



國立中山大學機械與機電工程研究所

碩士論文

Department of Mechanical and Electro-Mechanical Engineering

National Sun Yat-sen University

Master Thesis

整合聲學振動及薄型溫度感測於車削品質監聽之應用

Integrated Acoustic Vibration and Thin Temperature Sensor for

On-site Monitoring the Cutting Quality in Turning Machining

研究生：高嘉駿

Chia-Chun Kao

指導教授：林哲信 博士

Dr. Che-Hsin Lin

中華民國 109 年 3 月

March 2020

# 論文審定書

國立中山大學研究生學位論文審定書

本校機械與機電工程學系碩士班

研究生高嘉駿（學號：M063020029）所提論文

整合聲學振動及薄型溫度感測於車削品質監聽之應用  
Integrated Acoustic Vibration and Thin Temperature Sensor for On-site  
Monitoring the Cutting Quality in Turning Machining

於中華民國 109 年 2 月 10 日經本委員會審查並舉行口試，符合  
碩士學位論文標準。

學位考試委員簽章：

召集人 郭文正 郭文正

委員 林哲信 林哲信

委員 李佳言 李佳言

委員 傅龍明 傅龍明

委員 朱訓鵬 朱訓鵬

委員 \_\_\_\_\_

指導教授(林哲信) 林哲信 (簽名)

# 論文公開授權書

國立中山大學博碩士論文公開授權書



etd-0127120-134640

2020-02-27 15:01:05

本授權書所授權之論文為授權人高嘉駿在國立中山大學機械與機電工程學系研究所108學年度第2學期取得碩士學位之論文。

論文題目：整合聲學振動及薄型溫度感測於車削品質監聽之應用

指導教授：林哲信

### 注意事項：

1. 依本校102年1月9日101學年度第1學期第10次行政會議通過，研究所畢業生可於上傳電子論文時自行選擇紙本及電子檔開放年限。
2. 因專利申請涉及論文公開時間，為避免因喪失新穎性而無法申請專利，請各位老師及同學上網參考「**專利各項申請案件處理時限表**」(網址路徑：經濟部智慧財產局→專利→專利情報通→專利處理時限)後再選定論文公開時間。  
另有關於著作權相關資訊，請參考「**經濟部著作權專區**」(網址路徑：經濟部智慧財產局→著作權)。  
若尚有任何專利申請與著作權等相關問題，歡迎洽詢本校產學營運中心智財技轉組，分機2626。
3. 授權書一式兩份，經本人及指導教授共同簽名後，將論文公開授權書裝訂於審定書之後，辦理畢業離校時，除繳交一本論文至圖書館外，另一本繳交至教務處註冊組。

• **電子檔：** 此項授權同意以非專屬、無償方式授權予本校圖書館，不限地域、時間與次數，以微縮、光碟或數位化方式將論文全文(含摘要)進行重製，及公開傳輸。亦提供讀者非營利使用線上檢索、閱覽、下載或列印。

立即公開傳輸數位檔案。

因特殊原因，校內讀於5年後公開、校外(含國家圖書館)讀於5年後將論文公開或上載網路公開閱覽。

※ 論文電子檔公開日期：校內民國114年02月27日，校外(含國家圖書館)民國114年02月27日。

• **紙本論文：** 此項授權同意以非專屬、無償方式授權予本校圖書館，不限地域、時間與次數，以紙本方式將論文全文(含摘要)進行收錄、重製與利用；於著作權法合理使用範圍內，讀者得進行閱覽或列印。

同意立即公開。

因特殊原因，欲延後公開，讀於5年後公開陳覽

※ 紙本論文公開日期：民國114年02月27日。

授權人：高嘉駿

學 號：M063020029

授 權 人： 高嘉駿 (簽章)

指導教授： 林哲信 (簽章)  
林哲信

中華民國 109 年 2 月 27 日

### ※ 此授權書嚴禁塗改

- 若欲修改權限，請登入系統修改後重新列印此授權書。
- 若論文已審核通過，請聯繫etd@mail.nsysu.edu.tw或校內分機2452，修改後重新列印並簽章。
- 授權書將自動列印兩份。請於圖書館和教務處辦理離校手續時，裝訂於繳交的紙本論文內。

# 中文摘要

本研究開發出一套基於 MEMS 感測器以及單晶片電腦的低成本車床切削狀態監測系統，用於量測在車削過程中切削溫度的變化以及車刀之聲學振動訊號。其中以薄膜熱電偶進行切削溫度的量測，透過特殊設計可以將薄膜熱電偶直接夾緊在車刀下方，近距離的量測切削溫度，同時也省去了傳統切削溫度感測器安裝所需的額外成本；聲學振動訊號則由 MEMS 麥克風模組進行量測，將模組直接貼附於車刀上，直接接收車刀架所傳遞之訊號減少訊號衰減，同時隔絕環境雜訊之干擾。感測模組所收集之訊號由自行開發之電路所接收，在取樣頻率設定上，溫度訊號之取樣頻率為 20 Hz 而聲學振動訊號之取樣頻率則為 48 kHz。使用鎳與銅做為材料的薄膜熱電偶，於熱電特性量測中，熱電偶兩端的溫度差與輸出電壓之間有良好的線性度，且在所測試之溫度區間範圍內，其席貝克係數約為 3.0  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 。MEMS 麥克風模組則使用商用 MEMS 麥克風製成，用於收集聲學振動訊號，該訊號則透過短時距傅立葉轉換進行時頻分析。分析結果顯示，對於切削深度以及車削異常兩項測試中，會在不同頻段出現具代表性之訊號，因此針對特徵頻段繪製訊號強度圖進行分析，另外亦對於磨損車刀的訊號繪製頻譜圖，分析其頻率分布情形。分析結果顯示在 5 kHz 到 10 kHz 之頻率範圍的訊號，適合用於判斷車削中的劇烈變動，如開始、結束以及各種異常車削狀態，而 20 kHz 到 24 kHz 之間的高頻訊號強度較弱但可用於分析切削深度變化。最後比較不同磨損程度的車刀之振動訊號頻譜，在 10 kHz 之振動訊號強度會明顯隨著車刀之磨損而增加，且能有效對應成品的表面粗糙度，因此設定 -60 dB 以及 -50 dB 兩閾值，分別對應車刀嚴重磨損以及車刀之斷裂訊號。本論文所開發之車床切削監測系統能有效描述車床加工狀態，且具有低成本以及安裝簡易之優勢，透過整合無線的資料存取系統，具有收集工業 4.0 領域數據的潛力。

Keyword：聲學振動、切削溫度、微機電麥克風、薄膜熱電偶、車削、切削深度

# Abstract

The thesis presents a lathe cutting monitoring system based on MEMS sensors and a single-board computer. It is used to measure the cutting temperature and the acoustic vibration signal of the turning tool. The cutting temperature is measured by a Ni-Cu thin film thermocouple. The designed thin film thermocouple can be clamped directly under the turning tool. This eliminates the processing cost of temperature sensor installation during traditional cutting temperature measurement. The acoustic vibration signal is measured by a MEMS microphone module directly attached to the turning tool. Receive the signal transmitted by the tool holder, reduce the signal attenuation and isolate the interference of environmental noise. The signal collected by the sensor is received by a self-developed circuit. The sampling rate of the temperature signal is 20 Hz and the acoustic vibration signal is 48 kHz. The designed thin film thermocouple showed good linearity. Over the temperature range tested, the Seebeck coefficient is approximately  $3.0 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ . MEMS microphone module is made of commercial MEMS microphone. It is used to collect acoustic vibration signals, and the signals are time-frequency analyzed by short-time Fourier transform. The results show that for cutting depth and turning abnormality tests, representative signals will appear in different frequency bands. Therefore, the signal intensity map is drawn for the analysis of the signal in characteristic frequency band. In addition, the spectrum of the signal of the worn tool is also drawn to analyze its frequency distribution. The results show that signals in the frequency range of 5 kHz to 10 kHz are suitable for judging drastic changes in turning, such as start, end, and various abnormal turning conditions. High-frequency signals between 20 kHz and 24 kHz are weaker but can be used to analyze changes in cutting depth. Finally, compare the vibration signal spectrum of turning tools

with different wear levels. The vibration signal at 10 kHz will obviously increase with the wear of the turning tool, and can effectively correspond to the surface roughness of the finished product. Therefore, two thresholds of -60 dB and -50 dB are set, which correspond to the tool wear and the tool chipping, respectively. The lathe cutting monitoring system can effectively describe the turning status, and the developed system has the advantages of low cost and easy installation. The integrated wireless data access system has the potential to collect data in the field of Industry 4.0.

Keyword : acoustic vibration, cutting temperature, MEMS microphone, thin-film thermocouple, turning, cutting depth

# 目錄

論文審定書.....	i
論文公開授權書.....	ii
中文摘要.....	iii
Abstract.....	iv
目錄.....	vi
圖目錄.....	ix
表目錄.....	xii
符號表.....	xiii
簡寫表.....	xvii
第一章 緒論.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 車床加工與車削異常偵測方法.....	2
1.2.1 車削加工品質因素.....	2
1.2.2 車削異常偵測.....	6
1.3 聲學振動與溫度感測器元件與其工作原理.....	11
1.3.1 聲學振動感測元件與原理.....	11
1.3.2 溫度量測元件與原理.....	14
1.3.3 微感測器.....	16
1.4 聲學振動訊號分析處理方法.....	18
1.4.1 整體訊號水平.....	18

1.4.2 聲壓 .....	18
1.4.3 聲音強度.....	19
1.4.4 傅立葉轉換.....	21
1.4.5 包絡檢測.....	23
1.4.6 小波分析.....	28
1.5 研究動機與目的 .....	32
1.6 論文架構.....	33
第二章 設計與分析方法.....	34
2.1 車削訊號量測系統架構.....	34
2.2 聲學振動與切削溫度感測器設計與製程.....	35
2.2.1 聲學振動感測模組設計 .....	35
2.2.2 切削溫度量測模組設計.....	38
2.3 感測器製程.....	40
2.3.1 微機電麥克風模組製程.....	40
2.3.2 熱電偶製程.....	41
2.4 感測系統電路設計.....	42
2.5 感測系統控制與數據導出 .....	45
2.6 振動聲學訊號處理與繪圖 .....	47
2.6.1 音框 .....	47
2.6.2 窗函數 .....	49
2.6.3 時頻圖分析方法 .....	51



2.7 熱電偶訊號處理 .....	53
2.8 感測器裝設位置比較.....	55
2.9 系統架設與實驗設備.....	58
第三章 實驗結果與討論.....	61
3.1 感測電路硬體架構.....	61
3.2 薄膜熱電偶之熱電特性.....	63
3.3 實際車削量測 .....	67
3.3.1 比較不同切削深度 .....	67
3.3.2 比較不同磨損程度之車刀.....	71
第四章 結論與未來展望.....	75
4.1 結論.....	75
4.2 未來展望 .....	76
參考文獻.....	77
論文原創性報告 .....	84
自述.....	85

# 圖目錄

圖 1-1 車削加工示意圖。.....	2
圖 1-2 理想狀況下車削工件表面模型。.....	4
圖 1-3 單自由度車削振動之機械模型。.....	5
圖 1-4 噪聲感測系統架設圖。.....	9
圖 1-5 加速度規之結構示意圖。.....	12
圖 1-6 聲發射訊號感測器結構示意圖。.....	13
圖 1-7 熱電偶溫度量測原理圖。.....	14
圖 1-8 溫度量測元件於車刀量測架設圖。.....	16
圖 1-9 早期微機電聲學傳感器設計.....	17
圖 1-10 聲音強度分析處理流程.....	20
圖 1-11 車刀側面磨損對聲壓訊號頻譜的影響。.....	22
圖 1-12 車削之振動訊號頻譜隨時間之關係圖。.....	23
圖 1-13 包絡檢測中震幅調變原理示意圖。.....	24
圖 1-14 包絡檢測訊號處理流程示意圖。.....	24
圖 1-15 轉子缺陷軸承之訊號分析。.....	26
圖 1-16 轉速 1600 RPM 下三種軸承缺陷類型的包絡訊號頻譜。.....	27
圖 1-17 小波分析中縮放後的母小波的時域與頻域的解析度示意圖。.....	29
圖 1-18 莫萊小波之訊號波型圖。.....	30
圖 1-19 內圈損壞滾珠軸承的振動訊號。.....	30
圖 1-20 滾珠軸承振動訊號的小波時頻分析圖。.....	31
圖 1-21 論文架構圖。.....	33
圖 2-1 感測系統之系統架構。.....	34
圖 2-2 微機電麥克風特性圖。.....	36

圖 2- 3 微機電麥克風模組設計圖。.....	37
圖 2- 4 薄膜式熱電偶設計圖。.....	39
圖 2- 5 簡化的微機電麥克風模組製程。.....	40
圖 2- 6 簡化的鎳-銅熱電偶製程圖。.....	42
圖 2- 7 感測器所使用之濾波電路設計。.....	44
圖 2- 8 訊號音框取樣參數關係圖。.....	48
圖 2- 9 窗函數取樣示意圖。.....	50
圖 2- 10 訊號處理流程示意圖。.....	51
圖 2- 11 訊號分析比較方法示意圖。.....	52
圖 2- 12 數位濾波前後之薄膜熱電偶訊號比較。.....	54
圖 2- 13 冷端溫度補償對溫度量測曲線之影響。.....	55
圖 2- 14 感測器安裝之測試點位置示意圖。.....	56
圖 2- 15 車削測試中微機電麥克風模組於 A 與 B 點兩所量測之時域訊號。.....	57
圖 2- 16 車削測試中微機電麥克風模組於 A 與 B 點兩所量測之頻域訊號。.....	57
圖 2- 17 熱電偶特性量測架構之圖片。.....	58
圖 2- 18 於監控車床切削條件的感測器安裝位置透視圖。.....	59
圖 2- 19 感測器模組成品照片與訊號量測系統架設之照片。.....	60
圖 2- 20 完成感測器架設之車刀架上視照片。.....	60
圖 3- 1 所設計之感測電路原型機。.....	61
圖 3- 2 振動聲學訊號感測電路測試實驗設置。.....	62
圖 3- 3 振動聲學訊號感測電路測試結果圖。.....	63
圖 3- 4 薄膜熱電偶的熱電特性量測結果。.....	64
圖 3- 5 薄膜熱電偶的熱電特性。.....	66
圖 3- 6 正式車削所設計之工件照片。.....	67
圖 3- 7 不同車削深度下的聲學振動以及其切削溫度訊號。.....	69

圖 3- 8 訊號分析中對於分析頻段選擇。.....	70
圖 3- 9 車刀之照片。左至右分別為新的、磨損的以及斷裂的車刀片。.....	72
圖 3- 10 車削之工件尺寸參數示意圖。.....	72
圖 3- 11 不同磨損程度車刀之震動訊號頻譜圖。.....	73

# 表目錄

表 1-1 表面算術平均偏差 Ra 和粗糙度等級數的比較 .....	3
表 1-2 感測器在機床監控中的適用性 .....	7
表 1-3 振動聲學訊號比較表 .....	11
表 1-4 接觸式溫度感測元件比較表 .....	15
表 3-1 不同切削深度下所測得之最高溫度與成品的表面粗糙度 .....	71
表 3-2 不同磨損程度之車刀車削時的最高溫度與成品的表面粗糙度 .....	74

## 符號表

$A$ ：單位面積

$a_{lm}(t)$ ：缺陷脈衝傳輸路徑的特徵函數

$\alpha_s$ ：席貝克係數

$\alpha_{sk}$ ：K型熱電偶之席貝克係數

$\alpha_{st}$ ：本研究開發之熱電偶的席貝克係數

$C_b$ ：線路電容

$C_{CM}$ ：共模電容容值

$C_{diff}$ ：差模電容容值

$D_m$ ：工件材料直徑

$d_m(t)$ ：轉子與缺陷接觸造成的一系列脈衝函數

$E_s$ ：頻率帶寬為 $s$ 時所帶有的能量

$e_l(t)$ ：振動訊號的包絡線

$\varepsilon_k$ ：K型熱電偶所量測之熱電壓

$\varepsilon_t$ ：本研究開發之熱電偶所量測之熱電壓

$F(s_m)$ ：離散頻域函數

$F_n(e^{j\omega_k})$ ：對原始訊號 $f(n)$ 的離散短時距傅立葉變換

$F_{step}$ ：音框間距(frame step)

$F_{size}$ ：音框大小(frame size)

$f$ ：進給速度

$\hat{f}(s)$ ：傅立葉轉換後的頻域訊號

$f(t)$ ：連續的原始時域訊號

$f(t_n)$ ：離散時域函數

$f(n)$ ：離散的原始訊號

$f_{cc}$  : 共模低通濾波電路截止頻率

$f_{cd}$  : 差模低通濾波電路截止頻率

$f_{dm}$  : 脈衝訊號 $d_m(t)$ 發生的頻率

$f_m$  : 原結構安裝加速規後的振動頻率

$f_o$  : 原結構的振動頻率

$f_s$  : 聲音的頻率

$f_{sample}$  : 取樣頻率、每秒的樣本總數

$fps$  : 音框率

$h_{min}$  : 開始微切削之臨界厚度

$I$  : 聲音強度(Sound Intensity)

$I_{OL}$  : 低準位輸出電流

$M$  : 原結構質量

$m_a$  : 加速度規質量

$md$  : 缺陷數目

$mod(t, 1/f_{dm})$  : 時間  $t$  時的訊號殘差

$N$  : 樣本點數

$n$  : 主軸轉速

$O_{rate}$  : 音框重疊率(overlap rate)

$O_{size}$  : 音框重疊量(frame overlap)

$P$  : 聲壓

$P_0$  : 參考聲壓(通常使用  $20 \mu\text{Pa}$  作為標準)

$P_A$ 、 $P_B$  : 兩麥克風所測得之聲壓

$P_{rms}$  : 聲壓的方均根值

$P_s$  : 靜態壓力

$P_t$  : 總壓力

$p$ ：傳過單位面積的總功率

$q_m(t)$ ：描述缺陷的尺寸以及脈衝能量

$R$ ：濾波電路電阻阻值

$R_a$ ：表面輪廓的算術平均偏差，表面粗糙度

$R_{max}$ ：最大表面粗糙度

$R_{P(max)}$ ：上拉電阻阻值上限

$R_{P(min)}$ ：上拉電阻阻值下限

$RMS$ ：原始訊號單位時間內的總能量

$r_e$ ：車刀刀尖半徑

$SPL$ ：聲壓級

$S_R$ ：音框取樣後之訊號

$S_w(n)$ ：經過窗函數修飾的取樣訊號

$s$ ：尺度參數

$T$ ：所量測之溫度

$T_{room}$ ：量測時之室溫

$t$ ：時間變換參數

$t_r$ ：訊號上升時間

$u$ ：時間

$u_m(t)$ ： $u_m(t) = e^{-\sigma t'}$  其中  $t' = \text{mod}(t, 1/f_{am})$

$V$ ：粒子速度

$V(n)$ ：數位濾波後之訊號

$V_c$ ：切削速度(cutting speed)

$V_{DD}$ ：IC 工作電壓

$V_{OL(max)}$ ：低準位最高輸出電壓 (標準模式下為 0.4 V)

$VB$ ：車刀側面磨損(Flank Wear)



$v(t)$ ：滾珠軸承振動訊號

$W(n)$ ：窗函數

$W(s, t)$ ：小波轉換

$W_b$ ：布萊克曼窗函數

$W_R$ ：矩形窗函數

$W_s$ ：頻率帶寬參數為 $s$ 時的小波轉換

$w(n)$ ：窗函數

$w(t)$ ：低頻機械噪聲

$w_l(t)$ ：發生第 $l$ 階的機械振動模態

$x(n)$ ：數位濾波前之訊號

$\hat{x}(n)$ ：原始訊號

$y_i$ ：位置 $i$ 的表面高度

$\Delta f$ ：切削力變異

$\Delta l$ ：兩顆麥克風之間距

$\Delta r$ ：進給速度變異

$\Delta s$ ：切削深度變異

$\rho$ ：介質的密度

$\delta$ ：粒子位移的幅度

$\psi(t)$ ：母小波

$\psi_s(u)$ ：由 $\psi$ 經調控函數縮放而誕生的函數族

## 簡寫表

ALSA	Advanced Linux Sound Architecture	進階 Linux 聲音體系
ADC	Analog to digital converter	類比數位轉換器
AM	Amplitude Modulation	震幅調變
BCK	Audio Data Bit Clock	時脈線
CPS	Cyber-Physical System	網宇實體系統
DFT	Discrete Fourier Transform	離散傅立葉轉換
DOF	Degree of Freedom	自由度
DOUT	Audio Data Digital Output	資料線
FFT	Fast Fourier Transform,	快速傅立葉轉換
IC	Inter-Integrated Circuit	積體電路匯流排
I <sup>2</sup> S	Inter-IC Sound	電路內置音頻總線
IoT	Internet of Things	物聯網
ISO	International Organization for Standardization	國際標準化組織
LRCK	Audio Data Left Right Clock	聲道選擇線
MEMS	Microelectromechanical Systems	微機電系統
PCB	Printed Circuit Board	印刷電路板
PDMS	Polydimethylsiloxane,	聚二甲基矽氧烷
PET	Polyethylene Terephthalate	聚對苯二甲酸乙二酯
RMS	root mean square	均方根
RPM	Revolutions Per Minute	每分鐘所轉的圈數
RTD	Resistance Temperature Detector	電阻溫度計
SCL	Serial Clock Line	時脈線

SDA	Serial Data Line	資料線
SPL	Sound Pressure Level	聲壓級
SSH	Secure Shell	安全外殼協定
STFT	Short-time Fourier Transform	短時距傅立葉轉換

# 第一章 緒論

## 1.1 研究背景

伴隨感測器、訊號收集系統以及網路通訊技術的發展，有人認為將物聯網 (Internet of Things, IoT)、網宇實體系統(Cyber-Physical System, CPS)等技術應用於工業製造中具有極大的發展潛力[1, 2]，近年來這樣的發展更被視為是進行中的第四次的工業革命，也就是工業 4.0。工業 4.0 最早是 2011 年由德國政府作為 2020 德國高科技發展戰略所提出[3]，主要技術可分為為物聯網、網宇實體系統和智慧工廠三個部分。物聯網作為物件的識別技術，用於追蹤及標示物件之位置及其歷史進程；網宇實體系統則透過感測器、致動器以及微電腦等元件，監視並控制物件實際上的製造加工過程。最後透過網路進一步整合上述兩者以及上下游之數據，整合工廠內外一切資訊而就的便是智慧工廠[4, 5]。

車床是工業中常見的加工機，通常用於加工各式圓柱狀機械零件外型，將零件製成像是柱、棒、錐、管、軸等等元件，然而在車床實際加工的過程中，機台的振動、參數的設計、刀具的磨耗等等，都會對車削之成品造成影響[6-8]。在傳統上，這些都依靠著操作人員的技術與經驗作為操作依據，而這樣的模式對於工具機的智慧化，有著很大的阻力。因此為實現智慧工廠，首先便是建構一套低成本的整合式感測系統，整合感測器、感測電路以及將資料回傳至雲端的軟體，使得實體端的資訊能有效被數位化，得以從軟體端監控並分析車削加工之實際過程。

因此本研究欲針對車床，建構一套用於監測車床加工情形的感測系統，整合溫度以及振動訊號的感測器，於樹莓派(Raspberry Pi)單晶片電腦上進行數據之接收以及暫存，同時結合無線熱點技術(Wi-Fi)，可於遠端使用電腦或手機作為終端，登入樹莓派進行量測控制以及資料存取。本研究所開發之低成本量測系統具有低功耗、高度可擴充性，以及良好之通訊能力等優勢，能有效收集大量且多樣化的加工資訊，用於分析管理加工過程，從而實現工業 4.0 的願景。

## 1.2 車床加工與車削異常偵測方法

車床加工是非常傳統、重要且被廣泛使用的工業加工方法，車削的參數如主軸轉速、進給速度、切削深度、車刀和工件材質等等，皆會影響車削成品之品質，本節將介紹車床加工參數之意義以及一些影響車床加工品質之因素。

### 1.2.1 車削加工品質因素

車削是一種去除工件表面材料而得以成形的減材加工，在車削的過程中，將預車削之工件固定於主軸上進行高速旋轉，再透過車刀接觸高速旋轉中的工件，以此產生切削力進行加工。圖 1-1 為車削加工的示意圖，一個右手車刀被固定在車床機台上，沿著工件的主軸方向進行移動，去除工件表面的材料，並透過去除工件直徑之多寡，用來調整、修飾工件之幾何形狀。圖中的三個箭頭則分別標示了車削加工中的三項加工參數，由左向右分別為進給速度、切削深度以及主軸轉速。其中進給速度為主軸每轉一圈車刀所前進的距離；切削深度為從工件去除的單邊金屬厚度，由於車床切削是由主軸旋轉所帶動的，所以單次切削過程中工件所減小的直徑為切削深度的兩倍；主軸轉速則是指工件的旋轉速度，常用單位為每分鐘所轉的圈數(Revolutions Per Minute, RPM)。

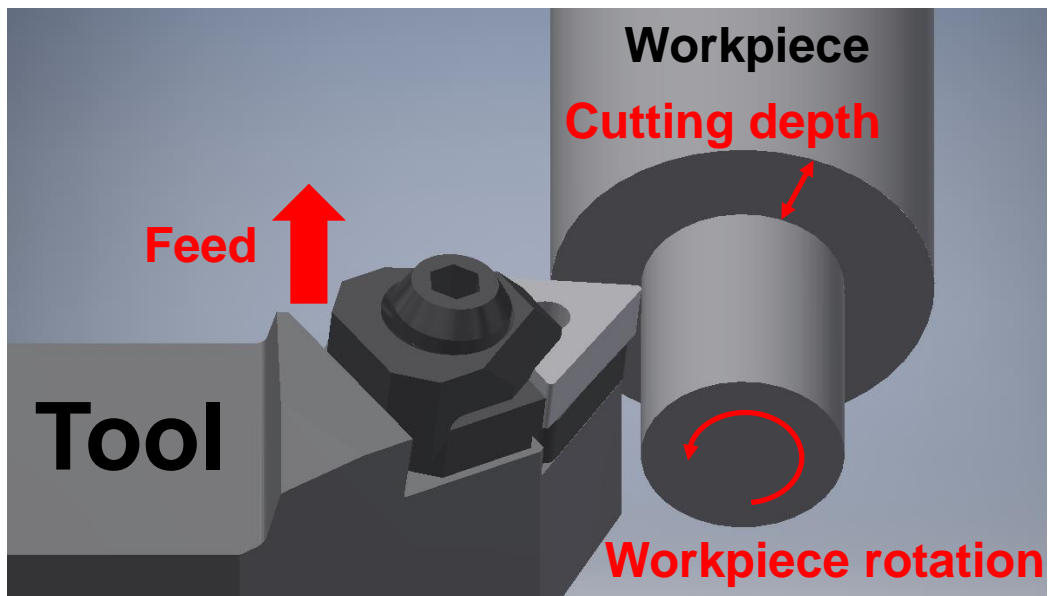


圖 1-1 車削加工示意圖。

車削完成之成品工件的品質，一般常以加工後工件表面之表面粗糙度來評估，而表面粗糙度最為標準之衡量方式為使用表面輪廓的算術平均偏差(Ra)來衡量，其為計算平均表面起伏之程度，計算方式為

$$Ra = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i| \dots \dots \dots (1- 1)$$

Ra：表面輪廓的算術平均偏差，表面粗糙度

N：樣本點數

$y_i$ ：位置 i 的表面高度

而對於所計算出的表面粗糙度 Ra 值，根據國際標準化組織(International Organization for Standardization, ISO)所訂定的標準 ISO1302[9]將其分為許多不同等級，如下表 1-1 所示，其中 N 後面所帶的數字越小者，代表其加工後之表面越為光滑，反之數字越大者則代表其表面越為粗糙。

表 1- 1 表面算術平均偏差 Ra 和粗糙度等級數的比較[9]

Roughness value <i>Ra</i>		Roughness grade numbers (given in the previous edition of ISO 1302)
µm	µin	
50	2 000	N 12
25	1 000	N 11
12,5	500	N 10
6,3	250	N 9
3,2	125	N 8
1,6	63	N 7
0,8	32	N 6
0,4	16	N 5
0,2	8	N 4
0,1	4	N 3
0,05	2	N 2
0,025	1	N 1

而為了了解車削成品表面起伏的成因，在過去有許多人為此建立了各種模型，首先於理想狀況下若只考慮車削加工中的運動學和數學幾何，表面粗糙度只與刀具幾何形狀和進給速率有關[10]，其公式可表示如下

$$R_{max} = \frac{f^2}{8r_e} \dots\dots\dots(1-2)$$

$R_{max}$  : 最大表面粗糙度

$f$  : 進給速度

$r_e$  : 車刀刀尖半徑

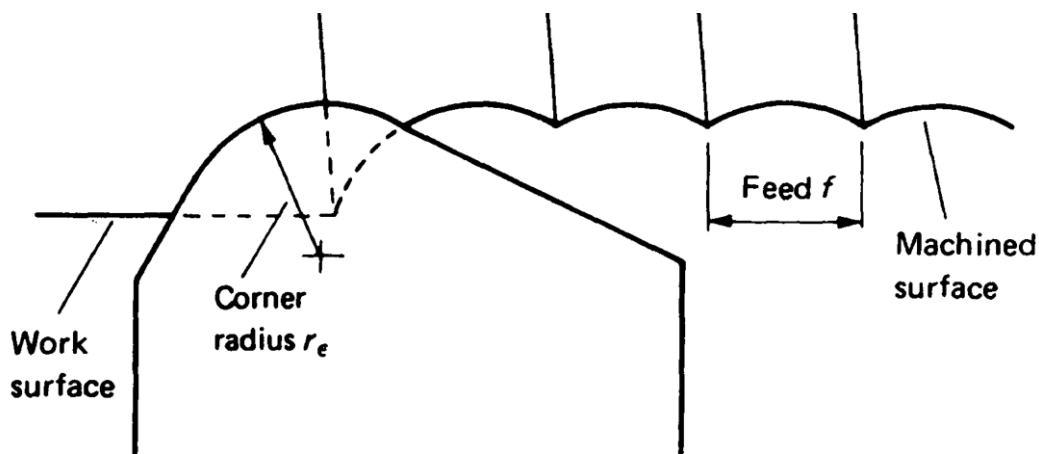


圖 1-2 理想狀況下車削工件表面模型[11]。

然而此模型過於簡化，與實際加工狀況之結果差距過大，因此 1996 年 Grzesik 提出了一個早期的經典修正模型，引入了能夠產生切屑進行有效車削的最小切削厚度[12]，修正後的公式為

$$R_{max} = \frac{f^2}{8r_e} + \frac{h_{min}}{2} \left(1 + \frac{r_e h_{min}}{2}\right) \dots\dots\dots(1-3)$$

$h_{min}$  : 開始微切削之臨界厚度

此模型在補充了原始模型中對於切削深度描述不足，同時也引出在傳統模型中，因假設材料為理想剛體而與實驗差距過多的問題。

由於實際上車刀並不是理想剛體，車削時車刀會因受力不穩定而產生振動，進而在工件表面產生波浪型的加工紋路，造成表面粗糙度增加。在 2001 年 Deshpande 和 Fofana 整理了早期對於此現象的描述，以單自由度 (Degree of

Freedom, DOF) 模型分析車削加工過程中的振動行為模式，這也是在材料去除加工中最常見且基本的模型[13]。圖 1-3 為簡化後之車削振動之機械模型，圖中之模型將實際機床的結構簡化成一個阻尼震盪系統。描述了車削加工中最主要的振動機制，也就是再生現象(Regenerative Effect)，為當車刀與工件因外界擾動產生震盪後，在下一圈的加工時會因加工後之工件表面不平整，而使其將切削之深度產生變化( $\Delta s$ )，進而影響車刀所受之切削力( $\Delta f$ )，使得車刀持續振動，因此切削力不只與當下之切削深度和時間有關，同時也與前一次的車削有關，模型中用於描述此現象之力平衡方程式為

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -\Delta f(\Delta s, \Delta r) \dots\dots\dots(1-4)$$

$\Delta f$ ：切削力變異

$\Delta s$ ：切削深度變異

$\Delta r$ ：進給速度變異

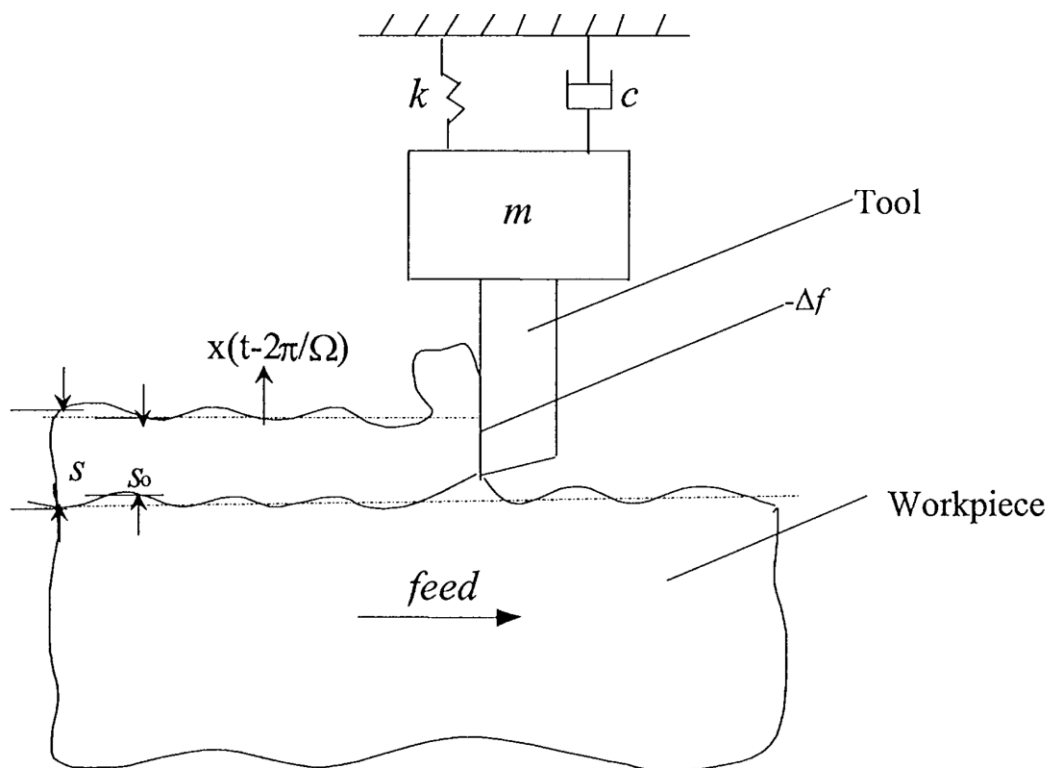


圖 1-3 單自由度車削振動之機械模型[13]。



從上述幾項理論模型可知，車削成品表面粗糙度的來源主要為車刀形狀與進給所帶來幾何上的先天限制，以及機床結構與車刀受力所產生的振動[10-13]。然而這些模型僅能說明表面粗糙度的來源，難以直接於實際加工中估算加工成品之表面粗糙度，例如早期在 1976 年 Hasegawa 等人[14]的研究中所得出的經驗公式為  $R_{max} \propto f^{-0.798} r_e^{-0.456}$  並不符合傳統模型，如公式 1-2 與 1-3 之描述，且 1996 年 Beauchamp 等人[15]以及 2006 年 Singh 和 Rao[16] 所得之經驗公式亦與理論公式有所出入。因此近年來的發展方向上，主要透過在車床上配置各式感測器，收集實際加工資訊，並量測該加工條件所對應之成品參數，配合類神經、深度學習等演算法，建立車削加工的條件與成品之間的對應關係[17-19]。

### 1.2.2 車削異常偵測

在車床實際加工中，除了加工參數之外許多額外因素也會影響加工成品之品質，如加工機台的老化、車刀的磨損等等[8]，因此雖然在近年之研究中顯示於工具機配置各式感測器，配合演算法可用於估算表面粗糙度[17-19]，但在實際應用中，所配置的感測器更常用於偵測機台各種異常狀況。而在機台異常狀況之偵測上，早期感測器技術尚不發達時，機台異常狀況只能等其造成較大危害時才能被操作人員直接觀測，而該時期對於早期機台異常的檢測僅有如 Sata 等人的研究，分析加工後的工件之表面形貌，也就是由加工所產生之加工紋路，連接該加工紋路與機台異常關係，作為機台異常診斷之依據[20]。這類檢測為加工完成後才能進行的線下檢測，此檢測方法是對加工之成品進行檢測，因此機台不需要停機，但是該檢測為事後檢測，無法即時偵測機台當下狀況，因此當檢測結果出來時，很可能該異常已經更為嚴重而偏離早期檢測之初衷。

近年來隨著感測器以及通訊技術的蓬勃發展，已有許多種類之感測器可以應用於車床之實時監測，表 1-2 是 2019 年由 Ryabov 等人所總結，目前各式感測器於車床監測上可能的檢測項目，以及應用之可行性[21]，下段將依序回顧過去研究中，對於表 1-2 所給出之九種感測器於車床檢測之應用或成效。

表 1-2 感測器在機床監控中的適用性[21]

	Electrical Characteristics	Force, Torque	Sound	Acoustic emission	Temperature	Visual	Pressure	Vibration, Acceleration	Displacement
Status reset	O		O					O	
Status standby	O		O					O	
Workpiece material		O		O		O		O	
Cutting tool		O		O		O		O	
Cutting speed	O	O						O	
Feed rate	O	O						O	
Depth of cut		O					O	O	
Surface roughness		O		O		O		O	
Workpiece clamping			O			O			O
Workpiece misalignment		O	O			O		O	O
Cutting tool fixation		O	O			O		O	
Tool wear		O	O	O	O	O		O	
Tool Chipping	O	O	O	O	O	O		O	

### 1.2.2.1 電氣特性(Electrical Characteristics)

機床電氣特性量測通常為量測工具機的耗電量，一般使用電流感測器，監測當下電流之大小，配合機台工作電壓計算整個機台所消耗的功率，進一步以消耗功率的變化，間接評估機台的運作情形。如 1989 年 Mannan 等人成功於車床馬達電流的量測中，觀察到車刀斷裂的訊號[22]，顯示車床的電流消耗量會隨著車刀的磨損而增加。但此類間接性的監控方式，會因一般的異常狀況初期所造成的功率變化，相較於機台的功率變化過於微小而難以被觀測，僅能用於監控較為嚴重之機台異常。

### 1.2.2.2 力、扭力(Force, Torque)

於車削過程中，影響切削力的主要因素為進給速度和切削深度[23]，然而車刀的磨耗或破損以及一些額外的擾動，會造成切削力的不穩定，這種切削力的不平衡或週期性的變化，會導致車刀產生振動，使工件的表面粗糙度上升，影響車削成品的品質。因此在車床相關檢測應用中，已有多項研究將力感測器架設於車刀架上，用於感測車刀所受之切削力變化，如 1993 年 Ravindra 等人便透過監控切削力的變化評估車刀磨損或破損狀況[24]。然而刀具磨損、刀具和工件材料的特性、車削參數等等，與切削力都有著相當複雜的關係，因此實驗結果具有一定程度的專一性，難以類推到其他狀況下使用。

### 1.2.2.3 聲音(Sound)

聲音感測又被稱為噪聲檢測，於車床之噪聲量測，一般將麥克風架設於車刀與工件接觸點位置附近，盡量靠近工作點，近距離量測車削過程中所產生的噪聲訊號，如圖 1-4 所示。於 1986 年 Lee 的研究則證實，噪音訊號的強度與刀具磨損程度之間具有相當程度的相關性[25]，但這樣的噪音變化也會受其他因素影響，如工具以及工件的材料，且這類聲音感測容易受到周遭雜訊影響，難以在工廠等吵雜的環境中使用。

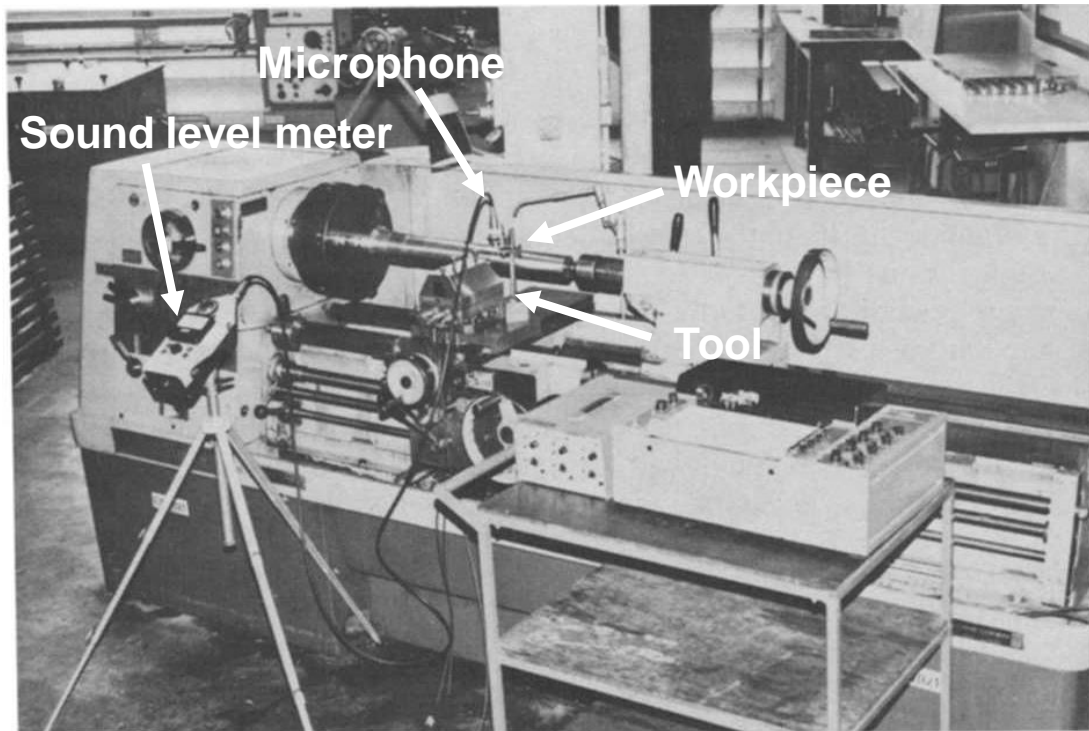


圖 1-4 噪聲感測系統架設圖[25]。

#### 1.2.2.4 聲發射(Acoustic Emission)

聲發射訊號是一種彈性應力波，為材料經過變形與斷裂等，材料內部結構重新排列的過程中，因材料內部應變能釋放，由材料自發產生[26,27]，而聲發射訊號所量測的頻率依檢測目標的材料而定，從 20 kHz 到 1 MHz 不等，使用壓電材料貼附於檢測目標之表面進行量測。此檢測在過去研究中也已被證實，能有效用於工具磨損等微小破壞的感測，但也容易受加工參數等其他條件影響[27-31]。聲發射訊號的感測器價格昂貴，且訊號產生頻率很高有大量的計算需求，總體而言成本過高，難以普及於車床這類傳統加工機台。

#### 1.2.2.5 溫度(Temperature)

在車削的過程中，隨著加工的進行以及工件上材料的去除，在車刀與工件之間會因為摩擦產生大量的熱，而這樣的熱量累積會造成溫度的上升，進而使車刀更容易磨損[32]，因此刀具溫度的監控與控制對於車刀壽命的評估是很重要的。在過去的研究中量測切削溫度之方法，主要可分為接觸式與非接觸式兩種[33,34]，

其中接觸式的溫度感測器難以直接安裝於車刀上，且無法直接量測實際工作位置之溫度，而非接觸式的溫度感測器卻因其成本高昂難以被大量使用。

#### **1.2.2.6 視覺(Visual)**

在過去的研究中也有人試著使用光學感測器應用於車削加工中，直接使用影樣辨識的技術，使用視覺方式觀察車刀的磨損情形[35]，然而在實際使用中為了保證影像的品質與一致性，對於打光、拍攝角度等等都具有很高的要求，在大多數情況下難以有效應用於實際工廠加工中。

#### **1.2.2.7 壓力(Pressure)**

壓力檢測在這邊為液體壓力的量測，於車床應用中液壓監測與車削過程較無直接關係，但可以用來提供液壓驅動系統部分的工作狀態資訊，目前僅用來檢測車床液壓元件或冷卻液運作是否正常[21]。

#### **1.2.2.8 振動、加速度(Vibration, Acceleration)**

於車削加工當中，車刀與工件之間會因切削力以及摩擦力等力的作用產生振動，這樣的振動與加工成品的表面粗糙度有直接關係。而在過去的研究中，車刀的磨損與破裂能在振動訊號的分析結果中發現[6, 36-38]，另外車床主軸之振動量測，則可以用來檢測主軸是否產生缺陷[39]。然而加速度訊號的量測與架設位置有高度相關[40]，且對所量測的振動方向具有選擇性，使用時須審慎評估加速度規架設的位置與方式。

#### **1.2.2.9 位移(Displacement)**

在過去並沒有直接應用位移感測器於車床之相關研究，但 Ryabov 等人於 2019 年提出位移感測器可以於車床夾持車刀與工件時協助定位[21]，雖然不能將其訊號連接車刀的磨損情形或成品之品質，但能協助掌握車床組件之間的相對位置，用於輔助機床操作流程。

### 1.3 聲學振動與溫度感測器元件與其工作原理

將現實中的物理量有效的數位化，能協助用於物理性質的定量以及分析，用於描述現實加工中的各種狀況，為了達成此一目的出現的便是感測系統。感測系統包含最前端將物理量轉換成為電壓的感測器、將電壓值轉換為數位訊號的類比數位轉換器(Analog-to-digital Converter, ADC)，和用於儲存該數位訊號的微電腦。而為了有效的描述現實中車床車削的過程，感測器的選用就顯得無比重要，承前一小節所介紹的內容可知，在車削的過程中，切削力、切削溫度、聲音、振動以及聲發射，五種物理量與車削狀況或車刀壽命有較為直接的相關性，這些物理量則被分為力、溫度以及聲學振動三大類。本研究為了能將感測系統低成本且無痛的導入現有的車床加工機台中，對所量測的項目進行初步篩選時，由於切削力的監控需要更換車刀架等機床更動，便不在本研究考慮範圍內，而本節將敘述並比較，各式切削溫度以及聲學振動訊號的感測器元件之量測原理與量測限制。

#### 1.3.1 聲學振動感測元件與原理

在車削加工當中，車刀和工件交界面的切削與摩擦會同時產生聲音、振動以及聲發射訊號，這三種訊號在過去研究中也發現極具相關性[41]，本文於下表 1-3 整理比較了這三者規模以及頻率間的差異，聲學振動訊號由低頻至高頻依序可分為為振動、聲音以及聲發射訊號，而這些聲學振動感測元件之差異主要便在於其感測元件之響應頻率上。

表 1-3 振動聲學訊號比較表

	振動	聲音	聲發射
規模	整個物體都一起 進行往復運動	物體中部分粒子一起 進行往復運動	物體內部粒子之 間的應變能釋放
頻率	0 Hz 到 200 Hz	20 Hz 到 20 kHz	20 kHz 到 5 MHz

振動感測器通常被稱為加速度規，其量測原理如圖 1-5 所示，當加速度規受加速度時，其內部之質量塊會因慣性而與加速度規其餘部件產生相對位移，之後該位移訊號便會以壓電式、電容式、壓阻式等方式導出，所以在此量測原理下加速度規量測會受其內部之質量塊之質量以及其振動方向所限制[42]。

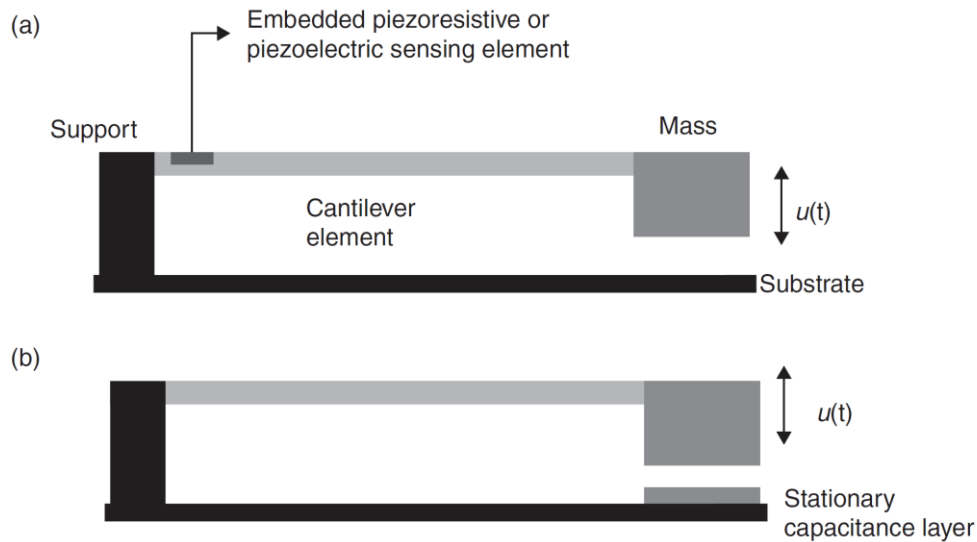


圖 1-5 加速度規之結構示意圖 (a)壓電式、壓阻式 (b)電容式[43]。

加速度規量測振動時，因質量塊而導致之量測誤差被成為質量效，因此誤差主要會出現在所量測之頻率值，2009 年 Baharin 和 Rahman 便於研究中指出加速度規質量對振動頻率的影響，並將其關係列式如下[40]

$$f_m = f_o \sqrt{\frac{M}{M+m_a}} \dots\dots\dots(1-5)$$

$f_m$ ：原結構安裝加速度規後的振動頻率

$f_o$ ：原結構的振動頻率

$M$ ：原結構質量

$m_a$ ：加速度規質量

由此可知，使用加速度規進行分析或預測時，須對振動頻率進行補償，而 2010 年 Özşahin 等人便提出切削系統中加速度規質量對振動穩定性的影響，以及一種數值校正方式[44]。加速度量測對其架設位置具有高敏感性，以及對不同軸向振動所具備的選擇性使得其操作過於複雜，因此本論文不使用加速度規感測器。

聲音感測器一般被稱作麥克風，可分為動圈式與電容式兩種，量測原理上動圈式麥克風於其振膜上安裝磁鐵或線圈，當振膜接收外部聲波開始振動時便會帶動磁鐵或線圈產生磁場變化，輸出訊號便為所產生的感應電流[45]。電容式麥克風則是直接使振膜帶電，量測其與另一帶電板之間因距離改變所造成的電容變化[46]，由於電容式麥克風其振膜上並無磁鐵或線圈等額外負重存在，通常具有較高的靈敏度以及較高的響應頻率範圍，因此常作為聲音感測元件。

1986 年 Lee 將聲音感測器用於研究刀具損傷對噪聲訊號的影響，其具體架設如前一節圖 1-5 所示[25]，其研究中發現在 4~6 kHz 的特徵頻率帶刀具損傷對噪聲具有較佳的相關性，雖然該研究表示此方法用於預測工具故障有巨大潛力，但聲音感測容易受到周遭噪音影響，因此難以應用於工廠等吵雜的環境中。而 2017 年 Wang 等人提出，將微機電麥克風貼附於機台表面的訊號量測方式便克服了這個問題，同時避免了訊號傳遞時的衰減和外界的噪聲干擾[47]。

聲發射訊號感測器通常使用單方向性的壓電材料進行量測，將其貼附於待測物表面接收應力波，再利用壓電材料之特性將訊號轉為電壓，其元件結構如圖 1-6 所示。聲發射訊號對於材料破壞具有很高的靈敏度[27-31, 48]，但其也易受其它加工條件影響[31]。聲發射訊號由材料內部結構重組而自發釋放，通常極為高頻，導致其感測器售價以及訊號接收電路的成本過高，很少用於傳統加工機台。

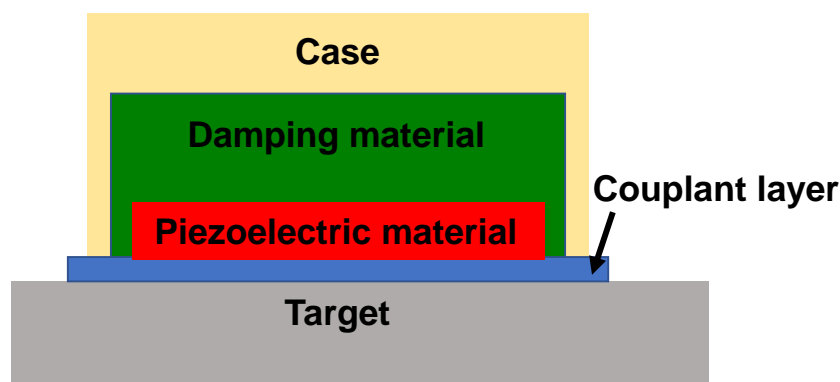


圖 1-6 聲發射訊號感測器結構示意圖。



### 1.3.2 溫度量測元件與原理

溫度感測有非常多種量測方式，整體而言可分成接觸式與非接觸式兩類[49, 50]，而考量其成本或穩定度，目前實際上能於工業中應用的僅有接觸式的熱敏電阻(Thermistors)、熱電偶(Thermocouples)、電阻溫度計(Resistance Temperature Detector, RTD)以及非接觸式的紅外線溫度計(Infrared Thermometer)。其中紅外線溫度計接收物體表面所散發出的紅外線能量，聚集於內部的接收器上，再利用熱電堆(串聯的多組熱電偶)將內部接收器上所積蓄的熱能轉為電訊號輸出[51]，這種量測方式雖然方便且適用於大多數情況，但會受到空氣中灰塵、粉塵、濕度等等影響其準確性，且本身成本亦較接觸式的感測元件高。

熱電偶利用材料的席貝克效應進行溫度量測，席貝克效應為當兩導電材料 a 與 b 於熱端點相接時，兩材料於冷端點的電極間，會自發產生與兩端點之間的溫度差相依的電位差，如圖 1-7 所示。因此熱電偶為一種被動式的溫度量測元件，使用時不需額外供應電源，而其所產生的電位差與溫度差之關係如下[52]

$$\Delta V = \alpha_s \Delta T \dots\dots\dots (1-6)$$

$\alpha_s$ ：席貝克係數

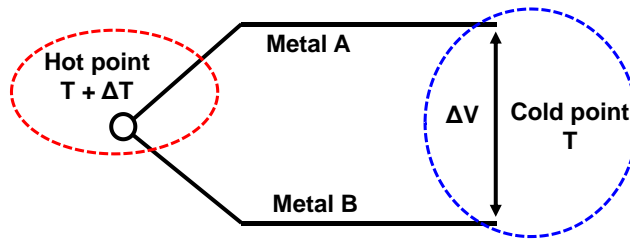


圖 1-7 熱電偶溫度量測原理圖。

熱敏電阻與電阻溫度計之量測原理相似，皆是利用其材料本身的電阻會隨著溫度而變化進行量測，然而量測電阻值需要施以外加電源，故為主動式量測元件[53]。熱敏電阻與電阻溫度計之差別在於所選用材料的不同，熱敏電阻通常為樹脂或半導體材料的混合物，於製造時控制其材料的組成及比例，使熱敏電阻可以在小範圍內具有很高的溫度量測靈敏度，不過這也使其量測精度會因製造時的些

微誤差而大幅下降。電阻溫度計則是使用低活性純金屬作為材料，由於物質組成單純，具有極高的穩定性、精確性以及較寬廣的量測範圍，但低活性純金屬通常為貴重金屬，故電阻溫度計元件成本較高，下表 1-4 整理了三種接觸式溫度感測元件的基本特性與優劣勢。

表 1-4 接觸式溫度感測元件比較表

	電阻溫度計	熱敏電阻	熱電偶
溫度量測範圍	-200°C 至 2000°C	-200°C 至 650°C	-100°C 至 500°C
量測方式	主動式	主動式	被動式
優勢	高精度、線性	低成本、高靈敏度	範圍大、反應快、 低成本
劣勢	高成本	範圍小、非線性	精度低

在使用接觸式溫度感測元件量測車床切削溫度時，選用熱電偶作為感測元件相較其餘兩者將具有較大的優勢，其優勢在於：一、切削溫度在加工過程有時會具有較大幅度的溫度變化而不適合選用熱敏電阻作為量測元件。二、電阻溫度計成本過高且接觸式溫度感測元件架設於車刀時，難以量測到切削點的溫度，其高精度之優勢難以於此應用中展現出來。三、熱電偶被動式的量測方式可以有效簡化量測電路的複雜性，同時不必通以電流可以避免因量測時有額外的熱量產生。

綜觀溫度感測器於車床溫度量測的應用，首先於車削過程中，切削溫度用於診斷車削情況的有效性與可行性已被許多研究進行證實[33, 34, 54-57]，因此為了評估比較切削溫度的量測方式，2015 年 Kus 等人於其研究中同時使用了熱電偶以及紅外線溫度槍兩種方式，比較了接觸式與非接觸式兩種切削溫度的量測架構，具體架設如圖 1-8 所示[55]，其中圖 1-8(A)顯示了熱電偶的安裝方式，額外使用固定用配件將熱電偶安裝於車刀架上，而圖 1-8(B)中則顯示了紅外線溫度計的架設方式其整體量測架構，包含所固定的熱電偶以及固定於車刀座上的紅外線溫度計。於其研究中可發現，熱電偶的接觸式量測因其無法直接架設於車刀刀尖之位置，僅能量測到由刀尖所傳遞出的溫度，而紅外線溫度槍則直接量測車刀與工件

表面之溫度。因此，熱電偶所量測之溫度值通常會小於紅外線溫度槍所量測到的溫度值，但這兩種量測方式所得之結果會具有相同之趨勢。

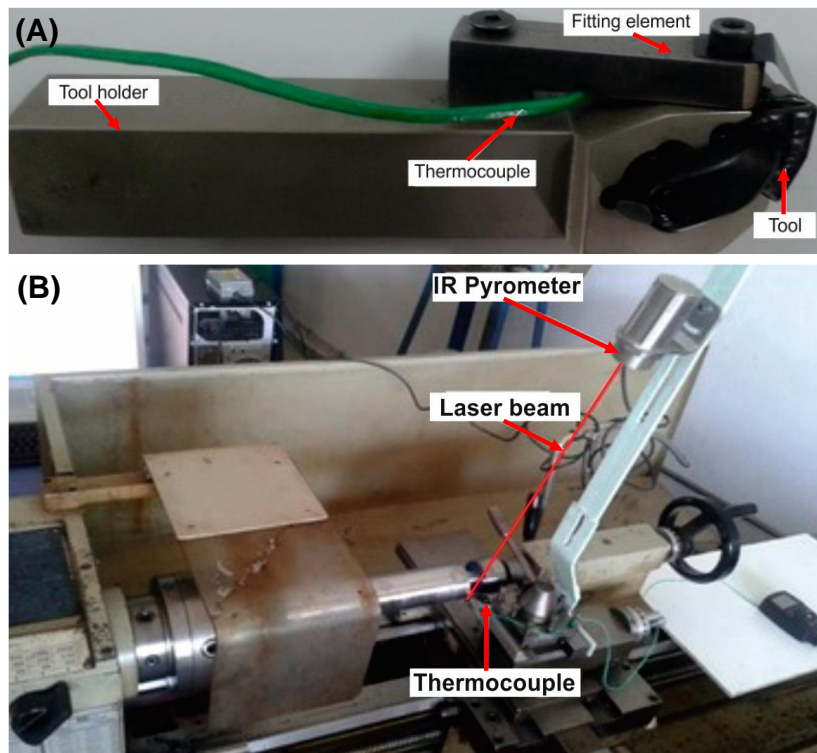


圖 1-8 溫度量測元件於車刀量測架設圖。(A) 熱電偶於車刀架上的安裝方式 (B) 熱電偶及紅外線溫度計用於切削溫度量測的系統安裝[55]。

### 1.3.3 微感測器

微機電系統(Microelectromechanical Systems, MEMS)的發展最早可以說是從 1954 年 Smith 提出矽和鍺的壓阻效應[58]開始，從此之後便有人利用這樣的材料特性，發展出了最為早期以矽為材料的壓阻式壓力感測器與應變規等感測器[59]。而後隨著材料科學、微電子學以及微機電系統微加工技術的發展，使得微機電系統能有許多感測或致動原理，有效轉換現實世界中的物理量以及電訊號，並以此開發出了許多不同的微感測器與微致動器[60]，使其能應用於許多原本難以想像之應用，而目前由微機電系統技術所製造的微感測器也已經應用於工程、醫學、材料科學和食品科學等領域[61]。

而對於微機電聲學傳感器或者是微機電麥克風的發展，最早可以追溯到

1983 年，Royer 等人將應用微加工技術濺鍍氧化鋅(ZnO)壓電層於矽薄膜上，作為聲學訊號的感測薄膜[62]，其設計之微機電麥克風如圖 1-9 所示，於該微機電聲學傳感器之中，整合了一個 MOS 放大器以及氧化鋅的壓電層。之後有人利用各種聲學能量與電能之間的換能原理，發展出了壓阻式與電容式等多種微機電聲學傳感器[63]，而這類引入了微機電製造技術的微機電麥克風，便會擁有高精度、微型化、低成本且可大量製造重複性高的技術優勢。

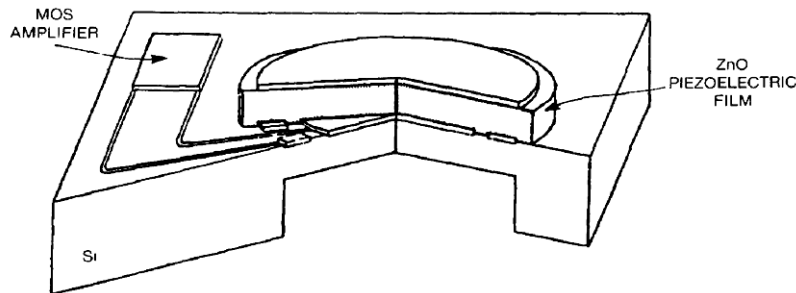


圖 1-9 早期微機電聲學傳感器設計，於一塊矽晶片上整合了高輸入阻抗的 MOS 放大器以及濺鍍的氧化鋅壓電層[62]。

比較傳統麥克風與微機電麥克風於加工機台之狀況檢測之應用，傳統麥克風不論是動圈式或電容式麥克風都具有較大的體積，其尺寸從數公分至數十公分不等，這使得以往若想使用噪聲訊號檢測機台運作情形時，只能如圖 1-4 中 Lee 的架設方式，將麥克風架設於車床旁量測，這樣的量測方式所接收到的訊號容易受到周圍環境噪音影響，使得該噪聲訊號檢測方法難以被廣泛應用於加工機台監測，尤其一般工廠經常伴隨著大量的噪音[25]。而近年來所發展的微機電麥克風，由於其尺寸的縮小，大幅增加了其操作上的方便性與可操控性，如 2017 年 Wang 等人將微機電麥克風貼附於沖床的模具表面，量測沖床之沖壓訊號，而於噪聲訊號量測時，能夠避免掉周圍雜訊的干擾以及許多系統架設上的麻煩[47]。

## 1.4 聲學振動訊號分析處理方法

感測器所接收到的聲學振動訊號為高速震盪的電壓訊號，但此訊號在進行處理前過於雜亂，難以用於分析欲量測的物件與訊號的關聯性，因此在過去研究當中開發出了許多種的分析方法，本節將介紹幾種常用的聲學振動訊號分析方法。

### 1.4.1 整體訊號水平

整體訊號水平(Overall Level)是最簡單且最便宜的振動訊號分析方法，這種分析方式透過計算原始訊號的方均根值(Root Mean Square, RMS)，計算該訊號所帶有的總能量大小，常用來計算連續訊號所帶有的總能量或是該訊號單位時間能量隨時間的變化，其計算公式如下：

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{\Delta T} \int_0^{\Delta T} [f(t)]^2 dt} \dots\dots\dots (1-7)$$

$RMS$ ：原始訊號單位時間( $\Delta T$ )內的總能量

$f(t)$ ：原始訊號

於 1981 年 Kannatey 和 Dornfeld 的金屬正交切割實驗中，其所測得之聲發射訊號之方均根值會隨著切削速度的上升而上升，此外發現刀具前角(Rake Angle)的增加亦會使聲發射訊號增強，最後於該研究中更認為此結果將來可以用來監控刀具的磨損[64]，而於 1987 年 Diei 和 Dornfeld 更是基於聲發射訊號建構了一個的方均根峰值與刀具斷裂之間的關係模型[65]，然而後續的研究認為這種分析方法雖然方便且快速，但分析出來的結果通常較不易隨著加工條件改變、缺乏敏感性資訊，通常僅能分析出嚴重之變化[66, 67]。

### 1.4.2 聲壓

相對於加速度規收集的加速度，以及聲發射訊號感測器所收集的應力波，麥克風收集的訊號為聲壓(Sound Pressure)訊號，所量測的物理量為，聲波對局部環境壓力造成的壓力改變量，因此單位為與壓力相同使用帕斯卡(Pa)，其定義式為

$$P_t = P_s + P \dots\dots\dots (1-8)$$

$P_t$ ：總壓力

$P_s$ ：靜態壓力

$P$ ：聲壓

然而使用帕斯卡度量聲壓訊號時，常常因其變化級距差異過大造成難以作圖與分析，因此在大部分情況下會使用聲壓級(Sound Pressure Level, SPL)衡量聲壓訊號之強度，為對數座標下衡量有效聲壓相對於一基準值之比值，一般使用分貝(dB)值來表示其比例關係，計算方式如下

$$SPL = 20 \log_{10} \left( \frac{P_{rms}}{P_0} \right) \dots \dots \dots (1-9)$$

$SPL$ ：聲壓級

$P_0$ ：參考聲壓(通常使用 20  $\mu$ Pa 作為標準)

$P_{rms}$ ：聲壓的方均根值

1986 年 Lee 於量測結果分析時，便使用聲壓級用於分析車削時的噪聲訊號 [25]，於該實驗中，噪音訊號的聲壓級曲線與刀具磨損顯示出良好的相關性，但該曲線會受工具或工件材料的成分的影響產生變化。於實驗架設上，麥克風暴露於空氣中，如圖 1-4 所示，該量測方式接收了空氣中所傳遞的所有聲波訊號，因此極容易受到周遭雜訊影響。而典型傳統加工廠的環境噪音水平約為 90 dB，因此難以於工廠這類吵雜的環境中使用 [68]。

### 1.4.3 聲音強度

聲音強度(Sound Intensity)之定義為，單位時間內通過單位面積範圍的總聲音能量，又能量通過單位面積之平面時具有方向性，因此聲音強度是一種向量，所使用的單位為  $W/m^2$ ，使用之計算公式如下 [69]

$$I = \frac{p}{A} = PV = 2\pi^2 f_s^2 \delta^2 \rho V \dots \dots \dots (1-10)$$

$I$ ：聲音強度

$p$ ：傳過單位面積(A)區域的總功率

A：單位面積

P：聲壓

V：粒子速度

$f_s$ ：聲音的頻率

$\delta$ ：粒子位移的幅度

$\rho$ ：介質的密度

一般聲音強度的計算上，需要同時擁有聲壓以及粒子速度兩種資訊，而最常見的量測方式為同時使用兩顆麥克風進行量測，如圖 1-10 所示，聲壓以及粒子速度兩種資訊分別由 1-11 與 1-12 兩式所計算而得

$$P = \frac{P_A + P_B}{2} \dots\dots\dots(1-11)$$

$$V = -\rho \int \frac{(P_B - P_A)}{\Delta l} dt \dots\dots\dots(1-12)$$

$P_A$ 、 $P_B$ ：兩麥克風所測得之聲壓

$\Delta l$ ：兩顆麥克風之間距

這樣的計算中使用  $\frac{(P_B - P_A)}{\Delta l}$  來逼近實際上的壓力梯度，而在 1977 年 Fahy 提出當聲音強度的量測滿足  $\Delta l < \lambda/3.7\pi$  以及  $\Delta l/L < 0.4$  時，由於近似所造成的誤差將小於 5%，其中  $\lambda$  為最短之目標聲波波長， $L$  為聲源與兩麥克風之平均距離[70]。

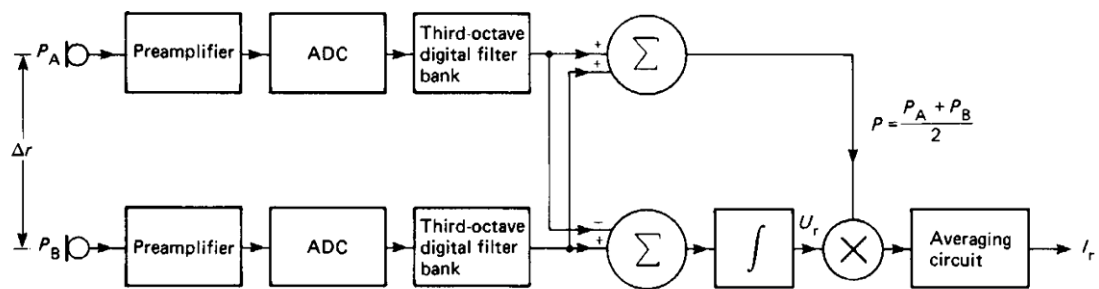


圖 1-10 聲音強度分析處理流程[71]

在 1990 年 Tandon 和 Nakra 便分析了滾珠軸承(Rolling-element Bearing)缺陷與聲音強度，在各種負載下和速度下的關係，在其研究當中，聲音強度在各種負

載下對於缺陷的檢測能力都優於單純聲壓分析的效果，但這種檢測方式仍無法用於分辨不同的缺陷模式，同時在低速運轉時，聲音強度檢測便會因訊號過小，無法判斷缺陷的有無[72]。聲音強度為分析通過單位面積的總功率，因此對於麥克風與聲源之距離具有很高的相依性，此外該方法所能量測之訊號波長亦受兩顆麥克風之間距影響，因此在量測時具有很大的侷限性。

#### 1.4.4 傅立葉轉換

上述幾種分析方法分析了訊號的強度值與其比較方法，但一個訊號往往都會擁有許多不同的組成，為了區分這些不同的組成成分，最基本的處理方式便為傅立葉轉換。傅立葉轉換(Fourier Transform)為訊號分析中將原始訊號自時域轉換成頻域時，最為基本的一種轉換方式，其概念上將複雜的原始訊號以一系列的正弦或餘弦波表示，也可以理解成使用一系列不同頻率的弦波來擬合原本的時域訊號，以此將訊號轉至頻域，傅立葉轉換的轉換方程式為[73]

$$\hat{f}(s) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-2\pi i s t} f(t) dt \dots \dots \dots (1-13)$$

$\hat{f}(s)$ ：傅立葉轉換後的頻域訊號，自變數  $s$  代表頻率可以為任意實數

$f(t)$ ：傅立葉轉換前的原始時域訊號，自變數  $t$  代表時間可以為任意實數

然而實際上要分析所收集的訊號時，由於實際上儲存於電腦中之資料都會是離散的，因此在進行數位訊號處理時，無法直接使用原本的傅立葉轉換方程式，因此推導出了用於離散訊號的離散傅立葉轉換(Discrete Fourier Transform, DFT)，可以將一串時域訊號的數列轉換為一串頻域訊號數列，其轉換方程式為[73]

$$F(s_m) = \sum_{n=0}^{N-1} f(t_n) e^{-2\pi i n m / N} \dots \dots \dots (1-14)$$

$F(s_m)$ ：離散頻域函數

$f(t_n)$ ：離散時域函數

$N$ ：樣本點數



而計算時若直接使用離散傅立葉轉換定義進行計算，其計算效率會很差，因此在許多研究中在計算時會選擇快速傅立葉轉換(Fast Fourier Transform, FFT)，一種使用電腦快速計算離散傅立葉轉換的演算法。

2001 年 Kopač 和 Šali 便利用快速傅立葉轉換，分析聲壓訊號的頻譜與車刀側面磨損(Flank Wear, VB)之間的關係[74]，如圖 1-11 所示，從該研究中所測得之訊號的頻譜變化可以看出，車刀側面磨損會使聲壓訊號中的高頻率成分項(尤其是 16 kHz 附近)明顯增多，從而更輕易的分析車刀是否磨損。這同時也證明在訊號分析時，使用傅立葉轉換進行訊號的頻域分析之有效性。

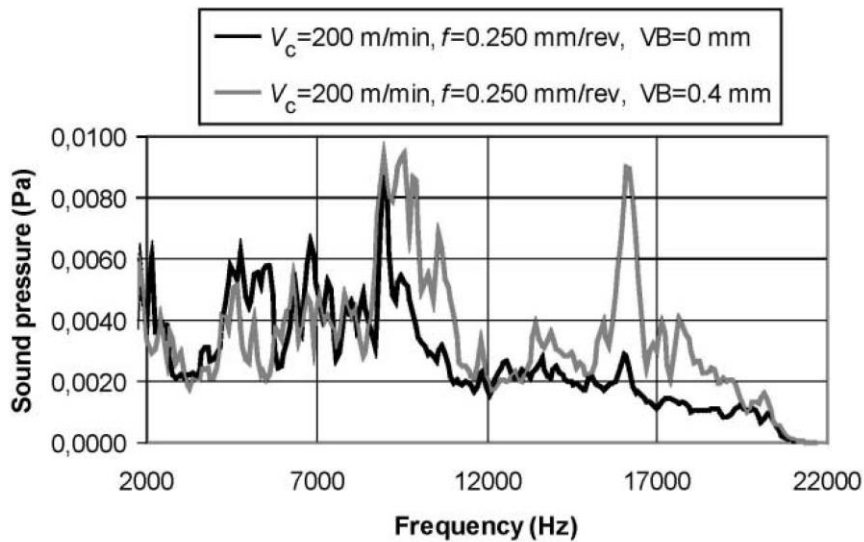


圖 1- 11 車刀側面磨損對聲壓訊號頻譜的影響[74]。

然而離散傅立葉轉換沒辦法得知訊號在時間軸上的頻率資訊，因此有人使用短時距傅立葉轉換 (Short-time Fourier Transform, STFT) 進行分析，公式 1-15 即為離散的原始訊號 $f(n)$ 的短時距傅立葉變換計算公式[75]。

$$F_n(e^{j\omega_k}) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} f(m)w(n-m)e^{-j\omega_k m} \dots\dots\dots(1-15)$$

$F_n(e^{j\omega_k})$ ：在時間 $n$ 以及頻率 $\omega_k$ 時對原始訊號 $f(n)$ 的離散短時距傅立葉變換

$w(n)$ ：窗函數

短時距傅立葉轉換使用窗函數 $w(n)$ ，將原始數據沿著時間軸分成許多資料塊，而這樣會隨著時間變動的資料塊也被稱為音框，而對每一音框分別進行快速

傅立葉轉換，便可以得到會隨著時間變動的訊號頻譜。

於 2007 年 Orhan 等人便使用短時距傅立葉轉換，分析銑床刀具振動訊號頻譜隨切削時間的變化[76]，實驗結果如圖 1-12 所示，刀具的磨損僅會增加部分頻率範圍的振動訊號，因此若針對該頻段進行監控，可用於評估刀具磨損狀況。對於這類會隨時間變化的訊號，使用短時距傅立葉轉換可以在保留時間資訊下展開訊號的頻譜，從而更有力的進行訊號的分析。

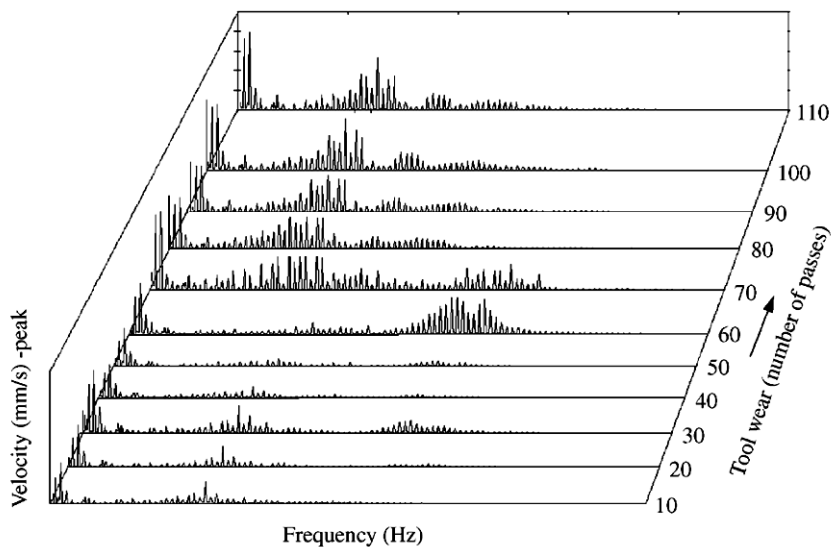


圖 1-12 車削之振動訊號頻譜隨時間之關係圖[76]。

### 1.4.5 包絡檢測

前面提到，使用傅立葉轉換可以用來分析訊號中的不同頻率成分，但有時某些機械系統的週期性缺陷，卻難以直接由傅立葉轉換所得之頻譜來診斷，例如滾珠軸承的表面破壞。當滾珠軸承表面具有一個小缺陷時，每當其內部的滾珠與該表面缺陷接觸時便會產生一個脈衝訊號，這種訊號由於持續時間很短的以及相對上較長的時間間隔，使得這樣週期性脈衝訊號所攜帶的總能量會很少，導致這樣的軸承缺損難以由標準的頻譜分析進行診斷[77]。

而為了量測這種滾珠軸承的週期性缺陷，有學者發現滾珠軸承的缺陷脈衝訊號產生的同時對系統產生高頻共振，若將該振動訊號模式以震幅調變(Amplitude Modulation, AM)進行解釋，引入通訊系統中訊號震幅調變的原理，便可以開發出

包絡檢測(Envelope Detection)分析。震幅調變為一種用於電子通訊之訊號調變方法，其概念上是將欲發送的訊號(Target Signal)，疊加於已知頻率的高頻載波(Carrier Signal)上進行傳送，而接收端在收到訊號後，便可以使用包絡檢波器從所接收之訊號調解出其包絡訊號(Envelop)如圖 1-13 所示。

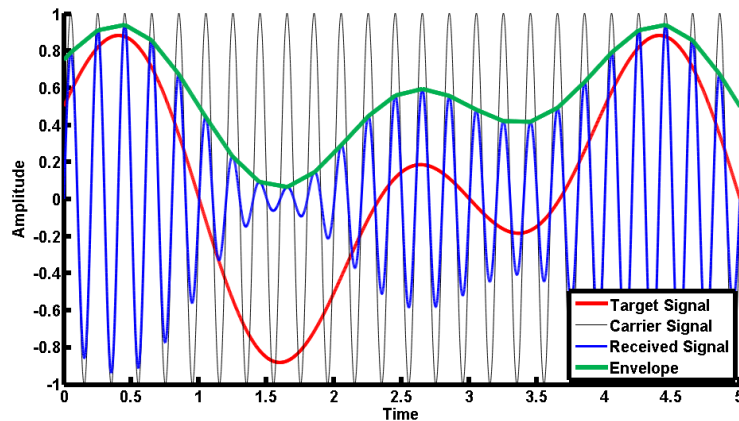


圖 1- 13 包絡檢測中震幅調變原理示意圖。

而實際上使用包絡檢測進行分析時，會先使用帶通濾波器，留下檢測目標物已知共振頻率附近之訊號，再使用包絡檢波器對該帶通濾波後之訊號進行調解，得到具高訊噪比的低頻包絡訊號，最後再使用傅立葉轉換分析，進而得所欲量測的脈衝訊號發生頻率，如圖 1-14 所示[78, 79]。

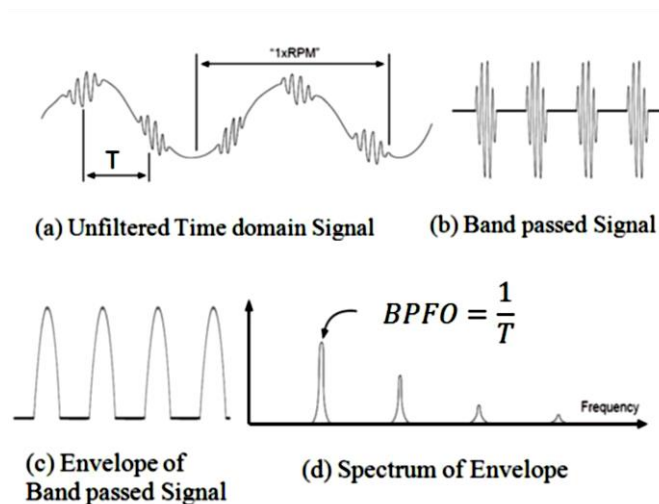


圖 1- 14 包絡檢測訊號處理流程示意圖。(a)理想上收集到的振動訊號 (b)使用帶通濾波器濾除低頻機械噪聲後的訊號 (c)使用包絡檢波器得到之包絡訊號 (d)對

得到之包絡訊號使用傅立葉轉換得到的包絡訊號頻譜[79]。

然而包絡檢測之分析效能高度依賴於帶通濾波頻段之選擇，需要能夠準確判斷檢測目標之振動頻率，如同接收震幅調變之通訊訊號時，需要知道所接收訊號之載波的頻率，才能順利解調出所傳遞的原始訊號。以應用於滾珠軸承系統的包絡檢測為例，簡化後的於滾珠軸承振動訊號可以表示成[80-82]

$$v(t) = \sum_{l=1}^L \left( \sum_{m=1}^{md} \int_{-\infty}^t d_m(\tau) q_m(\tau) a_{lm}(\tau) e^{-\sigma_l(t-\tau)} \cos(2\pi f_l(t-\tau) + \theta_{lm}) d\tau \right) + w(t) \dots\dots\dots(1-16)$$

$v(t)$ ：振動訊號

$md$ ：缺陷數目

$d_m(t)$ ：轉子與缺陷接觸造成的一系列脈衝函數

$q_m(t)$ ：描述缺陷的尺寸以及脈衝能量

$a_{lm}(t)$ ：缺陷脈衝傳輸路徑的特徵函數

$w(t)$ ：低頻機械噪聲

而振動訊號的包絡線可以被表示成

$$e_l(t) = \sum_{m=1}^{md} u_m(t) q_m(t) a_{lm}(t) + w_l(t) \dots\dots\dots(1-17)$$

$e_l(t)$ ：振動訊號的包絡線

$u_m(t)$ ： $u_m(t) = e^{-\sigma_l t'}$  其中  $t' = \text{mod}(t, 1/f_{dm})$

$\text{mod}(t, 1/f_{dm})$ ：時間  $t$  時的殘差

$f_{dm}$ ：脈衝訊號  $d_m(t)$  之產生頻率

$w_l(t)$ ：發生第  $l$  階的機械振動模態

在包絡檢測分析中，帶通濾波器便是用於濾除 1-16 式中的  $w(t)$ ，低頻機械噪聲，理想狀況下，如圖 1-14(a)到圖 1-14(b)，完美濾除所有雜訊，最後剩下由週期性脈衝以及其所造成的高頻共振所共同組成之包絡訊號，如圖 1-14(c)所示。

對應於 1-17 式包絡線為  $\sum_{m=1}^{md} u_m(t) q_m(t) a_{lm}(t)$ ，其中  $q_m(t) a_{lm}(t)$  是由脈衝所造成的高頻共振，也可以被理解為該脈衝訊號的載波，最後使用傅立葉轉換計算其

頻譜，便可以得到具有高訊噪比，而不受 $w(t)$ 所遮蔽的 $f_{dm}$ ，如圖 1-14(d)所示。

在 2008 年 Sheen 便實際使用包絡檢測，針對滾珠軸承缺陷的一階振動模態進行分析[83]，其分析效果如下圖 1-15 所示，圖 1-15(a)與圖 1-15(b)分別為原始振動訊號與經過包絡分析後的振動訊號包絡線，比較兩圖可以發現，於圖(a)中幾乎難以發現的由缺陷所造成的週期性脈衝訊號，於包絡分析後的圖(b)中則會顯示出明顯的間歇性的局部峰值。

最後傅立葉轉換所得之包絡訊號頻譜圖如圖 1-16 所示，由於不同種類的軸承缺陷引致之脈衝訊號之高頻共振相近，也就是不同缺陷的脈衝訊號仍會具有頻率相近之載波。因此包絡分析不只能明確的自原始難以判讀之訊號中，分析出軸承缺陷之訊號，更能在同樣的包絡分析參數中，分辨由不同軸承缺陷引致的脈衝訊號發生之頻率，圖 1-16 中則展示了使用包絡分析的三種軸承缺陷特徵頻率。

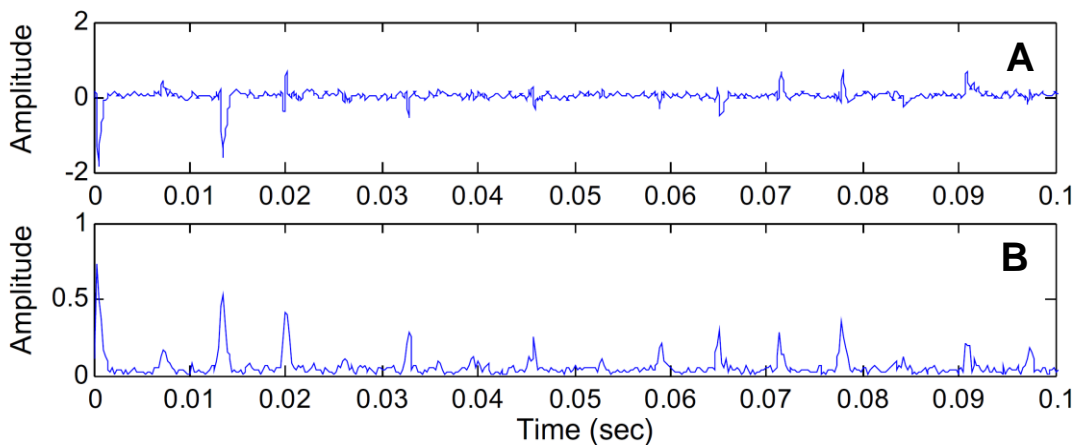


圖 1-15 轉子缺陷軸承之訊號分析。(a) 對以 1600 RPM 進行運轉的轉子缺陷軸承進行量測所得之振動訊號 (b)對 a 圖使用一階振動模態包絡分析而得之包絡訊號。[83]

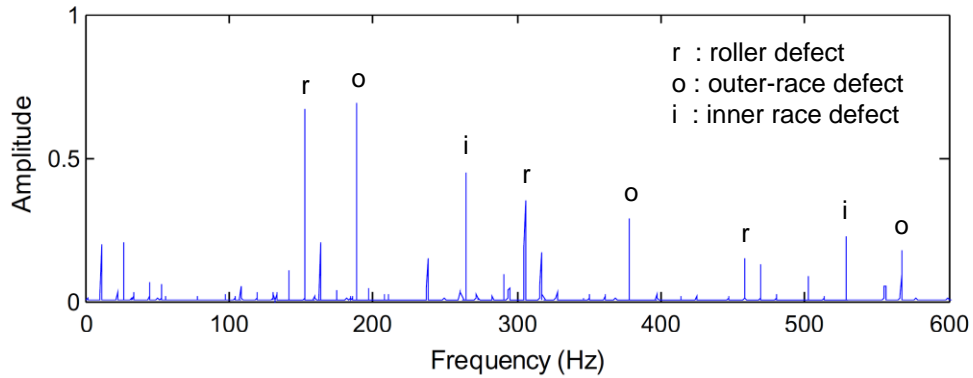


圖 1-16 轉速 1600 RPM 下三種軸承缺陷類型的包絡訊號頻譜[83]。

由滾珠螺桿的包絡分析可知，使用包絡分析能有效濾除低頻機械噪聲對量測訊號的干擾，並能重構出具極高訊噪比的訊號頻譜，然而這樣的處理中，進行帶通濾波器的濾波頻率設定時，需要非常小心才能準確的對所關心的訊號進行分析，因此，包絡分析通常只會應用於已經建立清楚振動模式的元件之缺陷振動行為，否則若是隨意的選擇濾波頻率，反而會導致訊號的嚴重失真。一般而言濾波範圍之選擇與通訊系統中震幅調變訊號相近，必須先確定載波的震度頻率才能有效調解出所要的目標訊號。綜上所述，雖然包絡分析在雜訊的濾除上極具優勢，然而在車床系統中，並不會因為切削而有固定周期之脈衝產生，僅可能用於分析車床傳動之齒輪等機床缺陷，而本研究的量測目標為切削之狀態，因此不適合使用包絡檢測進行分析。

### 1.4.6 小波分析

在 1.4.4 節中所介紹的短時距傅立葉轉換，利用窗函數將原始數據進行切割，實現對原始訊號同時進行時域與頻域的分析，然而窗函數的寬度會對所分析的訊號造成影響。舉例而言，如果該訊號時間長度遠小於窗函數的寬度，將會與原始的傅立葉轉換一樣，無法分辨出訊號時間上的變化，而若訊號時間長度大於窗函數的寬度，該頻率的訊號便無法被短時距傅立葉轉換所檢測到，因此為了解決窗函數的寬度與訊號之間的不匹配，有人便開發出小波分析(Wavelet Analysis)。

在使用小波轉換前首先需要定義一個有限長或快速衰減的函數 $\psi(t)$ ，或稱為母小波，再以此小波函數為基礎由調控函數縮放母小波 $\psi$ 的寬度，創造由一系列寬度不等的函數所組成的的函數族(Family of Function)， $\psi_s(u)$ ，而其調控方式如公式 1-16 所示，在 $p \geq 0$ 且 $s$ 為不為 0 的實數時，其定義為

$$\psi_s(u) = |s|^{-p} \psi\left(\frac{u}{s}\right) = \frac{1}{|s|^p} \psi\left(\frac{u}{s}\right) \dots\dots\dots(1-18)$$

$\psi_s(u)$ ：由 $\psi$ 經調控函數縮放而誕生的函數族

$s$ ：尺度參數

其中若 $\psi$ 的寬度為 $T$ 時， $\psi_s$ 的寬度便會是 $sT$ ， $\psi$ 的寬度受調控參數 $s$ 所控制，另外當 $s$ 較大時， $\psi$ 的寬度會被拉長，而 $\psi_s$ 便會擁有較低的頻率，反之亦然，如圖 1-17 所示，1-17(A)中展示了調控參數 $s$ 如何影響母小波 $\psi$ 的寬度，而 1-17(B)中則顯示調控後的母小波在時頻圖中的覆蓋範圍，圖中顯示當訊號為高頻時母小波所含蓋的時間較窄，使其能擁有較高的時間解析度[84, 85]。

而公式 1-18 定義了母小波 $\psi$ 的寬度調控函數，而實際使用時則需將函數 $\psi_s$ 於時間軸上進行定位，因此對所有實數 $t$ 可以將 1-18 式改寫成

$$\psi_{s,t}(u) = \psi_s(u - t) = |s|^{-p} \psi\left(\frac{u-t}{s}\right) = \frac{1}{|s|^p} \psi\left(\frac{u-t}{s}\right) \dots\dots\dots(1-19)$$

$u$ ：時間

$t$ ：時間變換參數

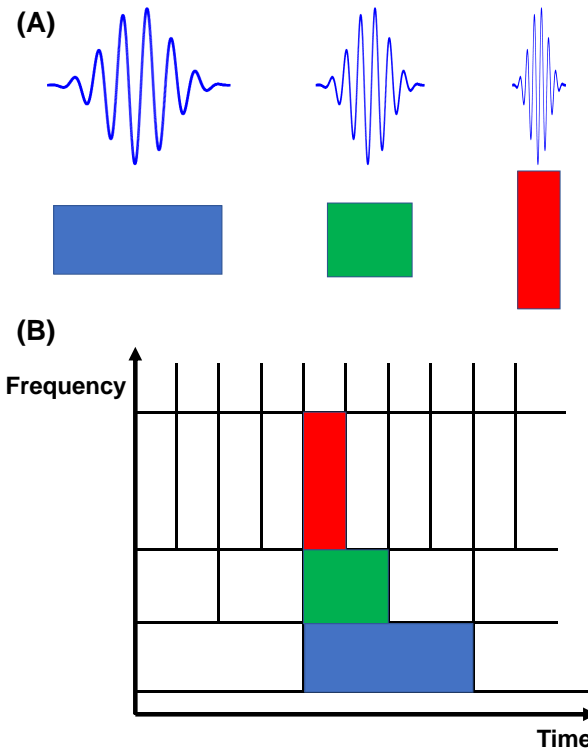


圖 1-17 小波分析中縮放後的母小波的時域與頻域的解析度示意圖 (A)基本函數 (B)時頻域的覆蓋範圍。

在大部分的狀況下會使式 1-19 中的  $p = 1/2$ ，此時的小波轉換方程式即為

$$W(s, t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(u)\psi_{s,t}(u)du \dots \dots \dots (1-20)$$

$W(s, t)$ ：小波轉換

$f(u)$ ：原始訊號

而在小波分析中，對於不同的量測目標會使用不同的母小波  $\psi(t)$ ，而母小波的選擇必須滿足下列幾個限制，首先為了能有效縮放母小波長度必須為有限函數，其次母小波必須為實數函數，最後母小波函數須為偶對稱(Even Symmetric)或者是奇對稱(Odd Symmetric)函數。舉例而言，2000 年 Lin 和 Qu 分析滾珠軸承的振動訊號時，使用莫萊小波(Morlet Wavelet)做為母小波進行小波轉換分析，由於莫萊小波，如圖 1-18 所示，其與脈衝訊號具有一定之相似，因此適合用於提取滾珠軸承因缺陷而產生的脈衝振動訊號[86]，莫萊小波母小波定義為

$$\psi(t) = \exp[-\beta^2 t^2 / 2] \cos(\pi t) \dots \dots \dots (1-21)$$



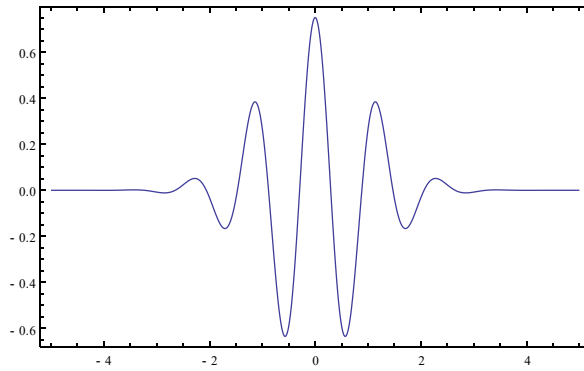


圖 1-18 莫萊小波之訊號波型圖。

而通過時間與尺度變換後的莫萊小波函數族則為

$$\psi_{s,t}(u) = \psi\left(\frac{u-t}{s}\right) = \exp\left[-\frac{\beta^2(u-t)^2}{2s^2}\right] \cos\left[\frac{\pi(u-t)}{a}\right] \dots\dots\dots(1-22)$$

其實驗結果如下圖所示，其中圖 1-19(A)為內圈損壞的滾珠軸承振動的原始訊號，圖 1-19(B)為使用莫萊小波的小波轉換提取的乾淨脈衝訊號，該實驗使用莫萊小波的小波轉換，從複雜的原始訊號中，找到並提取出隱藏在滾珠軸承振動訊號中的脈衝特徵訊號，證明該分析方法能有效用於分析滾珠軸承的缺陷。

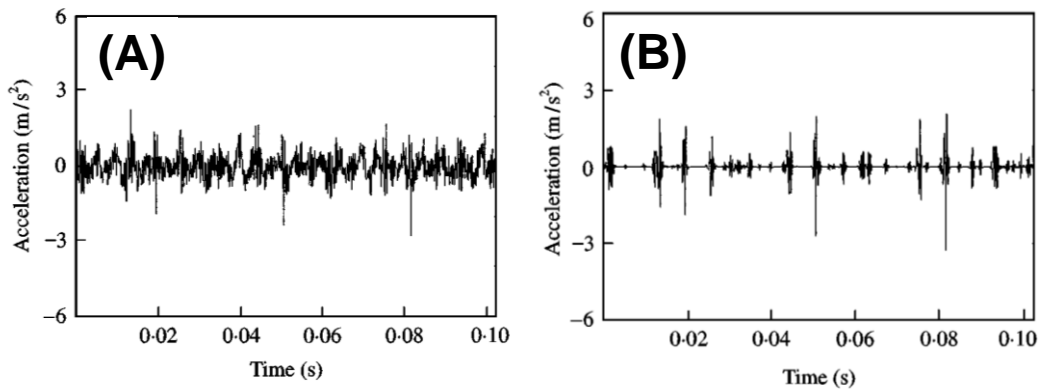


圖 1-19 內圈損壞滾珠軸承的振動訊號。(A)原始振動訊號(B)基於莫萊小波獲得的純淨訊號[86]。

而繪製小波轉換的時頻分析圖時，需對小波分析中能量的分布進行分析，由

$$\text{於母小波 } \psi \in L^2(C) \text{ 滿足條件 } C_\psi = \int_{-\infty}^{\infty} |\hat{\psi}\omega|^2 / |\omega| d\omega < \infty,$$

又  $\hat{\psi}\omega = \int \psi(u) \exp(-j\omega u) du$ ，因此小波轉換的逆轉換可以寫成

$$f(u) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} W(s,t) \psi_{s,t}(u) \frac{1}{s^2} ds dt \dots\dots\dots(1-23)$$

其中 $\frac{1}{s^2}$ 控制母小波函數族的震幅，使得所有母小波函數都帶有相同的能量，尺度參數 $s$ 則控制母小波函數族所帶有的頻帶，其中原始母小波的頻帶具有 $\omega_c$ 的中心頻率，以及寬度為 $\Delta$ 的帶寬，而受 $s$ 所調控後的中心頻率以及寬度則分別為 $\omega_c/s$ 與 $2\Delta/s$ ，因此小波分析中不同頻率帶寬可以由參數 $s$ 所表示，因此頻率帶寬為 $s$ 時，所帶有的能量可以由以下公式 1-24 進行計算[87]

$$E_s = \int |W_s(s, t)| dt \dots \dots \dots (1-24)$$

$E_s$ ：頻率帶寬為 $s$ 時所帶有的能量

$W_s$ ：頻率帶寬參數為 $s$ 時的小波轉換

以 2018 年 Yoo 和 Baek[88]所利用滾珠軸承振動訊號所繪製的，小波轉換的時頻分析圖為例，如下圖 1-20 所示，當滾珠軸承產生缺陷時，會產生帶有較高能量的訊號，而這樣的訊號通常容易在高頻的位置被發現。

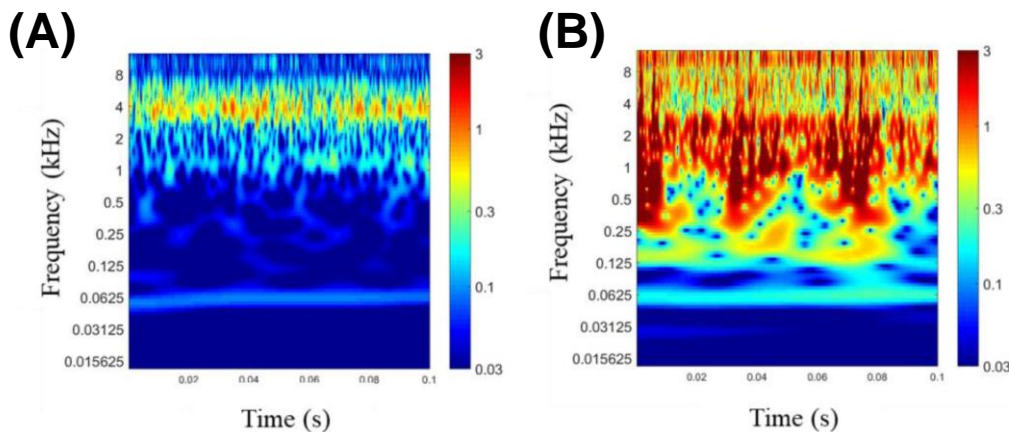


圖 1- 20 滾珠軸承振動訊號的小波時頻分析圖 (A)正常軸承 (B)缺陷軸承[88]。

小波轉換在該訊號的分析時，高頻部分會具有良好的時間解析度，而低頻部分具有良好的頻率解析度，然而實際上，短時距傅立葉轉換與小波轉換等時頻分析具有相近的分析能力，某些狀況下甚至是等效的[89]，通常僅在針對特徵訊號設計母小波時，小波轉換才會具有明顯之優勢。而本實驗所分析之訊號為車削時車刀與工件接觸而產生之聲音訊號，無法直接於理論中找出適合的特徵訊號，因此將使用短時距傅立葉轉換為基礎進行訊號分析。

## 1.5 研究動機與目的

於工業製造中，為了控制產品品質，工具機的加工狀況一直以來都是生產過程中欲監控的對象，而隨著微感測器的發展，已有許多研究於加工機台中配置如力、聲學振動、溫度、壓力等感測器，用於監控工具機的加工狀況。而關於車床車削狀況的監測，也已經有許多相關之研究，2019年 Ryabov 等人便總結了目前各式感測器於車床監測上的應用[21]。其中力、聲學振動以及溫度檢測則已經被證明能有效監測車床加工狀況，然而部分感測器之安裝如力或溫度感測器時需要進行設備的更動，使得對舊型車床而言，感測器的安裝與設備汰換的成本過高，導致大多車床監測方法因為成本問題而少有能被實際安裝使用之範例。

因此，本研究欲針對傳統車床建構一套低成本之車床加工情形監測系統，使該系統能在不進行車床零件更動的狀況下安裝使用，為了實現該車床加工監測系統，本研究針對車床中車刀的聲學振動與切削溫度感測進行系統開發。首先，以麥克風模組進行接觸式量測，解決傳統聲學檢測中容易受環境雜音干擾之問題；其次，開發一種專門用於量測切削溫度之薄膜式熱電偶，解決傳統切削溫度檢測中，溫度感測器安裝成本過高的困擾；輔以對應聲學以及溫度感測器的感測電路開發；最後使用單晶片電腦連接所開發之感測電路，結合開源軟體與無線熱點技術，建構遠端的量測系統控制以及資料存取系統。本研究所開發之低成本車床加工監測系統，涵蓋的功能包含聲學與切削溫度之感測器、相對應之類比數位轉換電路、基於單晶片電腦的訊號採集與初步處理系統，以及最後透過無線熱點技術實現遠端的無限控制與資料傳輸。

## 1.6 論文架構

本論文之架構如圖 1-21 所示，第一章將介紹目前車床感測系統的發展，第二章將介紹本論文之車床感測系統與分析方法，第三章將整理實驗之結果，最後第四章是本論文之結論與未來展望。

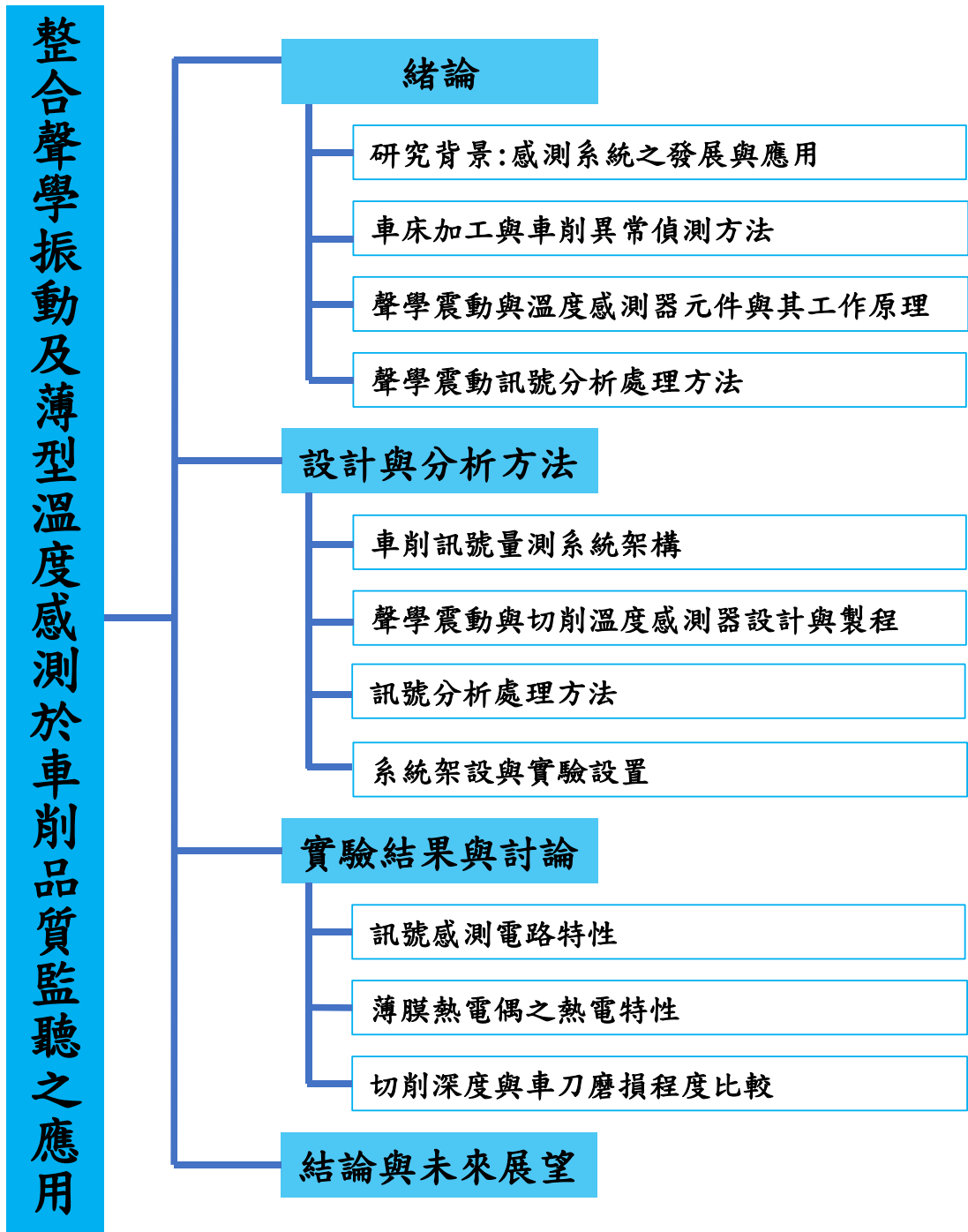


圖 1-21 論文架構圖。

## 第二章 設計與分析方法

### 2.1 車削訊號量測系統架構

本研究針對車床發展一個低成本的車床車削狀態感測系統，在第 1.2 以及 1.3 節的介紹中，列舉了許多車削加工訊號的量測方式，其中，伴隨車床加工而產生的聲學振動以及切削溫度，與車削狀態有較為直接的相關性。因此本研究欲開發的車床車削狀態感測系統，將包含聲學振動與切削溫度的感測器、與感測器對應的感測電路、微電腦以及配合量測系統使用的無線通訊架構。圖 2-1 為所發展的車床車削狀態感測系統之系統架構圖，於該系統中，所使用的感測器分別為自行開發的 Cu-Ni 薄膜式熱電偶作為溫度感測元件，以及市售的微機電麥克風所製成的聲學振動感測器模組。訊號轉換電路則利用 PCM1865 以及 ADS-1115 兩種市售的類比數位轉換晶片，進行訊號的初步處理，兩者分別將前端感測器模組所收集之溫度與聲學振動訊號轉換為數位訊號。其中 PCM1865 則處理微機電麥克風所接收的聲學振動訊號，而 ADS-1115 負責 Cu-Ni 熱電偶的溫度訊號。而後以單晶片電腦樹莓派，進行量測晶片的控制之同時，將晶片所輸出的數位訊號進行初步處理以及暫存，最後連上無線熱點(Wi-Fi)後，即可透過安全外殼協定 (Secure Shell, SSH)，遠端使用電腦或手機作為連線終端，登入樹莓派，遠端進行量測系統的控制以及暫存資料的存取，而系統個部分的詳細設計、製程、感測器的安裝，與系統資料傳輸模式，會於後段進行詳細說明。

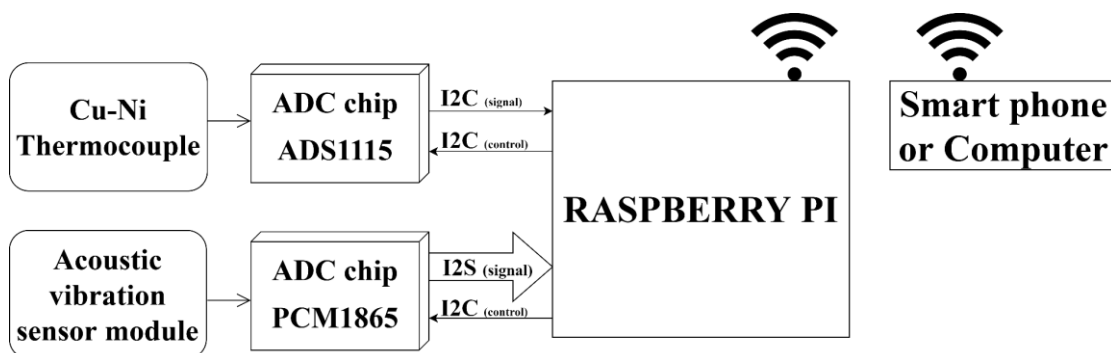


圖 2-1 感測系統之系統架構。

## 2.2 聲學振動與切削溫度感測器設計與製程

### 2.2.1 聲學振動感測模組設計

聲學振動訊號依其訊號頻率由高到底可概略分為聲發射、聲音以及振動三類聲學振動訊號，在 1.3.1 小節中，分析了用於收集聲學振動訊號的各式感測元件。考量其量測成本，聲音以及振動訊號感測器，較容易大量使用於工具機台上，但振動訊號的量測，容易受到感測器架設位置以及振動的方向性所影響，因此本研究在聲學振動訊號的量測部份，選用平價且較不易受振動方向影響的電容式麥克風作為聲學振動訊號的感測元件。本研究所選用的微機電電容式麥克風與傳統電容式麥克風具有相同的量測原理，但由於其尺寸的小型化，能夠輕易的將其裝設於車刀上，而不會因麥克風的存在造成加工操作上的困擾，同時微機電麥克風其完整的封裝，使其訊號的傳輸路徑非常確定而易於掌控。本研究所選用的微機電麥克風其封裝結構如圖 2-2(A)所示，用於接收訊號的帶電振膜被完整保護於結構內，而該振膜所接收的聲波訊號必須由上方的導音孔所導入。微機電麥克風由於其較小的尺寸，對於高頻訊號的靈敏度亦較一般傳統電容式與動圈式麥克風高。圖 2-2(B)為本研究所選用的微機電麥克風的頻率響應圖，該麥克風在 100 Hz 至 10 kHz 的範圍內用有極為平直的響應曲線，且在對於 10 kHz 到 60 kHz 範圍的訊號則具有更高的靈敏度，於圖中亦可發現，微機電麥克風的頻率響應較傳統麥克風寬廣，甚至可接收部分超聲波頻段的聲學訊號。

微機電麥克風模組的設計如圖 2-3(A)所示，於設計概念上，使微機電麥克風的導音孔緊密貼附於車刀架上，接收由車刀架所傳遞之聲學振動訊號，不但能有效隔絕周圍環境雜訊的干擾，亦減少了所接收的聲學振動訊號因於空氣中擴散導致的衰減。在結構設計上，為了使導音孔與模組的底面位於同一平面，於印刷電路板(Printed Circuit Board, PCB)中設計了使用一個方形通孔，用於安置微機電麥克風，如圖 2-3(A)所示。而麥克風則透過打線接合(Wire Bonding)技術，透過鋁線

連接其接點至電路板，整合用於濾波之交聯電容以及用於固定模組之磁鐵。電路板的詳細設計與尺寸如圖 2-3(B)所示，電路板之長寬分別為 10.0 mm 與 15.0 mm，包含了用於安置麥克風的 3.0 mm 乘 3.8 mm 之通孔，以及用於定位磁鐵之直徑為 6.0 mm 之盲孔。整個模組由於微機電麥克風的小尺寸，以及其簡單且少量的元件配置，使得整個模組仍具小型化之尺寸優勢，小於車刀架的寬度 25.0 mm，可輕易裝設於車刀架收集聲學振動訊號，而不會影響車刀架之安裝與車削的過程。

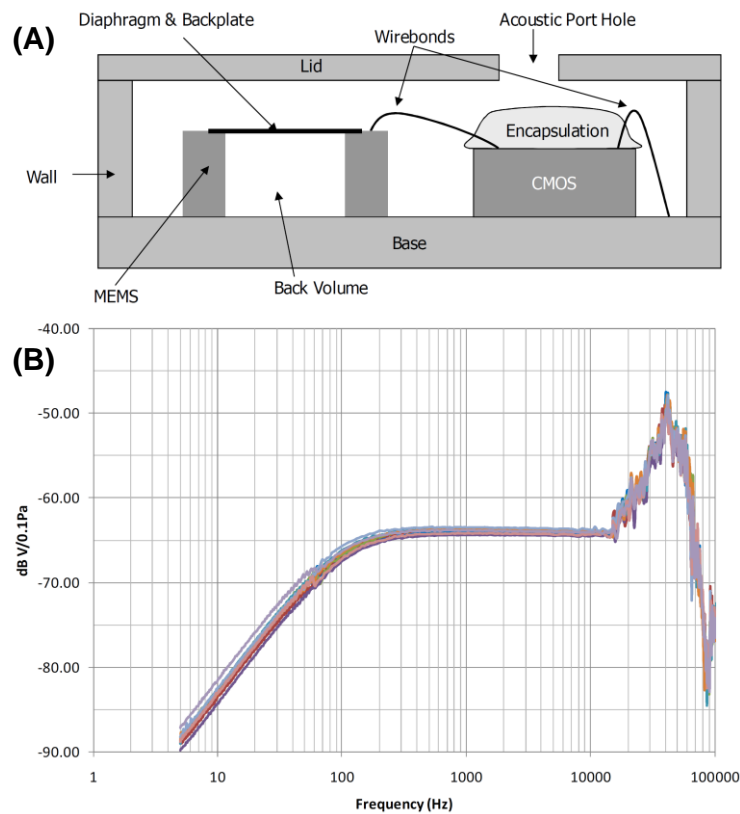


圖 2-2 微機電麥克風特性圖：(A)麥克風之結構示意圖，顯示其聲學振動訊號必須先通過導音孔(Acoustic Port Hole)才能被麥克風所接收 (B)麥克風頻率響應圖，描述了微機電麥克風之頻率響應圖，顯示其擁有寬廣的頻率範圍且對於高頻訊號擁有良好的靈敏度。[90]

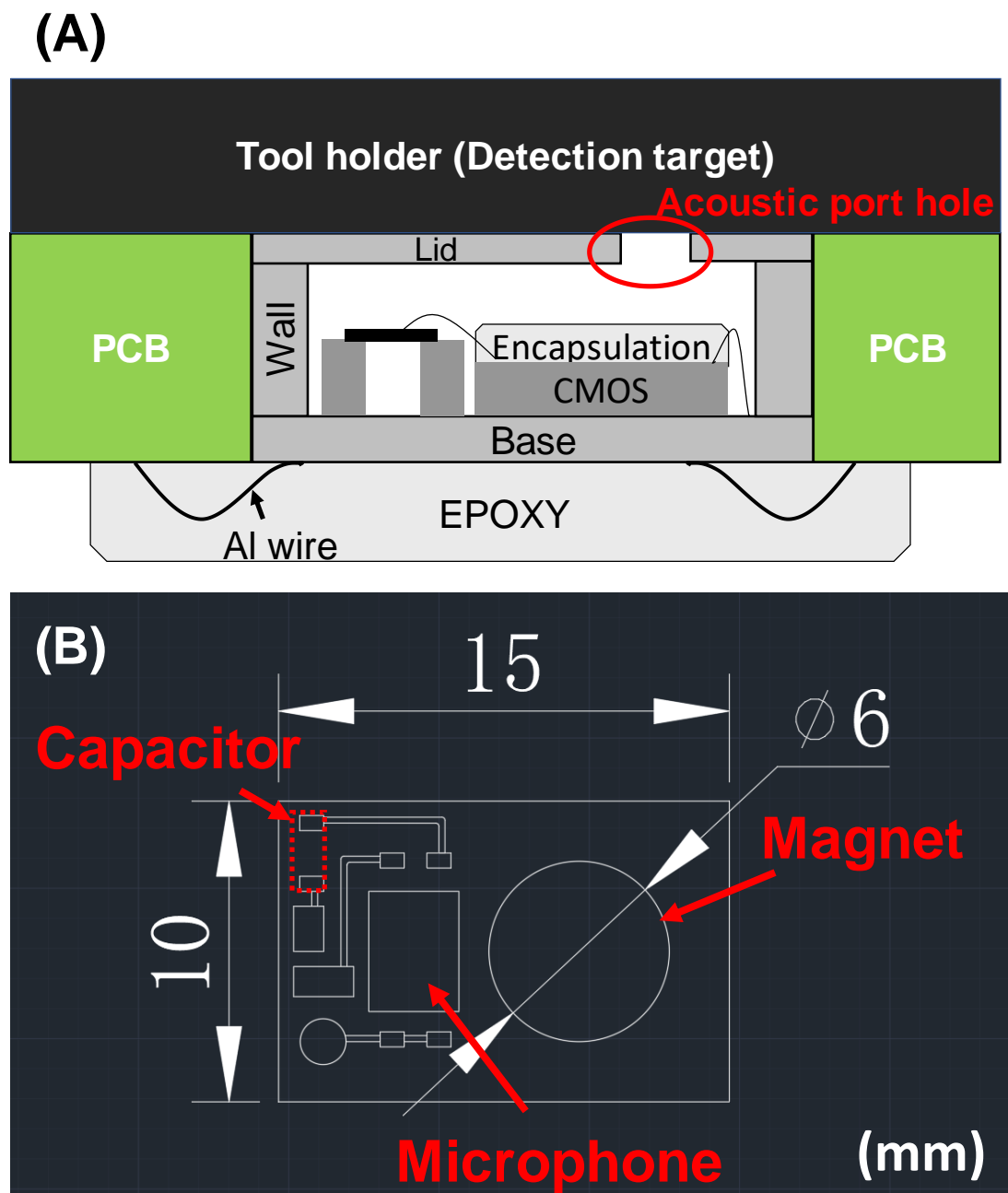


圖 2-3 微機電麥克風模組設計圖：(A) 微機電麥克風模組設計概念，使微機電麥克風之導音孔可以緊密貼附於量測目標上，隔絕外界之雜訊干擾。(B) 微機電麥克風模組之電路板，共包含三個零件安裝位置：用於焊接電容的銅層，用埋入微機電麥克風的通孔，以及用於固定磁鐵之盲孔。



## 2.2.2 切削溫度量測模組設計

切削溫度的訊號量測上，為了降低成本以及感測器安裝的複雜性，本研究選擇使用接觸式的溫度量測方式。然而在過去研究中可發現，若要將一般市售的溫度量測元件安裝於車刀時，往往需要對車刀進行額外的加工，如圖 1-8 所示，2015 年 Kus 等人對車刀架進行加工，並使用額外的固定用配件，才成功將市售的線形熱電偶固定於車刀上[55]，這樣的安裝方式造成了溫度量測上過高的外加成本。因此本研究打算開發一款可直接夾於車刀與墊片間的薄膜式熱電偶，以避免過去研究中溫度量測上，過於繁雜的前置加工。如圖 2-4(A)所示，於該圖中為了增加辨識度移除了車刀之固定螺絲，並將黃色的車刀懸於空中，於車刀正下方為紅色的薄膜式熱電偶，貼於下方墊片之上，如此一來於車削時熱電偶得以直接貼附於車刀之正下方，極為接近得量測車削工作點之切削溫度。

其尺寸與詳細設計如圖 2-4(B)所示，該圖左半邊為熱電偶的平面幾何設計，作為主體之三角形結構與右半邊的車刀的具有相同之平面幾何結構，皆為邊長 15.00 mm 之正三角形，而於兩者其中間也都有一個位於其正中心直徑為 3.70 mm 的通孔，用於固定其於車刀架上之位置以避免車削過程中發生偏移。這樣的薄膜熱電偶設計使得熱電偶能完美貼合於車刀下方，而不會露出，極為接近得量測切削溫度之同時，也避免熱電偶受車削所產生之銳利切屑切割破壞之可能。而為了將所量測之熱電訊號導出，於熱電偶的後方為了薄膜式熱電偶之兩極設計了同一尺寸之電極，長寬皆為 5.00 mm 與 5.65 mm 之作為冷端點，突出車刀後方，使冷端點電極不受車刀加熱且方便用於連接導線。

配合研究中所使用這類可替換式車刀，本實驗所設計之熱電偶可於安裝車刀時一併鎖於車刀與墊片之間，而不需以往研究中對車刀進行的額外加工，減去了過去研究中溫度感測器安裝上的困擾，大幅降低了切削溫度的量測成本。

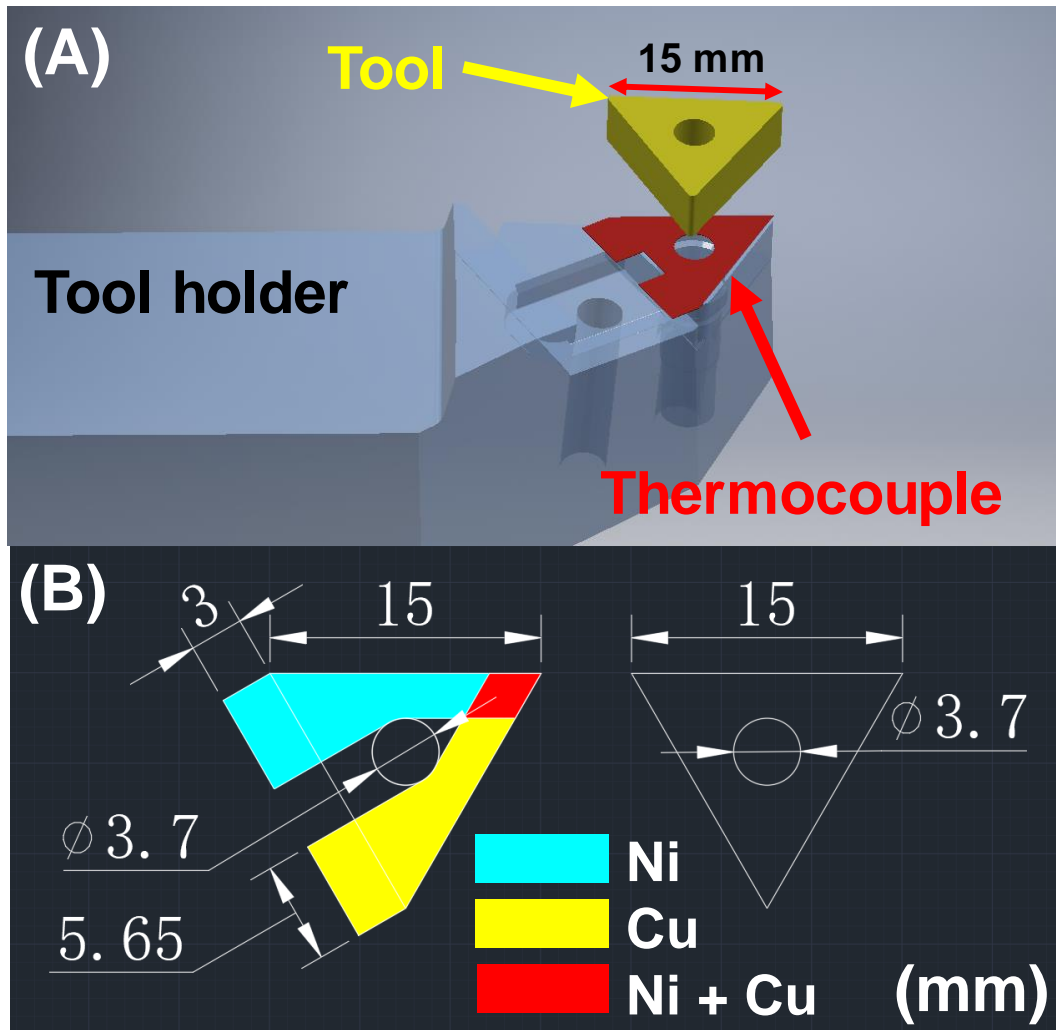


圖 2-4 薄膜式熱電偶設計圖。(A)薄膜熱電偶設計理念，使薄膜式熱電偶位於車刀與墊片間，直接貼合於車刀下表面量測切削溫度 (B)薄膜熱電偶平面設計圖(左半)與車刀平面幾何結構(右半)。

## 2.3 感測器製程

### 2.3.1 微機電麥克風模組製程

簡化的微機電麥克風模組的製造流程如圖 2-5 所示，為了使麥克風的導音孔緊密貼合車刀架，本研究所製作的印刷電路板如圖 2-5(A)所示，包含了一個與麥克風同尺寸之方型通孔，用於安置麥克風，以及一個圓形盲孔，用於安置磁鐵以固定麥克風模組於車刀架上。此設計能使導音孔與車刀架之間無額外縫隙，不只能有效隔絕周圍雜訊，避免量測受到干擾，同時也能減少訊號傳遞的衰減。圖 2-5(B)於印刷電路板上，會先焊上用於給電以及訊號導出的三條導線以及 0.22  $\mu\text{F}$  的電容，之後再使用桌上型鋁線打線機(SPB-U668, Super Power Precision Company, Taiwan)連接市售之微機電麥克風以及印刷電路板，以避免焊接導線及電容時弄斷微機電麥克風以及印刷電路板之間的鋁線。圖 2-5(C)中使用環氧樹脂覆蓋接點作為保護與絕緣層，圖 2-5(D)則於盲孔固定磁鐵，用於利用磁力將微機電麥克風模組固定於車刀架上。

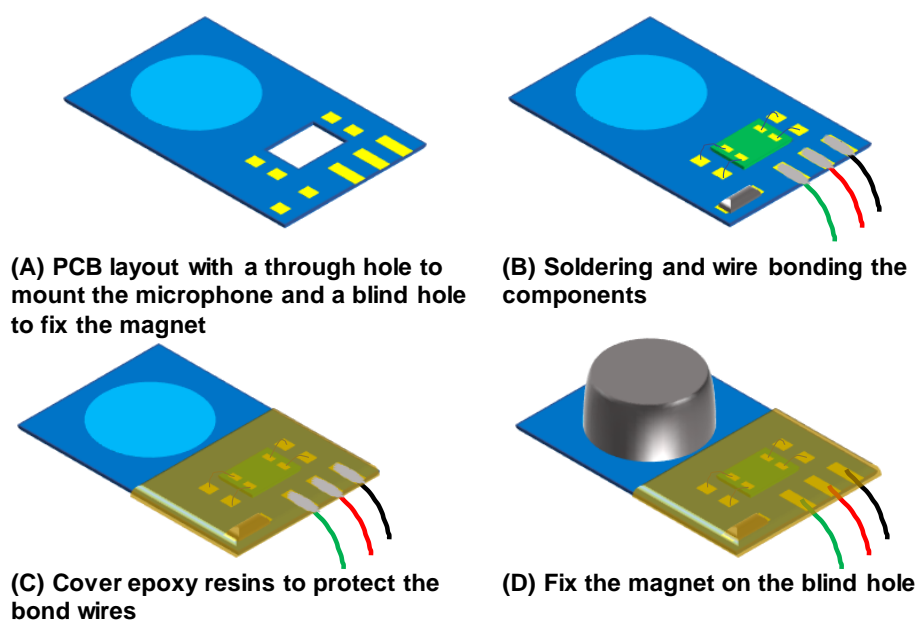


圖 2-5 簡化的微機電麥克風模組製程。(A)製作具有用於安裝麥克風的通孔和用於固定磁體的盲孔的印刷電路板 (B)透過銲接和打線接合導線、電容以及微機電麥克風 (C)覆蓋環氧樹脂用於保護以及絕緣接點 (D)將磁鐵固定在盲孔上。

### 2.3.2 熱電偶製程

圖 2-6 為簡化的鎳-銅薄膜熱電偶製程圖，根據 1.3.2 小節中所介紹，熱電偶之溫度量測原理為，兩導電材料於熱端點相接時，兩材料於冷端點的電極之間會產生與溫度相依的電位差，為了產生甚至增進這樣的熱電效應，一般市售的熱電偶常使用不同合金作為熱電偶的材料，但在本研究中為克服傳統溫度量測元件架設的問題，需自定義的薄膜熱電偶形狀，因此選擇自製薄膜熱電偶，為避免選用合金材料而導致製作薄膜熱電偶時，因合金材料使製程參數難以掌控降低成品穩定性，本研究選擇使用鎳與銅兩種純金屬材料作為薄膜熱電偶的導電材料。

本研究選用柔軟且易於加工的聚對苯二甲酸乙二酯 (Polyethylene Terephthalate, PET) 薄膜，作為薄膜熱電偶之基板，其厚度為 0.15 mm，再將鎳與銅以濺鍍方式鍍於其上方，作為熱電偶的兩極，最後覆蓋聚二甲基矽氧烷 (Polydimethylsiloxane, PDMS) 進行熱電偶的絕緣以及保護層。在圖 2-5(A) 中顯示本研究使用二氧化碳雷射切割薄膜熱電偶之基板以及遮罩材料，用於定義薄膜熱電偶的尺寸形狀，以及濺鍍時所使用的遮罩圖型，之後便於基板上先後使用所定義的兩款遮罩，分別濺鍍鎳以及銅兩種金屬材料，如圖 2-5(B) 所示，兩種材料所進行的濺鍍製程條件皆控制於 10 mTorr 的壓力下，以 5 sccm 的氬氣流率以及長達 15 分鐘的 DC 磁控濺鍍，且於濺鍍前皆會先持續對濺鍍腔抽真空，直到腔體壓力低於 7.5  $\mu$ Torr，另外會進行 1 分鐘的預鍍，以保證濺鍍之品質，而在此參數下鎳以及銅的薄膜厚度則分別為 1024 以及 1575 nm。薄膜熱電偶的接線方式如圖 2-6(C) 所示，使用銀膠連接導線以及熱電偶，可以保證導線與熱電偶間擁有良好的導電性，而不會使熱電訊號失真。但由於銀膠本身的接合力並不強，於圖 2-6(D) 中，使用浸塗的方式，浸塗一層 PDMS 包覆整個導電區，可以在保護以及絕緣熱電偶的同時使銀膠連接的導線更不易脫落，而製作完成之熱電偶位於車刀下方部分之厚度約為 0.2 mm，不會影響車刀之安裝。

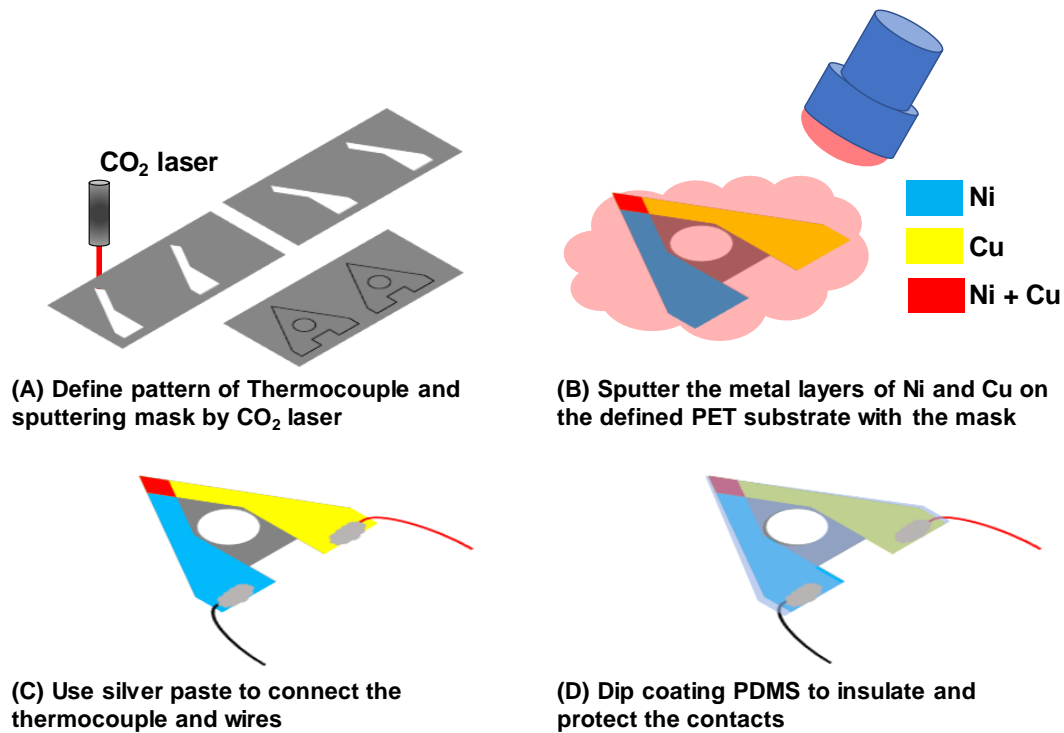


圖 2- 6 簡化的鎳-銅熱電偶製程圖。(A)使用二氧化碳雷射雕刻熱電偶的外圍輪廓以及濺鍍時所用之遮罩 (B)先後分別使用兩種遮罩於 PET 基板上濺鍍鎳以及銅兩種材料以形成熱電偶 (C)透過銀膠連接導線以及薄膜熱電偶的接腳 (D)使用浸塗的方式塗上一層 PDMS 材料用於保護以及絕緣。

## 2.4 感測系統電路設計

麥克風模組所輸出的訊號為高速變動的電壓訊號，在相關研究中常使用噪音計[25]或錄音介面[47]作為訊號接收端，但此類市售器材在成本以及多種感測器之整合上具有相當大的劣勢，因此本研究自行設計感測器的訊號接收電路，使用市售用於音訊的類比數位轉換晶片(PCM1865, Texas Instruments, United States)作為聲學振動訊號的接收晶片。根據取樣定理，為了不讓所蒐集的訊號失真，取樣頻率(Sampling Rate)至少要達到訊號最大頻率的兩倍，而在類比數位轉換晶片的取樣頻率控制上，取樣頻率會受到所使用的外部時鐘頻率所影響，因此於本實驗所設計的電路中 PCM1865 使用 24.576 MHz 的石英晶振作為其外部主時鐘源，

在此外部時鐘頻率下，PCM1865 最高可使用 96 kHz 的取樣頻率進行採樣，此採樣頻率所收集的訊號，在分析 48 kHz 以下的振動訊號都具有可信度。微機電麥克風所輸出的振動訊號，透過串聯一顆 0.22  $\mu\text{F}$  的貼片電容作耦合電容，進行高通濾波後，輸入至 PCM1865 類比數位轉換晶片接收，如圖 2-7(A)所示。

薄膜熱電偶所輸出的訊號為電壓訊號，因此，可以直接使用市售的通用型類比轉數位晶片進行訊號擷取，但由於熱電偶所輸出的電壓訊號一般都很小，常常以微伏( $\mu\text{V}$ )作為單位，因此在晶片的選擇上，不只需考慮其資料傳輸架構，對於晶片的分辨率亦須進行篩選，因此本研究選擇具高取樣位元數，且支援積體電路匯流排(Inter-Integrated Circuit, I<sup>2</sup>C)通訊架構的類比數位轉換晶片(ADS1115, Texas Instruments, United States)，用於擷取薄膜熱電偶的熱電壓訊號。薄膜熱電偶所輸出的訊號為溫度訊號，通常變化不會太快，因此使用低通濾波可以有效避免訊號的高頻雜訊。由於熱電偶的輸出為差動訊號，本研究所使用的濾波電路同時包含共模(Common Mode)與差模(Differential Mode)，兩種低通濾波電路，如圖 2-7(B)所示，一般設計上會使  $C_{CMa} = C_{CMb} = C_{CM} \leq \frac{C_{diff}}{10}$ ，且兩端外接之電阻  $R = R_a = R_b$ ，但本研究中所開發的熱電偶本身具有約 400  $\Omega$  之內電阻，因此於電路中，省去用於低通濾波的兩顆外接電阻，直接以熱電偶之內阻取代，一階共模與差模低通濾波電路之截止頻率計算公式分別如下：

$$f_{cc} = \frac{1}{2\pi RC_{CM}} \dots\dots\dots(2-1)$$

$$f_{cd} = \frac{1}{2\pi(R_a+R_b)C_{diff}} \dots\dots\dots(2-2)$$

$f_{cc}$ ：共模低通濾波之截止頻率

$f_{cd}$ ：差模低通濾波之截止頻率

$C_{diff}$ ：差模電容容值

$C_{CM}$ ：共模電容容值

$R$ ：濾波電路電阻阻值

同時使用共模與差模兩種低通濾波電路時，該電路之截止頻率計算公式，根據德州儀器公司所提供的設計守則[91]則可以表示為

$$f_{C-DM} = \frac{1}{2\pi(R_a+R_b)(C_{diff}+\frac{C_{CM}}{2})} \dots\dots\dots(2-3)$$

$f_{C-DM}$ ：混合共模與差模之低通濾波電路截止頻率

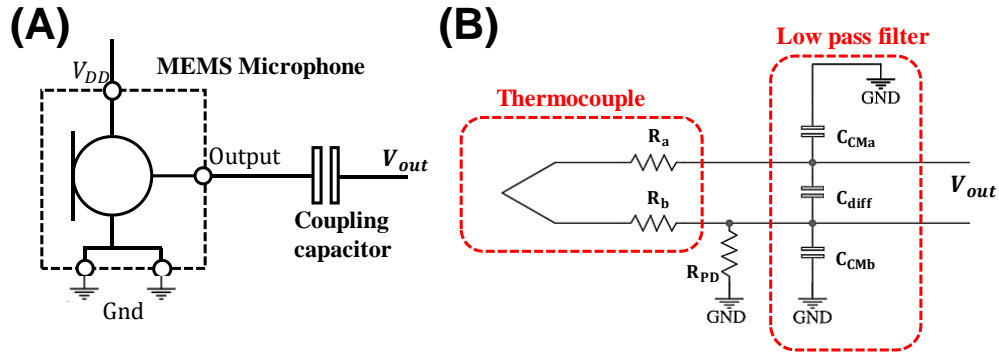


圖 2-7 感測器所使用之濾波電路設計。(A)微機電麥克風所使用之濾波電路，使用 0.22  $\mu$ F 之電容作為交聯電容濾除直流訊號完成聲學振動訊號之濾波 (B)熱電偶所使用之濾波電路，使用下拉電阻確保起始電壓為 0 V，而濾波電路包含共模以及差模兩種低通濾波電路。

經過濾波電路進行濾波的類比訊號，則由所選用的兩顆類比轉數位晶片，轉換為數位訊號，將數位訊號傳輸至單晶片電腦的數位電路部分，使用了 I<sup>2</sup>C (Inter-Integrated Circuit)以及 I<sup>2</sup>S (Inter-IC Sound)兩種晶片間的數位通訊架構。I<sup>2</sup>C 匯流排的線路架簡單，僅使用資料線(Serial Data Line, SDA)及時脈線(Serial Clock Line, SCL)兩條訊號線，且可於其資料線上並聯多顆晶片，並分別進行操作。為了保證於 I<sup>2</sup>C 匯流排傳輸之訊號，不會受線路雜散電容或其他干擾源影響，實際操作上，使用兩顆上拉電阻確保 I<sup>2</sup>C 匯流排不導通時為邏輯高準位，根據 I<sup>2</sup>C 規範文件第 55 頁[92]，該上拉電阻阻值之上下極限計算公式定義如下

$$R_{P(max)} = \frac{t_r}{0.8473C_b} \dots\dots\dots(2-4)$$

$$R_{P(min)} = \frac{V_{DD}-V_{OL(max)}}{I_{OL}} \dots\dots\dots(2-5)$$

$R_{P(max)}$ ：上拉電阻阻值上限

$R_{P(min)}$ ：上拉電阻阻值下限

$t_r$ ：訊號上升時間 (標準模式下為 1000 ns)

$C_b$ ：實際上的線路電容 (標準模式下最高許可為 400 pF)

$V_{DD}$ ：IC 工作電壓

$V_{OL(max)}$ ：低準位最高輸出電壓 (標準模式下為 0.4 V)

$I_{OL}$ ：低準位輸出電流 (標準模式下最小為 3 mA)

而在本研究所開發的電路中，由於電路布線長度較短，線路電容幾乎可以忽略，因此只須考慮  $R_{P(min)}$ ，根據 2-5 式，代入本研究所使用的晶片工作電壓 3.3 V，可計算出此時於標準 I<sup>2</sup>C 傳輸模式下  $R_{P(min)}$  約為 970  $\Omega$ ，而在實際電路中上拉電阻至少會選用大於 1 k $\Omega$  之電阻。

I<sup>2</sup>S 則是專門用於 IC 之間數位音頻訊號傳輸的通訊架構，使用三條訊號線進行傳輸，雖然 I<sup>2</sup>S 為一標準訊號傳輸介面，但訊號線名稱可能依公司或產品的不同而有些許出入。本研究所選用的晶片 PCM1865 的定義中，訊號線名稱分別為時脈線(Bit Clock, BCK)、聲道選擇線(Left Right Clock, LRCK)以及資料線(Audio Data Digital Output, DOUT)，其中資料線的音頻資料只能進行單一方向的，一對一傳輸，時脈線與聲道選擇線的時脈訊號可以自由選擇，由任一端甚至是第三方擔任，但於資料傳輸過程中無法進行更換，而時脈訊號的發出端，被定為主控端(Master)，時脈訊號的接收端則是受控端(Slave)。

## 2.5 感測系統控制與數據導出

感測系統透過樹莓派，此一單晶片電腦進行數位類比轉換晶片的控制、訊號讀取以及電源供應。本研究中，樹莓派所使用的作業系統為 Raspbian，一款基於 Debian 並針對樹莓派所開發的，以 Linux 為核心的作業系統。作業系統本身支援安全外殼協定功能，使得在程式撰寫以及運行過程中，得以透過無線網路從手機或電腦登入樹莓派進行遠端操作。同時系統中 Linux 內核(Kernel)所包含的 I<sup>2</sup>C



介面裝置驅動，使得在本實驗所使用的兩款晶片的讀寫控制上方便許多，以下將分別介紹本研究中如何控制用於接收聲學振動訊號的 PCM1865 晶片，以及用於接收熱電偶訊號的 ADS1115 晶片。

在聲學振動訊號部分，類比訊號經過 PCM1865 晶片進行轉換，以 I<sup>2</sup>S 通訊介面傳輸至樹莓派進行接收。在使用 I<sup>2</sup>S 進行通訊時，須先定義裝置狀態為主控或受控，因此於 PCM1865 的控制上，須先透過 I<sup>2</sup>C 介面，以將資料寫入 PCM1865 內部暫存器(Register)的方式進行控制。在本實驗的操作中 PCM1865 的運作狀態被定義為受控模式，且固定以 32 位元的解析度進行訊號的取樣，而於樹莓派端，在 ALSA(Advanced Linux Sound Architecture)的音訊設備趨動架構下，使用 arecord 指令，將樹莓派作為指定為主控端，並選擇所需的採樣頻率、聲道數目以及存檔格式，在指令發送後，樹莓派將持續進行訊號錄製，直到操作端輸入停止訊號。

熱電偶訊號則是透過 ADS1115 晶片進行訊號轉換，該晶片同樣可透過 I<sup>2</sup>C 介面，將資料寫入內部暫存器進行控制。為了精準量測熱電偶訊號，在本研究中控制 ADS1115，以差動模式量測熱電偶兩端之間的訊號，另外，在訊號讀取與儲存上，為了方便操作撰寫了一個 python 腳本用於儲存資料，在其運作中，會創建一個新的 CSV 格式文件，每隔 0.1 秒透過 I<sup>2</sup>C 進行一次電壓訊號讀取，並於文件中寫入讀取值與當下時間，並不斷重複此步驟直到輸入終止訊號。

輸入終止訊號後，聲學振動訊號以及熱電偶訊號會各自儲存為一個檔案，儲存於樹莓派中，最後檔案的存取則與控制晶片時相似，利用安全外殼協定所帶有的檔案傳輸協定，遠端使用手機或電腦存取所收集的聲學振動以及熱電偶訊號。

## 2.6 振動聲學訊號處理與繪圖

所收集到得聲學振動訊號為音頻訊號，分析上於承接 1.4 節中對於各種訊號分析的處理方式，本研究選擇使用短時距傅立葉轉換進行振動聲學訊號分析。於 1.4 節中曾介紹短時距傅立葉轉換之計算方式如下

$$F_n(e^{j\omega_k}) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} f(m)w(n-m)e^{-j\omega_k m} \dots\dots\dots(2-6)$$

$F_n(e^{j\omega_k})$ ：在時間  $n$  以及頻率  $\omega_k$  時對原始訊號  $f(n)$  的離散短時距傅立葉變換

$w(n)$ ：窗函數

由於引入了窗函數對訊號進行分割，使得短時距傅立葉轉換得以進行訊號的時頻分析，但窗函數的選擇以及取樣方法會對訊號分析之結果造成影響，本節將簡單介紹窗函數與取樣方式，對短時距傅立葉轉換造成之影響，以及本實驗中所使用的窗函數取樣參數。

### 2.6.1 音框

短時距傅立葉轉換先對原始訊號進行時間上的分割後，再分別進行傅立葉轉換，成功對原始訊號進行時頻分析，而所分割出來的每一小段訊號則被稱為音框(Frame)，對於音框的性質則使用音框大小(Frame Size)、音框率(Frame Rate)、音框間距(Frame Step)以及音框重疊率(Overlap Rate)進行描述，其關係式如下

$$F_{step} = F_{size} - O_{size} = F_{size}(1 - O_{rate}) \dots\dots\dots(2-7)$$

$F_{step}$ ：音框間距(Frame Step)、相鄰兩音框起點之間的距離

$F_{size}$ ：音框大小(Frame Size)、音框包含的樣本點數

$O_{size}$ ：音框重疊量(Frame Overlap)、相鄰兩音框重疊部分的樣本點數

$O_{rate}$ ：音框重疊率(Overlap Rate)、相鄰兩音框重疊部分所佔的比例

$$fps = f_s / F_{step} \dots\dots\dots(2-8)$$

$fps$ ：音框率(Frame Rate, Frame Per Second)、每秒的音框數目

$f_{sample}$ ：取樣頻率、每秒的樣本總數

音框的大小會影響訊號分析時的解析度，音框過大時，訊號中時間較短的訊號變化會難以被發現，也就是會降低時間解析度，而當音框過小時，雖然訊號會有較佳的時間解析度，但由於樣本點數過少，訊號的頻率解析度會降低，因此音框大小會隨著所欲分析的訊號進行些許調整。另外，為了後續傅立葉轉換的計算方便，音框大小通常會設為 2 的整數次方。而為了避免相鄰音框之間的訊號因音框的切割產生斷層，通常會使音框之間部分重疊以減緩這樣的問題，而重疊部分所占的比例便為重疊率，一般分析中重疊率會設為 1/2 到 2/3 不等，本實驗中則將重疊率設為 3/4，使用較大的計算量換取更好的訊號解析品質。一般表示上使用重疊率  $O_{rate}$ ，表示音框間距與音框重疊量之間的關係，如公式 2-7 所述，而圖 2-8 則顯示了音框大小、音框間距與音框重疊量之間的關係，圖中表示相鄰的第  $n$  個與第  $n+1$  個音框之間，其音框間距、音框重疊量以及音框大小之間的關係。

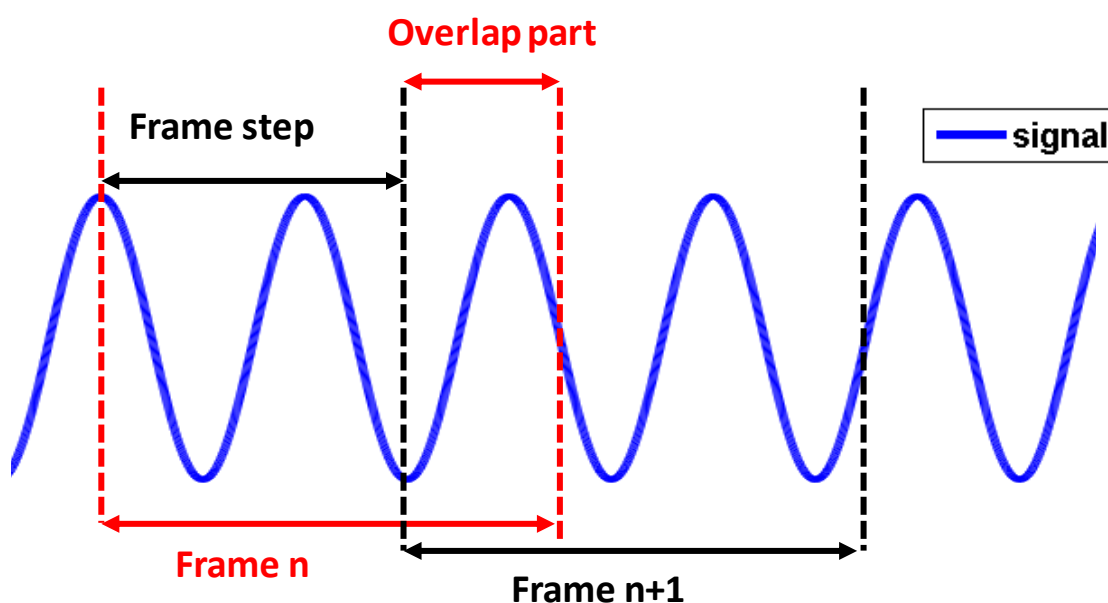


圖 2-8 訊號音框取樣參數關係圖。顯示第  $n$  個取樣音框以及第  $n+1$  個取樣音框，之間音框間距、音框重疊量以及音框長度之關係。

## 2.6.2 窗函數

訊號經過音框取樣後所得之取樣訊號，有時會再使用窗函數對所取得之音框訊號進行修飾，而未使用窗函數進行修飾的原始音框取樣訊號可以寫成

$$S_R = \begin{cases} \hat{x}(n), & 0 \leq n \leq F_{size} - 1 \\ 0, & otherwise \end{cases} \dots\dots\dots(2-9)$$

$S_R$ ：音框取樣後之訊號或稱為矩形窗函數取樣訊號

$\hat{x}(n)$ ：原始訊號

而這樣的音框取樣訊號也可被稱為，使用最為典型的矩形 (Rectangular)窗函數所修飾的取樣訊號，其中矩形窗函數的定義為

$$W_R(n) = \begin{cases} 1, & 0 \leq n \leq F_{size} - 1 \\ 0, & otherwise \end{cases} \dots\dots\dots(2-10)$$

$W_R$ ：矩形窗函數

矩形窗函數的圖形如 2-9 (A)所示，而矩形窗函數取樣訊號則如圖 2-9(B)所示，直接為該音框範圍內之原始訊號，該音框範圍內之訊號皆被完整保留，然而，這樣的取樣方式會造成窗口兩端的訊號被強制歸零，這驗的斷差會導致於該位置產生強烈的高頻訊號，因此，大部分分析中會使用窗函數衰減其兩端訊號的強度，以此避免因訊號處理產生的額外雜訊干擾分析結果。

本研究所使用的窗函數為典型的布萊克曼(Blackman)窗函數，其定義為

$$W_b(n) = \begin{cases} a_0 - a_1 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) + a_2 \cos\left(\frac{4\pi n}{N-1}\right), & 0 \leq n \leq F_{size} - 1 \\ 0, & otherwise \end{cases} \dots\dots\dots(2-11)$$

$W_b$ ：布萊克曼窗函數

$a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ ：為常數通常狀況下  $a_0 = 0.42$ 、 $a_1 = 0.5$ 、 $a_2 = 0.08$

而經過窗函數修飾的取樣訊號，則可以由窗函數修飾的通式寫成

$$S_w(n) = \hat{x}(n) \times W(n) \dots\dots\dots(2-12)$$

$S_w(n)$ ：經過窗函數修飾的取樣訊號

$W(n)$ ：所使用窗函數，於本研究中為布萊克曼窗函數

最後布萊克曼窗函數圖形則如 2-9 (C)所示，音框範圍內之訊號僅有中央部分的訊號強度被完整保留，而越往兩側的訊號則會受到一定程度的衰減，如圖 2-9 (D)所示，這樣使窗口兩端訊號衰減的窗函數，可以有效避免窗口兩端的訊號被瞬間歸零，而使得在訊號分析中產生強大的高頻的雜訊。

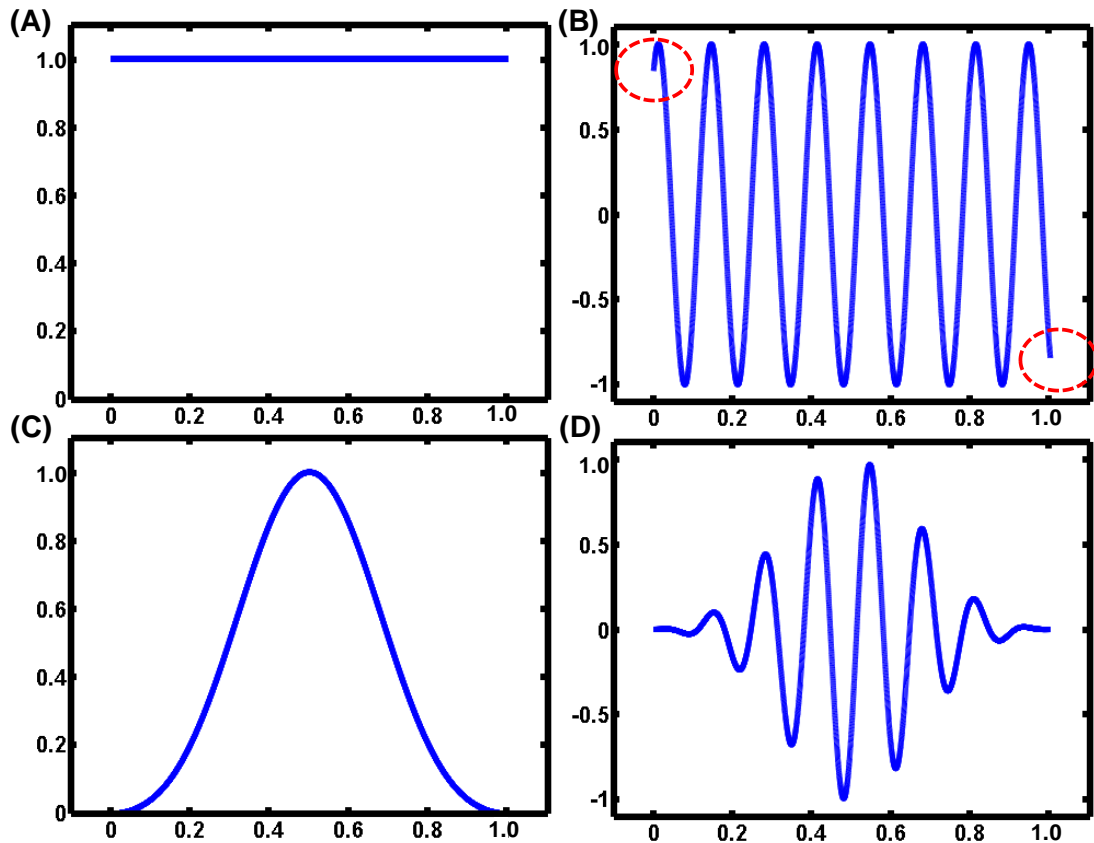


圖 2- 9 窗函數取樣示意圖。(A)矩形窗函數 (B) 矩形窗函數取樣之訊號，該訊號兩端受取樣影響，被強制歸零，因此於該處之信號會被分析成強烈的高頻訊號 (C) 布萊克曼窗函數 (D)布萊克曼窗函數取樣之訊號，該取樣方式衰減兩端之訊號，使其歸零較為和緩，不會於分析中產生高頻雜訊。

### 2.6.3 時頻圖分析方法

而在短時距傅立葉轉換中，當音頻訊號經過上述之音框與窗函數的參數設置後，便可以分別對每個經過窗函數修飾的取樣窗，進行離散傅立葉轉換，得到一張同時將原始訊號之時域與頻域成分展開之時頻圖，如圖 2-10 所示，將圖 2-10(A)之原始訊號透過短時距傅立葉轉換，便能分析訊號中時域與頻域之成分，得到如圖 2-10(B)以時間、頻率與訊號強度為軸的三維圖譜，圖 2-10(C)則為圖 2-10(B)之上視圖，於此視角較能有效進行觀察比較。

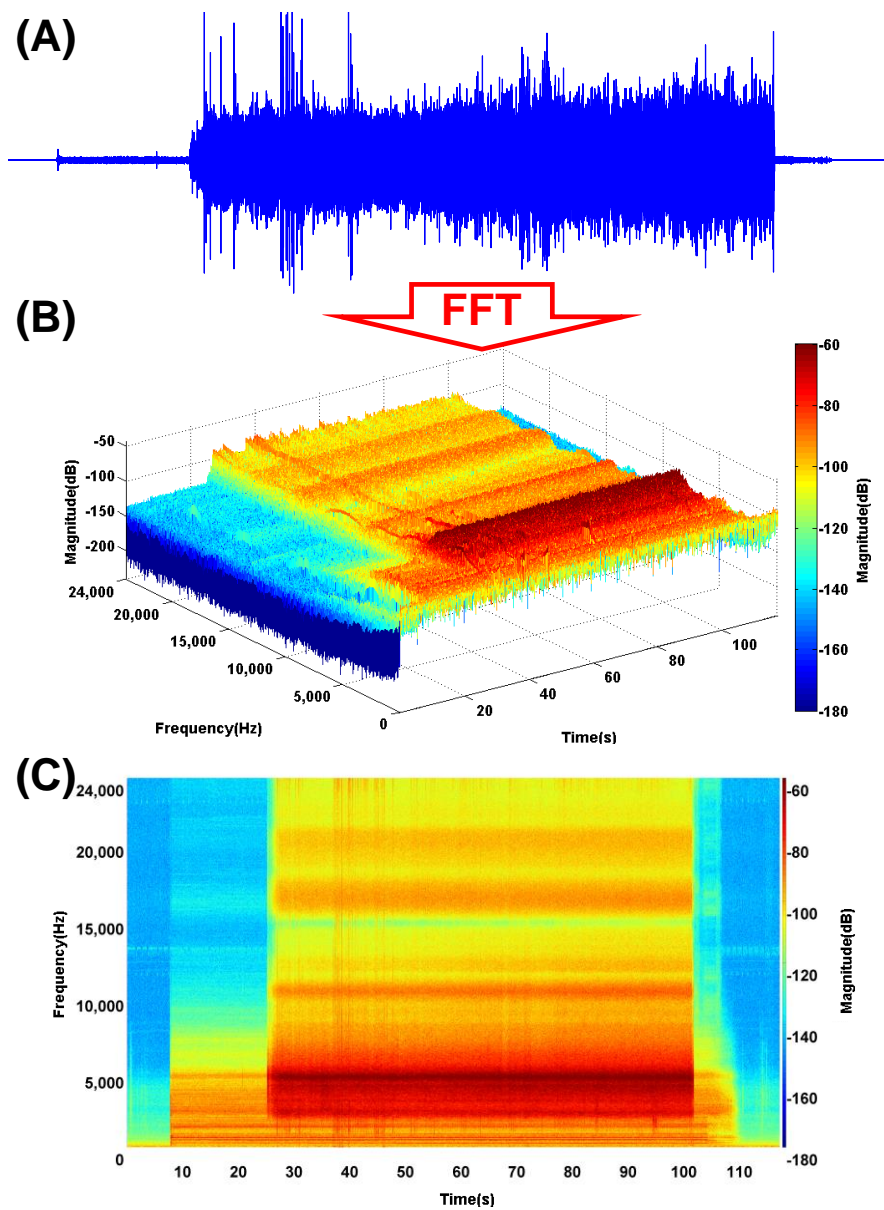


圖 2-10 訊號處理流程示意圖(A)原始訊號(B)時頻訊號圖(C)時頻圖之上視圖。

然而在判斷時，為了方便進行歸類與比較，將短時距傅立葉轉換後所得到之圖譜從兩個不同軸向，對訊號強度進行積分，用於進行不同的車削狀況的整理比較，其具體作法如下圖 2-11 所示，其中圖 2-11(A)為原始訊號經短時距傅立葉轉換後，所得之三維圖譜的上視圖。圖 2-11(B)則是用於觀察分析，該次車削中車削狀況隨時間之變化的作圖方式，針對特定頻率帶，分析該頻率帶範圍內訊號之總強度對時間之關係，也就是對圖 2-11(A)中紅色方框範圍內的訊號強度進行積分，如圖 2-11(B)中，標示了一次車削中振動訊號的時間歷程。而圖 2-11(C)所表示的分析方法，則是分析特定的穩定切削過程中的訊號頻率分布，用於分析不同磨損程度之車削刀具之頻率響應。圖 2-11(C)便是圖 2-11(A)中白色方框範圍內之訊號的響應頻譜，這樣對特定時間段進行積分而得之訊號強度與頻率之關係圖，對於頻率響應會擁有較良好之頻率分析結果。

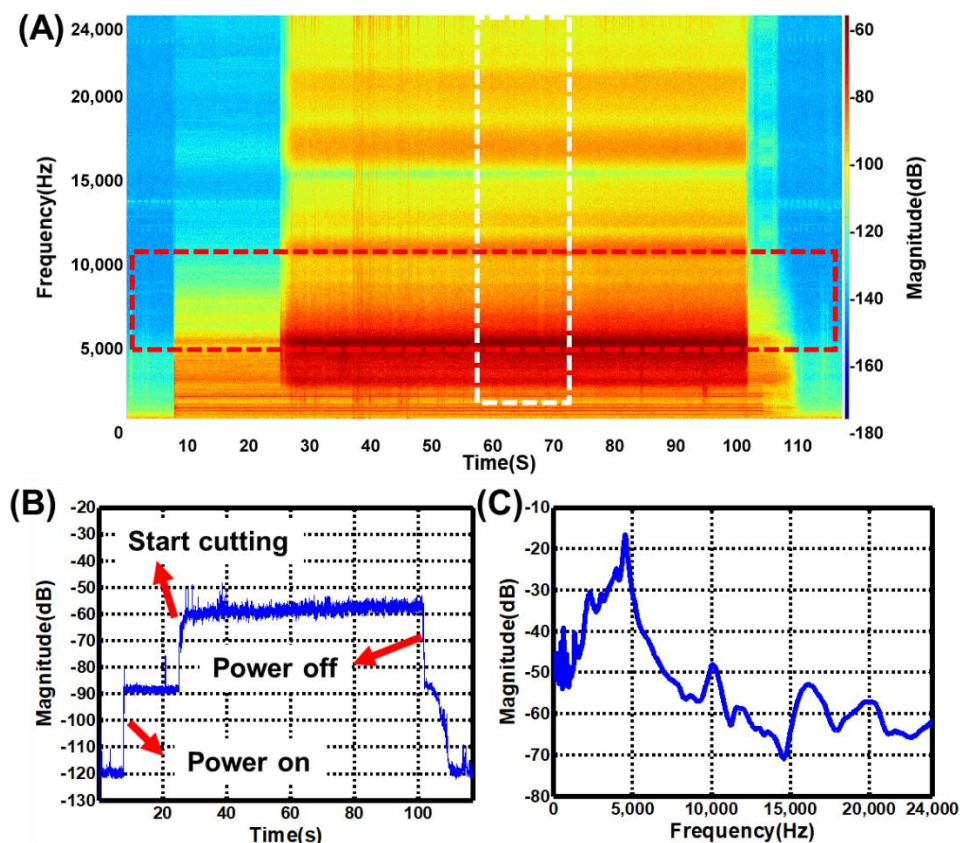


圖 2- 11 訊號分析比較方法示意圖。(A)訊號時頻圖之上視圖 (B)特定頻率範圍內訊號強度與時間之關係 (C)特定時間範圍內訊號強度與頻率之關係。



## 2.7 熱電偶訊號處理

熱電偶所收集之訊號為電壓訊號，於本實驗中，會先對其進行量測，確認所製造的薄膜熱電偶的熱電效能，之後再依其熱電響應值，於訊號分析時將薄膜熱電偶所量測之電壓換算出溫度值，再將得到之切削溫度用於評估車削狀況。

然而所收集到之熱電訊號，雖然已經過濾波電路濾除雜訊，實際量測之訊號仍具有一定程度之抖動。因此，於實驗中選擇提高訊號的取樣頻率，再使用移動平均法對訊號進行數位濾波，其計算方式如下

$$V(n) = \frac{x(n)+x(n-1)+\dots+x(n-(S-1))}{S} \dots\dots\dots(2-13)$$

$V(n)$ ：數位濾波後之訊號

$x(n)$ ：數位濾波前之訊號

$S$ ：移動平均濾波窗格長度，本實驗中設為 20 個資料點

而圖 2-12(A)與(B)則分別為數位濾波之前與之後的，熱電訊號與實際溫差之比較圖，(A)(B)兩小圖中，藍色的熱電訊號對應於左側的藍色的電壓刻度，由所開發之薄膜熱電偶量測，而圖中紅色的溫度訊號則對應於右側的紅色的溫度刻度，由市售之 K 型熱電偶所量測。由圖 2-12(A)可知，未經數位濾波之熱電壓值與另外使用市售溫度計所量測之溫度，具有一致之趨勢，但訊號持續抖動，使得兩條量測訊號曲線無法貼合。而於圖 2-12(B)中，經數位濾波之熱電壓訊號則非常貼合於市售溫度計之量測曲線，顯示處理後之熱電壓訊號能有效反映實際量測之溫度，這樣的訊號處理能有效減少薄膜熱電偶的量測誤差，且於初期熱電效能量測時，這種處理更是有助於衡量薄膜熱電偶的熱電效能。



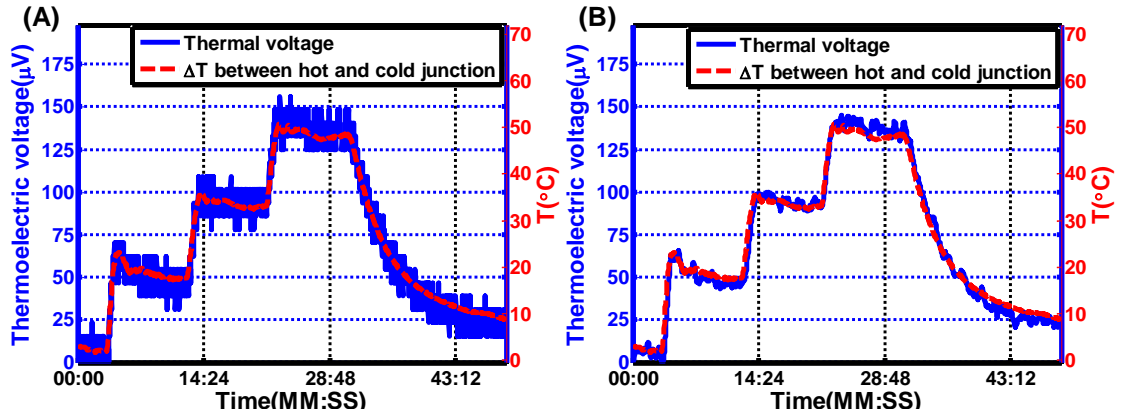


圖 2- 12 數位濾波前後之薄膜熱電偶訊號比較 (A)數位濾波前之薄膜熱電偶熱電訊號 (B)數位濾波後之薄膜熱電偶熱電訊號，圖中充分顯示所使用之數位濾波處理能有效濾除雜訊減少薄膜熱電偶之量測誤差。

然而實際進行切削溫度量測時發現，在車削過程中，不只是車刀部分會產生溫度的提升，在車刀架亦產生了些微的溫度上升。這會導致熱電偶冷端的溫度上升，進而減小熱電偶冷熱兩端之間的溫度差，這造成了額外的量測誤差，因此於本實驗中將額外使用一條市售之 K 型熱電偶，將其固定於所設計之薄膜熱電偶的冷端，量測熱電偶冷端之溫度變化，用於冷端溫度補償。

下圖 2-13 便顯示於一次車削實驗當中，薄膜熱電偶之量測溫度、冷端溫度值以及進行冷端溫度補償後之溫度量測值，圖中黑色虛線為使用所量測之熱電壓，依薄膜熱電偶之熱電特性回推之量測溫度值；紅色虛線則為使用市售之 K 型熱電偶所量測到的冷端溫度值；最後藍色曲線便是進行溫度補償後，薄膜熱電偶實際上所應量測到之車刀溫度值，由圖中可知，雖然於量測結果中冷端溫度的提升會的確造成了溫度量測之量測誤差，但由於車刀與車刀架本身散熱很快，於冷端之溫度累積速度並不快，且冷端所上升之溫度基本上遠小於所量測之車刀的切削溫度，對於切削溫度之量測影響不大，約為 5°C 左右，但於本實驗仍會使用市售之 K 型熱電偶進行冷端溫度補償，以提高溫度量測之準確率。

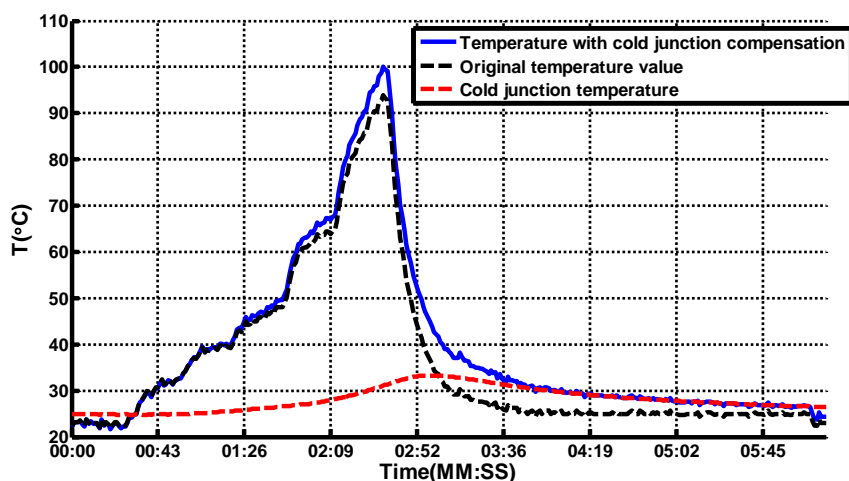


圖 2- 13 冷端溫度補償對溫度量測曲線之影響。圖中紅色與黑色的虛線分別為薄膜熱電偶冷端之溫度，以及薄膜熱電偶的溫度輸出值，而藍色實線則顯示冷端補償後薄膜熱電偶熱端的實際溫度。

## 2.8 感測器裝設位置比較

為評估聲學振動訊號的感測器於車刀架之安裝位置，本實驗同時於兩個不同訊號量測點，裝設微機電麥克風模組進行測試，先行比較不同位置的量測，對微機電麥克風的量測結果產生之影響，再依此結果進行感測器安裝位置之設計。

對於微機電麥克風的安裝，本實驗透過固定於微機電麥克風模組上的永久磁鐵，利用其磁力將整個模組直接吸附於車刀架上，而所測試之兩吸附點 A 與 B 則如圖 2-14 所示，圖中淺藍色透明部分為所使用的車刀架，黃色部分為車刀於車刀架裝設之位置，最後以紅色標示 A 與 B，兩個微機電麥克風模組於車刀架之裝設位置之測試點，其中 A 點為車刀之正下方，最是靠近車刀的加工點，而 B 點較為遠離加工點，位於車刀架之末端量測經由車刀架所傳導之振動聲學訊號。

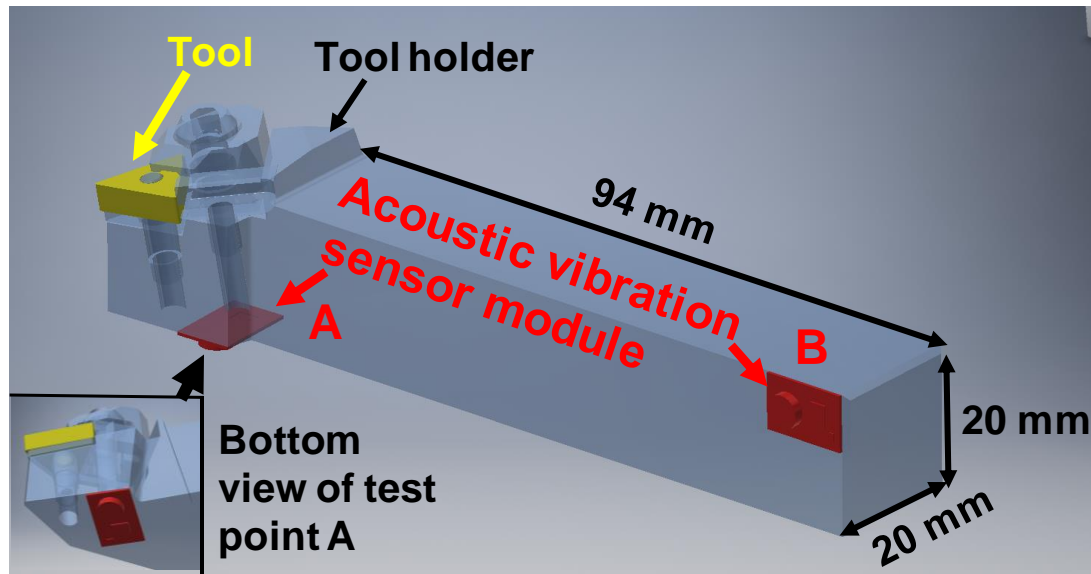


圖 2-14 感測器安裝之測試點位置示意圖。

為了比較 A 與 B 感測器裝設位置，於實驗中同時裝設兩個麥克風模組，並使用於 2.3 節介紹之自行開發的電路，同時量測 A 與 B 兩點之振動聲學訊號，於測試中比較同一次 6061 鋁合金棒的車削過程中，分別由兩量測點之麥克風模組接收之訊號，該訊號之分析結果如下圖 2-15 與圖 2-16 所示。

於該兩圖中，顯示了較具比較意義之時間範圍的訊號分析結果，其中圖 2-15 為所量測之訊號之時域分析結果，而圖 2-16 為訊號之頻域分析結果。首先於時域分析上，所比較之時間段包含了主軸開始旋轉與車床開始車削，兩個可以確認之時域訊號的急遽變化點，而這樣的訊號急遽變化點不論是在量測點 A 或量測點 B 中皆可發現。於分析結果可發現，當主軸開始旋轉時，兩量測位置之訊號強度增幅都在 10 dB 左右。而相對於主軸旋轉之訊號，當車床開始車削時於量測點 A 所測得之訊號強度增幅為 35 dB，但在量測點 B 則只有 15 dB 左右，顯示在訊號量測時，當感測器裝設於圖 2-14 中所標示之 A 點所量測之訊號，會比 B 點在訊號強度變化的量測方面擁有更好的靈敏度。

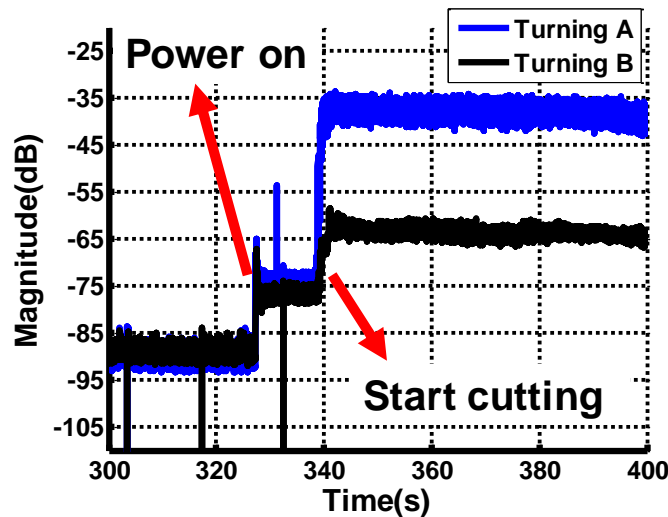


圖 2- 15 車削測試中微機電麥克風模組於 A 與 B 點兩所量測之時域訊號。

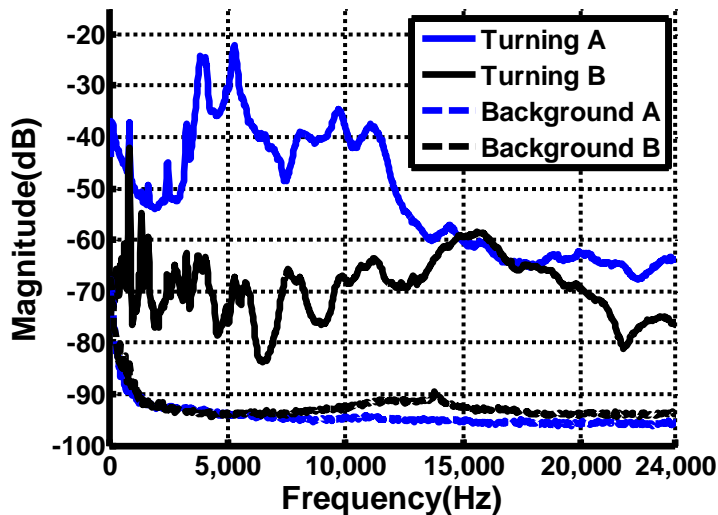


圖 2- 16 車削測試中微機電麥克風模組於 A 與 B 點兩所量測之頻域訊號。

圖 2-16 為圖 2-14 中量測點 A 與量測點 B 之背景訊號，以及兩點於穩定車削時的量測訊號頻譜圖，首先兩量測點之背景訊號頻譜幾乎一樣，表示兩量測點具有幾乎相等之背景雜訊。而在車削時的訊號頻譜部分，在 15.0 kHz 時兩訊號擁有相近得訊號強度，但在量測點 B 之訊號頻譜之低頻部分，相對於 A 受到了相當程度之衰減，且量測點 B 之訊號頻譜相較於 A 之訊號強度對於頻率的變化趨於水平，推測可能是訊號於車刀架中傳遞時，受到了衰減以及發散。因此認為量測點 B 之訊號頻譜對於車刀之振動聲學訊號較不具代表性，故本實驗後續之測試時，皆會將微機電麥克風模組安裝於圖 2-14 中之 A 點位置。

## 2.9 系統架設與實驗設備

為了量測所製造之薄膜熱電偶的熱電特性，本實驗搭建了一個簡易的熱電偶特性量測架構，如下圖 2-17 所示。於實驗使用一塊由市售之多路 PID 控制器 (THMA068K, Yythyb, China) 所控制之電熱板 (Hot Plate) 作為熱源，使用耐熱膠帶將熱電偶之熱端點，以及用於 PID 控制之市售的 K 型熱電偶一併固定於電熱板上，並另外將一條市售之熱電偶固定於所製造之薄膜熱電偶的冷端點，此時薄膜熱電偶之冷端點會懸於電熱板的外側而不會被加溫。實驗進行時，使用兩條市售之熱電偶分別量測薄膜熱電偶熱端點以及冷端點之溫度，藉由調控電熱板之溫度，製造熱端與冷端之間的溫度差，再比較溫度差與薄膜熱電偶所輸出的熱電壓值，該對應關係便能得到薄膜熱電偶的熱電響應係數，而之後進行車削實測時，所量測之溫度值便會以此係數進行轉換。

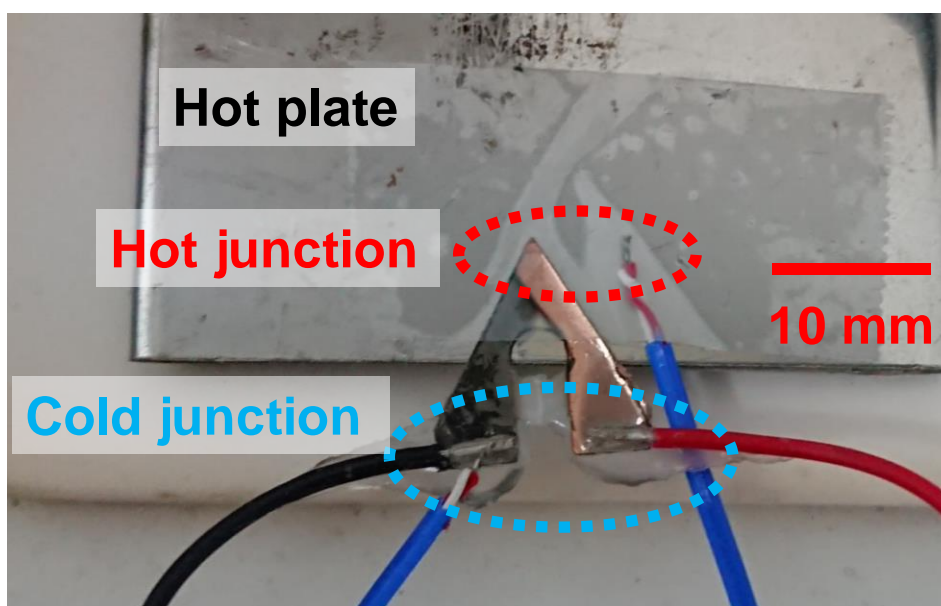


圖 2-17 熱電偶特性量測架構之圖片。

而實際車削時，用於監控車床切削條件兩種感測器安裝位置之示意圖，便如下圖 2-18 所示，其中薄膜熱電偶直接位於車刀之正下方，緊貼車刀之背面用於量測車削時車刀之切削溫度，而微機電麥克風模組之安裝位置則如 2.8 節所述，會將微機電麥克風模組安裝車刀之正下方，使其盡量貼近於車刀切削之工作點，

使其對於訊號變化更為靈敏，量測對於車削狀況更具有代表性的聲學振動訊號。

而圖 2-19 則為所製造的薄膜熱電偶，以及聲學振動訊號感測器模組之成品照片，與兩種感測器安裝於車刀架時之照片，其中圖 2-19(A)為所製造之薄膜熱電偶成品，具有與車刀相同之平面幾何結構，且厚度僅為 0.2 mm 左右，可以在不影響車削的狀況下固定於車刀之下方。圖 2-19(B)為微機電麥克風模組，其為長寬分別為 10.0 mm 與 15.0 mm 之長方形，這樣的尺寸小於車刀架底部寬度之 25.0 mm，故能直接使用磁吸之方式將模組固定於車刀架之下方，更靠近得量測聲學振動訊號。最後圖 2-19(C)為安裝了兩種感測器之車刀架照片，實際車削測試時便是在這樣的架設下進行操作。

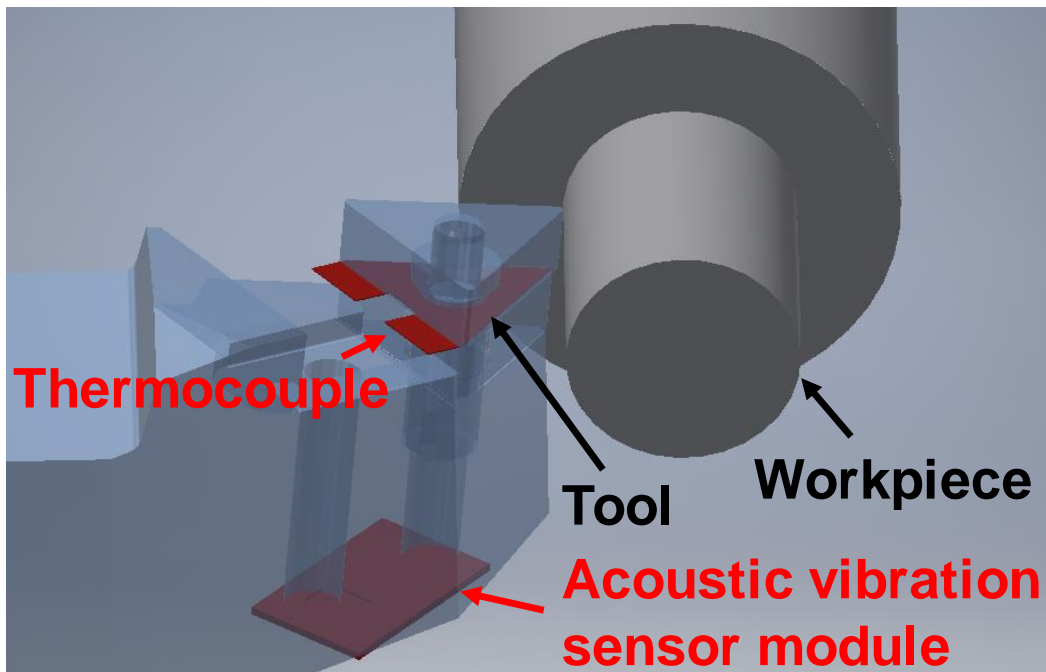


圖 2- 18 於監控車床切削條件的感測器安裝位置透視圖



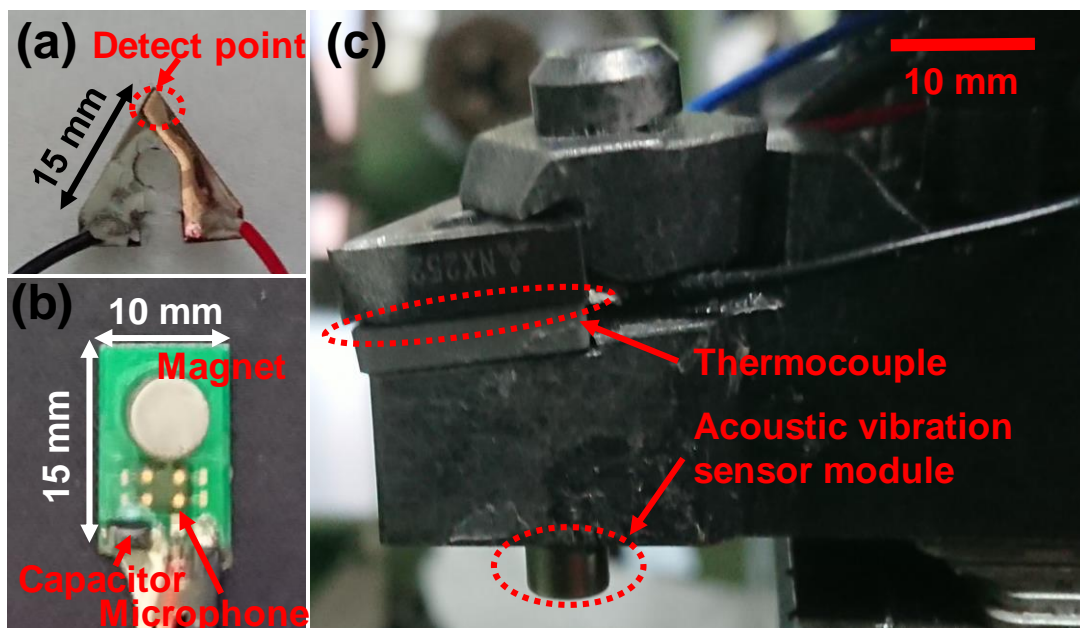


圖 2-19 感測器模組成品照片與訊號量測系統架設之照片 (A) 薄膜熱電偶成品 (B)微機電麥克風模組成品 (C) 完成感測器架設之車刀架照片。

圖 2-20 為車刀架之上視照片，顯示各種感測器之訊號連接線之走線方式，其中薄膜熱電偶與冷端補償之訊號線皆從車刀後方之間隙拉出，而微機電麥克風模組之訊號連接線則是從車刀架之下方，經過側邊在與其他訊號線會合後拉出。

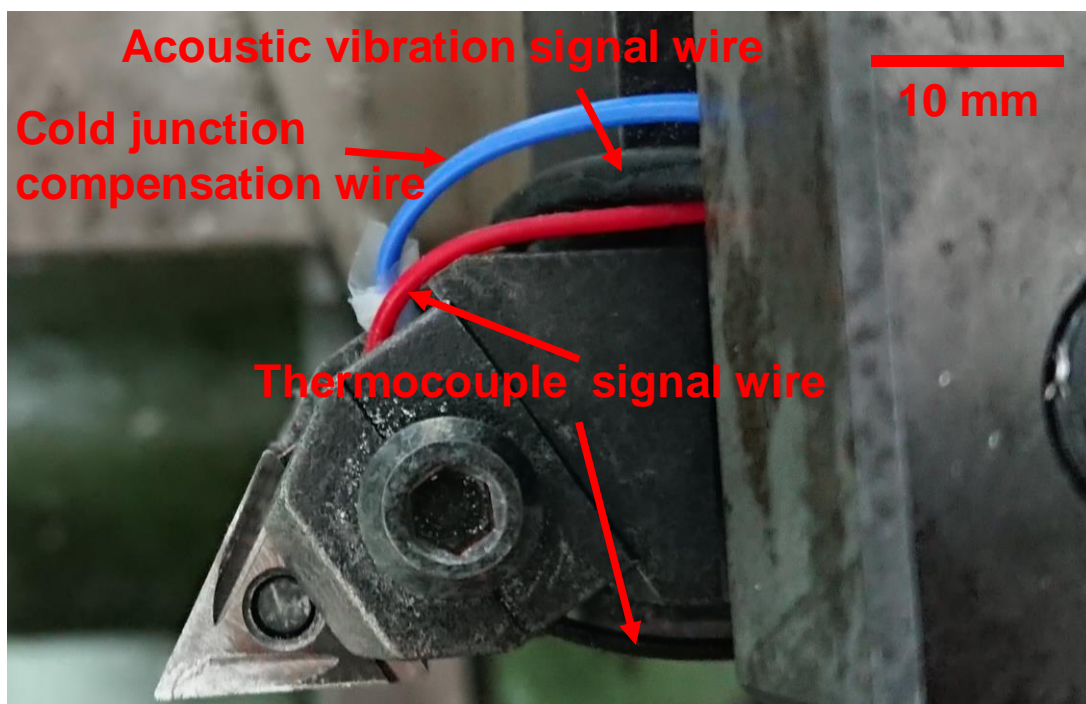


圖 2-20 完成感測器架設之車刀架上視照片

## 第三章 實驗結果與討論

### 3.1 感測電路硬體架構

圖 3-1 為本實驗所開發之感測電路原型機，該電路板長寬分別 48.0 mm 與 71.9 mm，內部涵蓋溫度感測電路、振動聲學訊號收集電路以及與單晶片電腦 (Raspberry Pi Zero W) 之間的連接埠，連接時單晶片電腦將位於電路版之正下方，並提供感測電路中所使用之電源，包含兩塊晶片以及麥克風之供電；而電路板上方則是用於連接麥克風以及熱電偶，同時也留下日後用於擴充之連接埠。

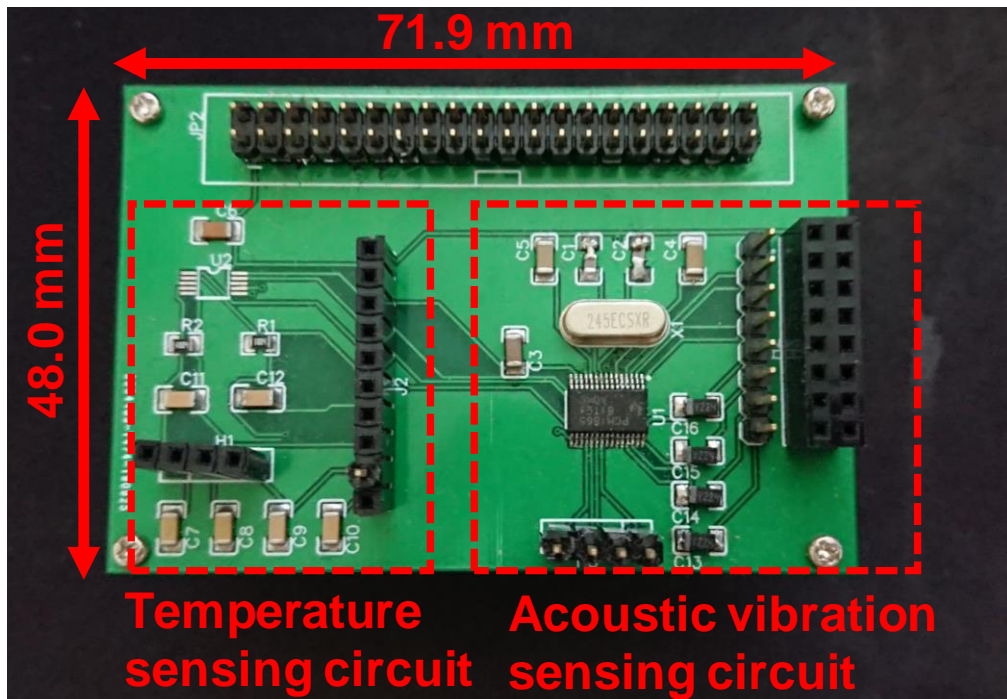


圖 3-1 所設計之感測電路原型機

為了衡量所設計之振動聲學訊號感測電路的量測效能，這邊同時使用市售之錄音介面(UAC 8, Zoom Corp., Japan)與所開發之訊號感測電路，進行同一訊號源之訊號採集，並比較其量測結果。由於市售之錄音介面不適合移至工廠量測車床訊號，使用磨豆機空轉之振動訊號作為訊號源進行評估，如圖 3-2 所示，將麥克風模組貼附於磨豆機之機殼上，量測磨豆機空轉時的訊號，將其輸出並聯至市售之錄音介面以及所開發之訊號感測電路進行量測，以確保輸入訊號完全一致。



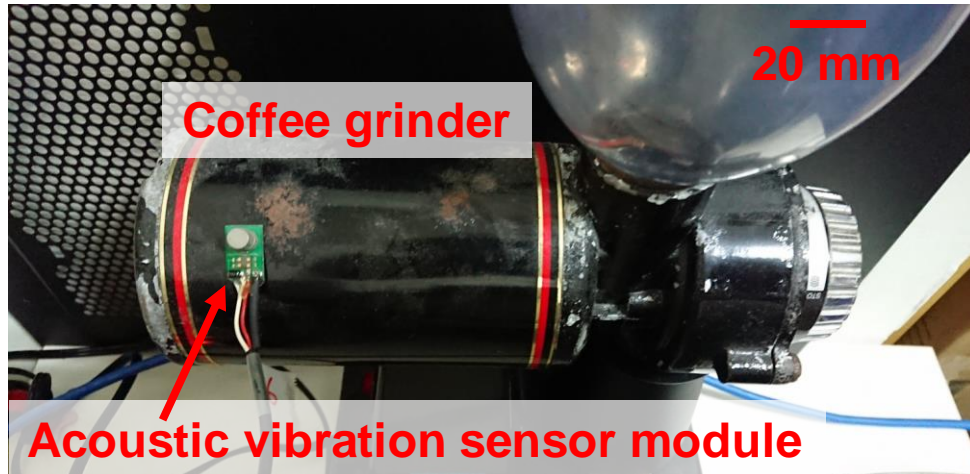


圖 3-2 振動聲學訊號感測電路測試實驗設置

圖 3-3 為其量測結果，其中圖 3-3(A)是使用市售之錄音介面採集到的訊號時頻圖，圖 3-3(B)則為使用所設計之訊號感測電路所量測，磨豆機空轉振動訊號的時頻圖，圖 3-3(C)為使用市售錄音介面採集到的訊號之頻譜圖，最後圖 3-3(D)為使用所設計之電路所量測到的磨豆機空轉振動訊號，經分析而得之頻譜圖。

比較兩訊號採集介面所收集到之訊號，雖然時頻圖所能提供之資訊遠多於頻譜圖，但在這樣的比較當中，較難以以肉眼對時頻圖直接進行量化分析，僅能看出其訊號有所差異，因此在這邊主要比較圖 3-3(C)與圖 3-3(D)。首先，從訊號強度部分可看出，市售之錄音介面採集到的訊號其訊號強度大於所設計之感測電路，其原因為市售之錄音介面具有內建且可控的訊號放大電路，而本研究所設計之電路中為了降低這方面的成本與減少電路之複雜度，並無放大電路之設計，但比較兩圖，雖然所設計之電路收集到之訊號強度弱於市售之錄音介面，凡於圖 3-3(C)的訊號頻譜圖中出現訊號強度局部峰值，於圖 3-3(D)之相應位置亦皆會出現訊號局部峰值。由此可判斷所設計之訊號感測電路雖然其效能稍弱於市售之錄音介面，但其所量測之訊號仍具有可信度。且比較設計之電路之成本與市售之錄音介面的售價，所設計之電路其整體成本約為市售錄音介面售價的十分之一，因此所設計之電路在堪用的狀況下具有低成本之優勢，滿足研究初期所設定之目標。

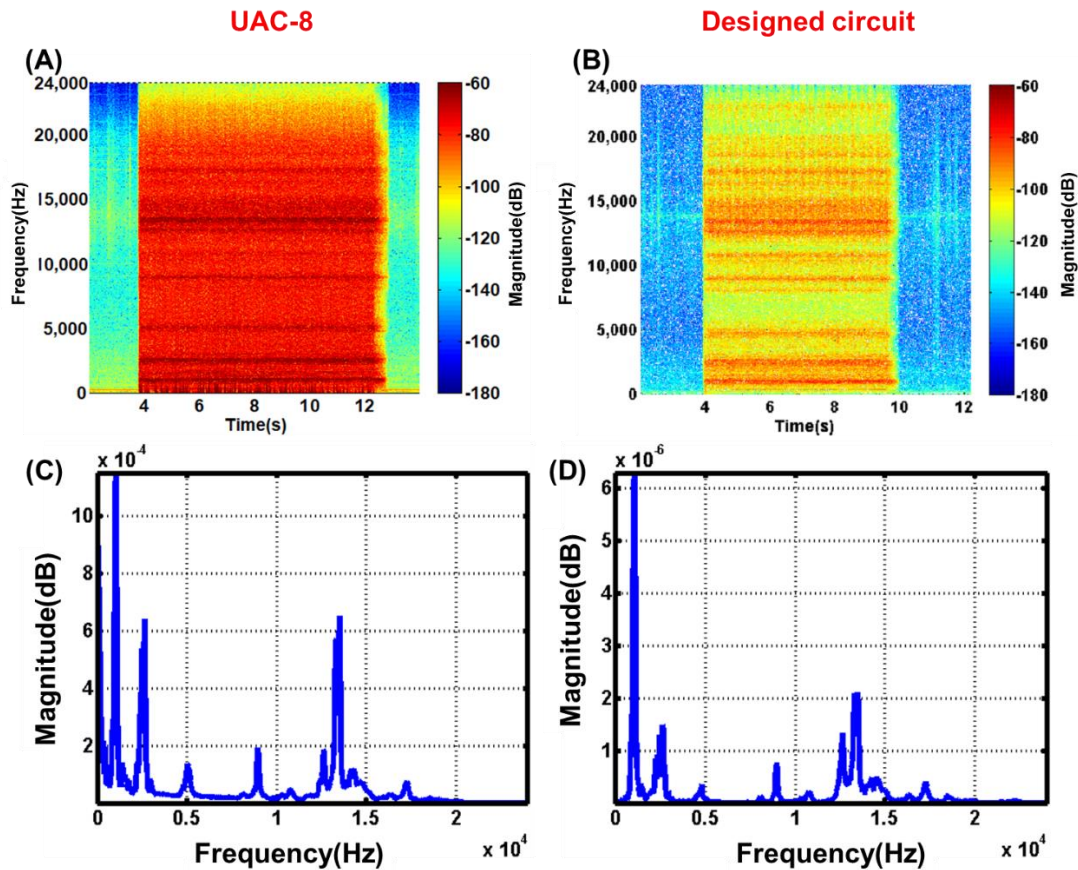


圖 3-3 振動聲學訊號感測電路測試結果圖。(A)市售之錄音介面採集之訊號的時頻圖 (B)所設計之訊號感測電路採集之訊號的時頻圖 (C)市售錄音介面採集到的訊號之頻譜圖 (D)所設計之電路採集之訊號分析而得之頻譜圖。

### 3.2 薄膜熱電偶之熱電特性

為了量測分析實驗中所製造之薄膜熱電偶的熱電特性，使用 2.8 節前半所介紹之量測架構進行量測，其實驗結果則列於圖 3-4。其中圖 3-4(A)是未經處理之原始數據，而圖 3-4(B)則是經過濾波與座標刻度調整後之數據。於圖 3-4(A)中熱電壓值以藍色實線標示對應左側之 y 軸的電壓座標，而冷端溫度、熱端溫度以及溫度差則以虛線表示，對應於右側之溫度軸。首先黑色虛線的冷端溫度並不受電熱板影響，而持續維持於室溫，其次綠色虛線之熱端溫度為實驗中所設定的值，其分別於三個不同高溫，進行一段時間之持溫，用以衡量熱電偶的量測是否會擁有時間延遲，最後則以紅色虛線標示冷熱端之間的溫差，若熱電偶之特性理想，

其藍色實線之熱電響應值應與綠色虛線重合。然而所設計之熱電偶會受雜訊影響，而持續進行抖動，因此，使用 2.7 節所敘述之數位濾波處理，其結果如 3-4(B)所示，圖中藍色的薄膜熱電偶的熱電訊號對應於左側之電壓值，而熱電偶冷端與熱端之間的溫差則以紅色虛線標示對應於右側之溫度軸，由圖中可看出，經過數位濾波之熱電偶訊號非常貼近於冷熱端之間的溫差，因此，本實驗所設計之熱電偶與市售之 K 型熱電偶之溫度量測具有能互相對應的溫度量測曲線。

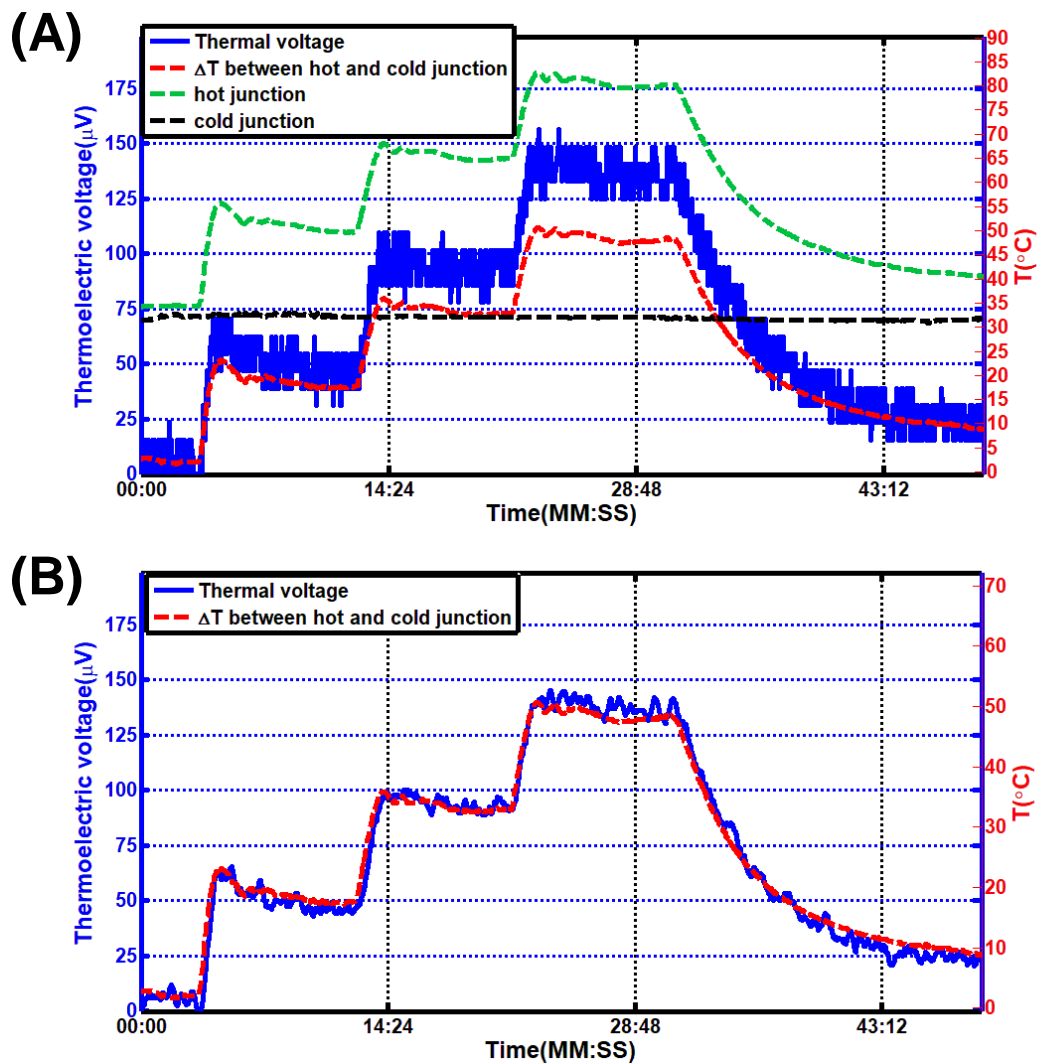


圖 3-4 薄膜熱電偶的熱電特性量測結果。(A)所量測的原始熱電壓值、熱電偶冷端、熱端溫度以及冷熱端之間溫差隨時間的變化 (B)經過數位濾波的熱電壓值與熱電偶冷熱端之間溫差隨時間的變化。

圖 3-5 便是由此定義從圖 3-4 所轉換而成之圖型，圖 3-5(A)為將圖 3-4(B)之熱電壓訊號轉換為席貝克係數後，所繪之席貝克係數、溫度隨時間之變化圖。而圖 3-5(B)則是使用溫度差與熱電壓訊號作為兩軸進行做圖而得，於此圖中斜率便會為熱電偶席貝克係數。由圖 3-5(A)可以發現於測試初期，當冷熱端之間的溫差小於 5°C 時，由於做為分母之溫差極小，因此以此時數據所計算之席貝克係數極不穩定，而隨著溫度的上升席貝克係數便會趨於一個定值，也就是圖中虛線所描繪的席貝克係數平均值其值為 2.7  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ，且於同一片薄膜熱電偶重複量測將時極為穩定。然而統計所製作的十二片熱電偶之席貝克係數，其平均值與標準差則分別為 3.0  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$  以及 0.7  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ，顯示在不同片之間之穩定性不算特別高，推測為濺鍍時，由於擺設位置差異，導致的金屬層厚度產生變異所造成。因此在後續實驗中計算量測切削溫度時，會以當下用於量測之特定熱電偶的席貝克係數，計算熱電偶兩端之溫度差，配合市售之 K 型熱電偶用於冷端溫度補償計算切削溫度，所使用之轉換公式如下

$$T = T_{room} + \varepsilon_k / \alpha_{sk} + \varepsilon_t / \alpha_{st} \dots \dots \dots (3-1)$$

$T$ ：所量測之溫度

$T_{room}$ ：量測時之室溫

$\varepsilon_k$ ：K 型熱電偶所量測之熱電壓

$\alpha_{sk}$ ：K 型熱電偶之席貝克係數

$\varepsilon_t$ ：本研究開發之熱電偶所量測之熱電壓

$\alpha_{st}$ ：本研究開發之熱電偶的席貝克係數

然而熱電偶之量測通常會具備一定之遲滯現象(Hysteresis)，也就是其熱電壓值不只與當下溫度，同時會與其過去狀態相關，這樣的特性可以從熱電壓訊號與溫差圖中看出來。如圖 3-5(B)所示，於熱電壓訊號與溫差圖中，若將熱電偶之電壓訊號分為溫度上升段與溫度下降段，可以明顯看出這兩條線並不會重合，如該圖中，紅色的溫度上升曲線與藍色的溫度下降曲線並不會重疊，當熱電偶溫度下

降時，其所輸出之電壓訊號會以較慢的速度下降。因此使用公式 3-1 的線性方式計算溫度時會與實際溫度擁有一定程度之變異，舉例而言對圖 3-5(B)繪製線性趨勢線  $\varepsilon_k = 2.7 * \Delta T$  時，得到之決定係數(coefficient of determination,  $R^2$ )會是 0.97。但於切削過程中，切削溫度的主要關切點在於，其會與刀具磨損產生相互助長，當切削溫度過高時會使刀具更容易磨損，且磨損之刀具則會使溫度更容易上升，於檢測中通常為設定溫度過高之閾值，因此於切削溫度之量測時，主要關心的數值為車削過程中所達到之最高溫度，而非其散熱速或降溫速度，因此這樣得磁滯現象並不會對於檢測目的產生過大影響，能放心的使用熱電偶作為感測元件。

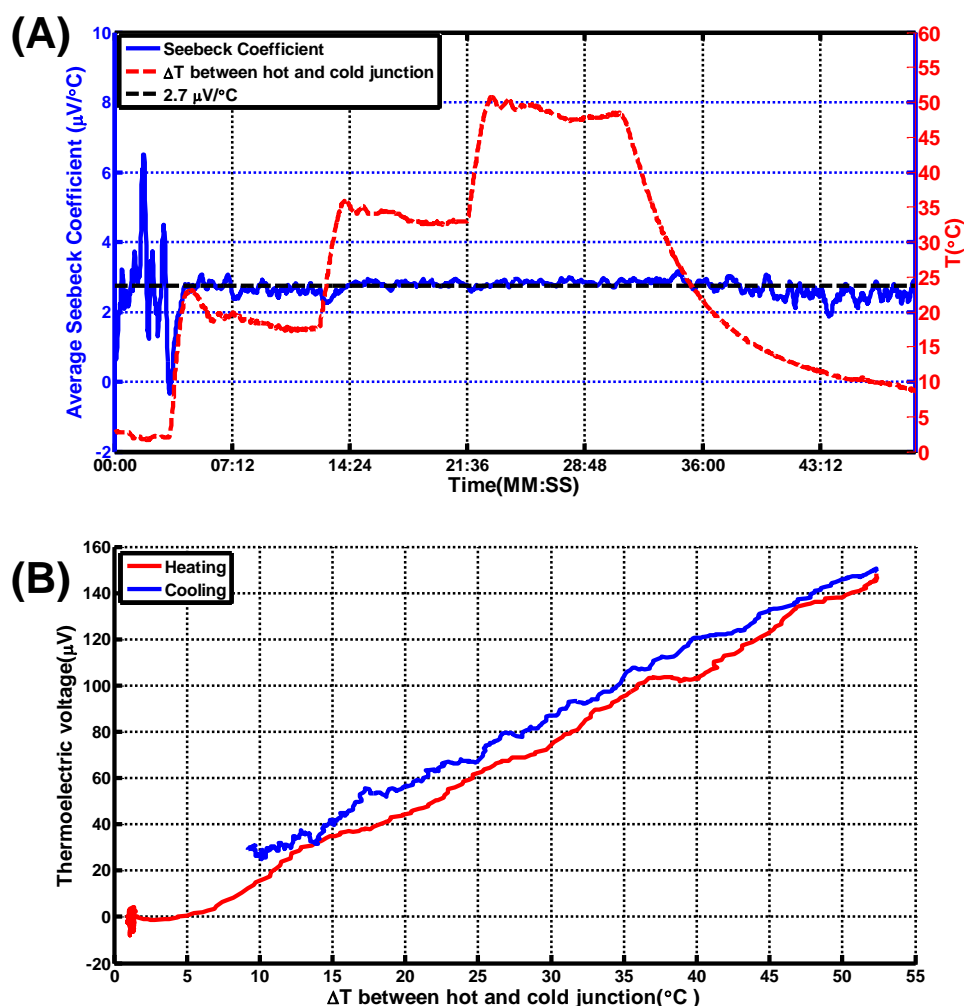


圖 3-5 薄膜熱電偶的熱電特性。(A)薄膜熱電偶之席貝克係數與冷熱端之間溫差隨時間的變化，顯示溫差在  $5^{\circ}C$  以上時熱電偶之席貝克係數趨於定值 (B)薄膜熱電偶在升溫以及降溫時其熱電壓與溫度之關係，展示了熱電偶的磁滯現象。



### 3.3 實際車削量測

對於實際車削時，之訊號量測本研究分為兩個部分作進行探討，其中第一部分比較一把全新的車刀在固定主軸轉速與進給速率下，以不同之切削深度進行切削，而第二部分則是固定主軸轉速、進給速率以及切削深度，比較使用新的車刀與另外兩把不同磨損程度之車刀，進行車削時所量測訊號之差異。

#### 3.3.1 比較不同切削深度

為了方便比較車削時，不同車削深度對量測訊號之影響，進行正式量測前會先將工件車削成同心圓階梯狀，如圖 3-6 所示，使得車削後進行數據分析時，可以直接以時域上訊號的變化比較不同的切削厚度，而更方便的進行訊號的分析比較，同時也更能證明該分析結果為車削深度對量測訊號之影響而非其他外界因素。

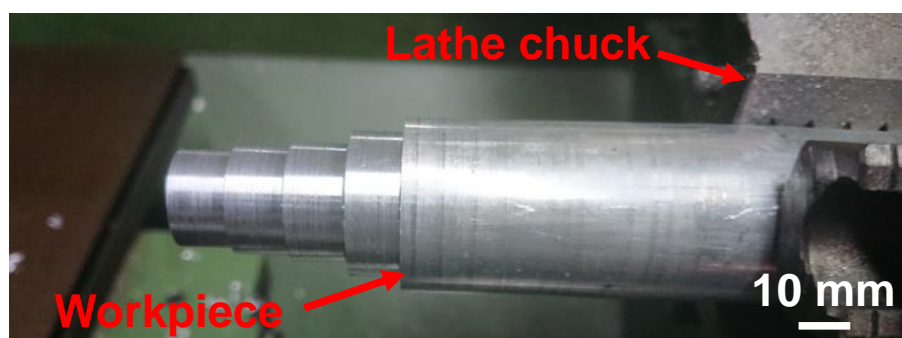


圖 3-6 正式車削所設計之工件照片。

於實際車削時，所使用之車刀(TNMG160404R-2G NX2525, Mitsubishi, Japan)為無塗層之陶瓷金屬車刀片，安裝於右手外徑車刀架(MTJNR 2020K16, Kuyama, Taiwan)上，進行 6061 鋁合金棒的車削。車削參數的設定上，由於所設計之對大切削深度較大，為確保安全性以 650 RPM 的轉速進行慢速車削，進給速度則為 0.037 mm/rev.，最後關於切削深度與工件伸出夾爪之距離之設計，如圖 3-7(A)所示，所設計之車削分為i到v五個不同階段，車削深度依序為 0.5, 1.5, 2.5, 5.0 以及 7.5 mm，而每一階段之車削長度皆為 10.0 mm，所車削之工件最寬位置之直徑為 32.0 mm，而經車削後於該位置則會剩下直徑為 17.0 mm 的圓柱，另外伸出夾爪而不受車削之距離會固定為 50.0 mm，而總伸出量便會是 100.0 mm。而由於主軸

之轉速為 650 RPM，配合車削後之直徑 17.0 mm，根據公式 3-2 此時所對應之切削速度約為 35 m/min，落於所使用之車刀適用之切削速度 30 到 190 m/min 中。

$$V_c = \frac{\pi D_m n}{1000} \dots\dots\dots(3-2)$$

$V_c$ ：切削速度(cutting speed)

$D_m$ ：工件材料直徑

$n$ ：主軸轉速

圖 3-7(B)為頻率 20.0 kHz 到 24.0 kHz 之間，訊號總強度對時間之關係，在該圖中，可以看到當車削開始進行時訊號強度會從-100 dB 開始上升，於切削區域i訊號之強度則約為-90 dB，之後隨著切削深度逐階的上升，於圖中亦可看出明顯之段落差。然而這樣的訊號上升只持續到車削區域iv，之後便不再繼續發生，由此可知這樣的訊號強度上升與實際切削深度並非線性之對應關係。於前兩次的切削深度增加，其段差分別為剛開始車削進入i區的 0.5 mm，以及從i區進入ii區的 1.0 mm，但於這兩個時間位置強度之增加量都約為 10 dB，而隨著車削繼續向後進行，訊號增強的幅度也越來越小，最後則止步於區域iv的 -65 dB。雖然車削深度的增加與訊號強度的增強量並沒有直接的對應關係，但兩者之變化具有相同之趨勢，未來仍可能以此趨勢評估切削深度之變化。

而圖 3-7(C)為所量測到之切削溫度與時間之關係圖，圖中可以看出，伴隨車削的開始，切削溫度開始緩步上升，而這樣上升的速率會隨著切削深度的增加而增加，而於此次實驗中，該溫度之最大值也就是最大切削溫度約為 100°C。

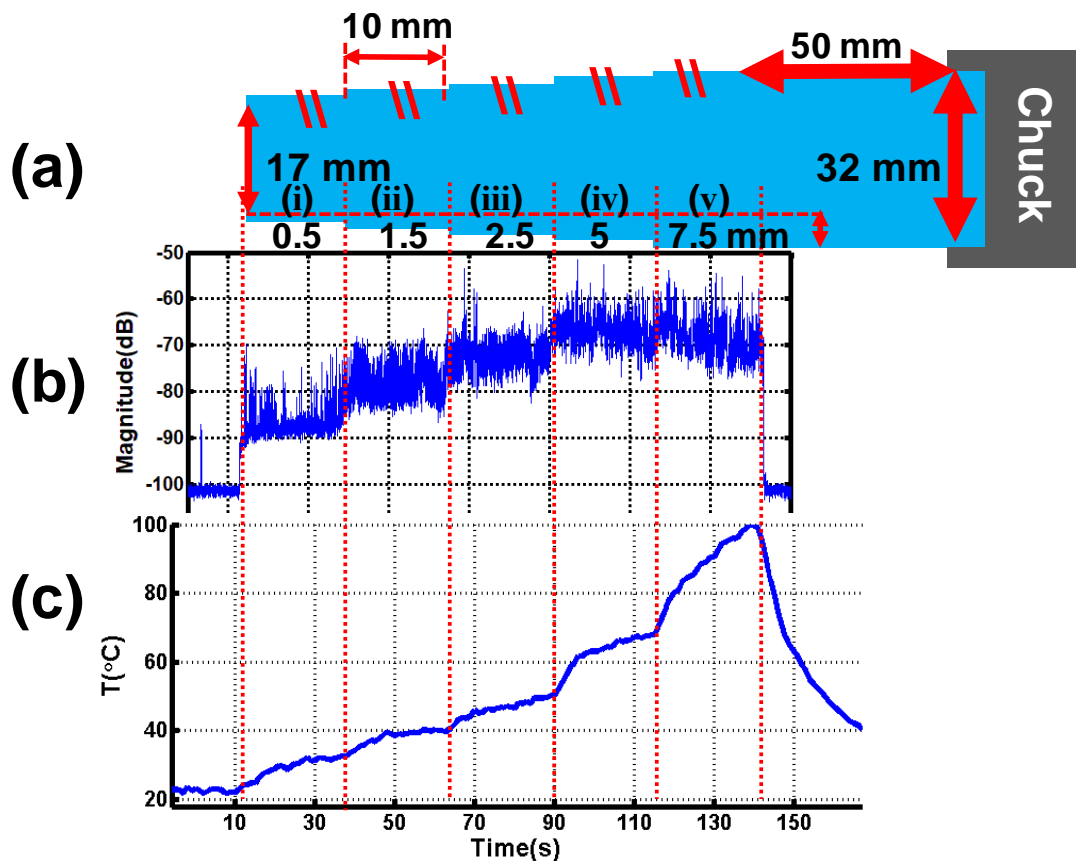


圖 3-7 不同車削深度下的聲學振動以及其切削溫度訊號。(A)車削測試之工件設計示意圖 (B)20.0 kHz 到 24.0 kHz 之間之訊號強度對時間之關係圖 (C)切削溫度對時間之關係圖。

而圖 3-8 則解釋了圖 3-7(B)中，選擇以頻率 20.0 kHz 到 24.0 kHz 之間之訊號進行做圖的原因，其中圖 3-8(A)為對車削訊號進行分析而得之時頻圖。圖中可明顯看出，車削振動訊號於 5.0 kHz 附近擁有最強的訊號，且在時域分析上，車削之開始與結束之時刻，於時頻圖中顯示為中高頻段兩個紅色與綠色範圍之交界，其邊界非常清楚，而對於 i 到 v 五個不同之車削深度，於時頻圖僅能稍微看出其差異但卻難以量化。因此會對於不同頻段分別繪製訊號強度時間圖以進行分析，圖 3-8(B)為頻率從 0 Hz 到 5.0 kHz 之間之訊號強度對時間之關係，雖然車削之開始與結束之訊號仍然明顯但對於不同車削深度幾乎沒有判別能力。圖 3-8(C)以及圖 3-8(D)分別為頻率從 5.0 kHz 到 10.0 kHz 之間以及頻率從 10.0 kHz 到 20.0 kHz 之間訊號強度對時間之關係，其中圖 3-8(C)對於車削深度變化與圖 3-8(B)一樣幾



乎沒有判別能力，而於圖 3-8(D)中雖然能稍微分辨車削深度，但其判別能力依舊不及圖 3-7(B)中，選用 20.0 kHz 到 24.0 kHz 區間的分析效果，高頻訊號受車削深度之影響較其他頻率段明顯，較可能以此做為分析車削深度變化之依據。

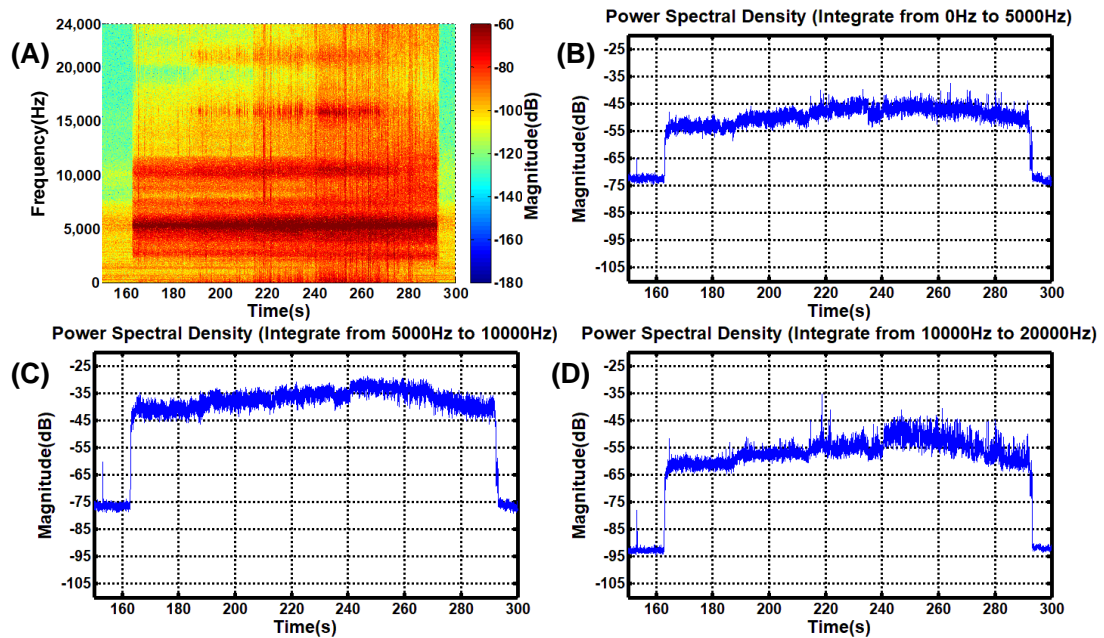


圖 3-8 訊號分析中對於分析頻段選擇。(A)量測訊號轉換之時頻圖 (B)頻率 0 Hz 到 5.0 kHz 之間的訊號強度時間圖 (C)頻率從 5.0 kHz 到 10.0 kHz 之間的訊號強度時間圖 (D)頻率從 10.0 kHz 到 20.0 kHz 之間的訊號強度時間圖。

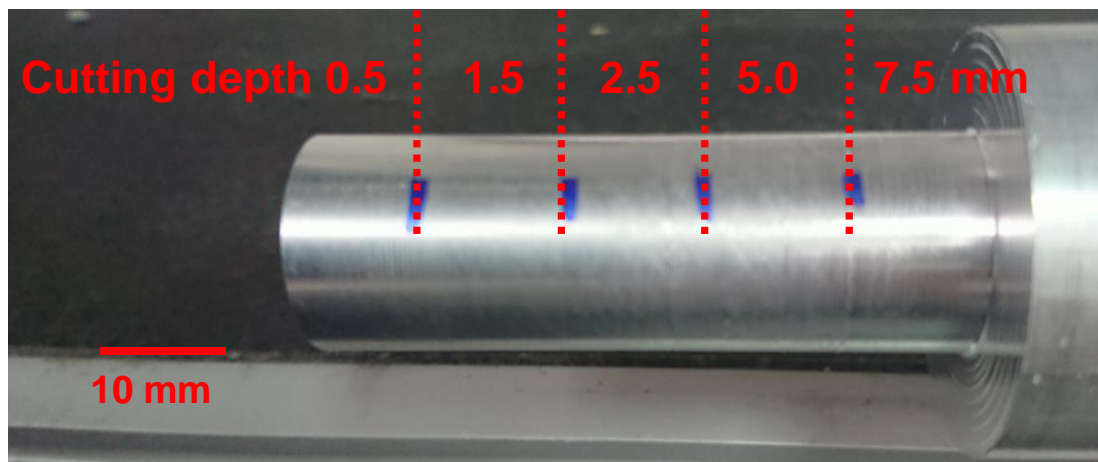


圖 3-9 不同切削深度下進行車削後工件之照片

圖 3-9 則是車削完成後之工件的照片，展示了不同切削深度時工件成品之表面形貌，而對於成品之表面粗糙度則使用表面粗糙度儀(SJ-400, Mitutoyo, Japan)進

行量測，表 3-1 則整理了不同切削深度下所測得之溫度、表面粗糙度以及表面粗糙度所對應之表面粗糙等級，表中顯示隨著切削深度的增加，溫度以及車削成品之表面粗糙度也都會隨之增加，且當切削深度達到 2.5 mm 以上時，於車刀背面所量測到的切削溫度便會突破 50°C，此時表面粗糙度便會超過 3.2 $\mu$ m，達到 N9 的表面粗糙度等級，顯示車削狀況逐漸變得不穩定，加工行為已經不太理想。而之後隨著切削深度的增加，溫度以及表面粗糙度也都會更進一步的增加，甚至達到 N10 的表面粗糙度等級，表示此時已經在進行不穩定之車削，已經超出正常切削能夠使用之切削深度區間，已經大幅降低成品之品質。由此現象可認為在低速車削下若溫度超過 50°C，車削便可能出現之不穩定的狀況，這會大幅降低車削成品之品質。

表 3- 1 不同切削深度下所測得之最高溫度與成品的表面粗糙度

<b>Cutting depth (mm)</b>	<b>0.5</b>	<b>1.5</b>	<b>2.5</b>	<b>5.0</b>	<b>7.5</b>
<b>T<sub>max</sub> (°C)</b>	<b>32.7</b>	<b>39.7</b>	<b>50.5</b>	<b>67.9</b>	<b>100.0</b>
<b>Ra (<math>\mu</math>m)</b>	<b>1.20</b>	<b>1.34</b>	<b>3.30</b>	<b>7.71</b>	<b>6.55</b>
<b>ISO1302</b>	<b>N7</b>	<b>N7</b>	<b>N9</b>	<b>N10</b>	<b>N10</b>

### 3.3.2 比較不同磨損程度之車刀

為了比較不同磨損程度之車刀與訊號之間的關係，於實驗中使用不同磨損程度的車刀片，以相同的加工條件進行 6061 鋁合金棒之加工，如圖片 3-10 所示，由左至右分別為新的、磨損的以及斷裂的車刀片，於實驗中便是使用圓圈所標記的切削刃，在車削條件之設計上，與 3.3.1 節相同，主軸轉速與進給速度分別為 650 RPM 以及 0.037 mm/rev.，而車削深度則固定為 1 mm。加工之工件則為直徑 32 mm 之 6061 鋁合金圓柱，加工後所剩於之圓柱的直徑則為 30 mm，由公式 3-2 此時的切削速度約為 61 m/min，如圖 3-11 所示，工件伸出夾爪而不受車削之距離會固定為 50 mm，而受加工之長度則為 30 mm。

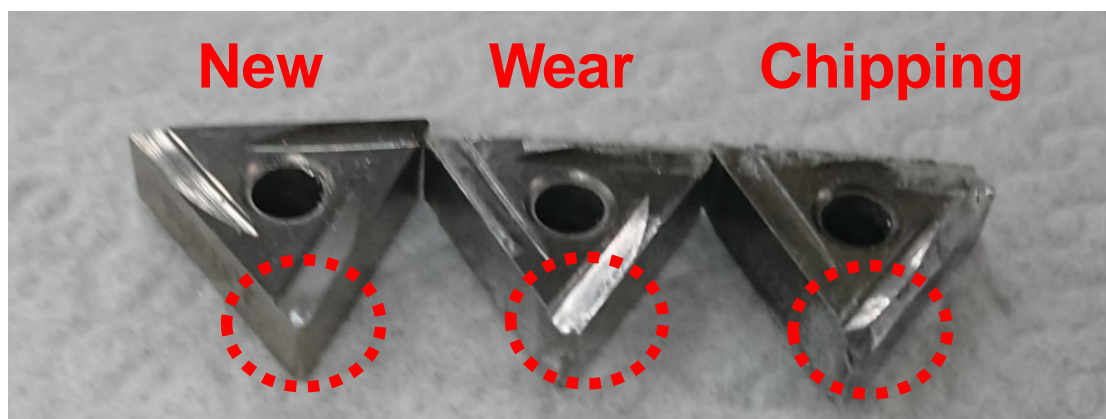


圖 3- 10 車刀之照片。左至右分別為新的、磨損的以及斷裂的車刀片。

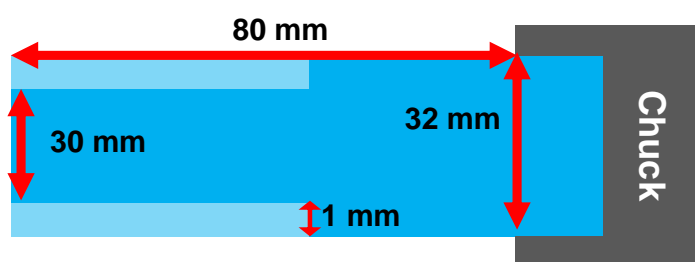


圖 3- 11 車削之工件尺寸參數示意圖。

測試結果中，由於切削深度固定不隨時間變化，單純進行時域分析將只能顯示車削之開始或結束等特異點，因此在不同磨損程度的分析上將進行頻域分析。分析結果如圖 3-12 所示，圖中顯示新車刀、磨損程度愈漸嚴重之車刀之三次車削以及最後斷裂後的車刀之車削震動訊號強度在頻率上的分布。首先 5.0 kHz 之振動訊號對於不同磨損程度之車刀極不敏感，但卻非常穩定不論車刀磨損程度如何，其訊號強度都在 -30 dB 左右幾乎沒有任何變化；其次對於已經斷裂之車刀，其車削震動訊號強度在各個頻段上幾乎都大於其他四組車削，且在 3.5 kHz 以及其倍頻附近都有明顯之特徵峰；第三不同磨損程度之車刀之訊號在 5.0 kHz 以下之低頻訊號幾乎沒有明顯差異，顯示低頻訊號無法用於分析車刀之磨損情形，而在 10.0 kHz 附近以及 15.0 kHz 以上之高頻訊號位置，能明顯觀察到車削震動訊號隨著車刀磨損之變化，尤其在 10.0 kHz 附近該變化最為明顯。

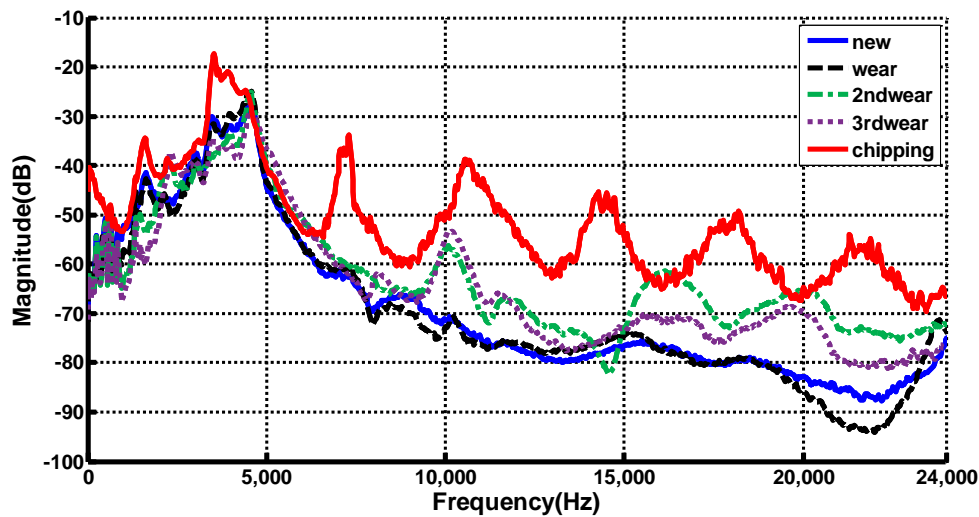


圖 3- 12 不同磨損程度車刀之震動訊號頻譜圖。

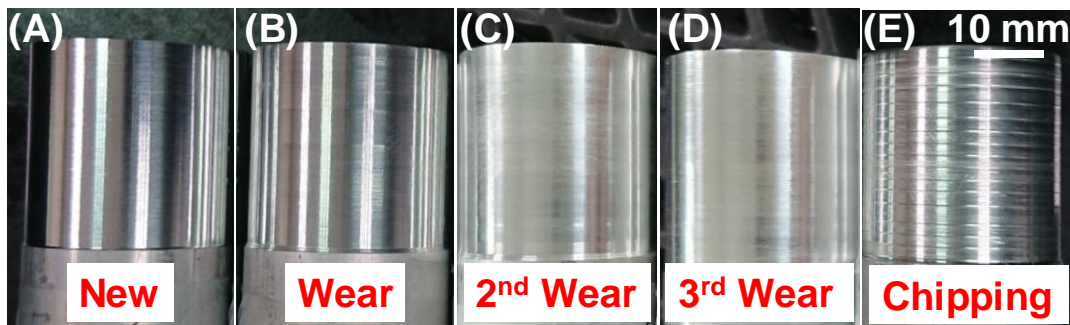


圖 3- 13 以不同磨損程度之車刀進行車削後之工件照片 (A)全新的車刀 (B)第一次磨損車刀 (C)第二次磨損車刀 (D)第三次磨損車刀 (E)斷裂之車刀。

圖 3-13 為五種不同磨損程度之車刀車削後之工件照片，車削過後之圓柱直徑為 30.0 mm，而所車削之長度則約為 30.0 mm，比較圖 3-13(A)到圖 3-13(E)可明顯看出圖 3-13(E)以斷裂之車刀進行車削之工件成面之表面極為粗糙，而其他四組則較難以肉眼直接判斷其表面粗糙程度。表 3-2 則整理了不同磨損程度之車刀車削時所測得之溫度、表面粗糙度以及所對應之表面粗糙等級，表中顯示隨著車刀磨損的加重，溫度以及車削成品之表面粗糙度也都會隨之增加，其中當斷裂車刀進行車削時，切削溫度以及表面粗糙度均會出現極劇烈的上升幅度，顯示此時車削出現嚴重異常；其次，當車刀產生一定程度之磨損後，切削溫度才會出現較大之上升幅度，如表中於第二次與第三次磨損車刀之車削之間才出現較為明顯

之溫度上升；第三，車削成品的表面粗糙度會隨著車刀之磨損程度出現較為穩定的增幅直到車刀斷裂，而由於此車削時所選定之切削厚度為精車削之範圍，磨損之車刀所切削之成品其表面粗糙度仍在 N8 之表面粗糙度等級，仍屬於正常車削之範圍內。

表 3-2 不同磨損程度之車刀車削時的最高溫度與成品的表面粗糙度

	New	Wear	2ndwear	3rdwear	Chipping
$T_{max}$ (°C)	35.3	37.5	38.3	49.4	72.0
Ra (µm)	1.19	1.48	1.75	2.07	13.99
ISO1302	N7	N7	N8	N8	N11

綜合圖 3-12 以及表 3-2 可以發現在 10.0 kHz 之車削震動訊號能與表面粗糙度等級擁有一定程度之對應關係，首先對於新的車刀以及第一次的磨損車刀車削，兩者在 10.0 kHz 之車削震動訊號強度均在 -70 dB 附近，並無明顯差異，而此兩次車削之溫度以及成品之表面粗糙度都極為相近，顯示新的車刀以及第一次的磨損車削之加工狀態極為接近。而隨著車刀的磨損當表面粗糙度等級達到 N8 時在 10.0 kHz 之車削震動訊號都會達到 -60 dB 的強度，且該訊號之強度會隨著磨損程度的增加而上升，另外雖然切削溫度的上升與表面粗糙度均會隨著車刀的磨損而上升，但切削溫度開始大量上升之臨界值與車削之表面粗糙度等級並無直接關係。最後對於 10.0 kHz 之車削震動訊號強度，本研究認為可以設定 -60 dB 以及 -50 dB 兩閾值，分別對應車刀較為嚴重之磨損以及車刀之斷裂訊號。

## 第四章 結論與未來展望

### 4.1 結論

本研究成功開發了一套基於微機電的感測器與單晶片電腦的車床切削監測系統，用於量測切削溫度以及車刀之聲學振動訊號。由所開發之鎳-銅薄膜熱電偶以及微機電麥克風模組，成功測量車床之切削溫度以及聲學振動訊號。特別設計的薄膜熱電偶可以直接夾緊在車削工具下方，避免傳統上切削溫度感測器安裝時所需的額外加工，大幅降低了量測成本；微機電麥克風模組則能直接透過磁鐵吸附於車刀架上，其裝設位置位於車刀片之正下方，透過將微機電麥克風之導音孔直接緊貼於車刀架表面，可以直接接收由車刀架傳遞之訊聲學振動號，同時也避免外界環境雜訊之干擾。

薄膜熱電偶之訊號透過濾波電路以及數位濾波處理，能有效濾除溫度量測上所受之雜訊干擾，使所量測之溫度訊號於測試中能有效貼合於市售之 K 型熱電偶，而所設計之鎳-銅薄膜熱電偶之席貝克係數約為  $3.0 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ，能有效用於量測切削溫度。於實際車削量測中，比較了不同的切削深度以及三種不同磨損程度之車刀；其中為比較切削深度，設計了 0.5、1.5、2.5、5.0、7.5 mm 五種切削深度，發現雖然在這五種切削條件下於 5.0 kHz 皆有最大之訊號強度，但高頻訊號對於切削深度之變化較為敏感，能透過高頻訊號之分析評估切削深度變化，而切削深度對於低頻訊號則幾乎沒有影響；而對於磨損車刀損之車削異常訊號，較適合以 10.0 kHz 附近之訊號進行評估與分析，於該頻段之分析能有效連接訊號、車削成品表面之粗糙度等級以及車刀之磨損情形，可以設定 -60 dB 以及 -50 dB 兩閾值用於評估，其中當訊號強度超過 -60 dB 時對應車刀較為嚴重之磨損以及 N8 之表面之粗糙度等級；而訊號強度超過 -50 dB 時則表示車刀之斷裂以及異常車削所造成之 N11 的表面之粗糙度等級。而切削溫度雖然無法直接對應於車削成品之表面粗糙度，但當切削溫度臨近  $50^\circ\text{C}$  時便顯示此時車削可能出現之不穩定的狀況。

綜合前述幾點，高頻振動訊號適合用於評估切削深度的變化，而 10.0 kHz 之訊號強度則可以用來評估車刀的磨損程度，最後切削溫度的量測適合用來設定閾值，以避免切削溫度過高導致之車刀的磨損加快。

本研究已證明所開發之車床切削監測系統於實際應用之可能性，透過分析該系統所蒐集之訊號，能有效用於描述車床的車削狀態，且所開發之系統同時兼具低成本、安裝簡易、且整合無線的電路控制及資料存取系統等優勢，具有用於發展工業 4.0 領域之智慧車床系統的潛力。

## 4.2 未來展望

本研究所開發之車床切削狀態監測系統，透過將微機電麥克風緊貼於車刀架表面，解決的傳統上麥克風檢測容易受外界環境干擾之問題，且已經透過短時距傅立葉轉換進行時頻分析，顯示聲學振動訊號而能用於判斷磨損與正常車刀之差異等等。但這樣的分析方式仍無法直接用於評估車削成品品質，或者是用於生成更加適當之車削加工參數，且於溫度量測上所測得之溫度值目前僅用於測定切削溫度過高之閾值，而未能明確連接溫度隨著磨損程度之變化關係。

因此未來希望能大量應用此切削狀態監測系統，引入其他車削加工中之變因，諸如車刀與工件材料、車刀幾何形狀等等，以及將此系統拓展於各式車床當中使用，收集大量資料建立雲端資料庫，配合現時快速發展之各類人工智慧演算法，用於評估車刀壽命、車削品質等等，甚至於應用中依具車刀材料與工件之加工特性，提供更加適當之車削加工參數。

## 參考文獻

- [1] L. Monostori, B. Kádár, T. Bauernhansl, S. Kondoh, S. Kumara, G. Reinhart, O. Sauer, G. Schuh, W. Sihn, and K. Ueda, "Cyber-physical systems in manufacturing" *CIRP Annals*, vol. 65, pp. 621-641, 2016.
- [2] J. Lee, B. Bagheri, and H.-A. Kao, "A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems" *Manufacturing Letters*, vol. 3, pp. 18-23, 2015.
- [3] H. Lasi, P. Fettke, H.-G. Kemper, T. Feld, and M. Hoffmann, "Industry 4.0" *Business & Information Systems Engineering*, vol. 6, pp. 239-242, 2014.
- [4] M. Hermann, T. Pentek, and B. Otto, "Design principles for industrie 4.0 scenarios," in *2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, 2016, pp. 3928-3937.
- [5] V. Roblek, M. Meško, and A. Krapež, "A complex view of industry 4.0" *SAGE Open*, vol. 6, 2016.
- [6] M. Thomas, Y. Beauchamp, A. Youssef, and J. Masounave, "Effect of tool vibrations on surface roughness during lathe dry turning process" *Computers & industrial engineering*, vol. 31, pp. 637-644, 1996.
- [7] J. Masounave, Y. A. Youssef, Y. Beauchamp, and M. Thomas, "An experimental design for surface roughness and built-up edge formation in lathe dry turning" *International Journal of Quality Science*, vol. 2, pp. 167-180, 1997.
- [8] T. Tamizharasan, T. Selvaraj, and A. Noorul Haq, "Analysis of tool wear and surface finish in hard turning" *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 28, pp. 671-679, 2005.
- [9] I. ISO, "1302 (2002) Geometrical Product Specifications (GPS)-Indication of surface texture in technical product documentation" *International Organization for Standardization (ISO)*, 2002.
- [10] J. Krizbergs and A. Kromanis, "Methods for prediction of the surface roughness 3D parameters according to technological parameters," in *5th International DAAAM Baltic Conference, Tallinn*, 2006.
- [11] B. Geoffrey and A. K. Winston, "Fundamentals of machining and machine tools", ed: Marcel Dekker, Inc., New York, 1989.
- [12] W. Grzesik, "A revised model for predicting surface roughness in turning" *Wear*, vol. 194, pp. 143-148, 1996.
- [13] N. Deshpande and M. Fofana, "Nonlinear regenerative chatter in turning" *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 17, pp. 107-112, 2001.
- [14] M. Hasegawa, A. Seireg, and R. Lindberg, "Surface roughness model for turning"



- Tribology international*, vol. 9, pp. 285-289, 1976.
- [15] Y. Beauchamp, M. Thomas, Y. A. Youssef, and J. Masounave, "Investigation of cutting parameter effects on surface roughness in lathe boring operation by use of a full factorial design" *Computers & Industrial Engineering*, vol. 31, pp. 645-651, 1996.
- [16] D. Singh and P. V. Rao, "A surface roughness prediction model for hard turning process" *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 32, pp. 1115-1124, 2006.
- [17] W.-J. Lin, S.-H. Lo, H.-T. Young, and C.-L. Hung, "Evaluation of deep learning neural networks for surface roughness prediction using vibration signal analysis" *Applied Sciences*, vol. 9, 2019.
- [18] M. Mia and N. R. Dhar, "Prediction of surface roughness in hard turning under high pressure coolant using Artificial Neural Network" *Measurement*, vol. 92, pp. 464-474, 2016.
- [19] T. Özel and Y. Karpaz, "Predictive modeling of surface roughness and tool wear in hard turning using regression and neural networks" *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 45, pp. 467-479, 2005.
- [20] T. Sata, M. Li, S. Takata, H. Hiraoka, C. Q. Li, X. Z. Xing, and X. G. Xiao, "Analysis of surface roughness generation in turning operation and its applications" *CIRP Annals*, vol. 34, pp. 473-476, 1985.
- [21] O. Ryabov, S. Kano, H. Sawada, and J. Herwan, "Lathe machine as industrie 4.0 component (CPS)," in *2019 IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 2019, pp. 1656-1660.
- [22] M. A. Mannan, S. Broms, and B. Lindström, "Monitoring and adaptive control of cutting process by means of motor power and current measurements" *CIRP Annals*, vol. 38, pp. 347-350, 1989.
- [23] D. Lalwani, N. Mehta, and P. Jain, "Experimental investigations of cutting parameters influence on cutting forces and surface roughness in finish hard turning of MDN250 steel" *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 206, pp. 167-179, 2008.
- [24] H. Ravindra, Y. Srinivasa, and R. Krishnamurthy, "Modelling of tool wear based on cutting forces in turning" *Wear*, vol. 169, pp. 25-32, 1993.
- [25] L. Lee, "A study of noise emission for tool failure prediction" *International Journal of Machine Tool Design and Research*, vol. 26, pp. 205-215, 1986.
- [26] E. Kannatey-Asibu Jr and D. Dornfeld, "A study of tool wear using statistical analysis of metal-cutting acoustic emission" *Wear*, vol. 76, pp. 247-261, 1982.
- [27] T. Blum and I. Inasaki, "A study on acoustic emission from the orthogonal cutting process" *Journal of Engineering for Industry*, vol. 112, 1990.

- [28] I. Grabec and P. Leskovar, "Acoustic emission of a cutting process" *Ultrasonics*, vol. 15, pp. 17-20, 1977.
- [29] I. Inasaki, "Application of acoustic emission sensor for monitoring machining processes" *Ultrasonics*, vol. 36, pp. 273-281, 1998.
- [30] A. Diniz, J. Liu, and D. Dornfeld, "Correlating tool life, tool wear and surface roughness by monitoring acoustic emission in finish turning" *Wear*, vol. 152, pp. 395-407, 1992.
- [31] X. Li, "A brief review: acoustic emission method for tool wear monitoring during turning" *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 42, pp. 157-165, 2002.
- [32] M. Bever, E. Marshall, and L. Ticknor, "The energy stored in metal chips during orthogonal cutting" *Journal of Applied physics*, vol. 24, pp. 1176-1179, 1953.
- [33] M. B. da Silva and J. Wallbank, "Cutting temperature: prediction and measurement methods—a review" *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 88, pp. 195-202, 1999.
- [34] M. Davies, T. Ueda, R. M'saoubi, B. Mullany, and A. Cooke, "On the measurement of temperature in material removal processes" *CIRP annals*, vol. 56, pp. 581-604, 2007.
- [35] S. Kurada and C. Bradley, "A review of machine vision sensors for tool condition monitoring" *Computers in Industry*, vol. 34, pp. 55-72, 1997.
- [36] J. de Jesus Rangel-Magdaleno, R. de Jesus Romero-Troncoso, R. A. Osornio-Rios, E. Cabal-Yepez, and A. Dominguez-Gonzalez, "FPGA-based vibration analyzer for continuous CNC machinery monitoring with fused FFT-DWT signal processing" *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 59, pp. 3184-3194, 2010.
- [37] M. Kozochkin, N. Kochinev, and F. Sabirov, "Diagnostics and monitoring of complex production processes using measurement of vibration-acoustic signals" *Measurement Techniques*, vol. 49, pp. 672-678, 2006.
- [38] M. Lee, C. E. Thomas, and D. G. Wildes, "Prospects for in-process diagnosis of metal cutting by monitoring vibration signals" *Journal of Materials Science*, vol. 22, pp. 3821-3830, 1987.
- [39] S. Saravanan, G. Yadava, and P. Rao, "Condition monitoring studies on spindle bearing of a lathe" *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 28, pp. 993-1005, 2006.
- [40] N. H. Baharin and R. A. Rahman, "Effect of accelerometer mass on thin plate vibration" *Jurnal Mekanikal*, vol. 29, 2009.
- [41] T. Rus, M. Dular, B. Širok, M. Hočevár, and I. Kern, "An investigation of the relationship between acoustic emission, vibration, noise, and cavitation structures

- on a Kaplan turbine" *Journal of Fluids Engineering*, vol. 129, pp. 1112-1122, 2007.
- [42] R. O. Yavne, "Accelerometer" vol. United States Patent US3363470, 1968.
- [43] D. Ozevin, "Micro-electro-mechanical-systems (MEMS) for assessing and monitoring civil infrastructures," in *Sensor Technologies for Civil Infrastructures*, ed: Elsevier, 2014, pp. 265-302e.
- [44] O. Özşahin, H. N. Özgüven, and E. Budak, "Analysis and compensation of mass loading effect of accelerometers on tool point FRF measurements for chatter stability predictions" *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 50, pp. 585-589, 2010.
- [45] S. Uzawa and Y. Kikuti, "Diaphragm of dynamic microphone", ed: Google Patents, 1992.
- [46] A. J. Zuckerwar, "Theoretical response of condenser microphones" *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 64, pp. 1278-1285, 1978.
- [47] C. M. Wang, Y.-T. Lin, and C. H. Lin, "Monitoring of micro-stamping procedures utilizing MEMS microphones under acoustic vibration transduction," in *2017 IEEE 12th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS)*, 2017, pp. 106-109.
- [48] R. Svečko, D. Kusić, T. Kek, A. Sarjaš, A. Hančič, and J. Grum, "Acoustic emission detection of macro-cracks on engraving tool steel inserts during the injection molding cycle using PZT sensors" *Sensors*, vol. 13, pp. 6365-6379, 2013.
- [49] D. L. Blackburn, "Temperature measurements of semiconductor devices-a review," in *Twentieth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (IEEE Cat. No. 04CH37545)*, 2004, pp. 70-80.
- [50] P. R. Childs, J. Greenwood, and C. Long, "Review of temperature measurement" *Review of Scientific Instruments*, vol. 71, pp. 2959-2978, 2000.
- [51] A. Bohm, "Infrared temperature sensor", ed: Google Patents, 1992.
- [52] A. Van Herwaarden and P. Sarro, "Thermal sensors based on the Seebeck effect" *Sensors and Actuators*, vol. 10, pp. 321-346, 1986.
- [53] F. Warkusz, "The size effect and the temperature coefficient of resistance in thin films" *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 11, p. 689, 1978.
- [54] A. Basti, T. Obikawa, and J. Shinozuka, "Tools with built-in thin film thermocouple sensors for monitoring cutting temperature" *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 47, pp. 793-798, 2007.
- [55] A. Kus, Y. Isik, M. C. Cakir, S. Coskun, and K. Ozdemir, "Thermocouple and infrared sensor-based measurement of temperature distribution in metal cutting" *Sensors (Basel)*, vol. 15, pp. 1274-91, 2015.
- [56] M. Selek, S. Tasdemir, K. Dincer, and S. Baskaya, "Experimental examination of the cooling performance of Ranque-Hilsch vortex tube on the cutting tool nose

- point of the turret lathe through infrared thermography method" *International Journal of Refrigeration*, vol. 34, pp. 807-815, 2011.
- [57] D. A. Stephenson, "Tool-work thermocouple temperature measurements—theory and implementation issues" *Journal of Engineering for Industry*, vol. 115, 1993.
- [58] C. S. Smith, "Piezoresistance effect in germanium and silicon" *Physical Review*, vol. 94, p. 42, 1954.
- [59] H. Du and R. Bogue, "MEMS sensors: past, present and future" *Sensor Review*, 2007.
- [60] J. W. Judy, "Microelectromechanical systems (MEMS): fabrication, design and applications" *Smart Materials and Structures*, vol. 10, p. 1115, 2001.
- [61] V. Varadan and V. Varadan, "Microsensors, microelectromechanical systems (MEMS), and electronics for smart structures and systems" *Smart Materials and Structures*, vol. 9, p. 953, 2000.
- [62] M. Royer, J. Holmen, M. Wurm, O. Aadland, and M. Glenn, "ZnO on Si integrated acoustic sensor" *Sensors and Actuators*, vol. 4, pp. 357-362, 1983.
- [63] P. Scheeper, A. Van der Donk, W. Olthuis, and P. Bergveld, "A review of silicon microphones" *Sensors and actuators A: Physical*, vol. 44, pp. 1-11, 1994.
- [64] E. Kannatey-Asibu and D. A. Dornfeld, "Quantitative relationships for acoustic emission from orthogonal metal cutting" *Journal of Engineering for Industry*, vol. 103, 1981.
- [65] E. N. Diei and D. A. Dornfeld, "A model of tool fracture generated acoustic emission during machining" *Journal of Engineering for Industry*, vol. 109, 1987.
- [66] K. Gupta, "Vibration—A tool for machine diagnostics and condition monitoring" *Sadhana*, vol. 22, pp. 393-410, 1997.
- [67] N. Tandon and B. Nakra, "Comparison of vibration and acoustic measurement techniques for the condition monitoring of rolling element bearings" *Tribology International*, vol. 25, pp. 205-212, 1992.
- [68] L. Dan and J. Mathew, "Tool wear and failure monitoring techniques for turning—a review" *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 30, pp. 579-598, 1990.
- [69] W. Moebs, S. J. Ling, and J. Sanny, "University Physics Volume 1" 2016.
- [70] F. J. Fahy, "Measurement of acoustic intensity using the cross-spectral density of two microphone signals" *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 62, pp. 1057-1059, 1977.
- [71] W. Boyes, *Instrumentation reference book*: Butterworth-Heinemann, 2009.
- [72] N. Tandon and B. Nakra, "The application of the sound-intensity technique to defect detection in rolling-element bearings" *Applied Acoustics*, vol. 29, pp. 207-217, 1990.

- [73] R. N. Bracewell and R. N. Bracewell, *The Fourier transform and its applications* vol. 31999: McGraw-Hill New York, 1986.
- [74] J. Kopač and S. Šali, "Tool wear monitoring during the turning process" *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 113, pp. 312-316, 2001.
- [75] J. B. Allen and L. R. Rabiner, "A unified approach to short-time Fourier analysis and synthesis" *Proceedings of the IEEE*, vol. 65, pp. 1558-1564, 1977.
- [76] S. Orhan, A. O. Er, N. Camuşcu, and E. Aslan, "Tool wear evaluation by vibration analysis during end milling of AISI D3 cold work tool steel with 35 HRC hardness" *NDT & E International*, vol. 40, pp. 121-126, 2007.
- [77] M. Lebold, K. McClintic, R. Campbell, C. Byington, and K. Maynard, "Review of vibration analysis methods for gearbox diagnostics and prognostics," in *Proceedings of the 54th meeting of the society for machinery failure prevention technology*, 2000, p. 16.
- [78] D. Hochmann and E. Bechhoefer, "Envelope bearing analysis: theory and practice," in *2005 IEEE Aerospace Conference*, 2005, pp. 3658-3666.
- [79] S. Tyagi and S. K. Panigrahi, "An improved envelope detection method using particle swarm optimisation for rolling element bearing fault diagnosis" *Journal of Computational Design and Engineering*, vol. 4, pp. 305-317, 2017.
- [80] P. McFadden and J. Smith, "Model for the vibration produced by a single point defect in a rolling element bearing" *Journal of Sound and Vibration*, vol. 96, pp. 69-82, 1984.
- [81] Y.-T. Su, M.-H. Lin, and M.-S. Lee, "The effects of surface irregularities on roller bearing vibrations" *Journal of sound and vibration*, vol. 165, pp. 455-466, 1993.
- [82] Y. Su and Y. Sheen, "On the detectability of roller bearing damage by frequency analysis" *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 207, pp. 23-32, 1993.
- [83] Y.-T. Sheen, "An envelope detection method based on the first-vibration-mode of bearing vibration" *Measurement*, vol. 41, pp. 797-809, 2008.
- [84] M. Vetterli and C. Herley, "Wavelets and filter banks: Theory and design" *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 40, pp. 2207-2232, 1992.
- [85] J. Gomes and L. Velho, *From fourier analysis to wavelets* vol. 3: Springer, 2015.
- [86] J. Lin and L. Qu, "Feature extraction based on Morlet wavelet and its application for mechanical fault diagnosis" *Journal of Sound and Vibration*, vol. 234, pp. 135-148, 2000.
- [87] P. W. Tse, Y. a. Peng, and R. Yam, "Wavelet analysis and envelope detection for rolling element bearing fault diagnosis—their effectiveness and flexibilities" *Journal of Vibration and Acoustics*, vol. 123, pp. 303-310, 2001.
- [88] Y. Yoo and J.-G. Baek, "A novel image feature for the remaining useful lifetime

- prediction of bearings based on continuous wavelet transform and convolutional neural network" *Applied Sciences*, vol. 8, p. 1102, 2018.
- [89] A. Bruns, "Fourier-, Hilbert-and wavelet-based signal analysis: are they really different approaches?" *Journal of Neuroscience Methods*, vol. 137, pp. 321-332, 2004.
- [90] K. Acoustics, "SiSonic design guide, application note rev. 3.0" *Knowles Acoustics*, 2011.
- [91] M. Beckman and L. Chioye, "Precision thermocouple measurement with the ADS1118" *Texas Instruments*, 2013.
- [92] N. Semiconductors, "UM10204 I2C-bus specification and user manual" *User Manual*, vol. 4, 2014.

# 論文原創性報告

## 整合聲學振動及薄型溫度感測於車削品質監聽之應用

### 原創性報告

**4%**  
相似度指數

**3%**  
網際網絡來源

**2%**  
出版物

**4%**  
學生文稿

### 主要來源

<b>1</b>	Submitted to National Sun Yat-sen University 學生文稿	<b>1%</b>
<b>2</b>	etd.lib.nsysu.edu.tw 網際網絡來源	<b>&lt;1%</b>
<b>3</b>	Submitted to National Changhua University of Education 學生文稿	<b>&lt;1%</b>
<b>4</b>	Submitted to National Chung Hsing University 學生文稿	<b>&lt;1%</b>
<b>5</b>	relialab.org 網際網絡來源	<b>&lt;1%</b>
<b>6</b>	www.freepatentsonline.com 網際網絡來源	<b>&lt;1%</b>
<b>7</b>	"CAM", Springer Science and Business Media LLC, 1985 出版物	<b>&lt;1%</b>
<b>8</b>	dspace.vutbr.cz 網際網絡來源	<b>&lt;1%</b>

## 自述

姓名：高嘉駿 (Chia-Chun, Kao)

生日：1994/11/18

性別：男

電子信箱：m063020029@student.nsysu.edu.tw

學歷：

國立中山大學 機械與機電工程研究所 碩士 2017/9~2020/3

國立中山大學 機械與機電工程學系 學士 2013/9~2017/6

發表著作：

國內研討會

1. **Chia-Chun, Kao**, Che-Hsin Lin, “Flexible thin film thermocouple sensing system for temperature gradient measurement,” *Conference on Precision Machinery and Manufacturing Technology(PMMT 2019)*, Kenting, Pingtung, 22-24 May, 2019
2. **Chia-Chun, Kao**, Che-Hsin Lin, “Transparent and flexible thermocouple produced with ITO-AZO in commercial PET-based touch panel sheet,” *International Conference on Smart Sensors(ICSS 2019)*, Sheraton, Hsinchu, 3-4 June, 2019
3. **高嘉駿** 林哲信, “應用於溫度梯度感測之可撓性薄膜熱電傳感系統” 中國機械工程學會第三十六屆全國學術研討會(China Society of Mechanical Engineering—CSME), 台北, 台灣, 十二月, 2019