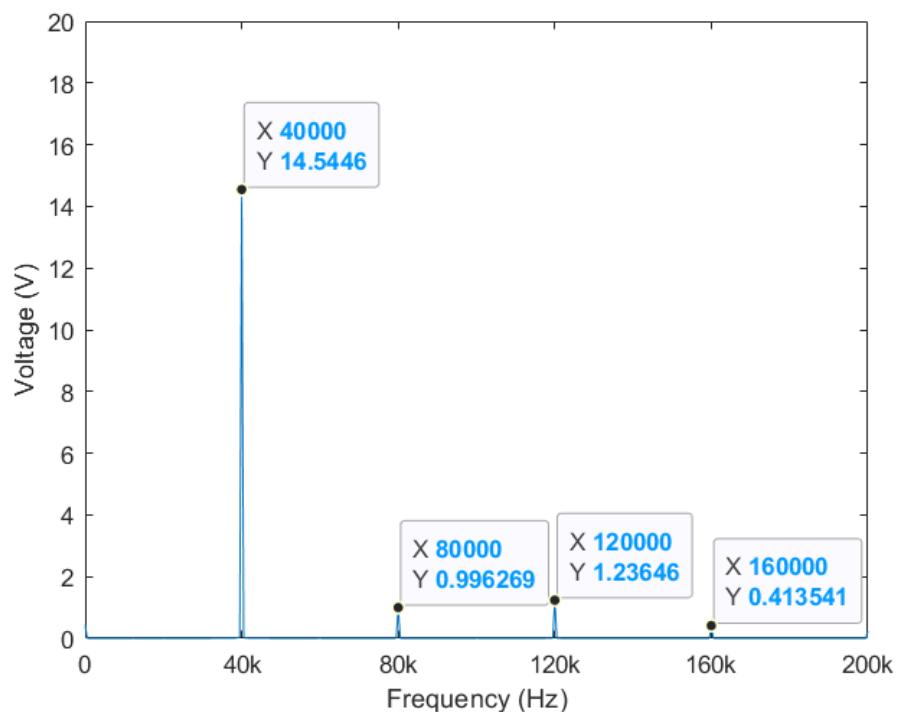


Fig. 4.13 E 類功率放大器  $V_{out}$  頻譜圖

# Chapter 5 實驗結果與討論



## 5.1 電路板

本研究的實作，乃根據 Fig. 4.11 之電路圖，以 EAGLE PCB 軟體繪製電路板 Layout，如 Fig. 5.1。再將 Layout 檔案利用 PCB prototype 雕板機雕出 PCB 電路板。所使用之 PCB 板為單層銅板，厚度為 1mm，最後再將購買之元件焊上電路板，完成電路製作，實體電路圖如 Fig. 5.2。

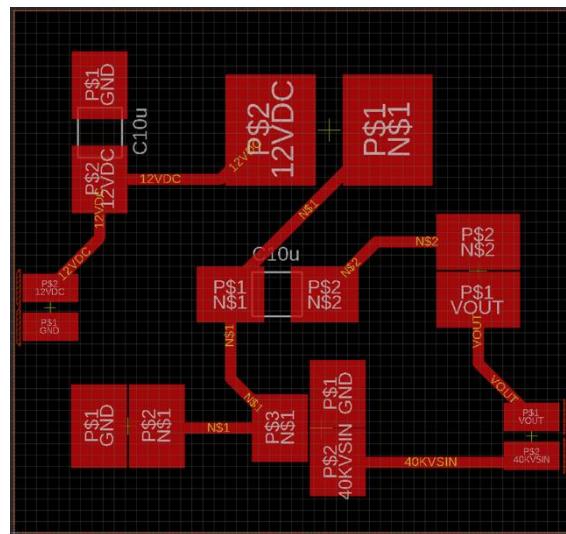


Fig. 5.1 E 類功率放大器 PCB Layout

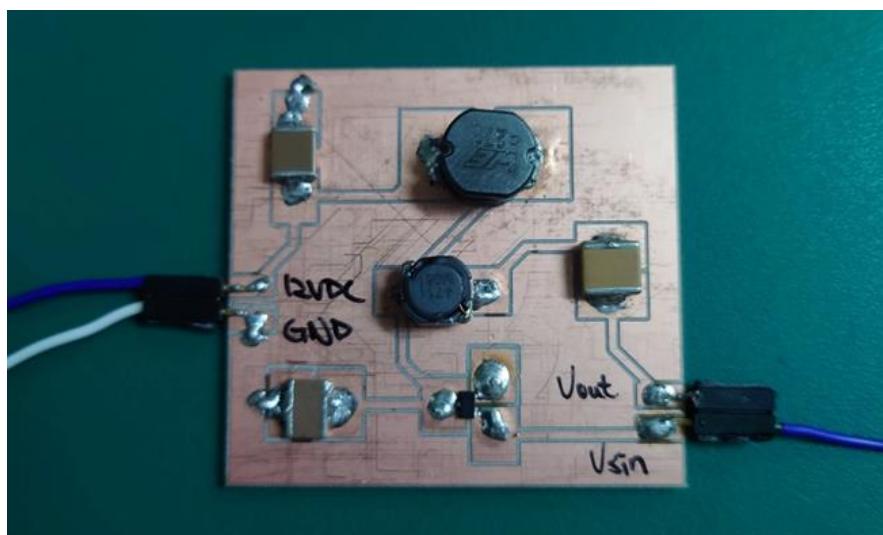


Fig. 5.2 E 類功率放大器實體電路圖

## 5.2 E 類功率放大器量測結果

E 類功率放大器  $V_{out}$  量測架構如 Fig. 5.3，使用直流電源供應器提供  $V_{dc}=12V$ ，訊號產生器提供振幅為 5V、重複頻率為 40kHz、高電位時間為半週期的連續脈衝作為  $V_{in}$ ，連接變壓器及換能器，並使用示波器量測 E 類功率放大器的  $V_{out}$  (即變壓器初級側端電壓)，量測結果如 Fig. 5.4 所示。

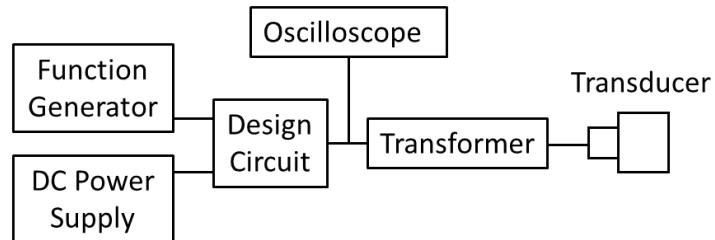


Fig. 5.3 E 類功率放大器  $V_{out}$  量測架構圖

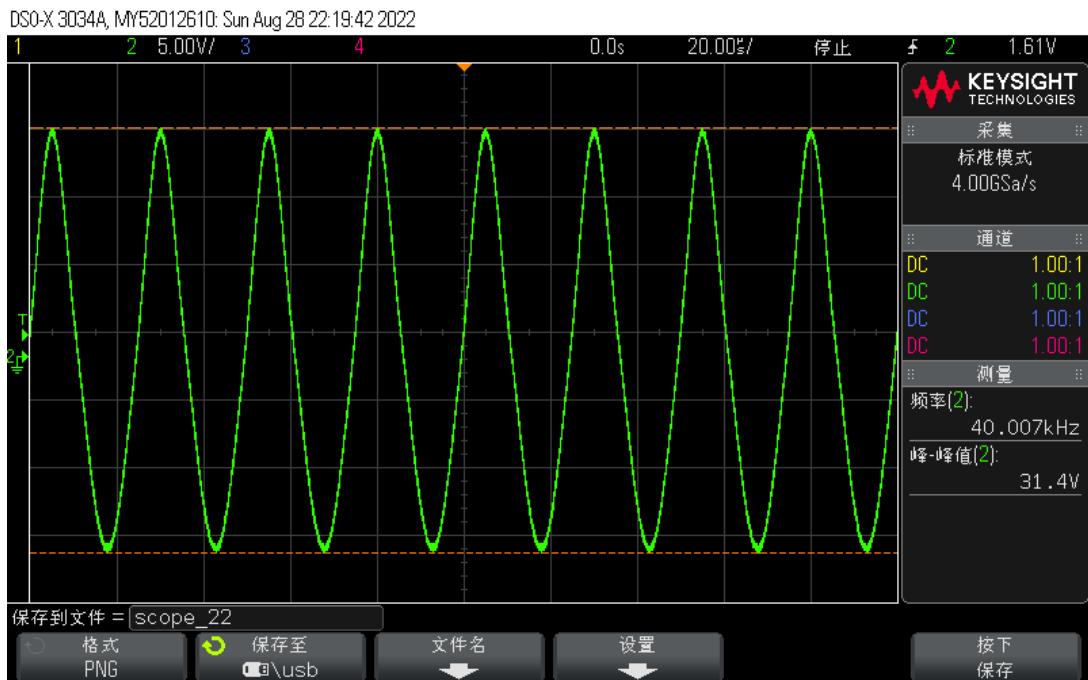


Fig. 5.4 E 類功率放大器  $V_{out}$

量測結果符合 Fig. 4.12 之模擬結果，並將量測結果透過 MATLAB 作 FFT 運算，得到 E 類功率放大器  $V_{out}$  頻譜圖，如 Fig. 5.5。

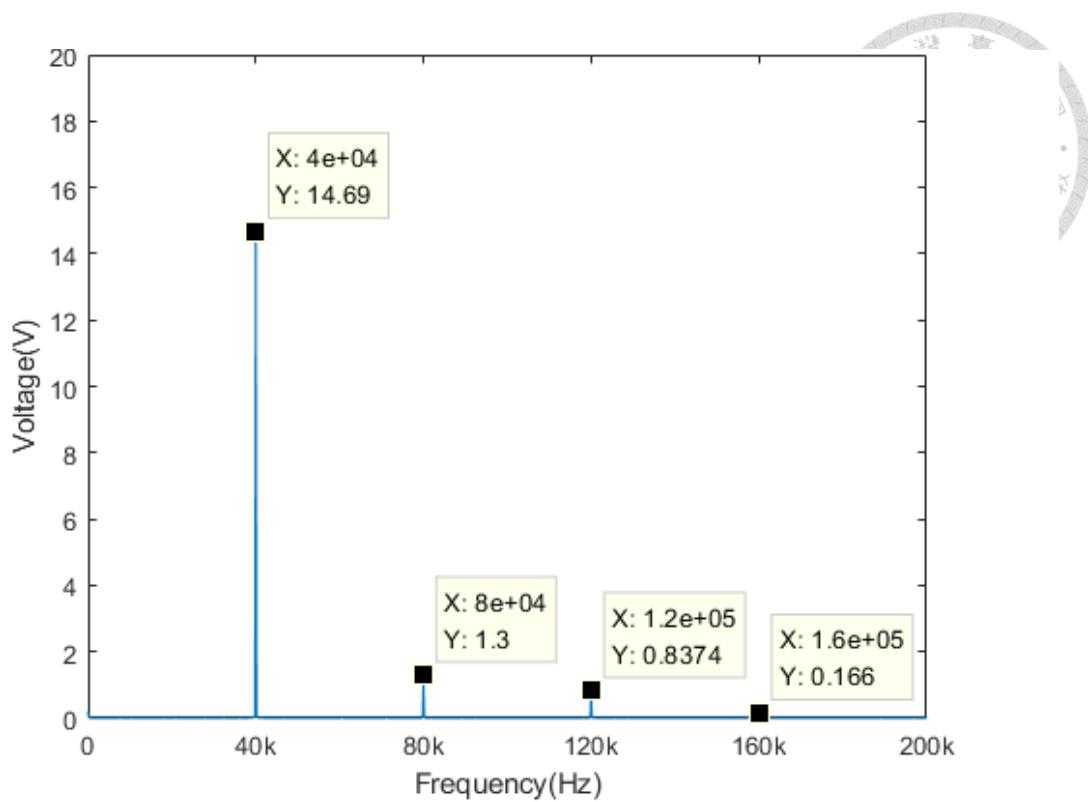


Fig. 5.5 E 類功率放大器  $V_{out}$  頻譜圖

實驗計算所得之頻譜圖也符合 Fig. 4.13 之模擬結果。



### 5.3 換能器端電壓量測結果

換能器端電壓量測架構如 Fig. 5.6，重覆上一節之量測，使用直流電源供應器提供  $V_{dc}=12V$ ，訊號產生器提供振幅為 5V、重複頻率為 40kHz、高電位時間為半週期的連續脈衝作為  $V_{in}$ ，連接變壓器及換能器，並使用示波器及 10 倍衰減的探棒量測換能器端電壓(即變壓器次級側端電壓)，量測結果如 Fig. 5.7 所示。

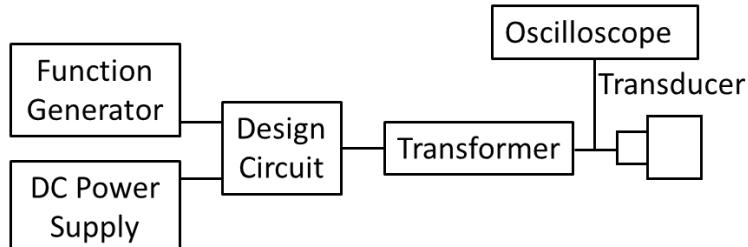


Fig. 5.6 換能器端電壓量測架構圖

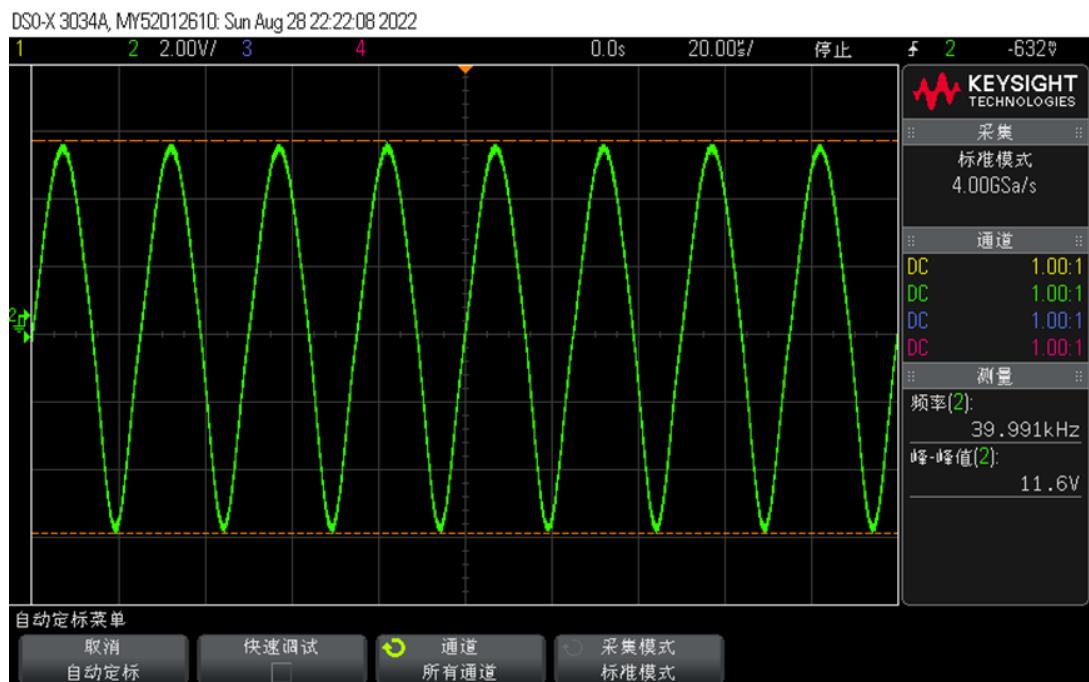


Fig. 5.7 換能器端電壓

量測結果經過探棒的十倍衰減，實際的換能器端電壓為 116V，變壓器提供約 3.7 倍的電壓放大。將量測結果透過 MATLAB 作 FFT 運算，得到換能器端電壓頻譜圖，如 Fig. 5.8。

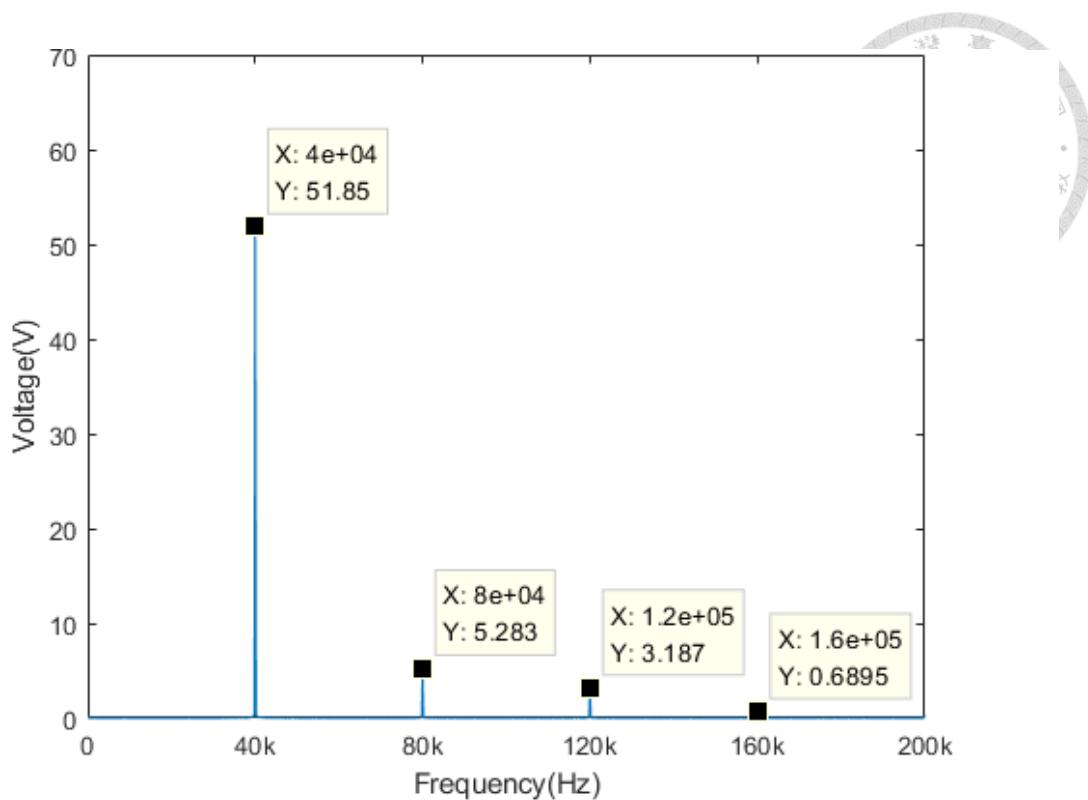


Fig. 5.8 換能器端電壓頻譜圖

實驗計算所得之頻譜圖與 Fig. 3.18 廠商控制盒驅動訊號頻譜圖相比，在工作頻率上有更高的電壓值，也有電壓值更低的高頻諧波。

## 5.4 換能器發射聲壓量測結果

此部份研究使用設計電路驅動超音波換能器，量測麥克風在距離換能器 30cm、60cm、90cm、120cm、150cm 下，麥克風的接收聲壓，得到設計電路驅動之超音波聲壓隨距離的衰減關係，實驗架設示意圖如 Fig. 5.9 所示。

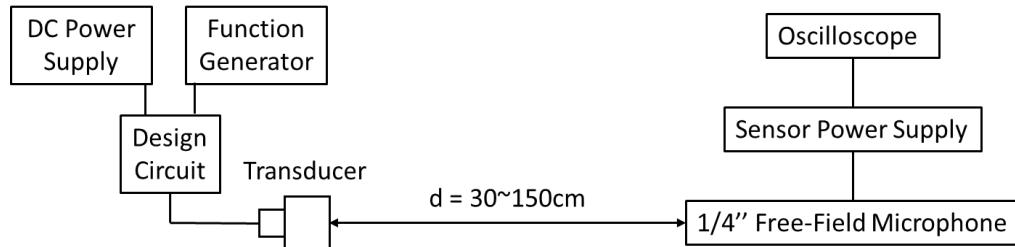


Fig. 5.9 設計電路驅動聲源聲壓量測示意圖

麥克風接收訊號如 Fig. 5.10 至 Fig. 5.14，逐步增加麥克風距離並各記錄五次接收訊號峰對峰值取平均後，再經由麥克風靈敏度(2.85mV/Pa)反向推算後得到 Table 9。

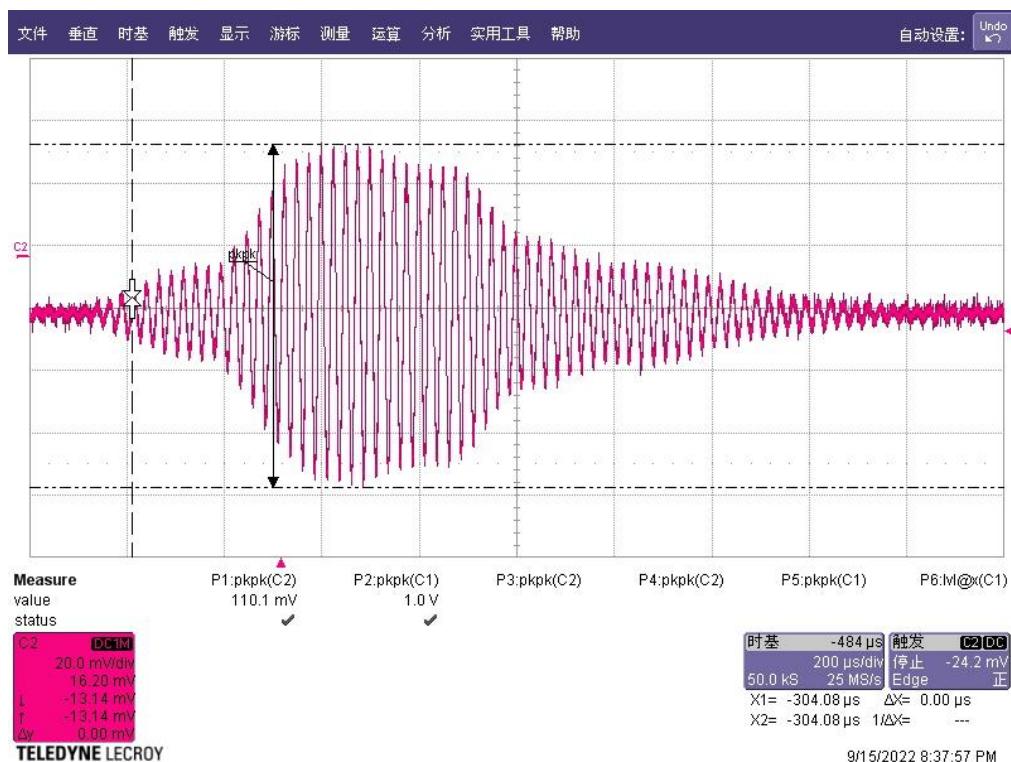


Fig. 5.10 麥克風接收訊號@ $d=30\text{cm}$

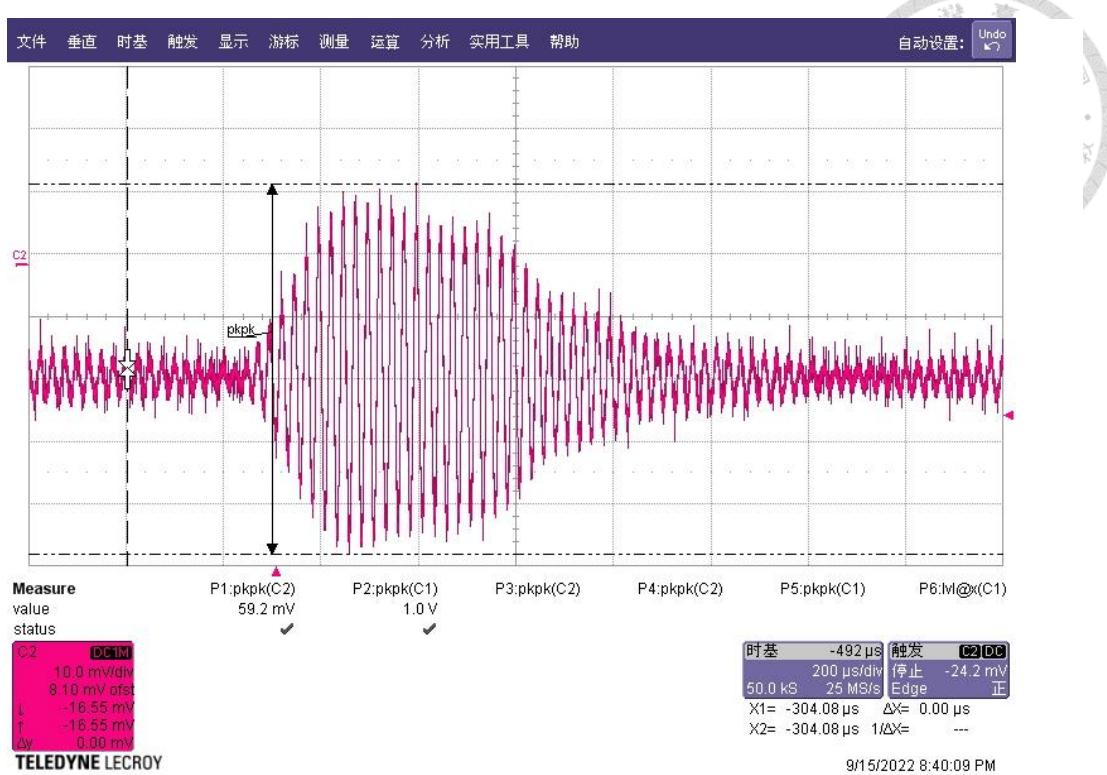


Fig. 5.11 麥克風接收訊號@ $d=60\text{cm}$

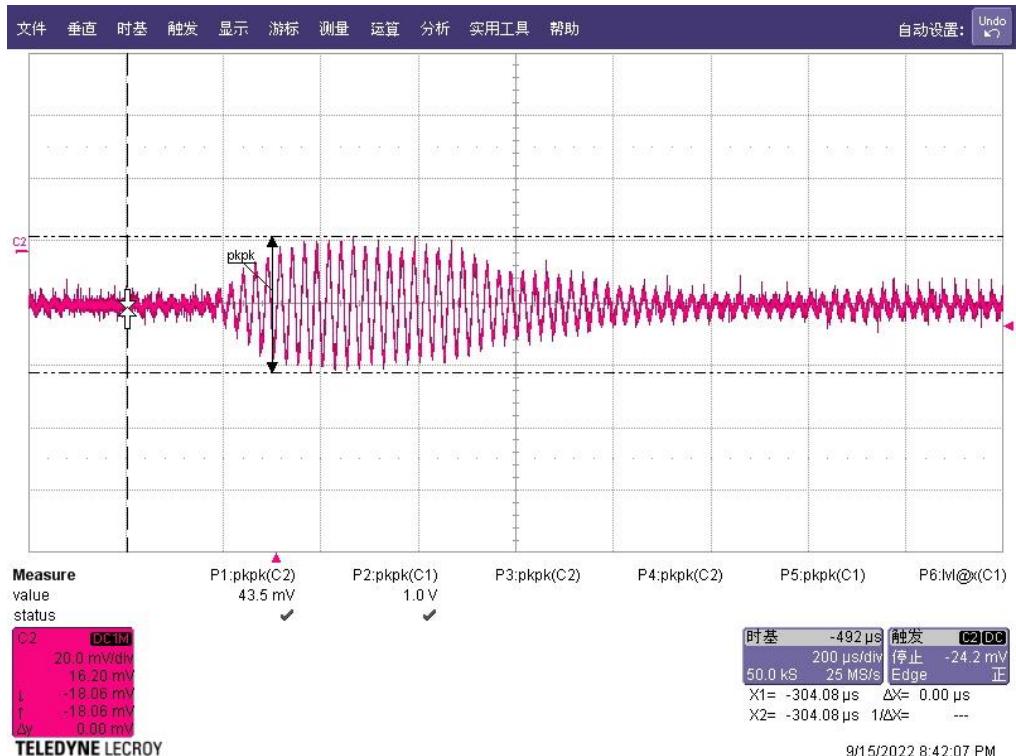


Fig. 5.12 麥克風接收訊號@ $d=90\text{cm}$

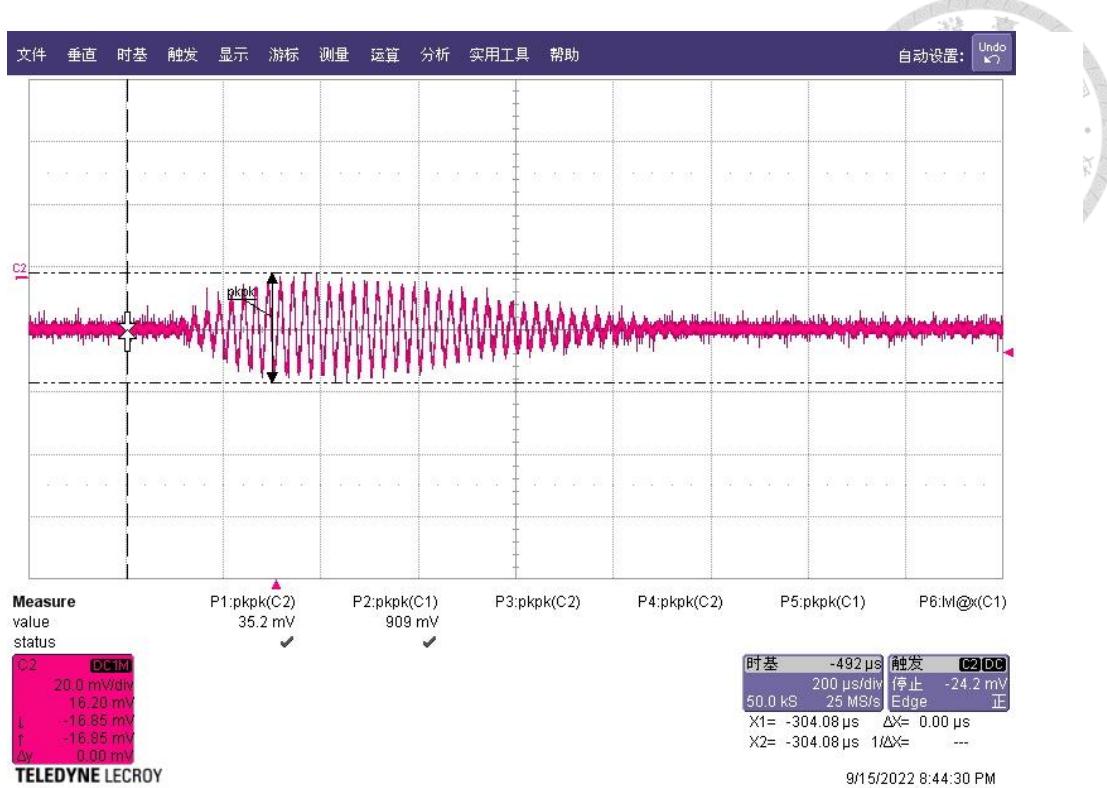


Fig. 5.13 麥克風接收訊號@ $d=120\text{cm}$

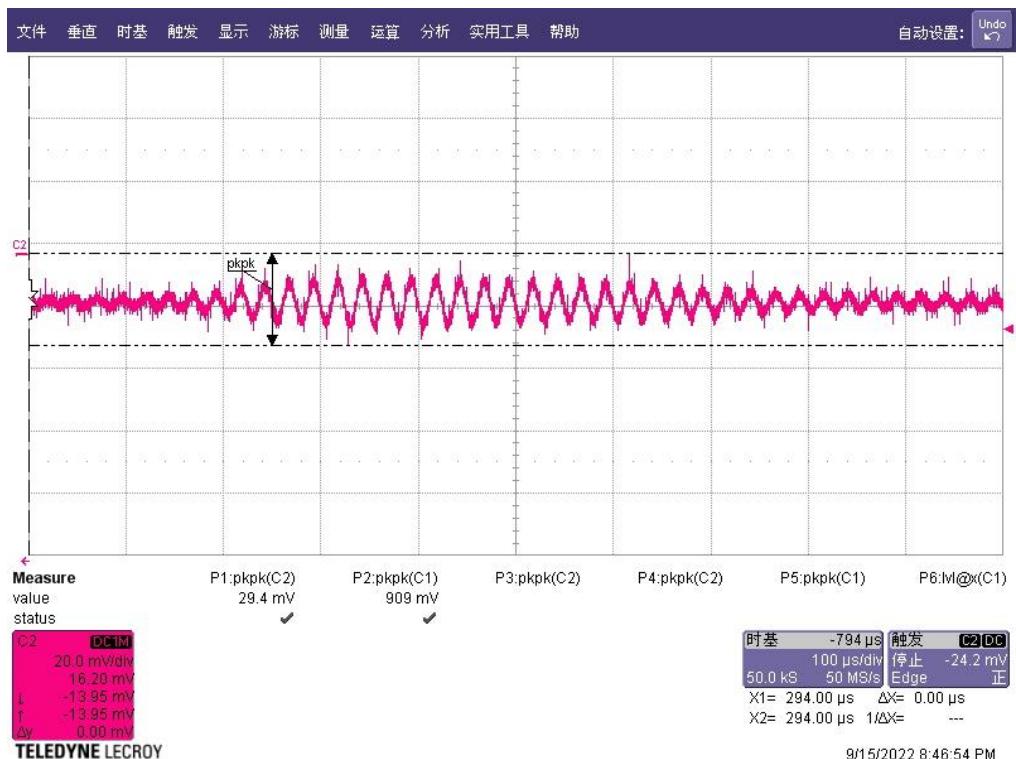


Fig. 5.14 麥克風接收訊號@ $d=150\text{cm}$

Table 9 麥克風接收電壓

d(cm)	1	2	3	4	5	平均麥克風 接收 V <sub>pp</sub> (mV)	聲壓 (Pa)
30	110.1	111.4	113.9	110.1	106.2	110.34	38.72
60	59.2	60.8	62.7	66.6	63.4	62.54	21.94
90	43.5	41.4	46.1	44.8	41	43.36	15.21
120	35.2	32.6	40.3	35.8	37.1	36.2	12.7
150	29.4	23	23.7	22.4	25	24.7	8.67

最後依 Table 9 得到設計電路驅動換能器聲源聲壓圖，如 Fig. 5.15。

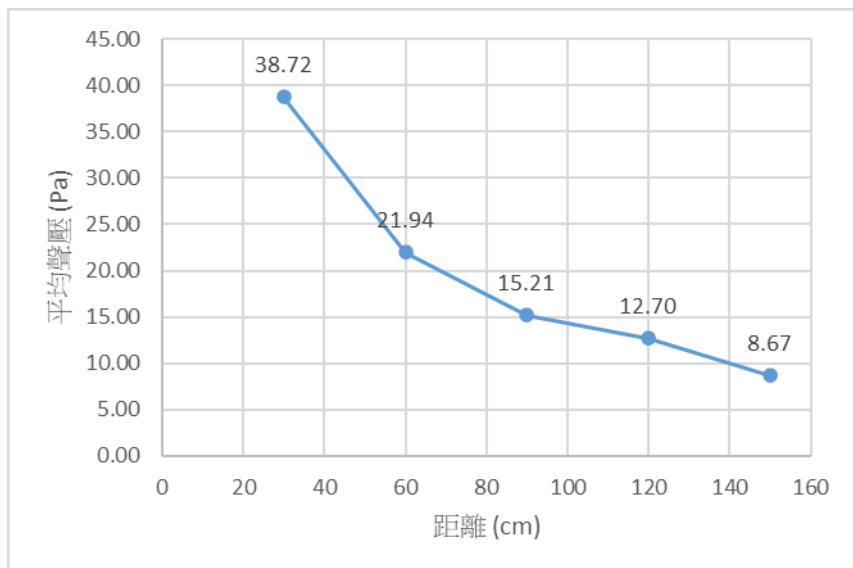


Fig. 5.15 設計電路驅動換能器聲源聲壓圖



## Chapter 6 結論與未來工作

### 6.1 結論

本研究針對封閉式空氣超音波換能器，設計、模擬並實作一 E 類功率放大器，並加入自行設計的變壓器作為設計電路驅動封閉式空氣超音波換能器。將 Table 4 廠商控制盒驅動換能器聲壓與 Table 9 設計電路驅動換能器聲壓比較，整理成 Fig. 6.1。本研究設計之驅動電路相較於廠商控制盒擁有更好的換能器驅動能力。

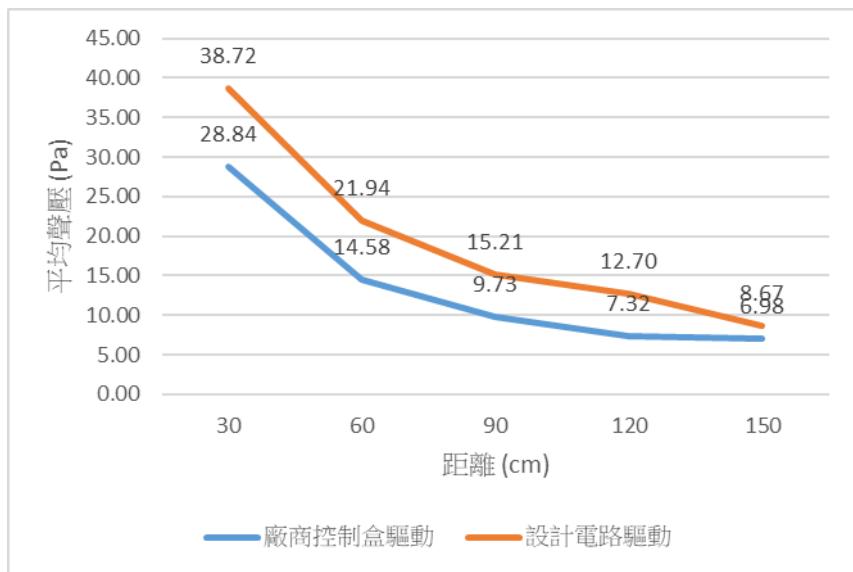


Fig. 6.1 換能器聲壓比較圖

另外，將 Fig. 5.8 設計電路驅動訊號頻譜圖與 Fig. 3.18 廠商控制盒驅動訊號頻譜圖相比，整理成 Table 10。可以看到設計電路驅動電壓在高頻諧波上也有更好的抑制，可以減少功率損耗在換能器上，提升換能器使用壽命。

Table 10 不同驅動訊號頻譜波比較表

Frequency(Hz)	40k	80k	120k	160k
設計電路 驅動訊號(V)	51.85	5.283	3.187	0.6895
廠商控制盒 驅動訊號(V)	25.97	22.71	13.23	6.083

根據實驗結果，本研究成功建立一超音波驅動電路設計流程，提升換能器發射聲壓能力及使用壽命，提供給其他超音波系統電路設計作為參考。



## 6.2 未來工作

本研究成功實作出一超音波換能器驅動電路，並且提供換能器相較於廠商控制盒更好的驅動訊號。然而，對於未來研究，仍有以下幾點建議，可以嘗試改善電路設計，提升換能器發射性能：

1. 在設計 E 類功率放大器時，本研究固定以  $Q_L = 2$  計算 E 類功率放大器各元件值，若未來使用不同  $Q_L$  值，以調整 E 類功率放大器各元件數值，可以了解不同  $Q_L$  對於 E 類功率放大器的影響，歸納出最理想的  $Q_L$  值。
2. 在設計變壓器時，本研究僅設計一符合阻抗值計算之四倍放大變壓器，可以嘗試設計不同的阻抗值或匝數比，找到更理想的變壓器設計。
3. 在電路設計中，變壓器有很大的非理想性，尤其本研究之變壓器為自製變壓器，非理想性尤為嚴重，若能找到符合設計規格之市售變壓器，便能改善電路之效率。

## 參考文獻



- [1] Newman, Paul G., and Grace S. Rozycki. "The history of ultrasound." *Surgical clinics of north America* 78.2 (1998): 179-195..
- [2] 游凱傑, 2020。「封閉式超音波換能器設計及性能改善」。碩士論文，國立臺灣大學工程科學及海洋工程學研究所。
- [3] Steve Arar. "Introduction to the Class E Power Amplifier." *All About Circuits*(2024).
- [4] Honda, Jun, and Jonathan Adams. "Class D audio amplifier basics." *International Rectifier Application Note AN-1071* (2005).
- [5] Maxim Integrated Products, Inc. *Class D Amplifiers: Fundamentals of Operation and Recent Developments*, 2007.
- [6] Hwu, K. I., and Y. T. Yau. "Output power enhancement of full-bridge class-D amplifier." *The 2010 International Power Electronics Conference-ECCE ASIA*- IEEE, 2010.
- [7] Sokal, Nathan O., and Alan D. Sokal. "Class E-A new class of high-efficiency tuned single-ended switching power amplifiers." *IEEE Journal of solid-state circuits* 10.3 (1975): 168-176.
- [8] Kapoor, Rohan, et al. "Acoustic sensors for air and surface navigation applications." *Sensors* 18.2 (2018): 499.
- [9] Qin, Qinghua. *Advanced mechanics of piezoelectricity*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [10] Gallego-Juarez, J. A. "Piezoelectric ceramics and ultrasonic transducers." *Journal of Physics E: Scientific Instruments* 22.10 (1989): 804.

- [11] Krimholtz, Richard, David A. Leedom, and George L. Matthaei. "New equivalent circuits for elementary piezoelectric transducers." *Electronics letters* 6.13 (1970): 398-399.
- [12] Mei, Shangming, et al. "The class D audio power amplifier: A review." *Electronics* 11.19 (2022): 3244.
- [13] 吳明順. "適用於超音波頻段切換式功率放大器設計與比較." 國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系學位論文 2016 (2016): 1-97.
- [14] Del Vecchio, Robert, et al. *Transformer design principles*. CRC press, 2017.
- [15] 章劭睿. "功率超音波驅動電路模組應用於霧化器." 國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系學位論文 2010 (2010): 1-86.
- [16] Retrieved December 15, 2022, from  
[https://www.pcb.com/contentstore/mktgContent/LinkedDocuments/Acoustics/TM-AC-378C01\\_lowres.pdf](https://www.pcb.com/contentstore/mktgContent/LinkedDocuments/Acoustics/TM-AC-378C01_lowres.pdf)