

中正嶺學報

第五十二卷 第一期

中華民國一一二年五月

目 錄

論文

1. 國軍庫儲單基發射藥安定劑含量變化對儲存安定性及彈道性能影響之分析 1
作者：楊琮賢、吳俊賢、陸開泰
2. 植基於像素排序法之可回復資訊隱藏技術 13
作者：劉興漢、楊顯豪、林永祥
3. 低溫感度改性單基發射藥之研究 31
作者：林奕憲、鄭凱心、楊琮賢、葉早發
4. 智慧型手機接收改良信號之 GNSS 動態定位測試 41
作者：張嘉強
5. 綠色起爆藥 DBX-1 形貌改良之研究 55
作者：李文祥、賴家同、楊琮賢、李金樹、陸開泰
6. 黑藥爆彈儀燃速數據擷取之改良平滑法 65
作者：方友霖、洪兆宇、陳一葳、趙嘉琦
7. 黑藥於爆彈儀之燃燒 75
作者：方友霖、洪兆宇、方淳民、趙嘉琦
8. 大數據分析技術結合時間序列預測應用-以區間式改良神經網路例 89
作者：林秀怡、徐彬偉
9. 可擴充主從式 IOT 溫控延長線 101
作者：謝哲人、李俊德、朱奕玫、梁瑋傑

JOURNAL OF CHUNG CHENG INSTITUTE OF TECHNOLOGY

VOLUME 52, NO. 1

MAY, 2023

CONTENT

PAPER

- 1 **Analysis on the Influence of Stabilizer Content Change of Single-base Propellant Stored in Military Ammunition Depot on Storage Stability and Ballistic Performance** 1
Tsung-Mao Yang, Chiung-Hsing Wu, Kai-Tai Lu
- 2 **A Reversible Image Steganographic Scheme Based on Pixel Value Ordering** 13
Hsing-Han Liu, Chuan-Hao Yang, Yung-Hsiang Lin
- 3 **Study on the Modified Single Base Gun Propellant with Low Temperature Sensitivity** ... 31
Yi-Hsien Lin, Kai-Hsin Cheng, Tsung-Mao Yang, Tsao-Fa Yeh
- 4 **GNSS Kinematic Positioning Test Using Modified Signals Received by Smartphones** 41
Chia-Chyang Chang
- 5 **Study on Morphology Improvement of Green Primary Explosive DBX-1** 55
Wen-Hsiang Li, Jia-Tong Lai, Tsung-Mao Yang, Jin-Shuh Li, Kai-Tai Lu
- 6 **An Improved Smoothing Method for Black Powder Closed Bomb Burning Rate Data Reduction** 65
Yu-Lin Fang, Chao-Yu Hung, Yi-Wei Chen, Chia-Chi Chao
- 7 **The Combustion of Black Powder in Closed Bomb** 75
Yu-Lin Fang, Chao-Yu Hung, Chun-Min Fang, Chia-Chi Chao
- 8 **Application of Big Data Analysis Combined with Time Series Prediction-Using Interval Improved Neural Networks** 89
Hsio-Yi Lin, Bin-Wei Hsu
- 9 **An Expandable Modular Internet of Things (IoT)-Based Temperature Control Power Extender** 101
Che Jen Hsieh, Chun-Te Lee, Huan-Mei Chu, Wei-Chieh Liang

國軍庫儲單基發射藥安定劑含量變化對儲存安定性及彈道性能影響之分析

楊琮賢^{1*} 吳俊賢² 陸開泰¹

¹國防大學理工學院化學及材料工程學系

²國防大學理工學院化學工程碩士班

摘 要

本研究主要探討國軍庫儲單基發射藥安定劑（二苯胺）含量變化對儲存安定性及彈道性能之影響，首先檢整不同儲存期之庫儲發射藥，再使用高效能液相層析儀（HPLC）量測成分中安定劑含量的變化情形，然後利用熱分析的方法獲得發射藥分解反應的動力學參數，藉以探討發射藥的熱安定性，最後利用爆彈儀（CB）試驗探討不同儲存期發射藥燃燒性能的變異程度，並分析其安定劑含量與彈道性能間的關聯性，藉以評估發射藥的有效儲存壽期及使用效能，分析結果顯示安定劑含量在合格範圍內的庫儲發射藥，其彈道性能均合於標準。

關鍵詞：庫儲發射藥、安定劑含量、爆彈儀、彈道性能

Analysis on the Influence of Stabilizer Content Change of Single-base Propellant Stored in Military Ammunition Depot on Storage Stability and Ballistic Performance

Tsung-Mao Yang^{1*}, Chiung-Hsing Wu², Kai-Tai Lu¹

¹ Master Program of Chemical Engineering, Chung Cheng Institute of Technology,
National Defense University

² Department of Chemical and Materials Engineering, Chung Cheng Institute of Technology,
National Defense University

ABSTRACT

This study mainly explored the influence of stabilizer (Diphenylamine, DPA) content change of single-base propellant stored in military ammunition depot on the storage stability and ballistic performance. First, the propellants of different storage times were collected and the high performance liquid chromatography (HPLC) was used to measure the variation of stabilizer content. Then, the kinetic parameters of decomposition reaction were analyzed by means of thermal analysis method to explore the thermal stability of these propellants. Finally, the closed bomb (CB) test was used to study the variation of the combustion characteristics of the propellant at different storage times. The relationship between stabilizer content and ballistic performance was also analyzed in order to evaluate the effective storage lifetime and use efficiency. The analysis results indicated that the ballistic performance of the storage propellant whose stabilizer content was within the qualified range met the standards.

Keywords: Storage propellants, Stabilizer content, Closed bomb, Ballistic performance

一、前言

發射藥的作用係在砲(槍)膛內燃燒產生高溫高壓的氣體推送彈頭前進，其燃燒所產生之能量是彈頭快速運動能量的來源，目前國軍使用的各式發射藥依其組成，可區分為單基、雙基及三基發射藥三類，均以硝化纖維為基本成分。由於發射藥具有吸濕性[1]，在儲存過程中，會產生熱解、自催化及水解三種形式的反應[2]，影響其儲存的安定性，其中熱解反應是主要的影響因素，發射藥熱解時會生成氮氧化物，氮氧化物具有自催化的作用，而氮氧化物與水作用亦會生成酸，同時加速水解的反應，由於自催化及水解作用均為放熱反應，又可加速熱解作用的進行，三種形式的反應彼此相互促進與影響，因此必須在發射藥中添加安定劑，目前常用的安定劑主要是二苯胺(Diphenylamine, DPA)及乙基中定劑(Ethyl centralite, EC)，二苯胺用於單基藥，乙基中定劑則用於雙基及三基藥。在發射藥中添加安定劑，並不能抑制發射藥的熱解反應，但可與發射藥熱解產生的氮氧化物及酸反應，生成穩定的物質，有效減緩發射藥的自催化及水解作用。

發射藥即使添加了安定劑，仍有一定的儲存期限，久儲的發射藥應定期取樣檢驗其性能，確定是否能繼續儲存和使用，以免發生危安事故。發射藥安定性測試的方法，主要是量測發射藥熱解產物氮氧化物的含量或發射藥內安定劑的殘存量，常用的測試法包括顏色試驗法(Colour Test)[3]、甲基紫試紙測試法(Methyl violet reagent-paper test)[4]、阿貝爾熱試驗法(Abel heat test)[5]、氣相層析法(Gas Chromatography, GC) [6,7]及高效能液相層析法(High Performance Liquid Chromatography, HPLC)[8-11]等，其中高效能液相層析法係量測發射藥內安定劑及其衍生物的含量，對庫儲單基發射藥而言，量測內含安定劑二苯胺(DPA)及其衍生物 2-硝基二苯胺(2-nitrodiphenylamine, 2-NDPA)與 4-硝基二苯胺(4-nitrodiphenylamine, 4-NDPA)的變化情形，據以評估庫儲發射藥的安全儲存壽期。

有關發射藥熱安定性的相關研究，Ning 等人[12]曾經以 DSC，採非等溫方式研究硝化纖維的熱分解反應，求得活化能為 176.7 kJ/mole；張鐵夫等人[13]則使用 DSC 及 TGA，採非等溫方式分析不同儲存期(5-40 年)庫儲七孔柱狀單基發射藥的熱分解反應動力學參數及爆炸臨界溫度，求得活化能為 169.8-197.1 kJ/mole；Lin 等人[14]亦曾應用 DSC 及 EA (Element analyzer)探討脫脂硝化纖維其含氮量的變化及對分解熱的影響；陳明華等人[15]則曾以數值模擬的方式探討單基發射藥的熱自燃與其剩餘能量的變化。

在發射藥燃燒性能分析方面，爆彈儀是用來量測發射藥在定容條件下，燃燒過程壓力變化的測試設備[16]，為了在密閉條件下進行發射藥的點火、燃燒及壓力的量測，爆彈儀採用耐高溫、高壓的合金鋼鑄成的中空圓柱體，兩端分別以點火塞及壓電轉換器承座利用螺紋連接，中空部份則放入待測的發射藥，擊發後，由壓電轉換器將測試所得之壓力轉換成電子訊號傳至數位示波器進行紀錄，經由計算可提供實測之壓力-時間(P-t)曲線和相應數據，這種測試方法也是內彈道學用來研究發射藥燃燒性能的主要方法。Grollman 和 Nelson[17]曾比較使用繩狀燃燒室和爆彈儀方法得到的七種標準美國陸軍用發射藥的燃燒速率值，其研究顯示，對相同的發射藥而言，兩種方法得到的燃燒速率是一致的，Robbins[18]的研究亦得到相同的結論。吳中文等人[19]則以爆彈儀試驗及內彈道模擬程式探討發射藥的成分、密度及藥型等因素對燃燒特性的影響，其研究顯示，硝化纖維確為發射藥能量之主要來源，成份每增加 1%則火藥力約增加 2.1%。劉子如等人[20]亦曾以爆彈儀試驗模擬內彈道性能，並透過實彈射擊評估單基發射藥性能的可靠度，發現儲存壽期可達 30 年以上。趙小敏等人[21]的研究則顯示，爆彈儀獲得的實測數據，可繪製壓力-時間、壓力梯度-發射藥燃燒分率及動力活度-發射藥燃燒分率三種關係曲線，藉以提供發射藥在砲膛內燃燒現象的預測。

本研究首先檢整不同儲存期之 105 公厘榴砲彈用 M1 式單孔柱狀單基發射藥，先利

用高效能液相層析儀量測發射藥成分中安定劑二苯胺含量的變化情形，再以熱重分析儀量測發射藥熱失重變化情形並計算其活化能，藉以評估安定性的變化；另利用爆彈儀試驗量測其燃燒特性與彈道性能的變異性，並探討其安定劑含量衰減及燃燒性能與庫儲時間的關聯性，藉以評估發射藥的有效儲存壽期及使用效能，可改善彈藥庫儲安全並提升射擊的準確度。

二、實 驗

2.1 實驗藥品

- (1) 105 公厘榴砲彈用 M1 式單孔柱狀單基發射藥：不同年份庫儲品，陸軍司令部北部地區彈藥庫提供，如圖 1 所示。
- (2) 二苯胺(Diphenylamine, DPA)：R.D.H. 公司製造，層析級試藥。
- (3) 乙醚(Ether)：Mallinckrodt 公司製造，層析級試藥，溶劑使用。
- (4) 甲醇(Methanol)：Mallinckrodt 公司製造，層析級試藥，HPLC 移動相使用。



圖 1. 庫儲 M1 式單孔柱狀單基發射藥

2.2 實驗設備

- (1) 高效能液相層析儀 (High Performance Liquid Chromatography, HPLC)：本研究使用日本 JASCO 公司製造 MD-2010 型高效能液相層析儀，層析管型號為 Supelcosil LC-18，移動相成分為甲醇與去離子水，移動相濃度比例為 85:15，操作流速 0.8 mL/Min，取 15 μ L 測試樣品進行安定劑成份變化的量化分析。
- (2) 熱重分析儀 (Thermogravimetric analysis,

TGA)：本研究使用 TA 公司生產 Q50 型熱重分析儀，可量測樣品化學反應過程中重量的變化情形，測試樣品盤使用白金盤，樣品測試量 0.5-1.0 mg，反應溫度量測範圍為室溫至 250 $^{\circ}$ C，升溫速率為 1、2、4 及 10 $^{\circ}$ C/min，並在升溫的環境通入氮氣，以避免空氣影響測試樣品的化學反應。

- (3) 爆彈儀 (Closed Bomb, CB)：本研究使用奧地利 HPI 公司設計製造的 B180 型密閉器連同壓電式壓力測量裝備、主機、終端機等設備，可耐壓力達 5000 bar，爆體燃燒室容積有 25、200、700 毫升，可依發射藥顆粒大小選用不同容積爆體，在定容條件下，量測發射藥在密閉爆體內燃燒過程中壓力的變化，並用來量測和判定發射藥燃燒性能。

2.3 實驗規劃

本研究首先檢整不同儲存期的庫儲 105 公厘 M1 式單孔柱狀單基發射藥 9 組樣品，後續利用高效能液相層析儀 (HPLC) 量測發射藥成分中安定劑含量的變化情形，再以熱重分析儀 (TGA) 的實驗數據計算其熱分解的活化能，藉以評估發射藥熱安定性的變化，另利用爆彈儀 (CB) 試驗量測發射藥的燃燒特性（相對火藥力、相對敏捷值）及彈道性能（初速、膛壓）的變異，藉以評估發射藥的有效儲存壽期及使用效能，實驗規劃如表 1 所示。

表 1. 庫儲發射藥實驗規畫表

樣品 編號	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
儲存 年期	1	4	7	11	15	17	20	23	26
實驗 項目	HPLC/TGA/CB								

2.3.1 發射藥安定劑含量檢測

- (1) 配製濃度 31.75、50、125、250 及 500 ppm 等 5 種二苯胺 (DPA) 標準溶液，建立 HPLC 檢測發射藥安定劑含量的標準檢量線。

- (2) 將發射藥測試樣品，利用粉碎器具磨碎（儘可能細小化），以利完整萃取其中所含安定劑。
- (3) 取磨碎之發射藥樣品 5g，置入濾筒，量取 150 毫升乙醚，倒入萃取瓶，另取 50 毫升乙醚倒入萃取器中，再與冷凝器結合，放至水浴器上，啟動水循環冷卻系統（溫度設定為 5 °C），開啟索氏萃取器底部加熱器（溫度設為 70 °C），進行安定劑萃取（時間 12 小時）。
- (4) 萃取蒸餾後之溶質以甲醇稀釋至 100 mL 分裝於定量瓶，取其中 15 μ L 以 HPLC 檢測發射藥成份中 DPA 的含量。

2.3.2 熱重分析實驗

本研究利用 TGA 進行熱分析實驗測試樣品盤使用白金盤，樣品測試量 1.5-2.5 mg，反應溫度量測範圍為室溫至 250 °C，升溫速率為 1、2、4 及 10 °C/min，並在升溫的環境通入氮氣，以避免空氣影響測試樣品的化學反應，實驗結果經過運算後可求得分解反應的活化能，藉以評估庫儲發射藥熱安定性的變化。

2.3.3 發射藥燃燒性能測試

- (1) 秤取發射藥測試樣品 30g，置入爆彈儀之爆體燃燒室。
- (2) 將點火塞旋緊後固定於爆體水平位置，並輕微晃動爆體數次使發射藥粒均勻散佈於平放之爆體底部，將點火導線插上並待命點火。
- (3) 發射藥點火引燃後，爆體內壓力經由壓電轉換器產生電壓訊號傳至爆彈儀主機之電荷放大器，再由示波器輸出訊號給電腦，電腦透過內建程式運算處理，即可得到發射藥燃燒性能的量測數據。
- (4) 再利用美軍 MIL-STD-286C method 801.1.2 之規範，運用爆彈儀測得的最大壓力(P_{max})及壓力梯度(dP/dt)值，計算發射藥的相對火藥力(RF)和相對敏捷值(RQ)，據以判定發射藥燃燒性能的差異，RF、RQ 計算方式如下：

$$RF = \frac{100}{m} \sum_{i=1}^m \left[\frac{T_{pmaxi}}{R_{pmaxi}} \right] \quad (1)$$

$$RQ = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left[\frac{100}{n} \sum_{j=1}^n \frac{T_{ij}}{R_{ij}} \right] \quad (2)$$

其中 m 表測試數目，n 表 dP/dt 曲線上所選取的數據數目， T_{ij} 表第 i 個測試發射藥位於 dP/dt 曲線第 j 點的值， R_{ij} 表第 i 個測試參考藥位於 dP/dt 曲線第 j 點的值， T_{pmaxi} 表第 i 個測試發射藥最大腔壓值， R_{pmaxi} 表第 i 個測試參考藥最大腔壓值。此外，依據 WSRL-0291-MA[22]及 AVL[23]技術手冊，由壓力梯度與壓力分率的關係曲線，可以描述發射藥的燃燒現象，壓力分率介於 0.25 至 0.75 之間的數據可用以計算獲得相對敏捷值(RQ)；另由動力活度與壓力分率的關係曲線，可以顯示發射藥燃燒後能量產生速率的變化，當壓力分率在 0.35 時可以模擬比較最大腔壓，在 0.75 時可以模擬比較初速。

三、反應動力學參數評估

反應動力學參數的評估可分為等溫與非等溫反應兩種方式，現今的固態反應大多以非等溫方式測量，故本研究採用非等溫反應的模式探討發射藥分解反應的動力學參數，假設反應速率可以用兩個可分離的函數 $k(T)$ 和 $f(\alpha)$ 來描述，如(3)式所示

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(T)f(\alpha) \quad (3)$$

其中 da/dt 是重量損失率， α 是任意時間的轉化率， $k(T)$ 則是與溫度相關的速率常數， $f(\alpha)$ 可以 α 的函數表示，如(4)式所示

$$f(\alpha) = (1 - \alpha)^n \quad (4)$$

其中 n 是反應級數，反應速率的溫度關聯性通常由 Arrhenius 方程式描述，如(5)式所示

$$k(T) = A \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (5)$$

其中 E_a 是活化能、 A 是前頻因子、 R 是通用氣體常數，結合方程式(3)至(5)，可得到(6)式

$$\frac{d\alpha}{dt} = A \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) (1 - \alpha)^n \quad (6)$$

在升溫速率 $T'(dT/dt)$ 條件下，(6)式積分可得(7)式

$$\int_0^\alpha \frac{d\alpha}{f(\alpha)} = \frac{A}{T'} \int_{T_0}^T \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) dT \quad (7)$$

Ozawa 法[24-25]假設 A 、 $f(\alpha)$ 及 E_a 與溫度 T 無關，而 A 及 E_a 與轉換率 α 無關，(7)式經由分離和積分可得 Ozawa 方程式如(8)式所示

$$\log f(\alpha) = \log\left(\frac{AE_a}{R}\right) - \log T' - 2.315 - 0.4567 \frac{E_a}{RT} \quad (8)$$

繪製 $\log T'$ 對 $(1/T)$ 圖可獲得近似直線的關係，活化能 E_a 值則可經由斜率 $(-0.4567E_a/R)$ 值計算獲得。

四、結果與討論

4.1 發射藥安定劑含量分析

DPA 檢量線建立係取標準品溶解於甲醇溶劑，分別製備濃度為 31.25、50、125、250 及 500 ppm 的溶液，經由 HPLC 分析顯示 DPA 約在第 4.5 分鐘時出現明顯波峰，如圖 2 所示，且濃度與波峰面積顯示成一線性關係，如圖 3 所示。

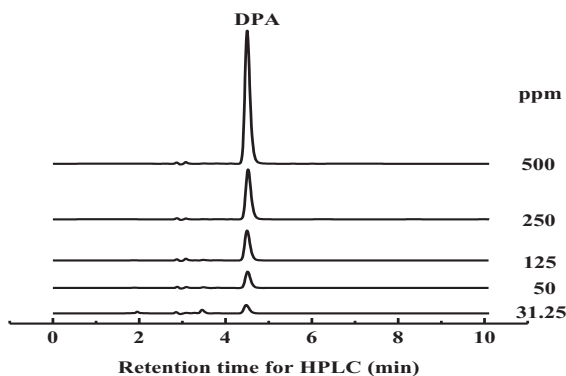


圖 2. DPA 檢量線分析 HPLC 圖譜

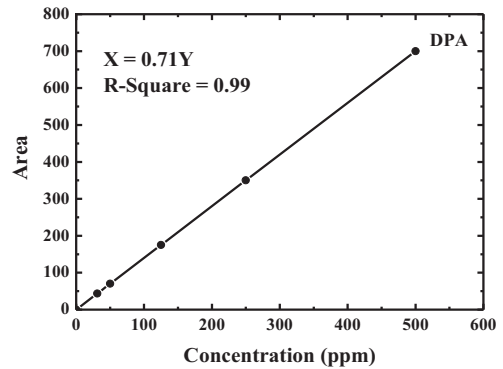


圖 3. DPA 檢量線分析圖

不同儲存期的 105 公厘榴砲彈用 M1 式單孔柱狀單基發射藥，經由 HPLC 分析之圖譜如圖 4 所示，在滯留時間 4.5 分鐘時出現之波峰為 DPA，此波峰的強度隨著庫儲時間的增加而逐漸遞減，顯示發射藥中 DPA 的含量有降低的趨勢，而在滯留時間 3.8 分鐘時出現的波峰，經由標準品檢測確認為發射藥成份中的二硝基甲苯(DNT)。

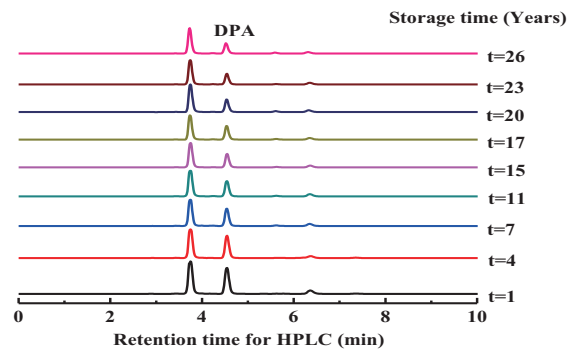


圖 4. 不同儲存期之 M1 式單孔柱狀單基發射藥 HPLC 圖譜

HPLC 圖譜經與 DPA 檢量線比對所得庫儲時間對 DPA 含量的關係如表 2 所示，再藉由數值分析的方法，建立 DPA 含量與庫儲時間關係的擬合曲線，如圖 5 所示，DPA 含量變化隨庫儲時間的增加呈現非線性單調遞減的趨勢，前 10 年呈陡降遞減，10-26 年間則趨於平緩，依據國軍彈藥部隊對於發射藥之安定性分類及儲運規定，若安定劑含量低於 0.2%，考量儲存安全，應立即浸水儲存，60 天內完成銷燬[26]，分析結果顯示 M1 式單孔柱狀單基發射藥在庫儲 26 年後，DPA 含量仍有 0.31%，達安全儲存標準。

表 2. 庫儲發射藥安定劑含量分析表

樣品編號	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
儲存年期	1	4	7	11	15	17	20	23	26
DPA									
含量 (%)	0.90	0.73	0.58	0.56	0.49	0.41	0.41	0.39	0.31

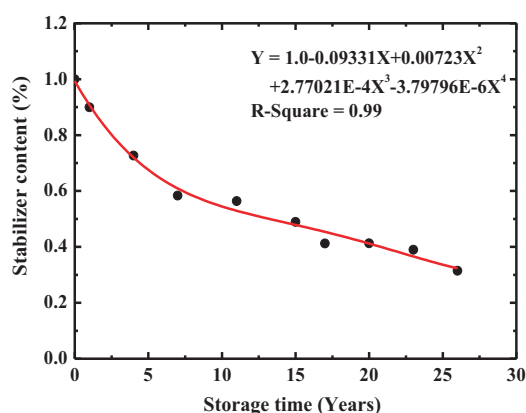


圖 5. 庫儲發射藥安定劑含量變化圖

4.2 動力學參數值評估

本研究針對不同儲存期的 105 公厘榴砲彈用 M1 式單孔柱狀單基發射藥，利用 TGA 進行熱分析實驗，實驗數據代入方程式(8)的 Ozawa 法動力學方程式繪製 $\log T'$ 對 $1000/T$ 關係圖，所得斜率值經由數值運算即可獲得活化能 E_a 值。圖 6 顯示庫儲 1 年期的單孔柱狀單基發射藥(A1 樣品)在升溫速率 1、2、4 及 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 條件下的熱失重曲線，取熱失重在 10-15%之間的數據進行數值分析，結果如圖

7 所示，分析所得斜率，經過數值運算後即可求得分解反應的活化能，不同儲存期發射藥的分解活化能綜整列於表 3，當發射藥儲存時間愈長時，其分解反應活化能有降低的趨勢，再比對發射藥安定劑的變化情形，顯示發射藥經過長時間儲存後，因安定劑含量隨儲存時間的增加而逐漸減少，導致安定性降低，因此造成其分解反應活化能亦隨之降低。

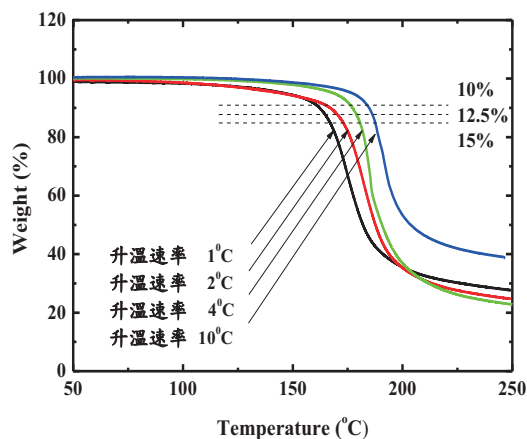


圖 6. A1 樣品不同升溫速率的 TGA 圖譜

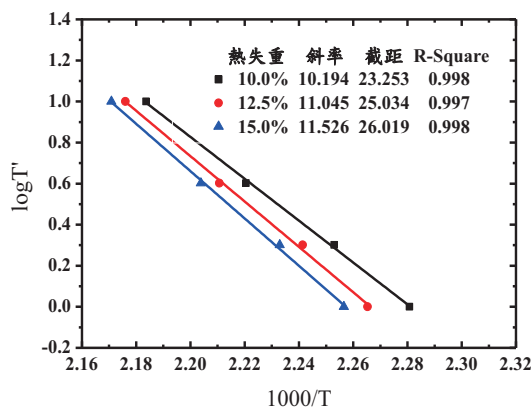


圖 7. A1 樣品發射藥的 $\log T'$ 對 $1000/T$ 關係圖

表 3. 庫儲 105 公厘榴砲彈用 M1 式單孔柱狀單基發射藥熱分解活化能分析表

樣品 編號	庫儲 年期	重量損失 (%)	反應溫度(°C)				Ea (kJ/mol)
			升溫速率(°C/min)				
			1	2	4	10	
A1	1	10	165.3	170.7	177.2	184.8	199.7±5.2
		12.5	168.3	173.0	179.2	186.4	
		15	170.0	174.7	180.6	187.5	
A2	4	10	164.0	168.9	179.7	184.3	194.6±3.7
		12.5	166.5	171.4	182.8	187.4	
		15	168.2	173.5	184.8	190.1	
A3	7	10	164.1	169.4	175.8	184.2	193.1±4.7
		12.5	166.8	172.2	178.2	185.7	
		15	168.7	174.2	179.9	186.6	
A4	11	10	162.2	167.2	174.9	181.9	186.0±4.9
		12.5	164.9	170.2	177.2	184.2	
		15	166.8	172.2	178.9	185.8	
A5	15	10	162.4	168	175.4	183.4	185.8±6.3
		12.5	166	171.9	178.1	185.5	
		15	168.4	174.4	180	186.4	
A6	17	10	160.3	168.8	174.6	182.1	182.8±7.5
		12.5	163.8	171.2	176.9	183.8	
		15	166.2	172.9	178.5	185	
A7	20	10	156.7	166	174.7	180.1	182.2±7.2
		12.5	163.6	170.8	178.9	183	
		15	167.1	173.2	181.2	184.7	
A8	23	10	157.3	164.1	176.1	181.4	181.2±7.8
		12.5	162.3	170.6	179.2	185.2	
		15	165.3	173.6	181.6	166.4	
A9	26	10	158	165.8	172	179.2	180.2±8.3
		12.5	162.3	169.3	175.4	182.2	
		15	164.9	171.5	177.4	184.1	

4.3 爆彈儀試驗結果分析

不同儲存期庫儲發射藥經爆彈儀試驗測得壓力梯度(dP/dt)及動力活度(Vivacity)對壓力分率(P/P_{max})之關係如圖8-9所示。依據AVL技術手冊得知，在壓力分率界於0.25-0.75之間為實驗數據最佳擷取範圍，經由數值運算可得最大膛壓(P_{max})、最大壓力梯度(dP/dt)_{max}、動力活度(Vivacity, L)及相對火藥力(RF)和相對敏捷值(RQ)等數據，如表4所示。

4.3.1 發射藥燃燒特性分析

若以A1發射藥(1年期)為標準，測試所得相對火藥力(RF)和相對敏捷值(RQ)均設為100%，圖10-12分別為不同儲存期發射藥的最大壓力梯度(dP/dt)_{max}、相對火藥力(RF)及相對敏捷值(RQ)與庫儲年期之關係，圖中顯示不同儲存期發射藥其最大壓力梯度(dP/dt)_{max}的差異在±3.9%以內，相對火藥力的差異度在±1.1%以內，相對敏捷值的差異在±5.3%以內，

三者均無特定遞增、減趨勢，其原因可能與發射藥批號不同有關。

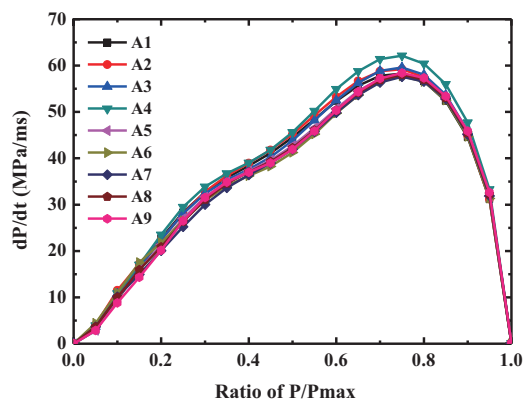


圖 8. 不同儲存期庫儲發射藥的壓力梯度與壓力分率之關係

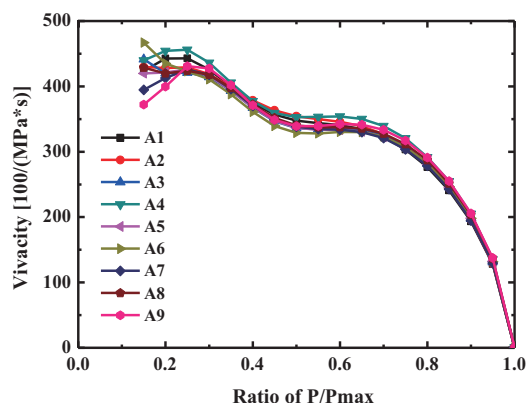


圖9. 不同儲存期庫儲發射藥的動力活度與壓力分率之關係

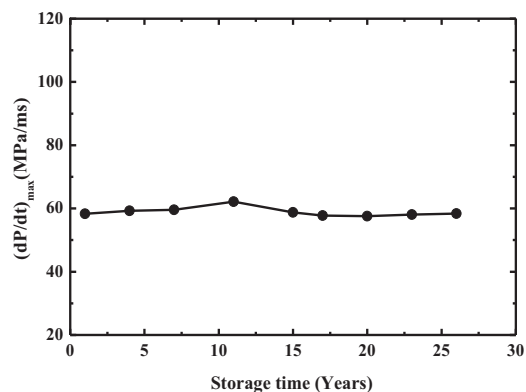


圖 10. 不同儲存期庫儲發射藥最大壓力梯度與庫儲時間之關係

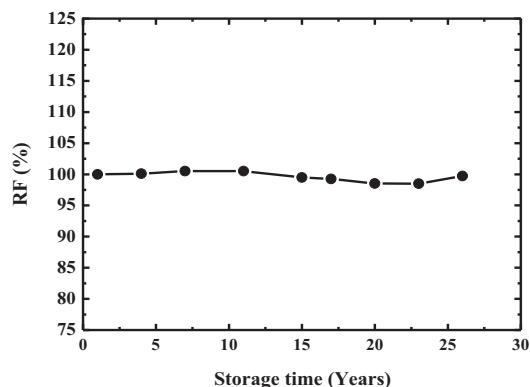


圖 11. 不同儲存期庫儲發射藥相對火藥力與庫儲時間之關係

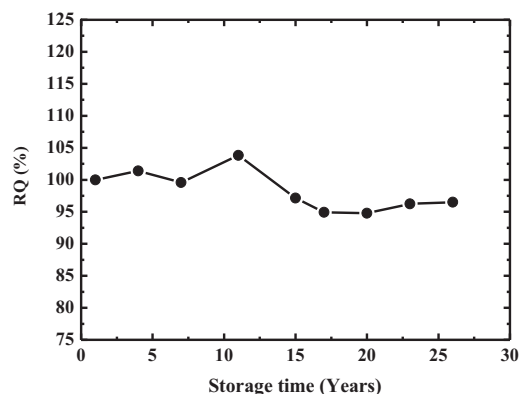


圖12. 不同儲存期庫儲發射藥相對敏捷值與庫儲時間之關係

此外，依據Vieille燃燒定律， $r_b = aP_c^n$ ，其中 r_b 為燃速， a 為常數與發射藥初溫有關， P_c 為燃燒室內之壓力， n 則為壓力指數(Burning rate pressure exponent)，一般發射藥的 n 值在0-1之間[27]， n 值愈小表示燃速隨壓力的變化值愈小並且反映了壓力對燃速影響的敏感程度。將爆彈儀測得之燃速及壓力分別取自然對數作圖，且在壓力分率界於0.35-0.75之間取其線性關係經由Vieille的燃燒定律分析，運算所得之壓力指數及速率常數值列於表5，另壓力指數與庫儲時間的關係如圖13所示，圖中顯示不同儲存期發射藥的燃燒速率指數在0.62至0.70之間且無特定遞增、減趨勢，其原因亦可能與發射藥批號不同有關。

表 4. 不同儲存期庫儲發射藥爆彈儀測試結果

樣品 編號	庫儲 年期	$P_{\max}$ (MPa)	$(dP/dt)_{\max}$ (MPa/ms)	RF (%)	RQ (%)	$L_{0.35}^{(\text{註1})}$ (100/Mpa.s)	相對最大腔 壓(%)	$L_{0.75}^{(\text{註2})}$ (100/Mpa.s)	相對初速 (%)
A1	1	160.00	58.30	100	100	399.59	100	309.06	100
A2	4	160.16	59.24	100.10	101.40	399.23	99.90	306.90	99.30
A3	7	160.82	59.58	100.51	99.58	393.44	98.46	307.84	99.61
A4	11	160.82	62.12	100.51	103.82	405.92	101.58	317.54	102.74
A5	15	156.98	58.76	98.11	97.16	393.86	98.57	305.79	98.95
A6	17	158.79	57.72	99.24	94.91	388.08	97.12	307.20	99.40
A7	20	157.64	57.58	98.53	94.79	395.76	99.04	303.61	98.24
A8	23	157.57	58.04	98.48	96.25	397.62	99.51	311.61	100.83
A9	26	159.56	58.41	99.73	96.50	401.86	100.57	317.07	102.60

註1：在壓力分率0.35時的動力活度，可模擬比較最大腔壓；

註2：在壓力分率0.75時的動力活度，可模擬比較初速。

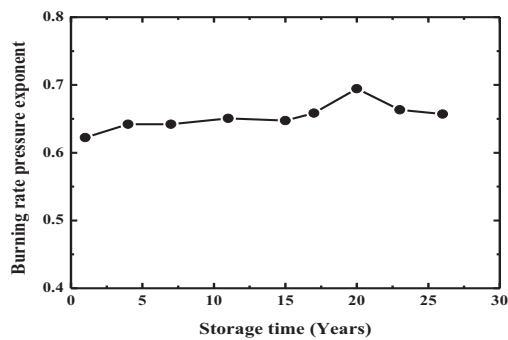


圖 13. 不同儲存期庫儲發射藥燃燒速率指數與庫儲時間之關係

表 5. 不同儲存期庫儲發射藥之燃速測試數值分析表

區分		Vieille's 燃燒定律 $r_b = a \cdot P_c^n$	
樣品 編號	庫儲 年期	a 值	n 值
A1	1	0.133	0.622
A2	4	0.124	0.642
A3	7	0.114	0.653
A4	11	0.122	0.651
A5	15	0.117	0.647
A6	17	0.110	0.658
A7	20	0.095	0.695
A8	23	0.110	0.663
A9	26	0.116	0.657

4.3.2 模擬彈道性能分析

依據 AVL 技術手冊，當壓力分率在 0.35 所得之動力活度數值可模擬比較最大腔壓的相對值，而壓力分率在 0.75 所得之動力活度數值則可模擬比較初速的相對值，圖 14 顯示不同儲存期庫儲發射藥對於 A1 發射藥（1 年期）的最大腔壓比值與庫儲時間之關係，不同儲存期發射藥相對 1 年期標準品最大腔壓比值的差異均在 $\pm 3\%$ 以內，圖 15 顯示不同儲存期庫儲發射藥對於 A1 發射藥（1 年期）的初速比值與庫儲時間之關係，不同儲存期發射藥相對 1 年期標準品初速比值的差異亦均在 $\pm 3\%$ 以內，分析結果顯示安定劑含量於合格範圍內的庫儲發射藥，其燃燒性能均可合乎標準。

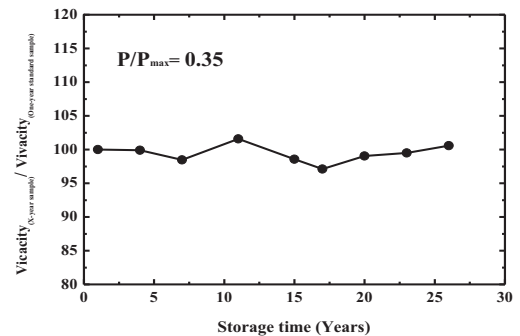


圖 14. 不同儲存期庫儲發射藥相對最大腔壓比值與庫儲時間之關係

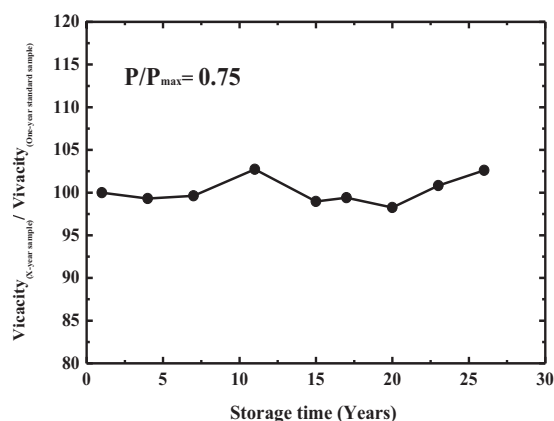


圖 15. 不同儲存期庫儲發射藥相對初速比值與庫儲時間之關係

五、結 論

本研究針對國軍不同儲存期 105 公厘榴砲彈用 M1 式單孔柱狀單基發射藥，利用高效能液相層析儀、熱重分析儀及爆彈儀試驗分析成分中安定劑二苯胺含量的變化對熱安定性的影響，並分析安定性的衰退與彈道性能的關係，獲得下列結論：

- (1) M1 式單孔柱狀單基發射藥安定劑二苯胺的含量，隨著庫儲時間的增加而逐漸降低，惟在庫儲 26 年後，二苯胺的含量仍有 0.31%，達安全儲存標準。
- (2) M1 式單孔柱狀單基發射藥儲存時間愈長，其分解反應活化能有降低的趨勢，再比對發射藥安定劑的變化情形，顯示發射藥經過長時間儲存後，因安定劑含量隨儲存時間的增加而逐漸減少，導致安定性降低。
- (3) M1 式單孔柱狀單基發射藥安定劑的含量雖然隨著庫儲時間的增加而減少，導致其燃燒性能產生變異，惟經由彈道性能分析，不同儲存期發射藥相對標準品最大膛壓比值及初速比值的差異均在 $\pm 3\%$ 以內，顯示安定劑含量在合格範圍內的庫儲發射藥，其彈道性能可合乎標準。

致 謝

本研究感謝陸軍司令部北部地區彈藥庫提供發射藥樣品使研究得以順利完成，特此

致謝；另感謝葉早發教授及黃其清教授在數據分析期間給予指導。

參考文獻

- [1] 阮望聖，發射藥理論與應用，聯勤 203 廠，高雄，第 1-6、26-33 頁，1986。
- [2] 王橋譚，“發射藥安定性研究”，中華民國火藥學會 97 年度火藥專題暨技術研討會，桃園，第 5-7 頁，2008。
- [3] 彭竹郎，“槍砲與迫砲發射藥安定性試驗方法之回顧”，火藥技術，第 5 卷，第 2 期，第 103-113 頁，1990。
- [4] 張力、杜仕國、許路鐵、徐同軍，“甲基紫試驗在長貯火藥安定性檢測中的應用”，火炸藥學報，第 29 卷，第 6 期，第 74-76 頁，2006。
- [5] Perry, M. A., Pinson, D. J., Wanat, E., “Correlation of Abel Heat Test Time and Stabilizer Content of Aged Gun Propellants,” Aeronautical Research Labs Melbourne, pp.1-6, 1986.
- [6] 葉靜、郝俊修，“氣相色譜法測定發射藥双安定劑成分的含量”，軍械工程學院學報，第 18 卷，第 4 期，第 7-9 頁，2006。
- [7] 俞朝暉、張余清、李隆瑞，“硝基胍發射藥化學安定性的氣相色譜測定方法”，色譜，第 17 卷，第 2 期，第 219-220 頁，1999。
- [8] Boers, M. N., Willem, P. C., “Lifetime Prediction of EC, DPA, Akardite II and MNA Stabilized Triple Base Propellants, Comparison of Heat Generation Rate and Stabilizer Consumption,” Wiley-vch Verlag GmbH, Vol.5, pp. 356-362, 2005.
- [9] Lindblom, T., Christy, A. A., Libnau, F. O., “Quantitative Determination of Stabiliser in a Single Base Propellant by Chemometric Analysis of Fourier Transform Infrared Spectra,” Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, Vol.29, pp. 243-254, 1995.
- [10] 林育明、高德受、石玉山、陳永吉、邱華

- 樞、吳謀泰，“單基發射藥之安定性與安定劑含量之關係”，火藥技術，第 1 卷，第 1 期，20-29 頁，1985。
- [11] Bellamy, A. J., Sammour, M. H., “Stabilizer Reactions in Cast Double Base Rocket Propellants. Part III: Evidence for Stabilizer Interaction During Extraction of Propellant for HPLC Quantitative Analysis,” Propellants, Explosives, Pyrotechnics, Vol. 18, pp. 46-50, 1993.
- [12] Ning, B., Hu, R., Zhang, H., Xia, Z., Guo, P., Liu, R., Lu, G., and Jiang, J., “Estimation of the Critical Rate of Temperature Rise for Thermal Explosion of Autocatalytic Decomposing Reaction of Nitrocellulose using Non-isothermal DSC,” Thermochimica Acta, Vol. 416, pp. 47-50, 2004.
- [13] 張鐵夫、李金樹、陸開泰、葉早發，“庫儲發射藥分解反應動力學參數及爆炸臨界溫度之研究”，中正嶺學報，第 41 卷，第 1 期，第 165-176 頁，2012。
- [14] Lin, C. P., Shu, C. M., “A Comparison of Thermal Decomposition Energy and Nitrogen Content of Nitrocellulose in Non-fat Process of Linters by DSC and EA,” Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 95, No.2, pp. 547-552, 2009.
- [15] 陳明華、江勁勇、路桂娥、劉禮斌，「單基發射藥的熱自燃數值模擬與其剩餘能量變化研究」，軍械工程學院學報，第 12 卷，第 1 期，第 33-34 頁，2002 年。
- [16] Ges, M. B. H., B173 Proputer Operating Instructions, AVL List GmbH, Austria, pp. 12-29, September 1988.
- [17] Grollman, B. B. Nelson, O. W., “Burning Rates of Standard Army Propellants in Strand Burner and Closed Chamber Tests,” 13th JANNAF Combustion Meeting, Chemical Propulsion Information Agency, Publ. 281, Vol. 1, Dec. pp. 21-43, 1976.
- [18] Robbins, F. W., The Burning Rate Behavior of Pure Nitrocellulose Propellant Samples, ARL, U.S.A., TR-82, pp. 1-20. March. 1993.
- [19] 吳中文、黃宗輝、汪成斌，“以爆彈儀探討發射藥成分與密度對燃燒特性的影響”，火藥技術，第 21-31 頁，2001。
- [20] 劉子如、潘統學、衡淑云，“單基發射藥彈道可靠度和考靠儲存壽命”，彈道學報，第 3 期，第 31-38 頁，1994。
- [21] 趙小敏，條狀發射藥成分藥型變動對內彈道性能的影響，碩士論文，中正理工學院，桃園，第 28 頁，1998。
- [22] Grivell, M. R., The Closed Vessel Test And Determination of Ballistic Properties of Gun Propellants, Manual WSRL-0291-MA, GPO, Adelaide, South Australia, pp. 1-3, 1982.
- [23] Ges, M. B. H., B173 Proputer Operating Instructions, AVL List GmbH, Austria, pp. 12-29, 1988.
- [24] Ozawa, T., “A New Method of Analyzing Thermogravimetric Data,” Chemical Society of Japan, Vol. 38, No. 11, pp. 1881-1886, 1965.
- [25] Ozawa, T., “Kinetic Analysis of Derivative Curves in Thermal Analysis,” Journal of Thermal Analysis, Vol. 2, pp. 301-324, 1970.
- [26] 宋合印，國軍批號彈藥檢查手冊(第二版)，聯合後勤司令部，台北，第 3-13 頁，2009。
- [27] 姜珊，催化劑降低發射藥燃速壓力指數的實驗研究，碩士論文，南京理工大學，南京，第 1 頁，2007。

楊琮貿等

國軍庫儲單基發射藥安定劑含量變化對儲存安定性及彈道性能影響之分析

植基於像素排序法之可回復資訊隱藏技術

劉興漢 楊顥豪* 林永祥

國防大學管理學院資訊管理學系

摘 要

本研究是基於 Weng 等學者於 2017 年提出的最佳化 (Optimal) 基於像素之像素排序法 (Pixel-based Pixel Value Ordering, PPVO) 及 Wu 等學者於 2020 年提出的改良式方法 (Improved PPVO)，來建構出一套可回復式資訊隱藏方法，在提取秘密訊息的同時，可以還原出原始影像。本方法可在人眼難以察覺之細微變化下，於灰階影像中藏入秘密訊息，並在低藏密量的前提下，有效提昇藏密品質，使之更為隱密。本方法將載體影像以棋盤式切割成兩部分，再各自獨立進行 PPVO 藏密，並依照 PPVO 編碼像素的區塊複雜度 (光滑程度)，來適應性地調整參照區塊大小。於測試驗證上，以 BOSSBase 自然影像資料庫中之載體影像為例，在各種藏密量的設定下，所獲得之影像品質普遍優於 Weng 等學者提出的最佳化 PPVO 方法和 Wu 等學者提出的改良式 PPVO 方法。本方法並可抵抗正規/特異 (Regular-Singular, RS) 分析和像素差直方圖分析，並在廣泛性測試有良好的表現。

關鍵詞：資訊隱藏、可回復資訊隱藏、適應性像素修改、PPVO

A Reversible Image Steganographic Scheme Based on Pixel Value Ordering

Hsing-Han Liu, Chuan-Hao Yang*, and Yung-Hsiang Lin

Department of Information Management, Management College, National Defense University

ABSTRACT

In this study, a reversible image steganographic scheme that is able to restore original cover images after retrieving secret information is developed based on the optimal pixel-based pixel value ordering (PPVO) by Weng et al. (2017) and the improved PPVO by Wu et al. (2020). By this method, secret information is embedded in grayscale images and only causes minor changes imperceptible to human vision. The quality of stego images is enhanced in the case that a certain low amount of information is embedded. The cover image is split into two parts interleavedly in a checkerboard-like manner, and each part performs the embedding process independently. With different pixel complexity, the size of context pixels is adaptively modified. During experimental verification, the images in BOSSBase dataset are adopted as the cover images. The quality of stego images is generally better by using this method, compared with the one by Weng et al. (2017) and Wu et al. (2020). This method can also prevent the stego images from being detected by the regular-singular (RS) analysis and the pixel difference histogram (PDH) analysis, and performs well during generalized benchmarking.

Keywords: steganography, reversible image steganography, adaptive pixel-modification, PPVO

一、前言

隨著近年來網際網路的快速發展，大量資訊以網路為媒介快速流通，使得資訊的傳遞更為便利。然而，未經保護的明文資料，在傳遞過程中會暴露在安全威脅之下。因此，如何安全地傳遞資料，在現階段是一個重要的課題。其中被廣泛研究的領域包含：密碼學（Cryptography）、數位浮水印、資訊隱藏（Information Hiding）等。資訊隱藏著重於不可察覺性，亦即將秘密訊息以不可察覺的方式隱藏於載體中，以本研究為例，載體即為影像，可用於隱藏版權資訊、內容檢查，以及軍事上的秘密通訊等等。

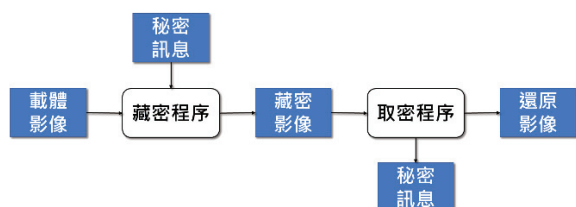


圖 1. 可回復式之影像藏密與取密基本流程圖

傳統的影像藏密技術，通常會在載體影像上產生不可恢復的失真，因此無法利用於某些需要維持載體完整性的場域，如醫學影像標記及軍用影像處理，於是就有了可回復式資料隱藏技術(Reversible Data Hiding, RDH)的出現。如圖 1 所示，可回復性，亦即從藏密影像(Stego Image)取出秘密訊息(Secret Text)的同時，可將影像恢復成原始的載體影像。為了確保可回復性，任何會導致永久失真的技術都不能運用於可回復式影像藏密技術。根據 Kaur 等人[1]的整理，先前的研究者所開發出的幾種無損的藏密方式(如圖 2 所示)包含：無損壓縮(Lossless Compression, LC)[2]、差異擴張(Difference Expansion, DE)[3]、直方圖位移(Histogram Shifting, HS)[4]、預測誤差擴張(Prediction-Error Expansion, PEE)[5]、像素排序(Pixel Value Ordering, PVO)[6]等方式。

無損壓縮法，是以不損毀影像資訊的方式壓縮載體影像的一部分，來騰出空間，並將秘密訊息嵌入此間隙中。由於無損壓縮演算法的壓縮率較低，採用此方法的缺點是可供嵌入的容量(Embedding Capacity, EC)較小。差異擴

張法則是以兩個像素為一組編碼單元，每個單元至多可藏入 1 位元，最終的藏密率至多接近 0.5 位元/像素(bits per pixel, bpp)。直方圖位移法，可將秘密訊息的位元串流，嵌入影像中最頻繁出現的像素，亦即直方圖的峰值。此方法會改變該像素在直方圖中的位置，而其餘沒有參與藏密的像素，也必須各自位移 1，以利用於在影像的直方圖中為待嵌入像素騰出空間，來維持取密時的可回復性。

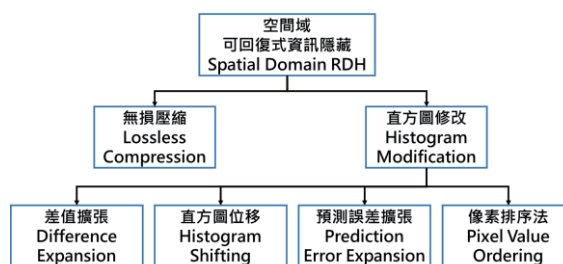


圖 2. 空間域之可回復式資訊隱藏

差異擴張法中，每個待嵌入像素，都由相鄰的一個像素做預測。而有鑑於 Tian[3]的差異擴張法具有較差的預測效果，Thodi 等人[5]提出的預測誤差擴張法(Prediction Error Expansion, PEE)，以臨近的 3 個像素預測待嵌入像素，並擴張預測值和原值之間的差值，藏入 1 位元的秘密訊息。其中直方圖位移法所採用的壓縮溢位映射表(Location Map, LM)的流程也被 Thodi 和 Rodriguez[5]採納，用來記錄可能會在藏密過程中溢位的區塊所在。

接下來是 Li 等人[6]所提出基於像素排序法(PVO)之方式。此類方法在不需太高嵌入容量的情況下，可達到極高的藏密影像品質。它是由 PEE 方法延伸而來，並使用 PVO 做為預測方式。待編碼區塊的像素以遞增方式重新排序，並以次大(次小)的像素預測最大(最小)的像素，並以預測誤差(Prediction Error, PE)的絕對值生成直方圖。PVO 方法產生的預測誤差，相較於其他 PEE 衍伸的方法，在低嵌入容量的前提下可以生成更正確的預測結果。後續再以此預測誤差直方圖(Prediction Error Histogram, PEH)透過類似直方圖位移法的方式進行藏密。其中預測誤差為 1(|PE|=1)的區塊通常是 PEH 中的峰值(bin 1)，可用於嵌入秘密訊息，而剩餘的區塊則位移 1，以騰出可藏密空間。

依照 Li 等人[6]的方式，會排除預測誤差為 0 (即 $|PE|=0$ 、bin 0) 的部分，因而不可用於藏密，但通常此區塊在 PEH 中是次多的，如果也可用於藏密，則可以增加藏密容量。為了改進這一點，Peng 等人[7]提出了改良式 PVO (Improved PVO, IPVVO)，將次大及次小的預測誤差部分也用於藏密，當然也使用到了預測誤差為 0 的部分。而為了更有效利用這個部分，Ou 等人[8]提出 PVO-k 方法，其中 k 代表最大(最小)的 k 個像素，在此方法中會同時被修改，用來藏密。

後續基於 PVO 的方式，主要包含：變動區塊 PVO (Variable-size Partitioning PVO)[9]、基於像素之 PVO (Pixel-based PVO, PPVO)[10]、像素對 PVO (Pairwise PVO)[11]、最佳化 PPVO (Optimal PPVO)[12]、改良式 PPVO (Improved PPVO)[13]。而 Kaur 等學者[1]曾於 2020 年針對 PVO 相關方法進行比較(如表 1 所示)。

表 1. PVO 相關方法比較

提出者	劣勢
Li 等人[6]	個別區塊內至多只利用 2 個像素進行嵌入，且只有 PEH 的 bin 0 用於嵌入。
Qu 等人[10]	以像素為藏密單位，使用參照區塊計算 PE 和複雜度，可提供比 Li 等人[6]之方法更大的容量和較佳的藏密品質，但藏密也只使用 bin 0 參與嵌入。
Weng 等人[12]	和 Qu 等人[10]的方法相比，參照區塊更完整地包圍待嵌入像素，並可根據影像品質決定用於藏密的 PEH bin，但參照區塊大小在整張影像中是固定的。
Wu 等人[13]	和 Qu 等人[10]的方法相比，參照區塊更完整地包圍待嵌入像素，並且可隨著影響內容調整區塊大小，但藏密也只使用 bin 0 參與嵌入。

PPVO 的主要概念，是以排序後的參照區塊 (Context Pixels) 來預測待編碼像素。具體而言，給定待編碼像素 (即待預測像素 x)，其參照區塊為 n 個右方及下方的最近相鄰像素 (編碼方向由左至右，由上而下)，以遞增方式排序之。在參照區塊中的所有像素皆大於 (或小於) 像素 x 的前提下，其中的最大 (或最小)

像素則可用於預測像素 x 。此方式幾乎可以預測所有載體影像上的像素，同時也因為可得到的預測誤差 (PE) 數量更多，所以其中可用於藏密的部分，也會較其他方式多。在較光滑的影像中，PPVO 可達成比傳統 PVO 更高的嵌入容量 (EC)。

Weng 等人[12]提出的最佳化 PPVO，則是運用更緊湊的參照區塊，使用了區塊內全部像素的平均值來進行預測。而由於參照區塊和待編碼像素排列得更緊密，和原先的 PPVO 相比，能更準確地做預測，因此在相同藏密量下可以達到更好的品質。此外，原始的 PVO 及 PPVO 方法固定使用 PEH 中的 bin 0 嵌入秘密訊息，雖然容量較高，但藏密後的品質不一定較好，於是作者在此方法中加入一種機制，使其在嵌入時可以在保證容量足夠的前提下，動態調整所使用的 PEH bin。根據 Kaur 等人[1]的比較結果，指出該方法運用在粗糙的載體影像 (如：USC-SIPI 影像資料庫中之 Baboon 載體)，可以達到比原始 PPVO 更好的品質，但是運用在相對平滑的載體影像時，其品質並沒有明顯提升。

Wu 等人[13]提出的改良式 PPVO，也改善了一些原始 PPVO[10]的不足。例如原始 PPVO 在參照區塊的選取上，並沒有利用待編碼像素的左側，而此方法則可同時利用待編碼像素的左下、下方及右下方的臨近像素做為參照區塊。然而，此方法和原始 PPVO 相同，僅參考該區塊的最大及最小值，而且在粗糙區塊中，藏密影像之品質沒有明顯變化。

本研究的主要目的，是在達到某種藏密容量的前提下，提昇藏密後的影像品質，並維持影像結構。其中影像品質以峰值訊號雜訊比 (Peak Signal-Noise Ratio, PSNR) 做為比較基準。本研究將以 Weng 等人[12]和 Wu 等人[13]的方法為基礎，針對預測參照區塊範圍及預測方式進行改良，以提升藏密後影像之品質，同時能維持 Weng 等人[12]所提出之方法針對複雜圖片的預測效果。

二、文獻探討

2.1 像素排序法 (PVO)

像素排序法 (PVO) 的概念，最初是由 Li 等人於 2013 年[6]提出。此方法的優點是可維持極高的藏密影像品質，因而吸引了大量學者的興趣。以 8 位元灰階影像為例，每一像素以無符號 8 位元整數表示，範圍介於 0 (00000000₂)到 255 (11111111₂)之間，用來代表該像素之亮度，0 為黑色，而 255 為白色。

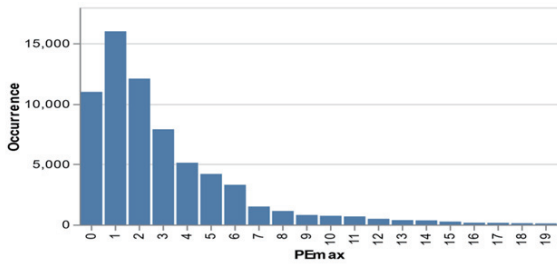


圖 3. 一般影像的 PEH[6]

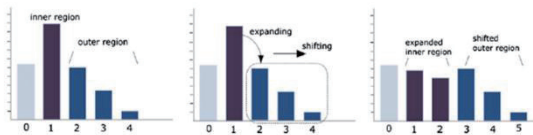


圖 4. 嵌入預測誤差直方圖 (PEH) 的變化[6]

根據 Li 等人[6]的方法，首先，將載體影像切割成不重疊的相等大小區塊($n_1 \times n_2$)，並將該區塊內的所有像素以遞增排序。接著計算該區塊之複雜度，預先過濾掉不適合的區塊。此處所指之複雜度，為該區塊次大及次小像素的差值，如果超過設定之閾值，則認定此區塊相對粗糙，在計算預測誤差時通常無法將所預測之像素作為嵌入目標，而只能位移該像素。根據圖 3 的預測誤差直方圖 (PEH)，為了避免這類多餘的位移 (N_E)，作者將這類像素維持不變，在藏密前即跳過。後續根據編碼計算最小預測誤差 PE_{min} 及最大預測誤差 PE_{max} 。當 $|PE_{\{min,max\}}|$ 為 1，即 PEH 中的 bin 1 (圖 4)。而依據待嵌入之秘密訊息位元是否為 1，調整 $PE_{\{min,max\}}$ 成 1 或 2，而其他 bin $\{PE: PE > 1\}$ 則必須為 bin 1 騰出編碼空間，因此此類像素的 PE 需向外移動 1。若以 $PE_{max} = 2$ 為例，則是調整成 $PE'_{max} = 3$ (此處 PE' 代表調整後之值)。計算出新的像素值後，再依排序前該像素的原始位置，將其置入藏密影像。最後嵌入還原資訊 (Auxiliary information)，生成藏密影像。其中，還原資訊主要包含藏密過程中所

使用的參數，來提供後續取密演算法使用。

於取密的過程中，首先取出還原資訊，從中取得記錄的區塊大小及複雜度閾值等藏密時使用之參數。後續，依據記錄的區塊大小，將藏密影像切割成不重疊的相同大小區塊，再以增序的方式排列各區塊內部的像素。接著計算區塊複雜度，排除過於粗糙之區塊，並依照修改後的 $PE'_{\{min,max\}}$ 為 1 或 2，取得該區塊嵌入之秘密訊息位元 b ，再將 $PE'_{\{min,max\}} \geq 2$ 的部分反向位移 1，還原成原始影像。當整張影像解密過一遍後，即可獲得完整的秘密訊息和還原後的原始影像。

此方法的主要缺點，在於計算複雜度和 PE' 時，僅僅依據各區塊內部的像素進行預測，而各區塊周圍的像素則會被忽略掉，使得預測的準確度在區塊較小時會變得較不準確。此外，各區塊只有兩個像素參與藏密，導致容量上有所侷限。針對這些問題，Qu 與 Kim[10]提出了以像素為嵌入單位的 PPVO，來進行改善。

2.2 像素式像素排序法 (PPVO)

由 Qu 和 Kim[10]提出的像素式像素排序法 (PPVO)，是改進自 Li 等人[6]的原始 PVO 方法。其主要區別，在於以滑動窗口 (Sliding Window) 的方式，對全圖像素逐一進行嵌入。而該滑動窗口，也稱為參照區塊 (Context Pixels)，用於複雜度篩選及預測誤差 (PE) 之計算，作為嵌入流程的一部分。其藏密步驟說明如下：

步驟 1：溢位處理

將載體影像中像素值為 0 及 255 的像素，分別修改為 1 及 254，並將修改的像素在溢位映射表 (Location Map, LM) 中設定為 $LM_{(i)}=1$ ，而其餘值介於 1 和 254 之間的像素，則設定為 $LM_{(i)}=0$ ，並將 LM 以算術編碼進行無損壓縮，得到 CLM，長度縮減為 l_{clm} ，稍後和秘密訊息一併嵌入至載體影像中。

步驟 2：還原資訊處理

令 L 為藏有秘密訊息及 CLM 的最後一個像素位置，而 N 為影像像素總數。將載體影像最後一行前 $16 + 2[\log_2 N]$ 個像素的最低有效位元 (LSBs) 原始值保存為 H_{LSB} ，隨後和秘密

訊息一併嵌入影像。而在後續的步驟中，會將還原資訊以 LSB 取代法，嵌入到上述這些像素中。

步驟 3：計算參照區塊大小

參照區塊 C 和目標像素 x 的相對位置關係，如圖 5 所示。其順序是以參照像素 c_i 和目標像素 x 之間的歐幾里得距離由近而遠，且由上而下排列。而採取之像素個數，以編碼時指定的參照像素數量 c_{CN} 為限。

x	c_1	c_4	c_9
c_2	c_3	c_6	c_{11}
c_5	c_7	c_8	c_{13}
c_{10}	c_{12}	c_{14}	c_{15}

圖 5. PPVO 參照區塊樣式

步驟 4：過濾適合的目標像素

依據公式(1)，以參照區塊中最大像素值 $\max(C)$ 減去最小像素值 $\min(C)$ ，來計算區塊複雜度 NL 。對於複雜度超過閾值 T 的像素 x ，則不進行藏入或位移，避免造成非必要的位移。

$$NL = \max(C) - \min(C) \quad (1)$$

步驟 5：藏入秘密訊息

待嵌入像素 p 先以公式(2)和參照區塊 C 進行比較，以計算預測值 $\hat{p}$ ，再以公式(3)計算原始像素 p 與預測值 $\hat{p}$ 之差，獲得預測誤差 PE 。後續，根據 PE 和預測值 $\hat{p}$ (公式(4))，來決定 p 需偏移 1，或嵌入一位元秘密訊息 b ，以獲得修改後像素 p' 。運用相同方式逐行掃描，以由左至右、由上至下的順序進行嵌入，直到秘密訊息結束或容量不足，並記錄最後一個修改的像素位置 L ，一併納入還原資訊中。

$$\hat{p} = \begin{cases} \max(C) & \text{if } \min(C) \neq \max(C) \text{ and } p \geq \max(C) \\ \min(C) & \text{if } \min(C) \neq \max(C) \text{ and } p \leq \min(C) \\ 254 & \text{if } \max(C) = \min(C) = VC = 254 \\ VC & \text{if } \max(C) = \min(C) = VC, 1 \leq VC \leq 253 \\ & \text{otherwise skipped} \end{cases} \quad (2)$$

$$PE = p - \hat{p} \quad (3)$$

$$p' = \begin{cases} p + b & \text{if } \hat{p} = \max(C) \text{ and } PE = 0 \\ p + 1 & \text{if } \hat{p} = \max(C) \text{ and } PE > 0 \\ p - b & \text{if } \hat{p} = \min(C) \text{ and } PE = 0 \\ p - 1 & \text{if } \hat{p} = \min(C) \text{ and } PE < 0 \\ & \text{otherwise} \rightarrow p \end{cases}$$

$$\text{where } \max(C) \neq \min(C) \quad (4)$$

$$p' = \begin{cases} p + b & \text{if } VC = 254 \text{ and } PE = 0 \\ p - b & \text{if } VC \neq 254 \text{ and } PE = 0 \\ p - 1 & \text{if } VC \neq 254 \text{ and } PE < 0 \\ & \text{otherwise} \rightarrow p \end{cases}$$

$$\text{where } \max(C) = \min(C) = VC$$

步驟 6：嵌入還原資訊

將還原資訊以 LSB 取代法，嵌入至載體影像的最後一行。其中，該行前 $16 + 2[\log_2 N]$ 個像素 $LSBs$ 的原始值 (H_{LSB})，已於步驟 2 預先和秘密訊息一併嵌入載體影像。

本方法的取密步驟如下：

步驟 1：取出還原資訊

依 Qu 和 Kim[10]之方法，從藏密影像最後一行的前 $16 + 2[\log_2 N]$ 個像素的 $LSBs$ 中取出還原資訊，其中包含：壓縮溢位映射表長度 l_{clm} 、篩選閾值 T 、區塊像素數量 CN ，以及修改的最後一個像素位置 L 。

步驟 2：取密

由最後一個編碼像素的位置 L 開始，反向取出藏密影像所藏的秘密訊息，並還原該像素。首先以公式(1)計算區塊複雜度 NL ，如 $NL > T$ ，則跳過該像素不做更動。隨後依照公式(2)計算預測值 $\hat{p}$ ，並依公式(3)計算預測誤差 PE ，作為偏移與取密的依據。最後由公式(5)取出秘密訊息位元，並還原影像。

p, b

$$= \begin{cases} p', b = 0 & \text{if } \hat{p}' = \max(C) \text{ and } PE = 0 \\ p' - 1, b = 1 & \text{if } \hat{p}' = \max(C) \text{ and } PE = 1 \\ p' - 1, \text{no } b & \text{if } \hat{p}' = \max(C) \text{ and } PE > 1 \\ p', b = 0 & \text{if } \hat{p}' = \min(C) \text{ and } PE = 0 \\ p' + 1, b = 1 & \text{if } \hat{p}' = \min(C) \text{ and } PE = -1 \\ p' + 1, \text{no } b & \text{if } \hat{p}' = \min(C) \text{ and } PE < -1 \end{cases}$$

$$\text{where } \min(C) \neq \max(C) \quad (5)$$

$$p, b = \begin{cases} p', b = 0 & \text{if } VC = 254 \text{ and } PE = 0 \\ p' - 1, b = 1 & \text{if } VC = 254 \text{ and } PE = 1 \\ p', b = 0 & \text{if } VC \neq 254 \text{ and } PE = 0 \\ p' + 1, b = 1 & \text{if } VC \neq 254 \text{ and } PE = -1 \\ p' + 1, \text{no } b & \text{if } VC \neq 254 \text{ and } PE < 1 \end{cases}$$

where $\max(C) = \min(C) = VC$

步驟 3：溢位還原

解壓縮溢位映射表 LM ，並將 $LM_{(i)} = 1$ 的像素，分別由 (254,1) 調整回 (255,0)。

步驟 4：還原影像末行

針對已於步驟 2 和秘密訊息一併取出的 H_{LSB} ，運用 LSB 取代法，還原回影像末行的前 $16 + 2 \times \lceil \log N \rceil$ 個像素。

2.3 最佳化 PPVO

Weng 等人[12]所提出的最佳化 PPVO，是建立在 Qu 等人[10]的 PPVO 基礎上，使參照區塊的像素更緊密地圍繞待嵌入像素 p ，並可依照編碼後的失真情形，適應性地調整使用的 PEH bin。bin 0 通常是 PEH 的峰值，可能達到最高的藏密容量，但在容量足夠時，根據載體影像的不同，bin 0 不一定會是達到最高品質的最佳選擇，所以在保證足夠容量的前提下，可根據藏密後之品質來適應性調整所用之 PEH bin，以進行品質上的改善，使得此藏密方式就算在紋理相對粗糙的載體影像（如：USC-SIPI 影像資料庫中之 Baboon 載體），也能達到比其他 PPVO 相關的方法更好的效果。但後續根據 Kaur 等人[1]的比較，將此方法運用於在大部分圖片時，在品質上並沒有特別優異的表現。

此方法的藏密步驟說明如下：

步驟 1：拆分影像

根據 Weng 等人[12]的方法，為了維持演算法的可回復性，參照區塊 I_{LSE} 中不能包含目前編碼階段會更動到的像素，因此將待編碼像素，以棋盤式拆分成兩階段。如圖 6 所示，灰色部分像素為本階段將修改或嵌入的像素（集合 I_A ），其中 x 是當下正編碼的像素，同階段 c_5 、 c_6 、 c_7 、 c_8 及 c_{13} 為接下來陸續要編碼的像素。而黑色部分像素僅做為參照區塊使用，不進行藏密（集合 I_B ），如果需要額外容量，則將

會於下一層編碼參與藏密。至於白色部分像素，則不採用。

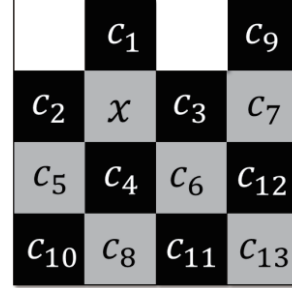


圖 6. 參照區塊及交錯嵌入的樣式

步驟 2：溢位處理

由於 PVO 的藏密方式最多只會改動像素 ± 1 ，此時須將溢位像素集合， $O_P = \{p \in \{0, 255\}\}$ 的像素記錄於溢位映射表 LM ，排除於藏密過程中，並將 LM 以算術編碼壓縮後，記錄於還原資訊。

步驟 3：篩選像素

區塊複雜度 Δ 可以透過公式(6)計算獲得，其值代表參照區塊的標準差，而篩選閾值為 vT 。後續將不會溢位的待嵌入像素 D_p 所在的參照區塊像素做篩選，當 $\Delta \leq vT$ 時，視為平滑像素 S_p ，否則視為粗糙像素 C_p ，會跳過而不進行藏密。 n 為參照區塊取用之像素數量，介於 4 至 18 之間。如圖 7 所示，下限為 $n = 4$ 時涵蓋了周圍上下左右最近的 4 個像素。

$$\Delta = \sigma_{LSE} = \sqrt{\frac{\sum_{t \in \{1, n\}} (c_t - \mu_{LSE})^2}{n}} \quad (6)$$

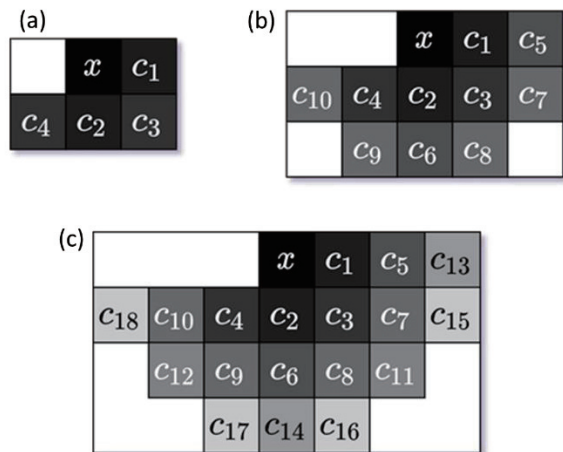


圖 7. 不同 n 下的參照區塊 C_n

步驟 4：藏密

預測誤差直方圖 PEH 中所選定 bin 的最大藏密量 $H(k, t)$ 可運用公式(7)，根據所選用之預測誤差 ($k = P_e$) 和複雜度閾值 t 計算產生，其中 $\#$ 為符合條件的像素數量，而 N_S 為平滑像素 S_P 的總數。運用公式(8)計算預測誤差 P_e ，再以公式(9)嵌入各像素。

$$H(k, t) = \#\{1 \leq i \leq N_S : P_{e,i} = k, \Delta_i = t\} \quad (7)$$

$$P_e = \begin{cases} \begin{cases} p - c_{\max} & \text{if } p \geq c_{\max} \\ c_{\min} - p & \text{if } p \leq c_{\min} \\ \text{skipped} & \text{if } c_{\min} < p < c_{\max} \end{cases} & \text{and } c_{\max} \neq c_{\min} \\ \begin{cases} p - c_{\max} & \text{if } p \geq c_{\max} + 1 \\ c_{\max} - p & \text{if } p \leq c_{\max} \end{cases} & \text{and } c_{\max} = c_{\min} \end{cases} \quad (8)$$

$$p', P'_e = \begin{cases} \begin{cases} p + b, P_e + b & \text{if } P_e = p_{e, \text{opt}}^* \\ p + 1, P_e + 1 & \text{if } P_e > p_{e, \text{opt}}^* \\ p, P_e & \text{if } P_e < p_{e, \text{opt}}^* \end{cases} & \text{and } p \geq c_{\max} \\ \begin{cases} p - b, P_e - b & \text{if } P_e = p_{e, \text{opt}}^* \\ p - 1, P_e - 1 & \text{if } P_e > p_{e, \text{opt}}^* \\ p, P_e & \text{if } P_e < p_{e, \text{opt}}^* \end{cases} & \text{and } p \leq c_{\min} \\ \text{skipped} & \text{if } c_{\min} < p < c_{\max} \end{cases} \quad (9)$$

where $c_{\max} \neq c_{\min}$

$$p', P'_e = \begin{cases} \begin{cases} p + b, P_e + b & \text{if } P_e = p_{e, \text{opt}}^* \\ p + 1, P_e + 1 & \text{if } P_e > p_{e, \text{opt}}^* \\ p, P_e & \text{if } P_e < p_{e, \text{opt}}^* \end{cases} & \text{and } p > c_{\max} \\ \begin{cases} p - b, P_e - b & \text{if } P_e = p_{e, \text{opt}}^* \\ p - 1, P_e - 1 & \text{if } P_e > p_{e, \text{opt}}^* \\ p, P_e & \text{if } P_e < p_{e, \text{opt}}^* \end{cases} & \text{and } p \leq c_{\min} \\ p, P_e & \text{if } P_e < p_{e, \text{opt}}^* \end{cases}$$

where $c_{\max} = c_{\min}$

2.4 改良式 PPVO

相較於 Weng 等人[12]與 Qu 和 Kim[10]提出的 PPVO，Wu 等人[13]的改良式 PPVO 將參考區塊擴大（如圖 7 所示），可以在低容量時更全面地參考周圍的像素，使預測結果更為精確，以降低不必要的位移。並且因為能更準確地計算預測誤差(PE)，使得其直方圖(PEH)更為銳利，可以在 Top bin 嵌入更多的秘密訊

息，換言之，可在品質不變的狀況下增加容量。此方法還可以依據像素所在區塊之複雜度，適時調整實際進行藏密時使用的參照區塊大小。

作者將像素以編碼時使用之參照區塊大小，區分為3類： $\{C_4, C_{10}, C_{18}\}$ （如圖 7 所示），亦即 3 類所使用之像素數量，分別為： $(n_1, n_2, n_3) = (4, 10, 18)$ 。並以多個閾值 $T = (t_1, t_2, t_3)$ ，依照所在之區塊複雜度 LC 加以區分，其中 T 滿足 $0 \leq t_1 \leq t_2 \leq t_3$ 。區塊複雜度 LC 是依照 $[t_{i-1}, t_i)$ 的範圍歸入第 i 類，並採取 C_i 作為嵌入時的參照區塊，而 $LC > t_3$ 的像素則完全捨棄，從藏密過程忽略。採取 3 種參照區塊大小，對於嵌入效果而言已經相當足夠，如果取到 4 種以上參照區塊大小，對於藏密後的影像品質提昇並沒有明顯的幫助。而若以窮舉的方式，來尋找閾值 t_i 的時間開銷，將隨著 k 的增加呈平方增長，即便能提昇影像品質，卻並不見得划得來。

三、研究方法

3.1 藏密程序

本研究所提出之方法，主要是結合 Weng 等人[12]提出的最佳化 PPVO 方法（採用環繞交錯式藏密方式），以及 Wu 等人[13]提出之改良式 PPVO 方法（採用擴大參照區塊的方式）兩者之優點，目標在提升藏密後影像之品質，以減低失真程度（以 PSNR 作為比較基準），同時能維持 Weng 等人[12]所提出之方法對於較粗糙圖片（如：USC-SIPI 影像資料庫中之 Baboon 載體）的預測效果。

具體的藏密流程（如圖 8 及圖 9 所示），各步驟說明如下：

步驟 1：拆分影像

參考 Weng 等人[12]的方法，先將載體影像 I_C 以類似西洋棋盤的方式，拆分成 I_A 和 I_B 兩組交錯的像素集合（其排列樣式如圖 10 所示）。

步驟 2：複雜度計算及參照區塊大小調整

假設此時正在參與藏密的集合為 I_A ，則以待編碼像素（即待預測像素 x ）為基準，如圖 11 所示，依由近而遠、由左而右、由上而下的順序選取參照區塊所用的像素，再以參照區塊

的最大可能的像素個數 CN (此處固定 $CN = 22$)，根據公式(10)計算像素的區塊複雜度 Δ ，其中 $\mu_{LSE} = I_{LSE}$ 的平均值， $\sigma_{LSE} = I_{LSE}$ 的標準差， $I_{LSE} = n$ 個臨近像素的集合。

$$\Delta = \sigma_{LSE} = \sqrt{\frac{\sum_{t \in \{1, n\}} (c_t - \mu_{LSE})^2}{CN}} \quad (10)$$

參考 Wu 等人[13]的方法，採用 m 個閾值 $T = (t_1, t_2, \dots, t_m)$ 來篩選各區塊複雜度 Δ (此處設定 $m = 2$ ，則獲得 2 個閾值 (t_1, t_2) ，且 $0 \leq t_1 \leq t_2$)。後續依照這些閾值，來判斷各個參照區塊藏密時實際使用的大小。各區塊分別使用 CN_i 個像素，並歸類為第 i 類的參照區塊像素集合 A_i ，其中 $i \in [1, m]$ 。本研究使用之參照區塊大小，如圖 12 所示 (分別為 $CN_1 = 4$ 與 $CN_2 = 11$)。

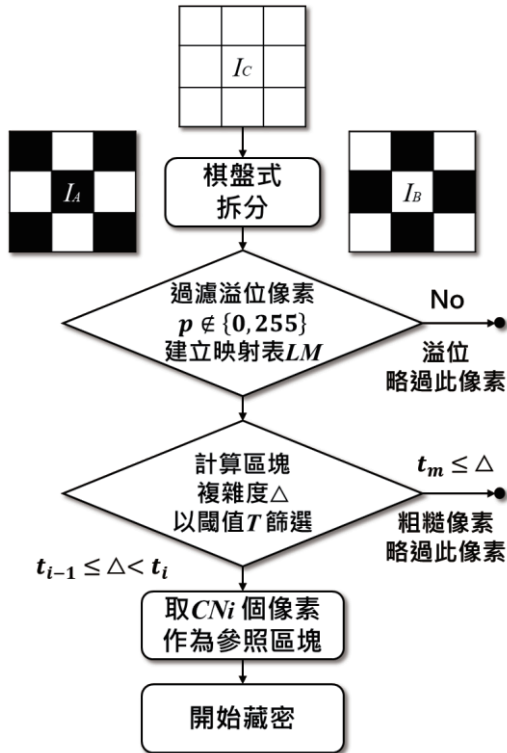


圖 8. 載體影像拆分與參照區塊調整

步驟 3：由預測誤差直方圖 PEH 中選擇最佳 bin 並藏密

各像素可根據所在區塊的複雜度 Δ ，透過所對應的閾值 t_i ，將其歸屬於第 i 類的像素集合，於藏密時將使用不同大小的參照區塊 CN_i ，

其中 $i \leq m$ 。

嵌入前，需先判斷 I_A 的 PEH 中預測誤差 $P_{e,opt}$ bins 的預估容量 $H(P_{e,opt}^i, t_i)$ ，並選擇滿足公式(11)的 bin。嵌入時，則各自根據 PEH bin 的品質 (藏密前後之方均差 MSE)，動態調整使用之 PEH bin，直到找到最適合的 $P_{e,opt}^*$ ，完成此層的嵌入。

$$H(k, t) = \#\{1 \leq i \leq N_S : k = P_e, t = T\}$$

$$H(P_{e,opt}, T) \geq \text{剩餘密文長度} \quad (11)$$

為集合內元素數量， N_S 為 S_p 的像素總數

步驟 4：還原資訊

當嵌入到各層的第 L_{CLM} 個像素後，先分別將 I_A 、 I_B 子圖起始的 L^2 個像素的 LSBs 保存成位元流 C ，再以步驟三的方式接續進行嵌入 (流程如圖 9)。而位元流 C 嵌入完畢後，再繼續嵌入秘密訊息，直到訊息結束或是容量不足為止。最後再分別於 I_A 、 I_B 子圖起始的 L_{CLM} 個像素，以 LSB 取代法嵌入還原訊息。

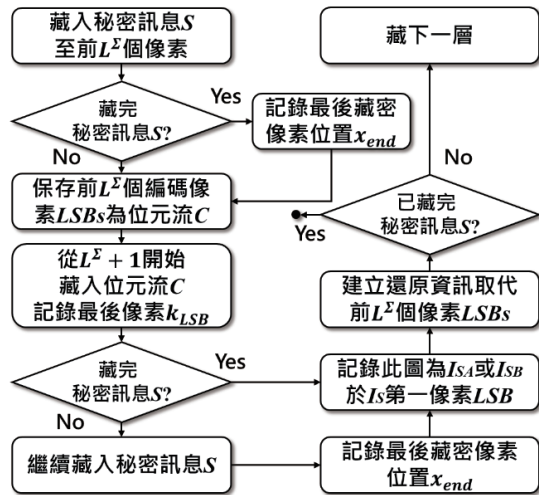


圖 9. 藏密流程

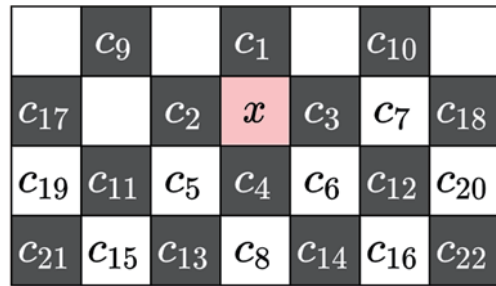


圖 10. 取樣區塊範圍及交錯樣式 (完整的 $CN = 22$)

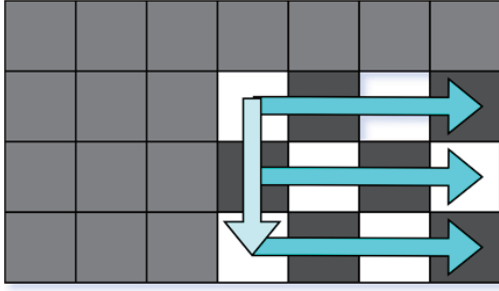


圖 11. 參照區塊像素的選取順序

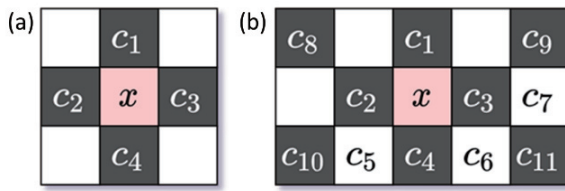


圖 12. 不同之參照區塊大小 CN (左圖為 $CN = 4$, 右圖為 $CN = 11$)

個別像素的藏密流程如下：

步驟 1：根據溢位映射表 LM ，跳過溢位標記為 True 的像素。

步驟 2：以公式(10)計算像素 p 的區塊複雜度 Δ ，根據篩選閾值 t_i ，決定所用參照區塊的大小 CN_i 。

步驟 3：根據所設定之參照區塊大小，及所採用之 PEH bin，依據公式(12)計算預測差值 P_e ，並以公式(13)嵌入秘密訊息位元 b ，得到修改後的像素值 p' 。

$$P_e = \begin{cases} p - c_{max} & \text{if } p \geq c_{max} \\ c_{min} - p & \text{if } p \leq c_{min} \\ \text{skipped} & \text{if } c_{min} < p < c_{max} \end{cases} \quad \text{and } c_{max} \neq c_{min}$$

$$\begin{cases} p - c_{max} & \text{if } p \geq c_{max} + 1 \\ c_{max} - p & \text{if } p \leq c_{max} \end{cases} \quad \text{and } c_{max} = c_{min}$$

(12)

$$p', P'_e = \begin{cases} p + b, P_e + b & \text{if } P_e = p_{e,opt}^* \\ p + 1, P_e + 1 & \text{if } P_e > p_{e,opt}^* \text{ and } p \geq c_{max} \\ p, P_e & \text{if } P_e < p_{e,opt}^* \\ p - b, P_e - b & \text{if } P_e = p_{e,opt}^* \\ p - 1, P_e - 1 & \text{if } P_e > p_{e,opt}^* \text{ and } p \leq c_{min} \\ p, P_e & \text{if } P_e < p_{e,opt}^* \end{cases}$$

$$\text{skipped} \quad \text{if } c_{min} < p < c_{max}$$

where $c_{max} \neq c_{min}$

(13)

$$p', P'_e = \begin{cases} p + b, P_e + b & \text{if } P_e = p_{e,opt}^* \\ p + 1, P_e + 1 & \text{if } P_e > p_{e,opt}^* \text{ and } p > c_{max} \\ p, P_e & \text{if } P_e < p_{e,opt}^* \\ p - b, P_e - b & \text{if } P_e = p_{e,opt}^* \\ p - 1, P_e - 1 & \text{if } P_e > p_{e,opt}^* \text{ and } p \leq c_{min} \\ p, P_e & \text{if } P_e < p_{e,opt}^* \end{cases}$$

where $c_{max} = c_{min}$

3.2 取密程序

取密程序 (如圖 13 與圖 14 所示)，各步驟說明如下：

步驟 1：拆分子圖

首先，以西洋棋盤的樣式為基準，交錯拆分藏密影像 I_S ，成為 I_{SA} 、 I_{SB} 兩層次的子圖。從第一個像素 LSB 是否為 0，來判斷此層子圖所屬為 I_{SA} 或 I_{SB} ，再取出對應子圖各像素的 $LSBs$ ，來重建還原訊息，而得到溢位映射表和各個藏密參數。

步驟 2：取密

由第 x_{end} 個像素，反向取出並還原秘密訊息 (取密順序示意，如圖 15)，取出至第 L^Z 個像素時，則暫時停止。所取出的這 L^Z 個位元，即包含原始影像前端 $LSBs$ 所組成的位元串流 C ，故運用 LSB 取代法，對影像前端像素進行還原。接著從先前的位置繼續取密，直到第一個像素還原完成後結束。

步驟 3：決定是否繼續下一層取密

根據目前記錄的層數 MT ，來判斷是否繼續往下一層進行取密。如果 MT 不為 0，即代表還有剩下的秘密訊息，則需回到步驟 1，繼續進行取密。

個別像素的取密流程如下：

步驟 1：根據取出的溢位映射表 LM ，跳過溢位標記為 True 的像素。

步驟 2：以公式(10)計算像素 p 的區塊複雜度 Δ ，並根據篩選閾值 t_i ，來決定所使用的參照區塊大小 CN_i 。

步驟 3：根據所用之參照區塊大小，及所採用之 PEH bin，依據公式(14)計算預測差值 P'_e ，並以公式(15)取出秘密訊息位元 b ，以還原原始像素值 p 。

$$P'_e = \begin{cases} p' - c_{max} & \text{if } p' \geq c_{max} \\ c_{min} - p' & \text{if } p' \leq c_{min} \\ \text{skipped} & \text{if } c_{min} < p' < c_{max} \end{cases} \quad \text{where } c_{max} \neq c_{min}$$

$$\begin{cases} p' - c_{max} & \text{if } p' \geq c_{max} + 1 \\ c_{max} - p' & \text{if } p' \leq c_{max} \end{cases} \quad \text{where } c_{max} = c_{min}$$
(14)

$$p, b = \begin{cases} p', b = 0 & \text{if } P'_e = P_{e,opt} \\ p' - 1, b = 1 & \text{if } P'_e = P_{e,opt} + 1 \\ p' - 1, \text{no data} & \text{if } P'_e > P_{e,opt} \\ p', \text{no data} & \text{if } P'_e < P_{e,opt} \end{cases} \quad \text{and } p' \geq c_{max}$$

$$\begin{cases} p', b = 0 & \text{if } P'_e = P_{e,opt} \\ p' + 1, b = 1 & \text{if } P'_e = P_{e,opt} - 1 \\ p' + 1, \text{no data} & \text{if } P'_e > P_{e,opt} \\ p', \text{no data} & \text{if } P'_e < P_{e,opt} \end{cases} \quad \text{and } p' \leq c_{min}$$

where $c_{max} \neq c_{min}$

(15)

$$p, b = \begin{cases} p', b = 0 & \text{if } P'_e = P_{e,opt} \\ p' - 1, b = 1 & \text{if } P'_e = P_{e,opt} + 1 \\ p' - 1, \text{no data} & \text{if } P'_e > P_{e,opt} \\ p', \text{no data} & \text{if } P'_e < P_{e,opt} \end{cases} \quad \text{and } p' > c_{max}$$

$$\begin{cases} p', b = 0 & \text{if } P'_e = P_{e,opt} \\ p' + 1, b = 1 & \text{if } P'_e = P_{e,opt} - 1 \\ p' + 1, \text{no data} & \text{if } P'_e > P_{e,opt} \\ p', \text{no data} & \text{if } P'_e < P_{e,opt} \end{cases} \quad \text{and } p' \leq c_{ax}$$

where $c_{max} = c_{min}$



圖 13. 取密流程(一)

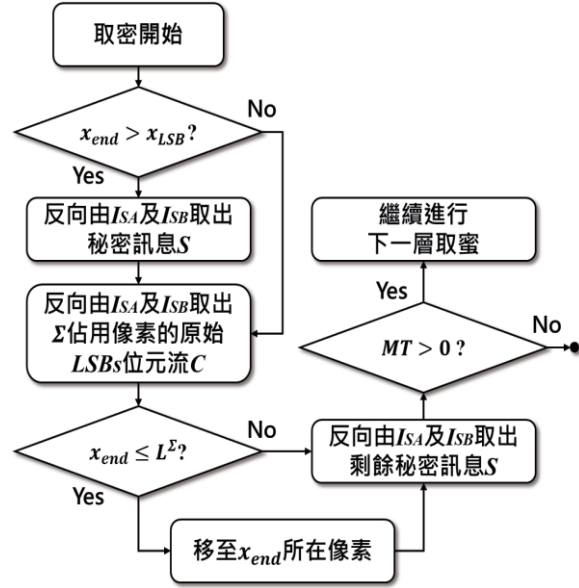


圖 14. 取密流程(二)

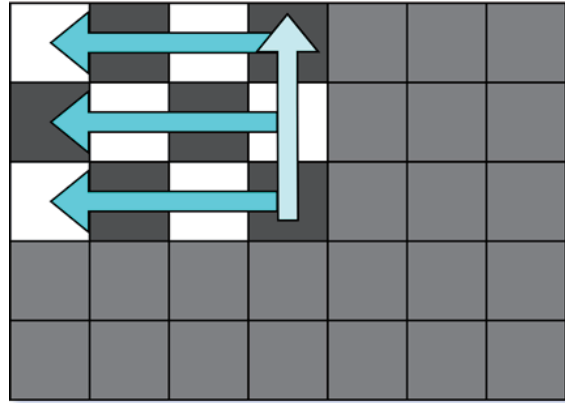


圖 15. 像素的取密順序

3.3 藏密、取密範例說明

令區塊複雜度的閾值 T 分別為 $(t_1, t_2) = (5, 10)$ ，參照區塊大小 CN 分別為 $(CN_1, CN_2) = (11, 22)$ ，而密文位元為 $b = 1$ 。

假設待編碼像素 $p=177$ ，則其周邊的像素如圖 16 所示。除待編碼像素外，圖中標示像素值之其餘 22 個像素，將根據公式(10)，用於計算區塊複雜度 Δ 。其中，完整參照區塊 $I_{LSE} = (179, 179, \dots, 179, 178)$ ，而參照區塊平均值 $\mu_{LSE} = 178.86$ ，計算出本像素的區塊複雜度為 $\Delta = 1.66$ 。由於 $0 \leq \Delta \leq t_1$ ，故本像素屬於第 1 類像素，應使用 $CN_1 = 11$ 來進行藏密、預測差值計算及嵌入（如圖 16 紅色粗框部分）。

	179		179		177	
181		179	177	180	177	176
179	182	178	178	180	178	177
183	179	179	177	180	179	178

圖 16. 藏密前測試區塊

於參照區塊 c 之中， $c_{max} = 182$ ，而 $c_{min} = 177$ ，則根據公式(12)， $c_{max} \neq c_{min}$ 且 $p \leq c_{min}$ ，計算出預測差值為 $P_e = c_{min} - p = 177 - 177 = 0$ 。假設此時此層 $P_{e,opt}^{1*} = 0$ ，則根據公式(13)， $P_e = P_{e,opt}^{1*}$ 且 $p \leq c_{min}$ ，計算出 $p' = p - b = 177 - 1 = 176$ 。此時結果如圖 17 所示，待嵌入像素變為 176。

最後將所使用之 (t_1, t_2) 、 (CN_1, CN_2) 、 $P_{e,opt}^{1*}$ 皆嵌入載體影像後，則完成藏密。

	179		179		177	
181		179	176	180	177	176
179	182	178	178	180	178	177
183	179	179	177	180	179	178

圖 17. 藏密後測試區塊

取密流程也以相同區塊來進行說明。首先，從還原資訊取出所使用的參數 (t_1, t_2) 、 (CN_1, CN_2) 、 $P_{e,opt}^{1*}$ 。

於圖 17 中，根據公式(10)來計算區塊複雜度為 Δ 。其中， $I_{LSE} = (179, 179, \dots, 179, 178)$ ，而 $\mu_{LSE} = 178.86$ ，故本像素的區塊複雜度為 $\Delta = 1.66$ 。而由於 $0 \leq \Delta \leq t_1$ ，則判斷本像素屬於第 1 類像素，應使用 $CN_1 = 11$ 來進行取密（如圖 17 之紅色粗框部分）。

於參照區塊 c 之中， $c_{max} = 182$ ，而 $c_{min} = 177$ ，則根據公式(14)， $c_{max} \neq c_{min}$ 且 $p' \leq c_{min}$ ，計算出預測差值為 $P'_e = c_{min} - p' = 177 - 176 = 1$ 。最後根據公式(15)， $P'_e =$

$P_{e,opt}^{1*} - 1$ 且 $p' \leq c_{min}$ ，計算出 $(p, b) = (p' + 1, 1) = (176 + 1, 1) = (177, 1)$ ，故秘密訊息位元 $b = 1$ ，而原始像素 $p = 177$ ，完成取密。

四、實驗結果

本節將針對本研究提出的基於像素式像素排序法之可回復式資訊隱藏技術進行分析，並藉由得到的實驗數據，來驗證本方法之可行性。此處針對 5,000-15,000 位元範圍下的低藏密量，進行固定容量藏密，並以峰值訊號雜訊比（PSNR）為指標，和其他學者提出方法之藏密影像進行品質比較。以下內容，首先陳述本研究進行之實驗環境，接續為實驗結果分析。

4.1 實驗環境

本研究採用之相關軟、硬體環境，簡述如下：

- 硬體環境：所使用之筆記型電腦，其中央處理器為具備四核心之 Core i7 6700HQ 2.6 GHz，並搭配 24GB 記憶體。主要用來進行藏密實驗程式開發及影像編碼。
- 軟體環境：所採用之作業系統為 Ubuntu 20.04，並運用 Visual Studio Code 整合開發環境，以 GCC 作為編譯器，以 C++ 進行程式編寫，並藉由 OpenCV 及 Eigen 所提供之函數，來實作原始 PPVO 藏密法及本研究提出之藏密方法，以進行藏密、取密及影像還原比較。

本研究使用影像處理領域常用的 USC-SIPI 影像資料庫[14]中之 Boat 等 6 張 512×512 灰階影像（如圖 18），來作為初步測試和比對目標。後續，以 BOSSBase 自然影像資料庫[15]中之影像為主，來進行廣泛性測試。其中包含具備複雜紋理的影像，也有相對平滑的影像，並於分類上包含人像、物體、風景等，可用來代表常見數位影像的內容。而在影像藏密後品質上的衡量標準，則主要是以峰值訊號雜訊比（PSNR）值作為比較依據。

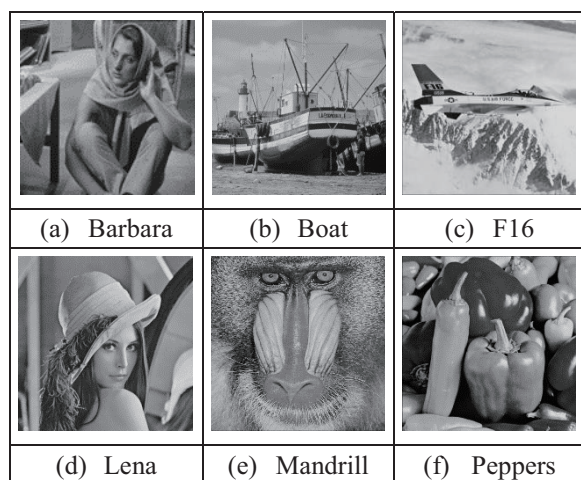


圖 18. 本研究使用之測試影像

4.2 結果分析

依照本研究提出之方法（藏密步驟如 3.1

節所述），採用 USC-SIPI 影像資料庫[14]中之 Boat 等 6 張 512×512 灰階影像（如圖 18），就藏密後之影像品質，與 Li 等人[6]的原始 PVO、Qu 和 Kim[10]的原始 PPVO、Weng 等人[12]的固定大小交錯式 PPVO，以及 Wu 等人[13]的變動參照區塊大小 PPVO 等方法進行初步比較，所獲得之數據（PSNR）依不同藏密量與載體影像區分，如表 2 至表 6 所示。另外，整體平均表現如表 7 與圖 19 所示。

由此初步實驗結果得知，和 Li 等人[6]、Qu 和 Kim[10]、Weng 等人[12]，以及 Wu 等人[13]的方法相比，本研究方法在藏密量約為 10000 位元，且估計是在第一層藏密即將結束時，具有最好的表現。而至於其他藏密量區間，則穩定保持與 Weng 等人[12]的方法有相當的品質表現。

表 2. 採用 USC-SIPI 影像資料庫 6 張標準影像於 5000 位元藏密量之 PSNR（dB）表現比較

作者 圖片	Li 等人[6]	Qu 和 Kim [10]	Weng 等人 [12]	Wu 等人 [13]	本研究
Barbara	N/A	64.0	65.0	64.0	64.3
Boat	61.7	62.5	62.5	63.0	65.2
F16	65.4	67.0	66.2	68.0	65.8
Lena	63.4	64.0	64.5	65.0	64.0
Mandrill	58.6	59.0	59.9	59.0	58.7
Peppers	62.3	62.5	63.0	63.0	62.9
平均	62.3	63.2	63.5	63.7	63.5

表 3. 採用 USC-SIPI 影像資料庫 6 張標準影像於 7500 位元藏密量之 PSNR（dB）表現比較

作者 圖片	Li 等人[6]	Qu 和 Kim [10]	Weng 等人 [12]	Wu 等人 [13]	本研究
Barbara	N/A	62.0	63.1	62.3	62.4
Boat	59.45	60.4	60.8	60.9	63.2
F16	63.1	65.3	65.1	66.0	64.4
Lena	61.3	62.2	62.7	63.0	61.8
Mandrill	55.8	56.6	57.7	56.7	56.4
Peppers	60.2	60.8	61.3	61.3	60.9
平均	60.0	61.2	61.8	61.7	61.5

表 4. 採用 USC-SIPI 影像資料庫 6 張標準影像於 10000 位元藏密量之 PSNR (dB) 表現比較

作者 圖片	Li 等人[6]	Qu 和 Kim [10]	Weng 等人 [12]	Wu 等人 [13]	本研究
Barbara	N/A	60.0	61.1	60.5	60.7
Boat	58.0	58.2	59.0	58.8	61.7
F16	61.7	63.5	64.0	64.0	62.8
Lena	59.9	60.4	60.9	61.0	60.4
Mandrill	53.6	54.2	55.4	54.4	54.7
Peppers	58.5	59.0	59.5	59.5	59.4
平均	58.3	59.2	60.0	59.7	60.0

表 5. 採用 USC-SIPI 影像資料庫 6 張標準影像於 12500 位元藏密量之 PSNR (dB) 表現比較

作者 圖片	Li 等人[6]	Qu 和 Kim [10]	Weng 等人 [12]	Wu 等人 [13]	本研究
Barbara	N/A	58.7	59.8	59.3	59.6
Boat	56.4	57.2	57.8	57.5	60.5
F16	60.8	62.7	63.0	63.2	61.8
Lena	58.6	59.4	59.9	60.1	59.4
Mandrill	51.8	52.3	54.0	Out of space	52.9
Peppers	57.4	57.8	58.3	58.3	58.4
平均	57.0	58.0	58.8	59.6	58.8

表 6. 採用 USC-SIPI 影像資料庫 6 張標準影像於 15000 位元藏密量之 PSNR (dB) 表現比較

作者 圖片	Li 等人[6]	Qu 和 Kim [10]	Weng 等人 [12]	Wu 等人 [13]	本研究
Barbara	N/A	57.7	58.6	58.5	58.6
Boat	55.4	56.0	56.5	56.2	59.5
F16	59.4	61.8	62.0	62.3	60.8
Lena	57.6	58.3	58.7	59.1	58.4
Mandrill	Out of space	50.7	53.0	Out of space	51.0
Peppers	56.2	56.4	57.1	57.1	57.3
平均	57.1	56.8	57.7	58.6	57.6

表 7. USC-SIPI 資料庫 6 張標準影像於 5000-15000 位元藏密量之平均 PSNR (dB) 表現比較

作者 藏密量	Li 等人[6]	Qu 和 Kim [10]	Weng 等人 [12]	Wu 等人 [13]	本研究
5000	62.3	63.2	63.5	63.7	63.5
7500	60.0	61.2	61.8	61.7	61.5
10000	58.3	59.2	60.0	59.7	60.0
12500	57.0	58.0	58.8	59.6	58.8
15000	57.1	56.8	57.7	58.6	57.6

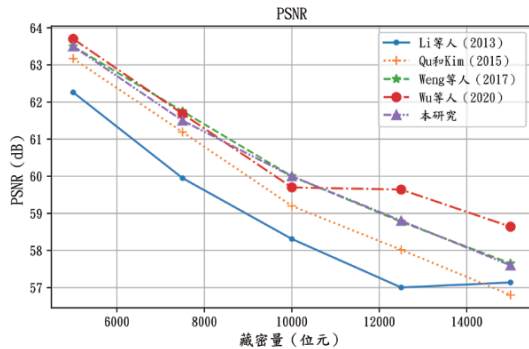


圖 19. 採用 USC-SIPI 影像資料庫 6 張標準影像於 5000-15000 位元藏密量之平均 PSNR (dB) 表現比較

本研究另外採用了大量影像，來進行廣泛性測試，並與其他學者所提出之方法進行比較。所使用之影像，是從知名的 BOSSBase 自然影像資料庫中，隨機選取的 3850 張 512x512 灰階影像。測試結果如圖 20 所示，相較於 Li 等人[6]、Qu 和 Kim[10]、Weng 等人[12]，以及 Wu 等人[13]的方法所產出之結果，普遍有較好的品質表現。於本測試中，由於缺少 Wu 等人[13]和 Weng 等人[12]兩種方法的原始程式碼，而依據其演算法所自行實作之程式，並沒有辦法達到與其文獻呈現完全相同效果，故本研究針對這兩種方法之結果，是直接採用其文獻中所宣稱之最佳數據，來進行比較。而由於本研究所採取之圖片數量更多，且種類範圍更廣，故可合理認定本研究進行之廣泛性測

試，所產出之結果更為客觀，且更具參考價值。且即便廣泛測試之結果，相較於只採用少數影像測試之最佳結果，可能會有低估性能之情形，然而在此情形下，本研究之結果仍能優於這兩種方法所提出之數據。

另外，本研究方法與 Li 等人[6]及 Qu 和 Kim [10]方法之比較結果，如圖 21、表 8 及表 9 所示。就峰值訊號訊比 (PSNR) 而言，本研究方法於 5000-15000 位元藏密量下，相較於 Li 等人[6]之方法，分別提升了 6.34%、6.09%、6.05%、6.10%、6.16%，而相較於 Qu 和 Kim[10]之方法，則分別提升了 7.12%、6.40%、5.90%、5.51%、5.16%。就結構相似性 (SSIM) 而言，相較於 Li 等人[6]之方法，分別提升了 0.0122%、0.0135%、0.0148%、0.0158%、0.0168%，而相較於 Qu 和 Kim[10]之方法，則分別提升了 0.0307%、0.0321%、0.0333%、0.0339%、0.0343%。

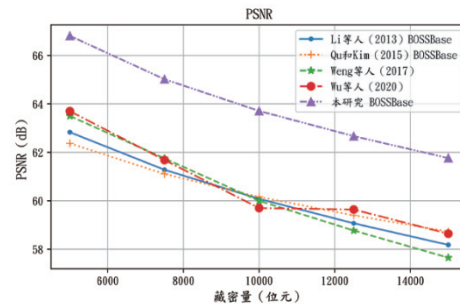


圖 20. 採用 BOSSBase 影像資料庫 3850 張隨機影像於 5000-15000 位元藏密量之平均 PSNR (dB) 表現比較

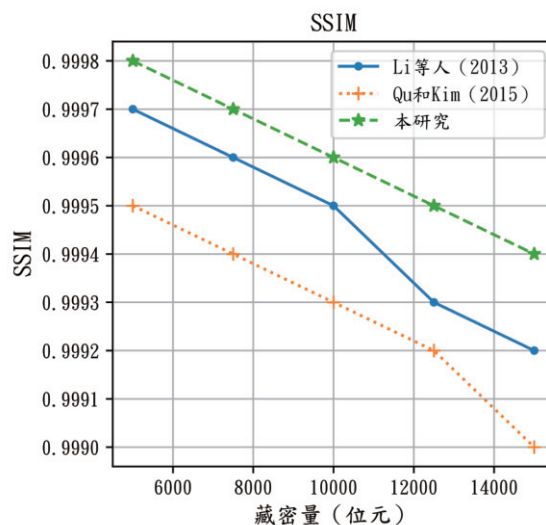
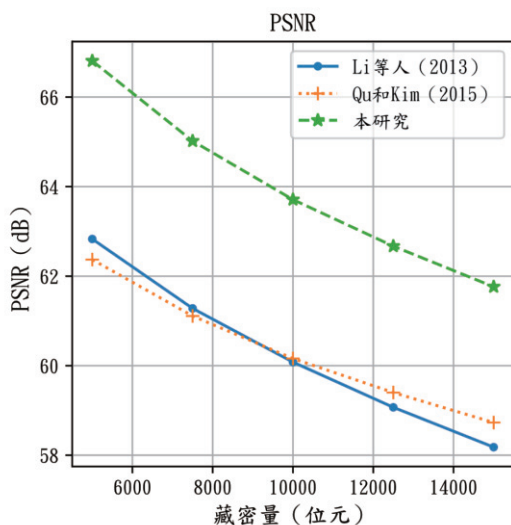


圖 21. 採用 BOSSBase 3850 張隨機影像於 5000-15000 位元藏密量之平均 PSNR 與 SSIM

表 8. 採用 BOSSBase 3850 張隨機影像於 5000-15000 位元藏密量之平均 PSNR (dB) 結果比較

作者 藏密量	本研究	Li 等人 (2013)	Qu 和 Kim (2015)
5000	66.81	62.83	62.37
7500	65.02	61.28	61.11
10000	63.71	60.08	60.16
12500	62.67	59.07	59.40
15000	61.76	58.18	58.73

表 9. 採用 BOSSBase 3850 張隨機影像於 5000-15000 位元藏密量之 SSIM 結果比較

作者 藏密量	本研究	Li 等人 (2013)	Qu 和 Kim (2015)
5000	0.9998	0.9997	0.9995
7500	0.9997	0.9996	0.9994
10000	0.9996	0.9995	0.9993
12500	0.9995	0.9993	0.9992
15000	0.9994	0.9992	0.9990

針對 BOSSBase 自然影像資料庫隨機 3850 張影像與 USC-SIPI 影像資料庫 6 張標準影像 (如圖 18)，運用本研究方法所進行之藏密影像品質比較，結果如圖 22 所示。顯示本研究方法在 5000-15000 位元藏密容量下，廣泛測試的平均表現，優於其他文獻中所特別挑選出的 6 張影像 (在各藏密容量下，影像品質分別有 5.210%、5.721%、6.183%、6.581%、7.227%的提升)。也代表本方法雖與文獻中其他方法在相對侷限的 6 張標準影像上的表現相當，然而在模擬實際運用的廣泛測試下，能有更良好穩定的表現。

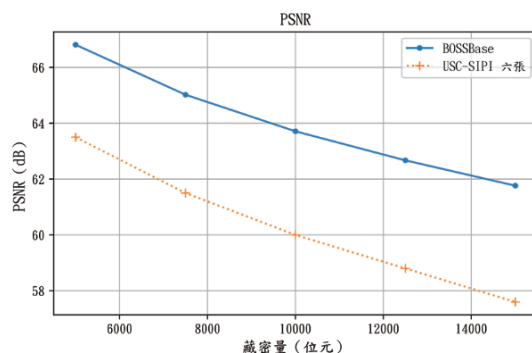


圖 22. 本研究方法對 BOSSBase 資料庫 3850 張隨機影像與 USC-SIPI 資料庫 6 張標準影像於 5000-15000 位元藏密量下之結果比較

4.3 安全性分析

資訊隱藏的根本目標，是完全不被察覺。而除了不被輕易從肉眼觀察到失真與不自然的改變之外，也要能夠預防被常見的藏密分析技術檢查出異常狀況。本節主要探討本研究提出的藏密方法，是否能有效抵抗藏密分析技術的偵測，故採用了兩種具有代表性的空間域藏密分析方法，分別為正規/特異 (RS) 藏密分析，以及像素差值直方圖 (PDH) 藏密分析，來進行藏密影像偵測。

RS 藏密分析技術是由 Fridrich、Goljan 與 Du 三位學者於 2001 年提出。於本安全性分析中，採用了 RS 藏密分析技術，來針對 Boat 原始載體影像進行分析，所獲得之參考結果如圖 23 (a)所示。後續，分別針對使用 1-bit LSB 取代法及 3-bit LSB 取代法藏密的 Lena 影像進行分析，其結果如圖 23 (b)與(c)所示。最後，針對本研究藏密方法進行藏密的 Boat 影像 (15,000 位元藏密量)進行分析，其結果如圖 23 (d)所示。由 RS 分析結果，指出各影像的藏密比率 (Embedding Rate) 分別為(a) -0.03、(b) 0.94、(c) 1.1 及(d) -0.03，由此判定(b)與(c)的影像有藏密，而(a)與(d)的影像無藏密。由此安全性分析結果，可得知 RS 偵測技術可有效偵

測使用 LSB 取代法藏密之影像，但無法偵測本研究藏密方法產生的藏密影像，代表本研究藏密法可有效抵抗 RS 藏密分析技術之偵測。

一般灰階影像像素是以 8 個位元來表示，使得其值介於 0 到 255 的範圍，以表示灰色的深淺。像素差值直方圖 (PDH)，是用來統計影像相鄰像素間各種差值出現的次數。一般載體影像之 PDH 會接近常態分佈，如圖 24(a)所示，其中橫軸為像素差值，而縱軸為像素差值的統計量 (次數)。而另一方面，影像若經藏密演算法藏密後，則會改變像素間彼此的相關

性，將使得其 PDH 會呈現不正常的分佈 (例如：階梯狀)，而不再接近常態分佈，如圖 24 (b)(c)(d)所示，此顯著的特徵容易成為藏密分析的偵測目標，用來判定該影像內確實隱藏秘密訊息。本研究針對原始像素差值 (Pixel-Value Differencing, PVD) 藏密法、3-bit LSB 取代法結合 PVD 藏密法、整合式 PVD/LSB 藏密法，以及本研究所提出之藏密方法 (藏密量分別為 5,000 至 15,000 位元)，分別進行藏密影像 PDH 安全性分析。

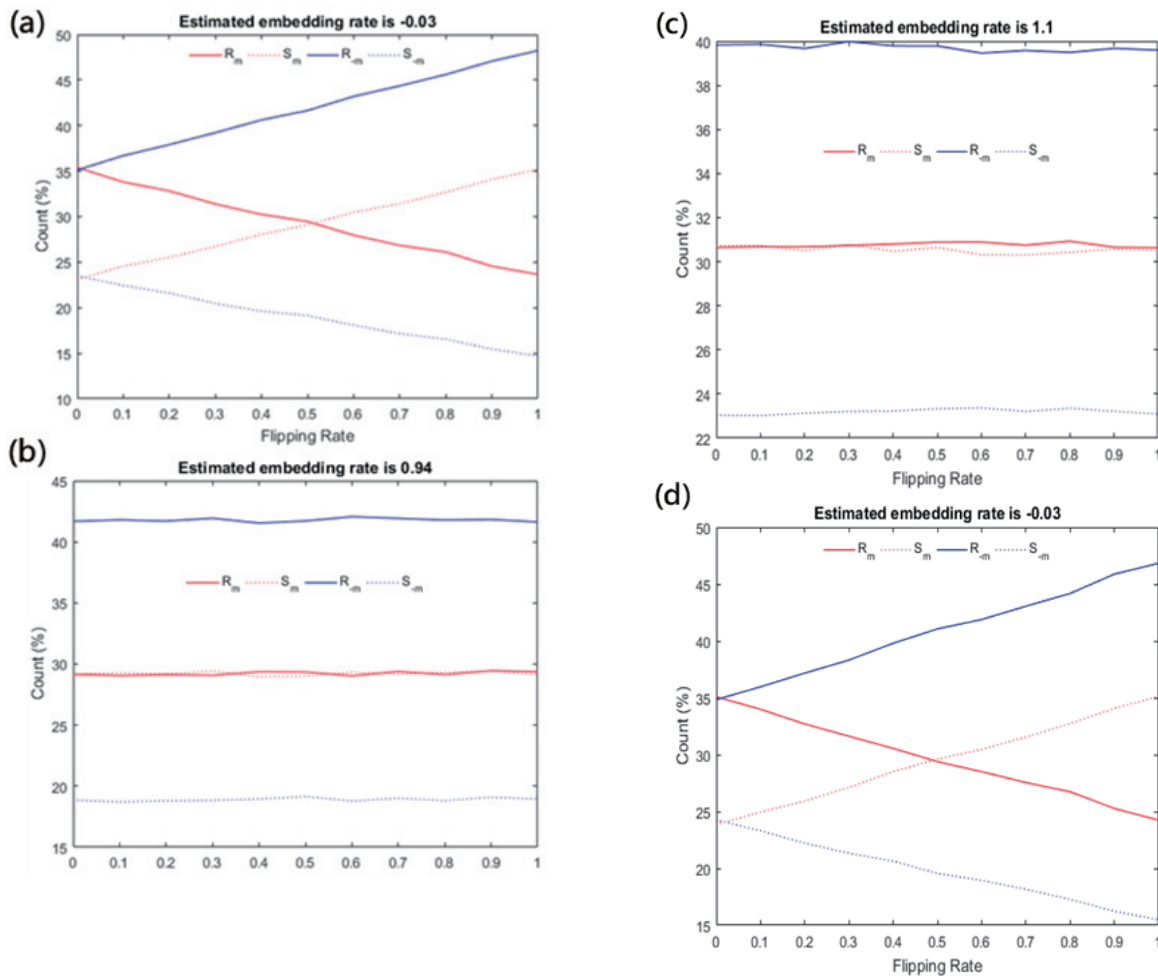


圖 23. RS 安全性分析結果：(a) Boat 載體影像 (b) 1-bit LSB 取代法 (c) 3-bit LSB 取代法 (d) 本研究藏密法

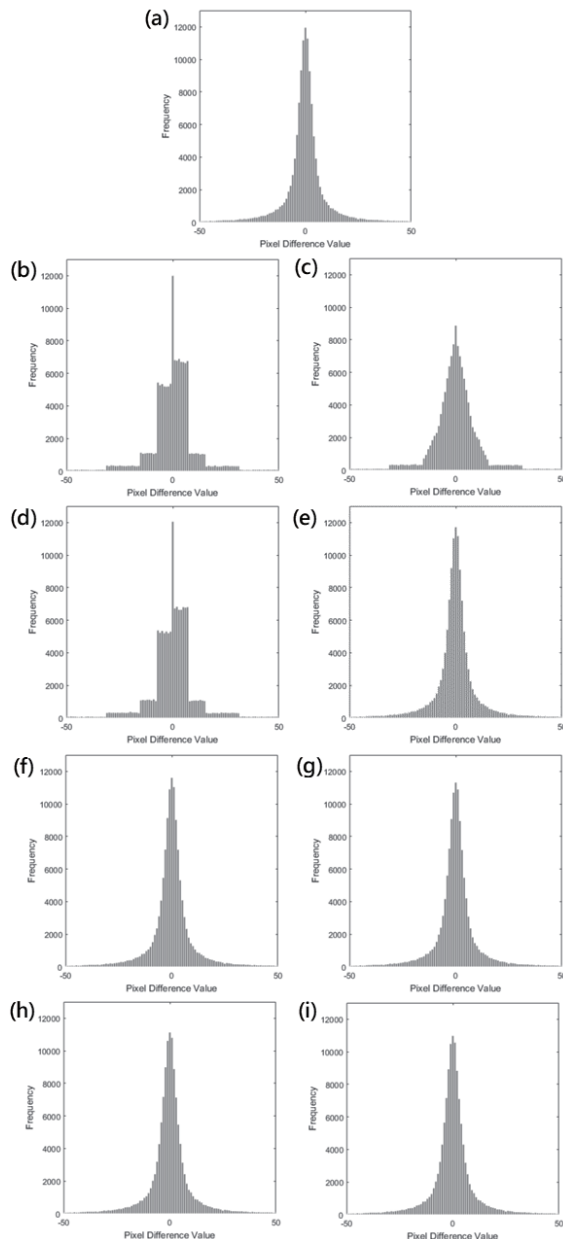


圖 24. 像素差值直方圖分析結果：(a) 載體影像 (b) 原始 PVD 藏密法 (c) 3-bit LSB 取代法結合 PVD 藏密法 (d) 整合式 PVD/LSB 藏密法 (e) 本研究方法藏入 5,000 位元 (f) 本研究方法藏入 7,500 位元 (g) 本研究方法藏入 10,000 位元 (h) 本研究方法藏入 12,500 位元 (i) 本研究方法藏入 15,000 位元

此分析以 Boat 影像為例，載體影像的 PDH 如圖 24(a)所示，而運用前述各種方法藏密後，所產生之 PDHs 如圖 24(b)~(i)所示。除了使用本研究所提出之藏密方法所產生之

PDHs 仍呈現常態分佈外(如圖 24(e)~(i))，其餘皆明顯呈現不正常的階梯狀分佈，而這類特徵容易遭藏密分析方法成功偵測。由此可知，本研究所提出之藏密方法，能有效抵禦像素差值直方圖藏密分析偵測。

五、結 論

本研究的目的，在於提升基於像素之像素排序法 (Pixel-based Pixel Value Ordering, PPVO) 於低容量下 (5000~15000 位元) 的藏密品質。此處以低容量為前提，主要是因為在確保圖片可還原的情形下，需保持圖片的冗餘特性，使得其藏密量和不可回復式藏密方法相比，具有先天的劣勢，故以低藏密量下的品質改進做為探討方向。

而依據此目的，主要的貢獻，是以 Weng 等學者於 2017 年提出的最佳化 PPVO 及 Wu 等學者於 2020 年提出的改良式 PPVO 為基礎，並結合兩者的優點，來建構出一套可回復式資訊隱藏方法。在測試與驗證上，先使用影像處理領域常用的 USC-SIPI 影像資料庫中之 Boat 等 6 張 512×512 灰階影像，來作為初步測試和比對目標，而後續再以 BOSSBase 自然影像資料庫中之影像為主，來進行廣泛性測試。由測試結果，說明了採用本方法所獲得之藏密影像品質，可普遍優於前述兩種方法，以及其他更原始之 PPVO 方法。其性能表現，也已透過各項測試來進行展示與驗證。

於現階段，本研究藏密方法已可提供動態選擇藏密預測誤差、依區塊複雜度調整參照區塊大小，以及調整複雜度閾值區間等功能。後續，可採用其他做法，如：動態更動參照區塊的樣式，甚至依照不同大小之參照區塊，來自動調整並採用更緊密的像素排列方式，同時考量其他可能有效提升影像品質之方式，來做為未來探究的方向。另外，本研究於有限期程內，並未針對所採用方法的回復性進行測試，將規劃納入後續的研究中做探討。

如果將本研究的藏密方法，結合公開金鑰密碼系統等方式保護秘密訊息，整合成完整的秘密通訊系統，可更有效達成可回復式資訊隱藏的隱蔽性。

參考文獻

- [1] Kaur, G., Singh, S., Rani, R., and Kumar, R., “A Comprehensive Study of Reversible Data Hiding (RDH) Schemes Based on Pixel Value Ordering (PVO),” *Archives of Computational Methods in Engineering*, Vol. 28, No. 5, pp. 3517-3568, 2020.
- [2] Fridrich, J., Goljan, M., and Du, R., “Lossless Data Embedding—New Paradigm in Digital Watermarking,” *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, Vol. 2002, No. 2, 2002.
- [3] Tian, J., “Reversible data embedding using a difference expansion,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, Vol. 13, No. 8, pp. 890-896, 2003.
- [4] Ni, Z. C., Shi, Y. Q., Ansari, N., and Su, W., “Reversible data hiding,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, Vol. 16, No. 3, pp. 354-362, 2006.
- [5] Thodi, D., and Rodriguez, J., “Expansion Embedding Techniques for Reversible Watermarking,” *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 16, No. 3, pp. 721-730, 2007.
- [6] Li, X., Li, J., Li, B., and Yang, B., “High-fidelity reversible data hiding scheme based on pixel-value-ordering and prediction-error expansion,” *Signal Processing*, Vol. 93, No. 1, pp. 198-205, 2013.
- [7] Peng, F., Li, X., and Yang, B., “Improved PVO-based reversible data hiding,” *Digital Signal Processing*, Vol. 25, pp. 255-265, 2014.
- [8] Ou, B., Li, X., Zhao, Y., and Ni, R., “Reversible data hiding using invariant pixel-value-ordering and prediction-error expansion,” *Signal Processing: Image Communication*, Vol. 29, No. 7, pp. 760-772, 2014.
- [9] Wang, X., Ding, J., and Pei, Q., “A novel reversible image data hiding scheme based on pixel value ordering and dynamic pixel block partition,” *Information Sciences*, Vol. 310, pp. 16-35, 2015.
- [10] Qu, X., and Kim, H., “Pixel-based pixel value ordering predictor for high-fidelity reversible data hiding,” *Signal Processing*, Vol. 111, pp. 249-260, 2015.
- [11] Ou, B., Li, X., and Wang, J., “High-fidelity reversible data hiding based on pixel-value-ordering and pairwise prediction-error expansion,” *Journal of Visual Communication and Image Representation*, Vol. 39, pp. 12-23, 2016.
- [12] Weng, S., Zhang, G., Pan, J., and Zhou, Z., “Optimal PPVO-based reversible data hiding,” *Journal of Visual Communication and Image Representation*, Vol. 48, pp. 317-328, 2017.
- [13] Wu, H., Li, X., Zhao, Y., and Ni, R., “Improved PPVO-based high-fidelity reversible data hiding,” *Signal Processing*, Vol. 167, 107264, 2020.
- [14] SIPI Image Database Volume 3: Miscellaneous. Available online at <https://sipi.usc.edu/database/database.php?volume=misc> [retrieved on April 5, 2022].
- [15] BOSS Break Our Steganographic System, BOSSBases (v0.93). available online at <http://agents.fel.cvut.cz/boss/index.php?mode=VIEW&tmpl=materials> [retrieved on January 4, 2022].

低溫感度改性單基發射藥之研究

林奕憲^{1*} 鄭凱心² 楊琮賢^{3*} 葉早發³

¹國防大學理工學院國防科學研究所

²國防大學理工學院化學工程碩士班

³國防大學理工學院化學及材料工程學系

摘 要

本研究之目的在開發低溫感度改性單基發射藥，以 M1 單基發射藥配方為參考配方，另添加包覆劑二甲基二苯脲(DMDPU)或二乙基二苯脲(DEDPU)規劃兩組試驗配方製備測試樣品，先利用燃燒彈熱卡計(BC)、微差掃描熱卡計(DSC)及真空安定性測試設備(VST)量測及分析樣品的爆熱、熱分解反應活化能及化學安定性和相容性，再利用爆彈儀(CB)量測發射藥樣品在不同溫度的燃燒性能並分析相對溫度敏感係數，實驗及分析結果顯示 M1 單基發射藥添加少量包覆劑二甲基二苯脲或二乙基二苯脲，其爆熱值無顯著差異，但安定性和相容性較佳，添加包覆劑二甲基二苯脲的樣品相對溫度敏感係數較低，適合作為 M1 單基發射藥降低溫度敏感性的包覆劑。

關鍵詞：改性單基發射藥、低溫感度、爆彈儀、燃燒性能

Study on the Modified Single Base Gun Propellant with Low Temperature Sensitivity

Yi-Hsien Lin^{1*}, Kai-Hsin Cheng², Tsung-Mao Yang^{3*}, Tsao-Fa Yeh³

¹ School of Defense Science, Chung Cheng Institute of Technology,
National Defense University

² Master Program of Chemical Engineering, Chung Cheng Institute of Technology,
National Defense University

³ Department of Chemical and Materials Engineering, Chung Cheng Institute of Technology,
National Defense University

ABSTRACT

The purpose of this study was to develop a modified single base gun propellant (SBP) with low temperature sensitivity. M1 SBP formulation was used as the reference formulation. Dimethyldiphenylurea (DMDPU) and diethyldiphenylurea (DEDPU) were added as coating agents, two formulations were designed and test samples were prepared. First, bomb calorimeter (BC), differential scanning calorimetry (DSC) and vacuum stability tester (VST) were used to measure and analyze the explosion heat, thermal decomposition reaction activation energy, chemical stability and compatibility of the samples, and then closed bomb (CB) was employed to measure the burning performance of samples at different temperatures and their relative temperature sensitivity coefficients were analyzed. The experiment and analysis results indicated that when a small amount of coating agent (DMDPU or DEDPU) was coated to M1 SBP, there was no significant difference in the explosion heat value, but the stability and compatibility were better. The relative temperature sensitivity coefficient of the sample coated with the coating agent DMDPU was lower, and it was suitable as a coating agent for reducing the temperature sensitivity of M1 SBP.

Keywords: Modified single base propellant, Low temperature sensitivity, Closed bomb, Burning performance

一、前言

發射藥的作用係在砲(槍)膛內燃燒產生高溫高壓的氣體推送彈頭前進，彈頭的速度取決於氣體產生及能量釋放的速率[1]。傳統的火砲發射藥依其組成大致區分為單基(SB)、雙基(DB)及三基(TB)發射藥，均以硝化纖維(NC)為基本成分，近年來，已開發出含有環狀硝胺炸藥(如 RDX、HMX 和 CL-20)的高能低易損性砲彈(LOVA)發射藥，用於需要更高能量的戰車砲彈[2-4]。

火砲發射藥的溫度敏感性定義為環境溫度對發射藥燃燒速率的影響，可導致火炮的內彈道性能產生明顯的變化，換言之，發射藥燃燒速率的變化可直接影響最大的砲膛壓力和砲口初速[5-7]，通常發射藥的燃燒速率隨著環境溫度的升高而增加，反之在溫度降低時燃燒速率則降低，這使得最大膛壓和初速增加或減少[8]。因此，溫度敏感係數定義為最大砲膛壓力的變化($\Delta P_{\max}$)除以環境溫度的變化(ΔT)，也可以用砲口初速的變化除以環境溫度的變化來表示[9]。Boulkadid 等人的研究[8]也曾使用相對溫度敏感係數 $TC(p)$ 及 $TC(v)$ [$(\%/^{\circ}\text{C})$] 來評估發射藥性能在高、低溫環境的溫度敏感性，其中 $TC(p)$ 表示最大膛壓變異的百分比與環境溫度變化的比值， $TC(v)$ 則表示初速變異的百分比與環境溫度變化的比值。

美國軍用規範 MIL-P-3984J 要求小型武器彈藥的使用溫度範圍為 -54°C 至 $+51^{\circ}\text{C}$ ，如何在整個工作環境溫度範圍內保持火炮正常的內彈道性能是發射藥的基礎研究[10]。有多種方法可以降低發射藥的溫度敏感性，例如表面包覆、使用化學添加劑、控制燃燒室的體積以及改變發射藥的配方等[11]。發射藥可藉由表面處理以改變其溫度敏感性，高能增塑劑和聚合物通常用於包覆發射藥粒以調節燃燒速率，也可用於降低溫度敏感性[12, 13]。M1 單基發射藥(M1 SBP)由 85%的硝化纖維(NC)、10%的二硝基甲苯(DNT)、5%的鄰苯二甲酸二丁酯(DBP，增塑劑)及外加 1%的二苯胺(DPA，穩定劑)組合而成，可用於 105 mm、

155 mm 和 8 inch 的榴彈砲[14]。M1 單基發射藥具有較低的火焰溫度，因此侵蝕性較小，其燃燒速率可藉由塗覆燃速調節劑來控制，惟其具吸濕性，不規則的燃燒是一個主要缺點。此外，M1 單基發射藥在工作環境溫度範圍內的溫度敏感性較高，這也引起研發人員的關注，並探討在 M1 單基發射藥配方添加安定劑(stabilizer)、膠凝劑(gelatinizer)或減敏劑(phlegmatizer)等添加劑以改善其燃燒現象的可行性[15]。

本研究之目的在開發低溫感度改性單基發射藥配方，以 M1 單基發射藥配方為基準，另添加包覆劑二甲基二苯脲(Dimethyldiphenylurea)或二乙基二苯脲(Diethyldiphenylurea)組成試驗配方並製備測試樣品，先利用燃燒彈熱卡計(Bomb Calorimeter)量測發射藥樣品的爆熱值分析差異性，後續利用微差掃描熱卡計(Differential Scanning Calorimetry)的實驗結果，以 Kissinger 法及 Ozawa 法評估發射藥樣品的分解活化能，分析發射藥樣品的熱安定性，再利用真空安定性測試設備(Vacuum Stability Tester)的實驗結果，評估發射藥樣品的化學安定性和相容性，最後藉由爆彈儀(Closed Bomb)量測不同溫度發射藥樣品的燃燒性能，分析相對溫度敏感係數的差異。

二、實驗

2.1 實驗藥品

- (1) M1 單孔柱狀單基發射藥(批號：A-1-96、直徑：0.045 吋、孔徑：0.016 吋、長度：0.2 吋)，軍備局生產製造中心第 205 廠提供，如圖 1 所示。
- (2) 硝化纖維(Nitrocellulose, NC)：工業級，含氮量 13.35%，軍備局生產製造中心第 205 廠提供。
- (3) 二硝基甲苯(Dinitrotoluene, DNT)：工業級，燃速調節劑，軍備局生產製造中心第 205 廠提供。
- (4) 鄰苯二甲酸二丁酯(Dibutyl phthalate, DBP)：工業級，增塑劑，軍備局生產製造中心第 205 廠提供。

- (5) 二苯胺(Diphenylamine, DPA)：工業級，安定劑，軍備局生產製造中心第 205 廠提供。
- (6) 乙醇(Ethanol)：試藥級，純度 99%，霖愷公司商購。
- (7) 乙醚(Diethyl ether)：試藥級，純度 99%，霖愷公司商購。
- (8) 二 甲 基 二 苯 脲 (Dimethyldiphenylurea, DMDPU)：試藥級，純度 98%，包覆劑，霖愷公司商購。
- (9) 二 乙 基 二 苯 脲 (Diethyldiphenylurea, DEDPU)：試藥級，純度 98%，包覆劑，霖愷公司商購。



圖 1. M1 單基發射藥

2.2 實驗設備

- (1) 燃燒彈熱卡計(Bomb Calorimeter, BC)：本研究使用美國 Parr 公司生產的 6200 型燃燒彈熱卡計，其主要結構為一個堅固的圓柱形高壓罐，將大約 0.5 公克的發射藥樣品置於高壓罐的坩鍋內，然後將高壓罐充滿氮氣，置入裝有 2 公升水的熱卡計內，熱卡計被空氣夾套包圍，以防止因輻射造成的熱量散失，最後，用電熱絲點燃發射藥樣品以量測爆熱值。
- (2) 微差掃描熱卡計(Differential Scanning Calorimetry, DSC)：本研究使用美國 TA 公司生產的 Q-20 型微差掃描熱卡計，量測發射藥樣品熱分解反應的溫度，測試樣品盤使用陶瓷坩鍋，樣品測試量 3-5 毫克，反應溫度量測範圍為室溫至 350°C，升溫速率為 1、2、5 及 10°C/min，並在升溫的環境通入氮氣，以避免空氣影響測試樣品的化學反應。
- (3) 真空安定性測試設備(Vacuum Stability Tester, VST)：本研究使用的實驗設備係自

行組裝，由反應器、恆溫加熱槽、壓力感測器及數據擷取系統與軟體等組成，藉以評估發射藥樣品的化學安定性和相容性。實驗依據 MIL-STD-1751A 方法 1061[16]進行，將恆溫槽溫度調整至 100°C，加熱 40 小時，紀錄試管內發射藥分解產生的壓力隨時間的變化，再利用理想氣體方程式計算產生的氣體量，評估是否符合規範標準。

- (4) 爆彈儀(Closed Bomb, CB)：本研究使用奧地利 HPI 公司設計製造的 B180 型密閉器連同壓電式壓力測量裝備、主機、終端機等設備，可耐壓力達 5000 bar，爆體燃燒室容積有 25、200、700 毫升，可依發射藥顆粒大小選用不同容積爆體，在定容條件下，量測發射藥在密閉爆體內燃燒過程中壓力的變化，用來評估發射藥的燃燒性能。

2.3 實驗規劃

本研究以 M1 單孔柱狀單基發射藥為基準藥，另添加包覆劑二甲基二苯脲(DMDPU)或二乙基二苯脲(DEDP)規劃兩組試驗配方，先完成發射藥樣品的製備，後續利用燃燒彈熱卡計(BC)量測各配方發射藥的爆熱，再以微差掃描熱卡計(DSC)在不同的升溫條件下，量測各配方發射藥的分解反應溫度評估活化能，及利用真空安定性測試設備(VST)量測各配方發射藥熱分解產生的氣體量，藉以評估各配方發射藥的化學安定性和相容性，最後利用爆彈儀(CB)量測各配方發射藥在不同環境溫度的燃燒特性並評估彈道性能，藉以分析發射藥對環境溫度的敏感性，配方規劃如表 1 所示。

表 1. 配方規畫表

配方 編號	配方組成 (wt.%)					
	NC	DNT	DBP	DPA*	DMDPU*	DEDP*
M1	85	10	5	1	-	-
M1DM	85	10	5	1	0.3	-
M1DE	85	10	5	1	-	0.3

*外加

2.3.1 發射藥的製備

M1 單基發射藥配方添加包覆劑製備程

序如下：

- (1) 驅水：將無水乙醇倒入裝有硝化纖維之燒杯中，攪拌約 10 秒，將酒精移除。
- (2) 拌藥：取已完成驅水之硝化纖維，加入醇醚溶劑(乙醇 35%、乙醚 65%)、二硝基甲苯及鄰苯二甲酸二丁酯，攪拌形成均勻的藥膠。
- (3) 壓藥：取藥膠置於壓藥機內，調節壓藥機壓力至等速壓出藥條，並維持至壓藥完畢。
- (4) 切藥：切藥前先捻去部分藥條頭後，將藥條插入切藥機內進行切藥。
- (5) 水煮：將切好之發射藥胚裝入藥包後，再將藥包置入水浴機，在 $60 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 的溫度水煮以去除多餘溶劑。
- (6) 烘藥：將發射藥胚平鋪於篩網上，置於烘箱內設定溫度 55°C ，持續烘乾 2 小時以上。
- (7) 包面液製備：依配方規劃的包覆劑重量比例，以酒精為溶劑製備包面液，須將包覆劑攪拌至完全溶解。
- (8) 包面：將定量的發射藥胚及包面液置入燒杯，攪拌均勻使包面液完全覆蓋發射藥，再將燒杯置入水浴機，在 $70 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 的溫度進行包面。
- (9) 烘藥：將發射藥樣品平鋪於篩網上，置於烘箱內設定溫度 55°C ，持續烘乾 2 小時以上。

2.3.2 發射藥的爆熱量測

本研究利用美國 Parr 公司生產的 6200 型燃燒彈熱卡計(BC)進行發射藥的爆熱量測，實驗程序如下：

- (1) 先將測試樣品置於 60°C 的烘箱中乾燥 2 小時，再放入乾燥器內冷卻至室溫備用。
- (2) 秤取測試樣品 0.5 公克置於高壓罐的坩鍋內，使其與鎳鉻絲接觸，並將鎳鉻絲兩端纏繞於兩電極棒，再連接點火電極。
- (3) 打開高壓罐上方之氣閥，將氮氣筒之氣體導管與高壓罐相連結，以 450 psig 的壓力將氮氣導入高壓罐內。
- (4) 將熱卡計之上蓋打開(其下有兩電線切勿弄斷)，將高壓罐置入定位後注入 2 公升的純水，再將熱卡計上蓋之二電線與高壓罐連結後，蓋上熱卡計上蓋，啟動點火系統

量測樣品釋放的爆熱。

- (5) 檢測完畢後，開啟熱卡計的上蓋並拆下與高壓罐相連之電線，取出高壓罐將熱卡計內的水清除，再將高壓罐之氣閥打開排除氣體，打開高壓罐清除殘餘之鎳鉻絲，高壓罐內之水漬及坩鍋內之殘餘灰分一併擦拭乾淨。

2.3.3 發射藥的熱化學特性測試

本研究使用美國 TA 公司生產的 Q-20 型微差掃描熱卡計(DSC)，量測發射藥樣品熱分解反應的溫度，測試樣品盤使用陶瓷坩鍋，樣品測試量 3-5 毫克，反應溫度量測範圍為室溫至 350°C ，升溫速率為 1、2、5 及 $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，並在升溫的環境通入氮氣，以避免空氣影響測試樣品的化學反應，實驗結果經過運算後可求得分解反應的活化能，藉以評估發射藥的熱安定性。

2.3.4 發射藥的真空安定性測試

本研究使用自行組裝的真空安定性測試設備(VST)，依據 MIL-STD-1751A 方法 1061[16]，在 100°C 的測試環境下加熱 40 小時，實驗程序如下：

- (1) 實驗前適量取樣置於烘箱，以 65°C 的溫度乾燥 2 小時。
- (2) 每次實驗量取 5 公克試樣，放入加熱試管後，將加熱試管安置於恆溫槽中，利用真空泵將加熱試管的壓力抽至 5mmHg 以下，關閉壓力控制閥，靜置 4 小時觀察系統有無漏氣現象。
- (3) 若系統無漏氣現象，則開始進行真空安定性試驗，首先調整恆溫加熱槽的溫度至 100°C ，並設定實驗時間為 40 小時，同時開啟數據擷取系統記錄試管內的力隨時間的變化情形。
- (4) 到達實驗設定時間 40 小時後，將試管移出恆溫加熱槽，並冷卻至室溫，持續記錄試管內的壓力變化情形。
- (5) 實驗完成後，移除實驗樣品並妥善儲存，以待後續銷燬作業。

真空安定性測試所得的壓力變化可換算為標準狀態下產生氣體的體積量，可據以評估發射藥的化學安定性和相容性。

2.3.5 發射藥的燃燒性能測試

本研究使用奧地利 HPI 公司設計製造的 B180 型爆彈儀(CB)，選用 200 毫升之爆體，進行發射藥的燃燒性能測試，實驗程序如下：

- (1) 測試樣品依據美軍規範 MIL-P-3984J，測試前先置於真空烘箱或冷凍櫃分別設定溫度為 51℃、21℃ 及 -54℃ 存放四個小時，以模擬測試樣品的環境溫度。
- (2) 秤取發射藥測試樣品 30 克，置入爆彈儀之爆體燃燒室。
- (3) 將點火塞旋緊後固定於爆體水平位置，並輕微晃動爆體數次使發射藥粒均勻散佈於平放之爆體底部，將點火導線插上並待命點火。
- (4) 發射藥點火引燃後，爆體內壓力經由壓電轉換器產生電壓訊號傳至爆彈儀主機之電荷放大器，再由示波器輸出訊號給電腦，電腦透過內建程式運算處理，即可得到發射藥燃燒性能的量測數據。

爆彈儀測試係使用美軍 MIL-STD-286C method 801.1.2[17]之規範，所得壓力-時間曲線(P-t curve)，可用以計算壓力梯度(dP/dt)、動力活度(Vivacity, L)、相對火藥力(RF)和相對敏捷值(RQ)。

三、反應動力學參數評估

化學反應動力學分析通常假設反應速率可以用兩個可分離的函數 $k(T)$ 和 $f(\alpha)$ 來描述如方程式(1)所示

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(T)f(\alpha) \quad (1)$$

其中 da/dt 是反應速率， α 為任何時間反應物的轉化率， $k(T)$ 則是與溫度相關的速率常數， $f(\alpha)$ 可表示為 α 的函數如方程式(2)所示

$$f(\alpha) = (1 - \alpha)^n \quad (2)$$

其中 n 是反應級數，反應常數通常與溫度相關可用 Arrhenius 方程式來描述，如方程式(3)所示

$$k(T) = A \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (3)$$

其中 E_a 是反應活化能， A 是前頻因子， R 則是氣體常數。結合方程式(1)-(3)可獲得方程式(4)

$$\frac{d\alpha}{dt} = A \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right)(1 - \alpha)^n \quad (4)$$

3.1 Kissinger 法

因為最大的反應速率出現在 $d^2\alpha/dt^2=0$ 時，可將方程式(4)微分獲得方程式(5)

$$\frac{E_a\beta}{RT_p^2} = A \exp\left(\frac{-E_a}{RT_p}\right)(1 - \alpha)^{n-1} \quad (5)$$

其中 T_p 是在線性加熱速率為 β (dT/dt) 時 DSC 曲線的峰溫值，Kissinger 法[18]假設乘積項 $n(1-\alpha)^{n-1}$ 與 β 無關，因此推導出方程式(6)

$$\frac{d\left[\ln\left(\frac{\beta}{T_p^2}\right)\right]}{d\left(\frac{1}{T_p}\right)} = -\frac{E_a}{R} \quad (6)$$

繪製 $\ln(\beta/T_p^2)$ 對 $1/T_p$ 圖可獲得近似直線的關係，活化能 E_a 值可藉由斜率值計算獲得。

3.2 Ozawa 法

在線性加熱速率 $\beta=dT/dt$ 的條件下，方程式(4)可改寫為方程式(7)

$$\int_0^\alpha \frac{d\alpha}{f(\alpha)} = \frac{A}{\beta} \int_{T_0}^T \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) dT \quad (7)$$

Ozawa 法[19]假設 $A \cdot f(\alpha)$ 及 E_a 與溫度 T 無關，而 A 及 E_a 與轉化率 α 無關，將方程式(7)變數分離並積分可得到方程式(8)

$$\log f(\alpha) = \log\left(\frac{AE_a}{R}\right) - \log \beta - 2.315 - 0.4567 \frac{E_a}{RT_p} \quad (8)$$

繪製 $\log \beta$ 對 $1/T_p$ 圖可獲得近似直線的關係，活化能 E_a 值可藉由斜率值計算獲得。

四、結果與討論

4.1 燃燒彈熱卡計測試結果分析

爆熱(Heat of explosion)定義為高能物質在高溫高壓下快速分解反應釋放出的熱量，其為決定發射藥性能的重要參數，本研究利用燃燒彈熱卡計進行配方編號 M1、M1DM 及 M1DE 三組發射藥樣品的爆熱量測，平均爆熱值分別為 2911、2883 及 2883 J/g，實驗結果顯示 M1 單基發射藥添加少量包覆劑二甲基二苯脲或二乙基二苯脲，其爆熱值僅約減少 1% 左右，無顯著的差異，實驗數據如表 2 所示。

表 2. 發射藥樣品爆熱量測結果

配方 編號	爆熱值 (J/g)	平均值 (J/g)
M1	2915	2911
	2910	
	2909	
M1DM	2895	2883
	2881	
	2874	
M1DE	2894	2882
	2880	
	2872	

4.2 微差掃描熱卡計測試結果分析

本研究利用微差掃描熱卡計(DSC)針對配方編號 M1、M1DM 及 M1DE 三組發射藥樣品在升溫速率 1、2、5 及 10°C/min 的條件下，進行熱化學特性量測，圖 2 顯示 M1 組發射藥樣品在不同升溫速率的 DSC 圖譜，各圖譜均顯示單一放熱峰，其為發射藥的放熱分解反應且放熱峰溫隨著升溫速率的增加而增加，另兩組的實驗結果也有相同的趨勢，實驗數據綜整列於表 3。

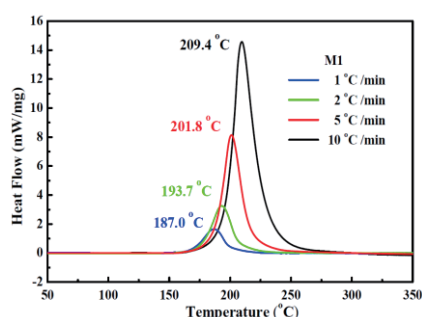


圖 2. M1 發射藥樣品不同升溫速率 DSC 圖譜

表 3. 發射藥樣品熱分解反應活化能分析表

配方 編號	升溫 速率 [β] (°C/min)	放熱 峰溫 [T _p] (°C)	活化能[Ea] (kJ/mol)	
			Kissinger法	Ozawa 法
M1	1	187.0	184.0	182.4
	2	193.7		
	5	201.8		
	10	209.4		
M1DM	1	187.2	192.6	190.6
	2	193.4		
	5	201.7		
	10	208.4		
M1DE	1	187.8	198.8	196.5
	2	194.0		
	5	201.8		
	10	208.5		

三組發射藥樣品分解反應的活化能可藉由 Kissinger 法及 Ozawa 法利用升溫速率值及相對應的放熱峰溫值計算獲得，圖 3 顯示利用 Kissinger 法繪製的 $\ln(\beta/T_p^2)$ 對 $1/T_p$ 關係圖，所得斜率經過運算求得的活化能為 184.0 kJ/mol，圖 4 顯示利用 Ozawa 法繪製的 $\log \beta$ 對 $1/T_p$ 關係圖，所得斜率經過運算求得的活化能為 182.4 kJ/mol，兩者均與文獻值 185.8 kJ/mol 相近[20]。M1 單基發射藥添加包覆劑二甲基二苯脲(M1DM)及二乙基二苯脲(M1DE)樣品的分解活化能也利用上述分析方法獲得，所有分析數據綜整列於表 3。由於 M1 單基發射藥添加包覆劑二甲基二苯脲(M1DM)或二乙基二苯脲(M1DE)可使分解反應活化能增加，顯示添加包覆劑有助於增加 M1 單基發射藥的熱安定性。

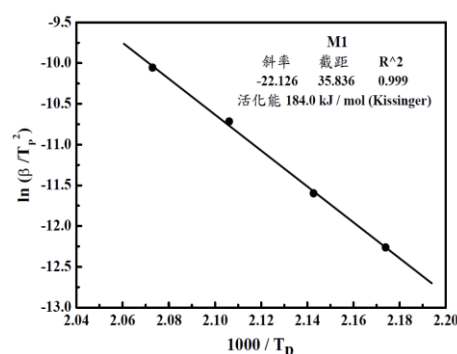


圖 3. M1 發射藥樣品升溫速率與峰溫值依 Kissinger 模式繪製之回歸圖

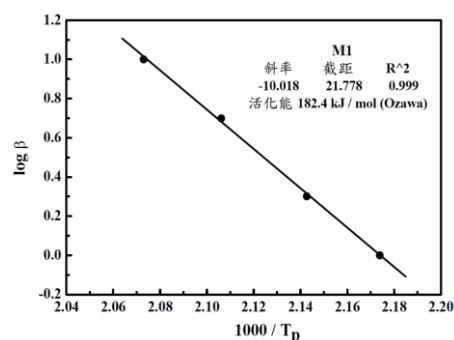


圖 4. M1 發射藥樣品升溫速率與峰溫值依 Ozawa 模式繪製之回歸圖

4.3 真空安定性測試結果分析

本研究利用真空安定性測試設備(VST)針對配方編號 M1、M1DM 及 M1DE 三組發射藥樣品在 100°C 的測試環境下加熱 40 小時，

進行發射藥的化學安定性和相容性測試，依據 MIL-STD-1751A [16]要求的標準，氣體釋放量必須小於 2 ml/g，三組發射藥樣品真空安定性測試所得試驗壓力變化歷程如圖 5 所示，實驗結果顯示三組發射藥樣品均符合真空安定性測試標準，其中 M1 組發射藥樣品真空安定性的測試結果與李金樹等人[21]曾發表的結果近似。

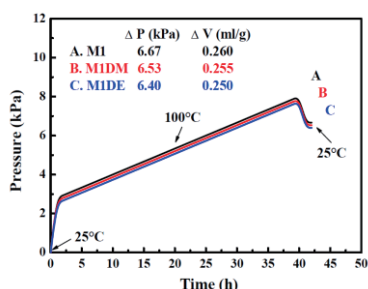


圖 5. 發射藥樣品真空安定性試驗壓力變化歷程圖

4.4 爆彈儀測試結果分析

本研究利用爆彈儀針對配方編號 M1、M1DM 及 M1DE 三組發射藥樣品在常溫 21°C、高溫 51°C 及低溫 -54°C 的條件下，進行燃燒性能測試，實驗前各配方樣品先以低藥量熱砲，再實施 30 克的實際測試，M1 組發射藥樣品爆彈儀測試所得壓力與時間之關係如圖 6 所示，實驗結果顯示最大壓力(P_{max})隨著測試樣品溫度的增加而增加，而到達最大壓力所需時間則隨著測試樣品溫度的增加而減少，此係低溫的測試樣品在燃燒過程先吸收較多的熱量，因而降低燃燒性能，另兩組的實驗結果也有相同的趨勢。此外，M1 單基發射藥添加少量包覆劑二甲基二苯脲及二乙基二苯脲也導致最大壓力的降低。

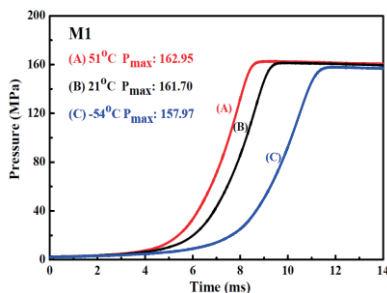


圖 6. M1 發射藥樣品測試的壓力與時間關係圖

圖 7-9 顯示三組發射藥樣品在 51、21 及 -54°C 條件下，壓力梯度(dP/dt)與壓力分率

(P/P_{max})之關係，其最大壓力梯度 $[(dP/dt)_{max}]$ 均隨著測試樣品溫度的增加而增加。此外，M1 單基發射藥添加少量包覆劑二甲基二苯脲及二乙基二苯脲也導致最大壓力梯度的降低，其原因為二甲基二苯脲及二乙基二苯脲是非含能物質，包覆在 M1 單基發射藥的表層具有鈍感阻燃效果，使得發射藥樣品的燃速降低因而導致最大壓力梯度的降低。

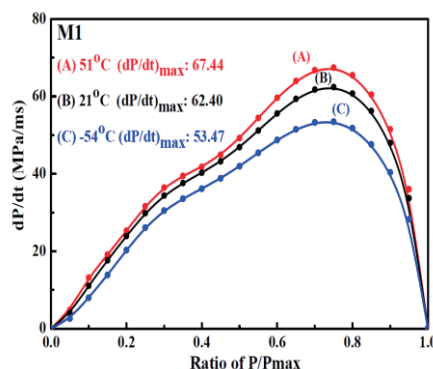


圖 7. M1 發射藥樣品測試壓力梯度與壓力分率關係圖

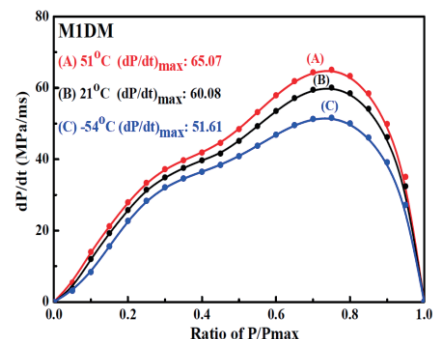


圖 8. M1DM 發射藥樣品測試壓力梯度與壓力分率關係圖

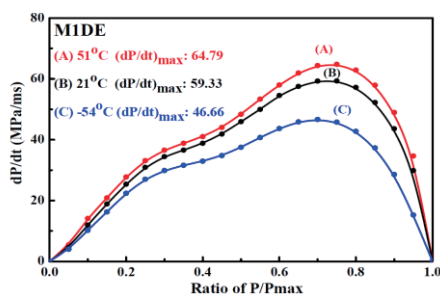


圖 9. M1DE 發射藥樣品測試壓力梯度與壓力分率關係圖

三組發射藥樣品在 51、21 及 -54°C 的條件下，動力活度(Vivacity)與壓力分率(P/P_{max})

之關係如圖 10-12 所示，依據 WSRL-0291-MA[22]及 AVL[23]技術手冊，在壓力分率 0.35 時的動力活度($L_{0.35}$)，可模擬比較最大膛壓，在壓力分率 0.75 時的動力活度($L_{0.75}$)，則可模擬比較初速，三組發射藥樣品的測試結果顯示最大膛壓及初速均隨著測試樣品溫度的增加而增加。

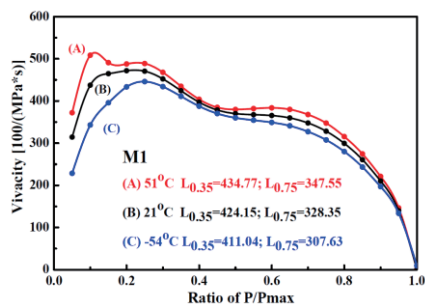


圖 10. M1 發射藥樣品測試動力活度與壓力分率關係圖

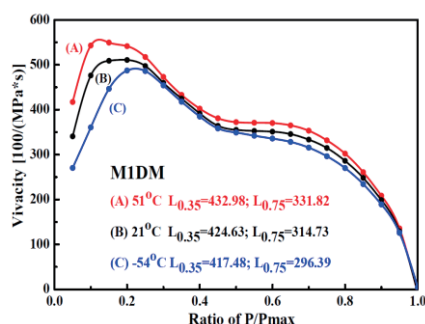


圖 11. M1DM 發射藥樣品測試動力活度與壓力分率關係圖

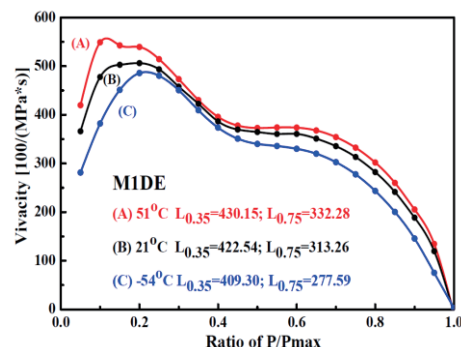


圖 12. M1DE 發射藥樣品測試動力活度與壓力分率關係圖

此外，M1 單基發射藥添加少量包覆劑二甲基二苯脲及二乙基二苯脲也導致最大膛壓及初速的降低。三組發射藥樣品在 51、21 及 -54°C 的條件下，爆彈儀測試所得相關數據 P_{max} 、 $(dP/dt)_{max}$ 、 $L_{0.35}$ 及 $L_{0.75}$ 經綜整列於表 4，也包括在高溫 51°C 及低溫 -54°C 時相對於常溫 21°C 的相對最大膛壓及相對初速，M1 單基發射藥添加少量包覆劑二甲基二苯脲，其高溫 51°C 及低溫 -54°C 樣品相對於常溫 21°C 樣品的相對最大膛壓及相對初速的變異均較 M1 單基發射藥低，而添加二乙基二苯脲則有較高的變異。

表 4. 發射藥樣品爆彈儀測試結果

配方編號	測試溫度 (°C)	P_{max} (MPa)	$(dP/dt)_{max}$ (MPa/ms)	$L_{0.35}$ (註 1) (100/MPa.s)	相對最大膛壓 (%)	$L_{0.75}$ (註 2) (100/MPa.s)	相對初速 (%)
M1	51	162.95	67.44	434.77	102.50	347.55	105.85
	21	161.70	62.40	424.15	100.00	328.35	100.00
	-54	157.97	53.47	411.04	96.91	307.63	93.69
M1DM	51	161.40	65.07	432.98	101.97	331.82	105.43
	21	160.31	60.08	424.63	100.00	314.73	100.00
	-54	157.07	51.61	417.48	98.32	296.39	94.17
M1DE	51	161.08	64.79	430.15	101.80	332.28	106.07
	21	159.74	59.33	422.54	100.00	313.26	100.00
	-54	153.44	46.66	409.3	96.87	277.59	88.61

註 1：在壓力分率 0.35 時的動力活度，可模擬比較最大膛壓；

註 2：在壓力分率 0.75 時的動力活度，可模擬比較初速。

發射藥樣品溫度隨著環境溫度的變化會引起彈道性能的變異，三組發射藥樣品在高溫 51°C 及低溫 -54°C 的相對溫度敏感係數如表 5 所示；M1 單基發射藥樣品的 $T(p)$ (模擬最大膛壓對溫度的敏感度) 及 $T(v)$ (模擬初速對溫度的敏感度) 在高溫 51°C 時分別為 0.083%/°C 及 0.20%/°C，在低溫 -54°C 時則分別為 0.041%/°C 及 0.084%/°C；M1 單基發射藥添加包覆劑二甲基二苯脲(M1DM)樣品的 $T(p)$ 及 $T(v)$ 在高溫 51°C 時分別為 0.066%/°C 及 0.18%/°C，在低溫 -54°C 時則分別為 0.022%/°C 及 0.078%/°C，其溫度敏感性明顯較 M1 單基發射藥樣品低；另 M1 單基發射藥添加包覆劑二乙基二苯脲(M1DE)樣品的 $T(p)$ 及 $T(v)$ 在高溫 51°C 時分別為 0.060%/°C 及 0.21%/°C，在低溫 -54°C 時則分別為 0.042%/°C 及 0.15%/°C，其溫度敏感性在高溫 51°C 時較 M1 單基發射藥樣品略低，但在低溫 -54°C 時則較高。另依據美軍規範 MIL-P-3984J，M1 單基發射藥在操作溫度的最大膛壓變異量為 $\pm 3\%$ ，換算在高溫 51°C 及低溫 -54°C 的相對溫度敏感係數分別為 0.1%/°C 及 0.04%/°C，而初速的變異量則未明列，因此，評估二甲基二苯脲比較適合作為 M1 單基發射藥降低溫度敏感性的包覆劑。

表 5. 發射藥樣品相對溫度敏感係數

配方 編號	相對溫度敏感係數 (%/°C) ^{註1}			
	高溫 51°C		低溫 -54°C	
	$TC(p)$ ^{註2}	$TC(v)$ ^{註3}	$TC(p)$	$TC(v)$
M1	0.083	0.20	0.041	0.084
M1DM	0.066	0.18	0.022	0.078
M1DE	0.060	0.21	0.042	0.15

註 1：%/°C 表示每°C 的相對模擬最大膛壓或模擬初速變異百分比

註 2：模擬最大膛壓對溫度的敏感度

註 3：模擬初速對溫度的敏感度

五、結 論

本研究之目的在開發低溫感度改性單基發射藥配方，以 M1 柱狀單基發射藥為基準

藥，另添加包覆劑二甲基二苯脲(DMDPU)或二乙基二苯脲(DEDPU)規劃兩組試驗配方並製備測試樣品，後續進行爆熱量測、熱化學特性測試、真空安定性測試及燃燒性能測試，獲得下列結論：

- (1) 燃燒彈熱卡計測試分析結果顯示，M1 單基發射藥添加少量包覆劑二甲基二苯脲或二乙基二苯脲，其爆熱值僅約減少 1% 左右，無顯著的差異。
- (2) 微差掃描熱卡計測試分析結果顯示，M1 單基發射藥添加包覆劑二甲基二苯脲或二乙基二苯脲可使分解反應活化能增加，添加包覆劑有助於增加 M1 單基發射藥的熱安定性。
- (3) 真空安定性測試分析結果顯示，M1 單基發射藥添加包覆劑二甲基二苯脲或二乙基二苯脲均符合真空安定性測試標準。
- (4) 爆彈儀測試分析結果顯示，M1 單基發射藥添加包覆劑二甲基二苯脲的相對溫度敏感係數在高溫 51°C 及低溫 -54°C 時均較 M1 單基發射藥樣品低，而添加包覆劑二乙基二苯脲的相對溫度敏感係數則較 M1 單基發射藥樣品在高溫 51°C 時略低，但在低溫 -54°C 時則較高；因此，評估二甲基二苯脲比較適合作為 M1 單基發射藥降低溫度敏感性的包覆劑。

致 謝

本研究承蒙軍備局生產製造中心第 205 廠提供實驗藥品使研究得以順利完成；另感謝陸開泰教授、黃其清教授及李金樹教授在數據分析期間給予指導。

參考文獻

- [1] 阮望聖，發射藥理論與應用，聯勤 203 廠，高雄，第 1-6、26-33 頁，1986。
- [2] Pillai, A. G. S., Dayanandan, C. R., Joshi, M. M., Patgaonkar, S. S., Karir, J. S., "Studies on the Effects of RDX Particle Size on the Burning Rate of Gun Propellants," Defense Science Journal, Vol. 46, No. 2, pp. 83-86, 1996.

- [3] Damse, R. S., Singh, H., "Nitramine-Based High Energy Propellant Compositions for Tank Guns," *Defense Science Journal*, Vol. 50, No. 1, pp. 75-81, 2000.
- [4] Pillai, A. G. S., Sanghavi, R. R., Dayanandan, C. R., Joshi, M. M., Karir, J. S., "Ballistic Evaluation of LOVA Propellant in High Calibre Gun," *Defense Science Journal*, Vol. 51, No. 2, pp. 147-153, 2001.
- [5] Boulkadid, M. K., Lefebvre, M. H., Jeuniau, L., Dejeaifve, A., "Influence of Firing Temperature on Properties of Gun Propellants," *Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, Vol. 9, pp. 415-427, 2015.
- [6] Clifford, W., Temperature Sensitivity of Aircraft Cannon Propellants. AFATL-TR-82-72, 1982.
- [7] Clifford, W., and Bertram, K., Ballistic criteria for Propellant Grain Fracture in the GAU-8/A 30 MM Gun. AFATL-TR-82-21, 1982.
- [8] Boulkadid, M. K., Lefebvre, M. H., Jeuniau, L., Dejeaifve, A., "Temperature Sensitivity of Propellant Combustion and Temperature Coefficients of Gun Performance," *Central European Journal of Energetic Materials*, Vol. 13, No. 4, pp. 1005-1022, 2016.
- [9] Liu, M. F., Zhang, X. B., Yu, L., Han, X., "Theoretical Study on Ignition Compensating Temperature Sensitivity," *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 7, No. 9, pp. 1-7, 2015.
- [10] MIL-P-3984J, Military Specification: Propellants for Small Arms Ammunition, U.S. Department of Defense, 25 May, 1992.
- [11] Jahanian, A., Zarei, A.R., Ghanbari Mazidi, M., "The Reduction of Temperature Sensitivity Methods in Gun Propellants," *Tahghigh va towse mavad por energy*, Vol. 7, No. 2(14), pp. 19-28, 2011.
- [12] Kumari, D., Balakshe, R., Banerjee, S., Singh, H., "Energetic Plasticizers for Gun & Rocket Propellants," *Review Journal of Chemistry*, Vol. 2, No. 3, pp. 240-262, 2012.
- [13] Chakraborty, T. K., Raha, K. C., Omprakash, B., Singh, A., "A Study on Gun Propellants Based on Butyl-NENA," *Journal of Energetic Materials*, Vol. 22, No. 1, pp. 41-53, 2004.
- [14] Diaz, E., Brochu, S., Poulin, I., Faucher, D., Marois, A., Gagnon, A., *Environmental Chemistry of Explosives and Propellant Compounds in Soils and Marine Systems: Distributed Source Characterization and Remedial Technologies*, American Chemical Society, Washington DC, pp. 401-414, 2011.
- [15] Houck, M. M., *Materials Analysis in Forensic Science*, Academic Press, Elsevier, San Diego, pp. 425-426, 2016.
- [16] MIL-STD-1751A, Department of Defense Test Method Standard: Safety and Performance Tests for the Qualification of Explosives (High explosives, Propellants, and Pyrotechnics), U.S. Department of Defense, December 11, 2001.
- [17] MIL-STD-286B, Propellants, Solid: Sampling, Examination and Testing, U.S. Department of Defense, 1 December, 1967.
- [18] Kissinger, H. E., "Reaction kinetics in differential thermal analysis," *Analytical Chemistry*, Vol. 29, No. 11, pp. 1702-1706, 1957.
- [19] Ozawa, T., "A new method of analyzing thermogravimetric Data," *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, Vol. 38, No. 11, pp. 1881-1886, 1965.
- [20] 吳俊賢, "庫儲單基發射藥安定劑含量與燃燒性能關係之研究", 碩士論文, 國防大學理工大學, 桃園, 2012。
- [21] 李金樹、鄭正發、陸開泰、葉早發, "長期庫儲發射藥熱安定性之研究—真空安定性試驗法", *火藥技術*, 第 27 卷, 第 2 期, 第 49-63 頁, 2011。
- [22] Grivell, M. R., *The Closed Vessel Test and Determination of Ballistic Properties of Gun Propellants*, Manual WSRL-0291-MA, GPO, Adelaide, South Australia, pp. 1-3, 1982.
- [23] Ges, M. B. H., *B173 Proputer Operating Instructions*, AVL List GmbH, Austria, pp. 12-20, 1988.

GNSS Kinematic Positioning Test Using Modified Signals Received by Smartphones

Chia-Chyang Chang*

Department of Applied Geomatics, Chien Hsin University of Science and Technology

ABSTRACT

Some mobile devices with an Android operating system have already acquired and recorded the GNSS satellite's dual-frequency carrier phase. If this type of smartphone can achieve high-precision GNSS kinematic positioning, the cost of devices will be effectively reduced. It is, then, expected to meet the standard of 20 cm positioning error required in pipeline surveying works. A smartphone of Mi8 was used in this study as a front-end data receiving tool, and the PPK positioning was carried out for a complete check on its operability, accuracy, and modification. The study found that the Mi8 smartphone could not effectively conduct moving observation, the broadcast ephemeris was not useful in data processing, and the positioning performance was unstable during different periods in a day. Importantly, the GNSS modified signal produced by the geodetic antenna and re-radiating kit with sheltering operation is proved to be effective. Its average positioning error could be better than 16 cm, through which it could decrease the error by at least 30% compared to the original signal.

Keywords: Global Navigation Satellite System (GNSS), Post-Processing Kinematic (PPK), smartphone, re-radiating kit, modified signal

智慧型手機接收改良信號之 GNSS 動態定位測試

張嘉強*

健行科技大學應用空間資訊系

摘 要

Android 系統的部分行動設備，已可進行 GNSS 衛星雙頻載波相位觀測量之獲取與紀錄。此類型之手機，若可達成高精度 GNSS 動態定位解算，將可有效降低作業裝置之成本，亦可滿足管線圖資更新測量之 20 公分定位誤差標準。本研究主要使用 Mi8 智慧型手機為資料接收工具，並採後處理動態定位模式進行解算，以進行其操作性、精確性及改良性之完整檢核。經測試可知，Mi8 相位觀測量並不適用於移動式定位，也不宜使用廣播星曆進行解算，另在同天不同時段之定位表現也不穩定。本研究提出 GNSS 大地型天線配搭信號轉發套件及遮罩方式所接收之改良信號，其平均誤差可優於 16 公分，且可較原始信號之誤差至少降低 30%。

關鍵詞：全球導航衛星系統、後處理動態定位、智慧型手機、信號轉發套件、改良信號

I. INTRODUCTION

Each modern smartphone has an embedded GNSS receiver chip. However, the GNSS raw data were not available to users at early beginning because they were protected by the chip manufacturers. This problem finally got a breakthrough in May 2016, when Google announced its Android Nougat (or version 7) operating system at the annual developer conference. This system can provide raw data of GNSS through Apps.

Subsequently, through the application programming interface (API) of the Android operating system, smartphones with such mobile platforms can directly acquire and store GNSS raw data. This capability made it possible for smartphones to conveniently carry out precise positioning. In addition, smartphones can combine accelerometers, gyroscopes, electronic compasses, cameras, barometers, and other sensors, allowing many application services in the field of geolocation [1].

When using the mobile positioning services of smartphones, the decimeter-level positioning applications can involve parking, logistics, shared transportation, emergency rescue, automatic driving, and other operations in smart cities. It is even more common in application projects such as location-based services (LBS), vehicle navigation, road monitoring, and mobile mapping [2].

Furthermore, in the development history of smartphones, early Android devices, such as Google/HTC Nexus 9, had a duty cycle problem as low power consumption GNSS chips were used. This problem caused each GNSS phase observables received by smartphones to have cycle slips, making it difficult to solve high-precision kinematic positioning [3].

During the 2016-2018 testing phase, Banville & Van Diggelen [4] used the tool of GNSS Logger released by the Android team to collect three minutes of GPS single-frequency data. They found that the carrier-to-noise density ratio (C/N_0) of the signal received by the smartphone antenna was easily affected by how the smartphone was held. In addition, as the smartphone antennas were mostly designed with linear polarization, the smartphone easily

received the GNSS signal reflected from the ground or the adjacent surface. Hence, it was easy to have the multipath effect. Moreover, it was likely to cause high noise and possible bias because the smartphone must be able to distinguish between direct and reflected signals during signal processing. At this time, the C/N_0 of the GNSS signal received by the smartphone antenna may have been reduced by about 10 dB-Hz compared with the geodetic antenna used for observation.

In addition, Riley et al. [3] used two smartphones, Nexus 9 and Samsung S7, for testing. They found that the GPS satellite signal may still fade in an open environment, and they judged that it should be caused by the multipath effect. In addition, the C/N_0 of a certain smartphone was low, which often stopped the positioning. However, when the smartphone received signals with an external GNSS geodetic antenna, its positioning results could be improved.

Similarly, in Odolinski and Teunissen [5], it was found that under the conditions of low ionosphere activity, if a smartphone was connected to a geodetic antenna for reception, the ambiguity resolution of phase observables could be successful in real-time. The position accuracy could then be achieved at the centimeter level.

During the evolution of smartphones, Xiaomi Mi8, a product with a new specification, was officially announced on May 31, 2018. It was the world's first smartphone capable of providing GNSS dual-frequency carrier phase. The smartphone Mi8 was embedded with a Broadcom BCM47755 chip, which can cooperate with the smartphone's receiving and processing software, the GNSS API of the Android operating system, and the installed GNSS data logging Apps, to form the GNSS dual-frequency carrier phase receiving system for the smartphone [3]. The types of GNSS signals that this smartphone can receive include GPS L1/L5, GLONASS L1, BeiDou B1, Galileo E1/E5a, and QZSS L1/L5 [6].

In his comment in the article written by Haddrell et al. [7], Professor Langley mentioned that the antenna is the most important factor for good GNSS signal reception. Since GNSS signals are right hand circularly polarized, the corresponding polarization matched receiving antenna can still transmit the maximum signal power to the receiver, despite the satellite

direction changing during the signal transmission. However, as the smartphone must not only provide voice communication but also need to connect with headphones, Wi-Fi, or Bluetooth, and must be small and affordable, this limitation will move GNSS antennas towards miniaturization and combination. Moreover, it also leads to a significant reduction in the signal gain, which is the inherent limitation to the smartphone's GNSS antenna.

With Android smartphones receiving GNSS raw data, researchers can use the GNSS carrier phase observables for related applications at a precise positioning level. However, there is an obvious limitation; that is, no smartphone manufacturer has officially disclosed the position of the antenna phase center embedded in its smartphone. The phase center position of the GNSS antenna required for high-precision satellite positioning should be discussed as a priority so that the GNSS receiving point of the smartphone can precisely correspond to the ground measuring point. In this regard, Netthonglang et al. [8] established that the antenna phase center of the Mi8 was at the upper left of the front of the phone. In other words, it was 2.8 cm to the left from the center of the upper edge of the smartphone and 0.9 cm away from the upper edge. This definition was applied to the present study when performing the subsequent centering of the smartphone.

In applying the precise positioning using the GNSS phase observables received by smartphones, the application object in this study was based on the surveying works after the underground pipeline was buried. Although the GNSS real-time kinematic (RTK) positioning was mainly used in the field operation, the quality of the observation based on the smartphone has not been clarified in the study. Hence, this study adopted the Post-Processing Kinematic (PPK) mode for smartphone-based GNSS positioning. The target accuracy was based on the 20 cm required for manhole cover and pipeline positioning as the national standard.

Therefore, this study used a smartphone capable of providing GNSS phase observables as the front-end data receiving tool for PPK positioning. In addition, a complete investigation of the error of positioning results was conducted through related test procedures, such as the signal

quality inspection, zero-baseline calibration, different ephemeris utilization, moving and fixed observation, multi-session positioning, and modified signal improvement. By doing so, the operability, accuracy, and improvement of the application ability of smartphones in GNSS high-precision positioning could be clearly understood. The research architecture is shown in Fig. 1.

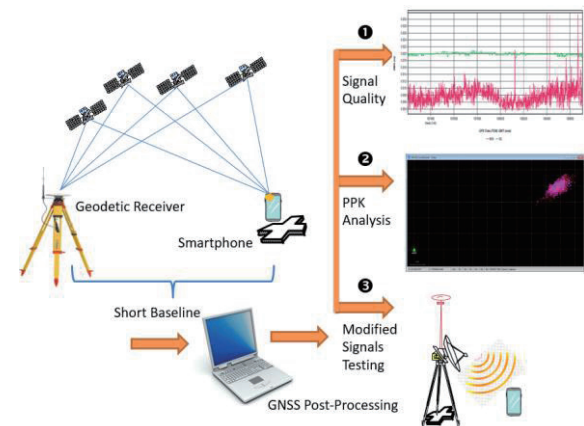


Fig.1. The operational architecture of this study

II. TESTS OF ORIGINAL SIGNAL

According to the literature, difficulties in GNSS observation for Mi8-type smartphones may occur because of the unstable signal reception and multipath effect mainly related to poor antenna quality [9-10]. To fully understand the performance of smartphone-based GNSS phase observables for precise positioning, a short baseline of about 55 m in length was used in this study. A NovAtel ProPak6 (PP6) geodetic GNSS receiver was used for the base station of the baseline, while a smartphone receiver was used for the rover.

The baseline observation was recorded with one epoch per second. Then, the positioning was solved by the Waypoint GrafNav 8.90 in PPK mode [11]. The dual-frequency observations provided by smartphone receivers were L1/L5(E5) and the number of modernized satellites that can transmit the L5(E5) was still uncommon, so only single-frequency of L1 observables were used for the PPK solution in this study, which is believed to affect the short baseline positioning not significantly.

2.1 Evaluation Indicators

In this study, the internal precision and

external accuracy of the positioning results were discussed in terms of the assessment of smartphone GNSS positioning solution obtained by the PPK mode. The use of each type of evaluation indicator is defined as follows:

- (1) The standard deviation of the solution set

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{PPK} - X_{mean})_i^2}{n-1}} \quad (1)$$

In Eq. (1), σ is defined as the standard deviation obtained after subtracting n epochs of PPK solutions (X_{PPK}) from the mean of the solutions (X_{mean}); the smaller the value of σ , the smaller the dispersion of the PPK results. In this study, this indicator was mostly used when the smartphone was observed at a fixed point, but not centering to the ground point so that there was no known coordinate for checking.

- (2) The average standard deviation of the epoch solution

$$\bar{\sigma} = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i}{n} \quad (2)$$

In Eq. (2), the calculation of $\bar{\sigma}$ is to average the standard deviation of each epoch solution (σ_i) with the solution number in the group (n); the smaller the value of $\bar{\sigma}$, the smaller the solving error. This indicator was mostly used in this study when the smartphone was used for moving observation. The value in Eq. (1) could not be obtained because the observation was not repeated at the same point, and there were no known coordinates at each moving point for checking.

- (3) The root mean square error of the solution set

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{PPK} - X_{static})_i^2}{n}} \quad (3)$$

In Eq. (3), RMSE is the root mean square error obtained by subtracting the n epochs of PPK solution (X_{PPK}) from the known coordinates (e.g. X_{static} from GNSS static solutions); the smaller the RMSE value is, the smaller the difference between the PPK solution and the known value. This indicator was mostly used in this study when the smartphone was observed at a fixed point, and the point has higher accuracy of coordinate for checking.

2.2 Signal Quality Comparison

In this study, a PP6 geodetic receiver and a Mi8 smartphone were set up at 12:00 local time on January 12, 2021 on the university building roof in Taoyuan, adjacent to each other, for 15 minutes (see Fig. 2). A comparison of the signal quality-related indicators of their performances is shown in Fig. 3.

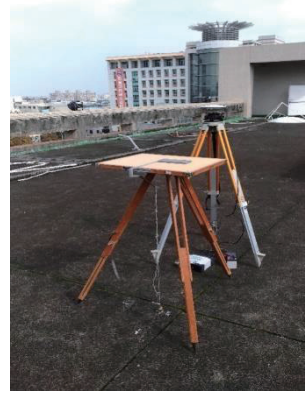
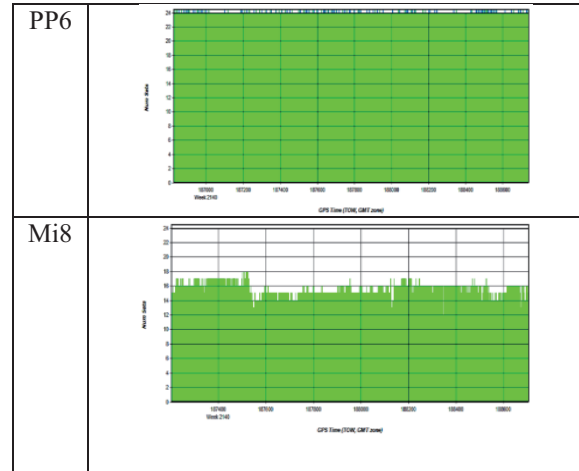
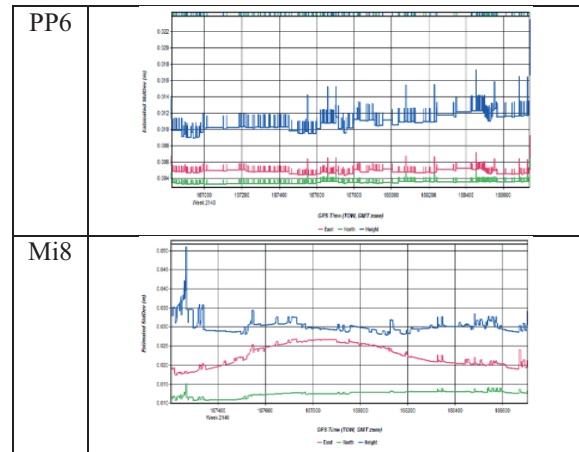


Fig. 2. Simultaneous GNSS observations collected by PP6 and Mi8



(a)



(b)

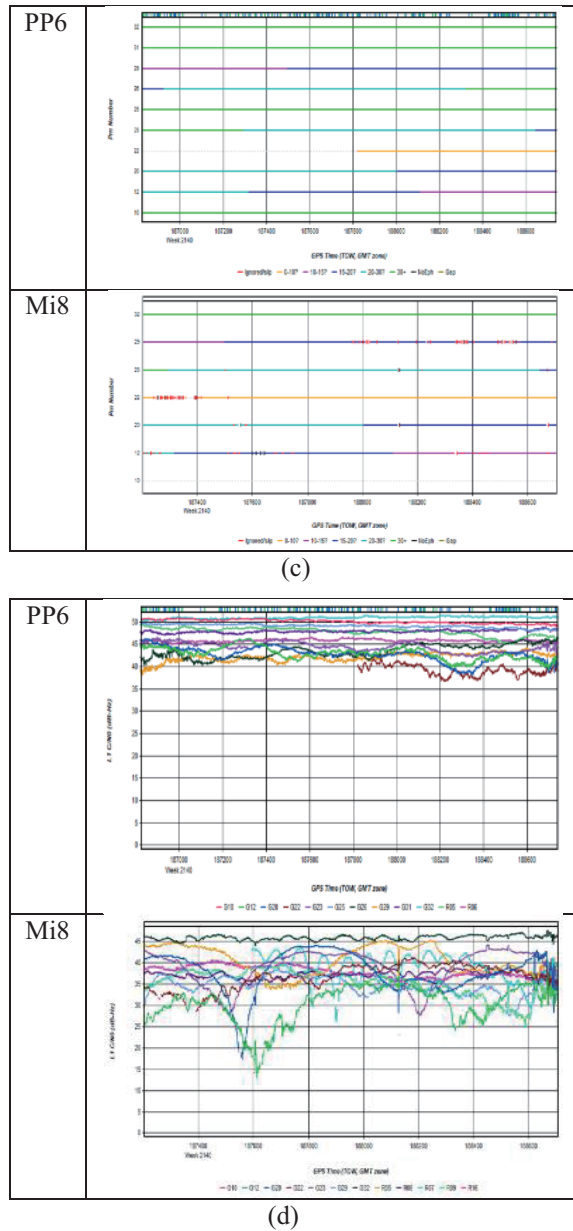


Fig. 3. Comparison of GNSS signal quality received by PP6 and Mi8 for: (a) number of satellites, (b) estimated position accuracy, (c) GPS L1 cycle slips, (d) L1 C/N0 for GPS and GLONASS

From the above-mentioned quality indicators reflected by the observations of the geodetic GNSS receiver (PP6) and the smartphone receiver (Mi8), it can be seen that the number of satellites received at the same time is about 24 for PP6 and about 16 for Mi8. In terms of PPK estimated positioning accuracy, PP6 is about 0.5 cm in the plane and 1.2 cm in height, while Mi8 is about 2.5 cm in the plane and 3 cm

in height. For GPS L1 cycle slips, PP6 is almost absent, while Mi8 is frequent. In terms of L1 carrier/noise ratio (C/N₀), PP6 locates at 40-50 dB-Hz, while Mi8 is about 30-45 dB-Hz.

Ultimately, similar to the study of Robustelli et al. [2], the findings of the present study indicate that the GNSS signal quality of the smartphone receiver (Mi8) is indeed worse than that of the geodetic receiver (PP6).

2.3 Ephemeris Testing

In understanding the difference in the performance of the PPK solution of smartphone observables with different levels of ephemeris, this study used broadcast ephemeris (BE) and precise ephemeris (PE) with two sets of Mi8 data collected at the same site in 2021 and 2022, respectively. Eq. (1) was used to compare the standard deviations of two solution sets (see Table 1), and the distribution of the plane coordinates of the second data set is shown in Figure 4.

Table 1. Positioning errors of PPK solutions using BE and PE

Data set (Date)	2D (cm)		H (cm)	
	BE	PE	BE	PE
2021/1/21	31.8	6.5	15.7	7.9
2022/1/11	15.2	1.5	23.0	6.1
Average	23.5	4.0	19.4	7.0

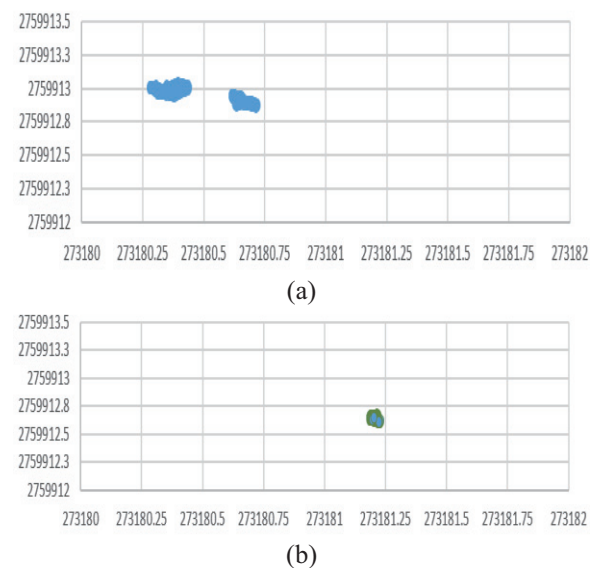


Fig. 4. Distribution of PPK plane coordinates for the second set of smartphone observations by using: (a) BE, (b) PE

As shown in Table 1, the positioning performance of PE is better than that of BE, and the average difference is about 20 cm in the plane component and 12 cm in the vertical component. In addition, the distribution of plane coordinates in Fig. 4 showed that in addition to the scattered differences, there were two concentrated blocks in the BE solution, and their coordinates deviated from the PE positioning results by up to 75 cm. Obviously, the results of the PE solution show much reliable performance.

2.4 Moving Testing

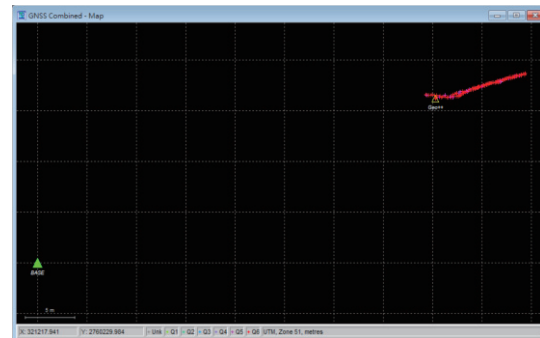
In an attempt to understand the positioning performance of the smartphone in a slow-moving state, this study collected two data sets with different moving routes (one straight line and one elliptical) with Mi8 smartphones on January 15, 2022. They were combined with the base station data of PP6 observations to perform a one-second epoch of PPK positioning using the precise ephemeris.

In exploring the performance, this study also included the solutions of the fixed-point observation and showed the comparisons in Table 2. It used Eq. (2) to calculate the average standard deviation of the epoch solution in each set of positioning solutions. The distribution of plane coordinates obtained by two sets of moving reception data is drawn in Fig. 5.

From the test results, it can be found that the positioning error of the Mi8 smartphone in the slow-moving condition is much worse than that of the fixed-point observation, and the difference can be up to 20 times or more, consistent with the findings of Dabove et al. [12], who suggested that the success rate of fixed ambiguity resolution of smartphone observables was significantly lower.

Table 2. Positioning errors of PPK solutions with different observation types

Observation	Route	2D (cm)	H (cm)
Stationary	Fixed point	1.3	2.2
Moving slowly	Straight line	35.9	41.6
	Elliptical	40.8	92.1



(a)



(b)

Fig. 5. Distribution of PPK plane coordinates observed by smartphone with: (a) straight line moving, (b) elliptical moving

2.5 Multi-session Testing

In an attempt to understand the positioning performance of smartphones during general operating hours, this experiment was conducted between 9:00 and 20:00 local time on March 27, 2021 using Mi8 smartphones to collect 15 minutes of fixed-point observations every hour. Then, it was combined with the base station data to perform a one-second PPK positioning solution using a precise ephemeris.

Because the smartphone was placed on the tablet, and the static observation was carried out after centering and leveling, it is possible to investigate the external accuracy of the PPK positioning results, based on Eq. (3). To determine the precise coordinates of the check point, two PP6 receivers were used for static observation and baseline solution. The root mean square errors (RMSEs) of each solution set group were obtained (see Table 3). The variation of the errors during an operating day is shown in Fig. 6.

The external accuracy shown in Table 3 indicates that the Mi8 positioning results are not good enough during the operating hours from daytime to evening, with an average plane error

of 40 cm and a great variation between periods by up to 75 cm. Meanwhile, the error variation trend in Fig. 6 shows that there are two large peaks at 15:00 and 18:00, and 12:00, 16:00, and 19:00 are relatively better.

Table 3. RMSE of PPK positioning of smartphone observations at different time

Local time	N (cm)	E (cm)	2D (cm)	H (cm)
9	30.7	43.0	52.9	95.9
10	29.5	9.5	31.0	15.1
11	25.9	14.9	29.9	26.3
12	21.0	5.4	21.7	9.7
13	43.0	21.4	48.1	19.1
14	46.0	15.1	48.4	13.7
15	60.1	76.1	97.0	252.2
16	19.5	9.0	21.5	12.8
17	30.8	3.9	31.0	6.3
18	25.4	45.6	52.2	154.5
19	16.0	17.7	23.9	4.4
20	23.2	11.5	25.9	16.1
Min. value			21.7	4.4
Max. value			97.0	252.2
Mean			40.3	52.2

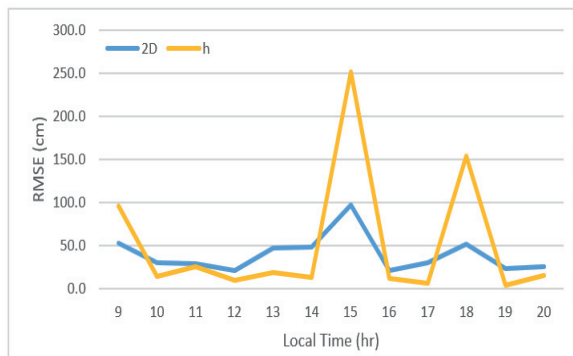


Fig. 6. RMSE of PPK positioning for multi-session observations

When further comparing the plane errors in a better period at 19:00 and a worse period at 15:00, as drawn in Fig. 7, the positioning error of the smartphone during the 15-minute observation period around 15:00 is unstable and may occur significant jumps during the observation period.

In the above-mentioned phenomenon, the

external accuracy indicator (such as RMSE in Table 3) of the PPK positioning results based on smartphone observations showed a much larger value than the internal precision indicator (such as σ in Table 1). It may result from either the not-well-defined Mi8 antenna phase center or the ionospheric effect that causes abnormal satellite signals received by the smartphones [5][8]. Thus, in order to overcome the above dilemma of the large error occurred, this study proposed using the GNSS signal re-radiator to modify and improve the signal reception quality, and the details of which are as follows.

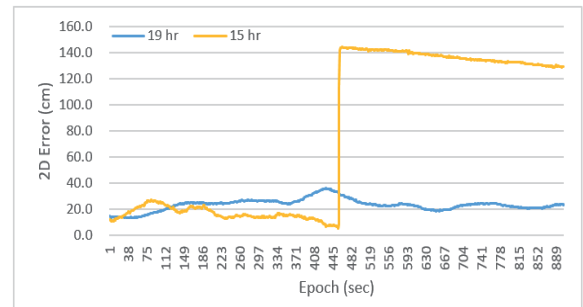


Fig. 7. Comparison of PPK plane errors observed at 15:00 and 19:00

III. TESTS OF MODIFIED SIGNAL

In improving the positioning accuracy of GNSS phase observables of smartphones, using an external antenna can be considered to enhance the quality of the received signals. Blot et al. [13] showed that the L1 code range could be improved, but the L1 carrier phase was not effectively improved, in which the signal noise was still three times higher than that of a typical geodetic receiver.

Since the above-mentioned improvement method has not been fully confirmed, and the PPK positioning mode has not been tested, this study proposed a combined device to provide the modified signal for smartphones' poor reception. Furthermore, this study further tested and discussed its operational effectiveness.

This modified GNSS signal transmission and receiving operation for smartphones was developed, as shown in Fig. 8. The modified signal generation device used a better quality and easy centering of GNSS geodetic antenna mounted on a pole for receiving the original

satellite signal at the positioning point, and was equipped with a signal re-radiating kit consisting of AC power, filtering amplifier, and passive transmission antenna for operation (see Fig. 9).

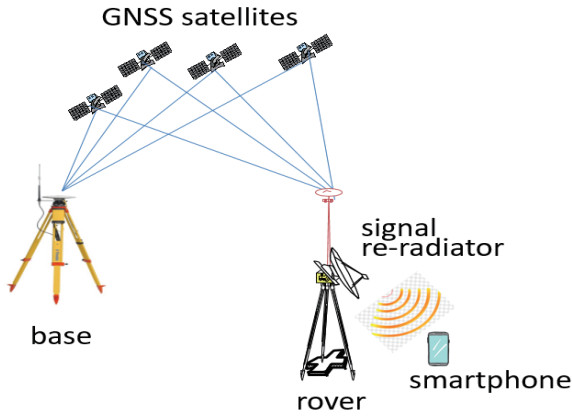


Fig. 8. Configuration and operation for smartphone receiving modified GNSS signal

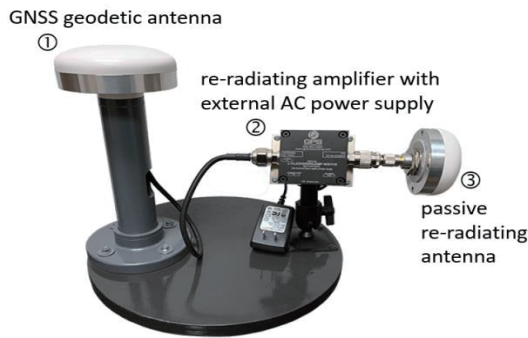


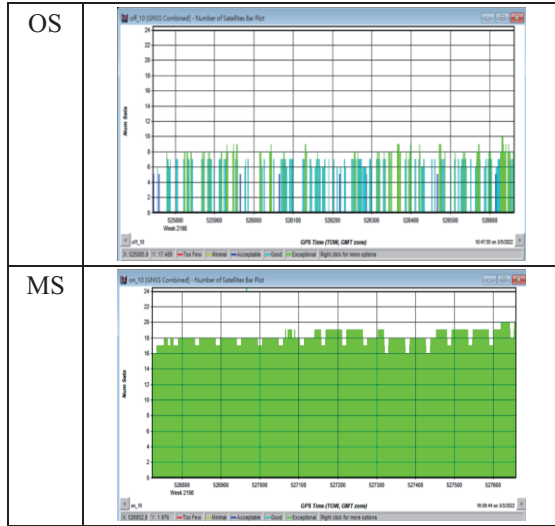
Fig. 9. Modified GNSS signal re-radiating kit

Under the operation of this design device, the GNSS observations can be recorded by a low-cost and lightweight smartphone. The positioning point was at the installation site of the geodetic antenna with the pole, which can avoid the centering problem caused by the uncertainty of the antenna phase center of the smartphone. This is because the GNSS signal has been filtered and transmitted by the re-radiating antenna, the observation quality and positioning performance of the modified signal received by the smartphone within an appropriate distance might be improved. These benefits will be practically tested and discussed in the following sessions.

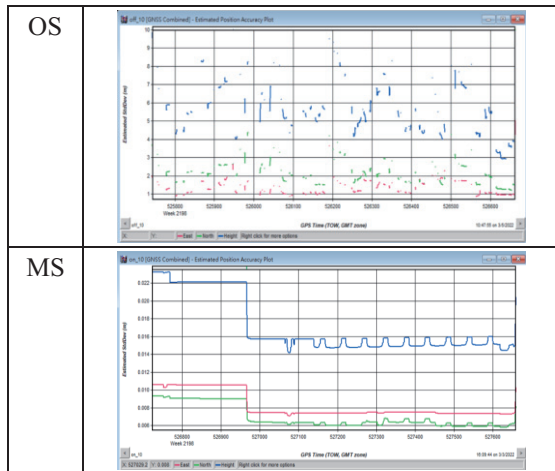
3.1 Quality of Modified Signal

During the period of 10:00-11:00 local time on February 26, 2022, the Mi8 smartphone was used to receive the original and modified GNSS

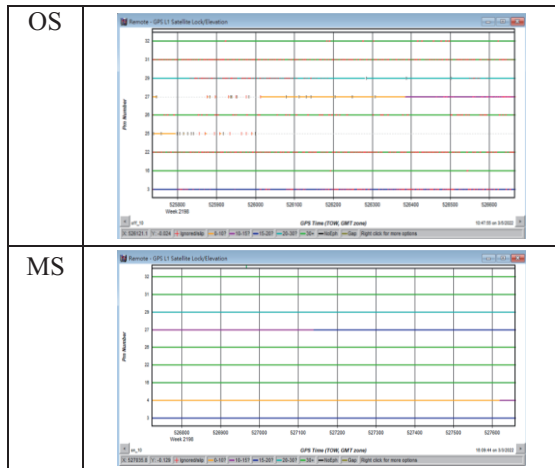
signals for 15 minutes on the top of a building on university campus. The evaluations of the received signal quality were compared and shown in Fig. 10.



(a)



(b)



(c)

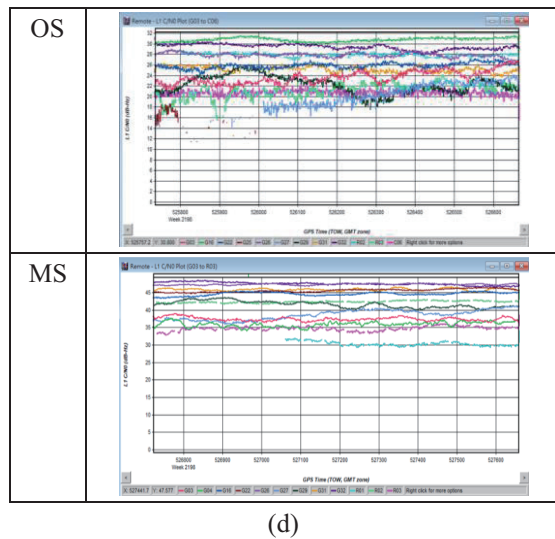


Fig. 10. Comparison of the quality of the GNSS original signals (OS) and modified signals (MS) received by Mi8 for: (a) number of satellites, (b) estimated position accuracy, (c) GPS L1 cycle slips, (d) L1 C/N0 for GPS and GLONASS

As shown in the comparison in Fig. 10, it is clear that the quality indicators reflected by the original and modified GNSS signals received by Mi8 smartphones are significantly different. In terms of the number of satellites received in the adjacent period, the original signal has about 8 satellites, while the modified signal can reach 18 satellites. In terms of the PPK positioning accuracy, the original signal performs at the meter level, while the modified signal is within 2 cm. In the GPS L1 cycle slips occurrence, the original signal frequently appears, while the modified signal hardly appears. In the L1 carrier/noise ratio (C/N₀), the original signal value falls at 18-30 dB-Hz, while the modified signal is about 30-50 dB-Hz. For this test data, the quality of the modified signal received by Mi8 is indeed much better than the original signal and is comparable to the PP6 reception quality shown in Fig. 3.

3.2 Zero Baseline Testing

The zero baselines can be applied to determine the hardware internal error of GNSS receivers. This concept was also used in this study to understand the effectiveness of Modified GNSS signal received by smartphones. A GNSS geodetic antenna was set up on the outdoor roof, and the signal was transmitted to the indoor area using the re-radiating kit as Fig. 9. Since the

indoor GNSS signal was relayed and modified from the original signal received by the roof antenna, the coordinates obtained by the indoor receivers should be the same. In terms of the baseline solution, the length of each baseline formed should be zero. However, a non-zero magnitude can be regarded as the positioning error caused by the GNSS receiver.

The test was conducted on December 6, 2021, at 11:00 am, using two PP6 geodetic receivers and one Mi8 smartphone for 40 minutes of data collection and performing a one-second interval of PPK positioning with the precise ephemeris. In this test, the Mi8 was not bothered by instrument centering, so Eq. (3) could be used to calculate the root-mean-square error of each baseline solution with zero length as the standard value. The comparison of the results is shown in Table 4. The error of each epoch solution for the PP6-PP6 baseline and the PP6-Mi8 baseline is shown in Fig. 11.

Table 4. RMSE of PPK positioning for zero baseline tests

Base	Rover	N (cm)	E (cm)	2D (cm)	H (cm)
PP6	PP6	0.7	0.2	0.7	0.1
	Mi8	1.0	0.3	1.0	1.0

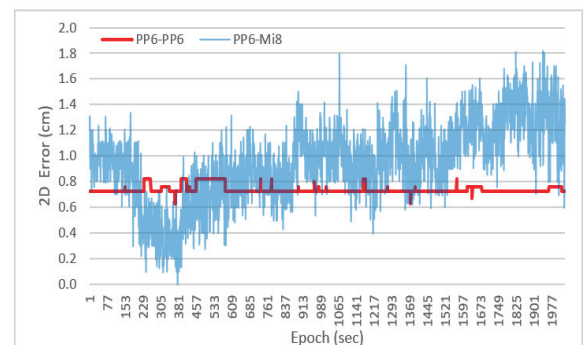


Fig. 11. Comparison of the zero baseline plane errors between PP6-PP6 and PP6-Mi8

The results of the zero baseline test listed in Table 4 were obtained under an observation environment with the modified GNSS signal. As expected, the better performance is found for the PP6-PP6 baseline of using two geodetic receivers, with a plane error of 0.7 cm. For the PP6-Mi8 baseline, which is the focus of this study, the plane error increases slightly to 1.0 cm when observed with one Mi8 smartphone. Compared to

the internal precision and external accuracy obtained from the previous tests with the original GNSS signal, this level of Mi8 positioning error is a promising result. It is basically believed that the modified GNSS signal provided by this study's design device is capable of improving the Mi8's observation. However, when the positioning errors are examined in Fig. 11, it can be also seen that the stability of the Mi8's observation is still not as good as that of the PP6 geodetic receiver.

3.3 Outdoor Testing

In the previous zero baseline test, the modified GNSS signal transmitted into the indoor environment through the re-radiating kit was no coexistence between original and modified signals in the same space. To further check whether the coexistence of original and modified signals in the same open environment would have a near-far effect similar to that of pseudolite [14], the re-radiating kit was placed in the outdoor space to produce the coexistence between the original and modified GNSS signals in space.

This study was conducted at 12:30 local time on January 26, 2022, with a PP6 as the base station (receiving only the original signal) and a Mi8 set up at 3 m, 5 m, and 10 m from the re-radiating kit (see Fig. 12). The original and modified GNSS signals were received for 15 minutes each by turning the re-radiating kit on and off. The results are listed in Table 5.

As shown in Table 5, the Mi8 observations were not successfully solved at the baseline distance of 3 m and 5 m from the re-radiating antenna when the kit was turned on. Meanwhile, the standard deviation of the 2D solution set at a 10-m distance was much higher than that of the original signal received by Mi8.

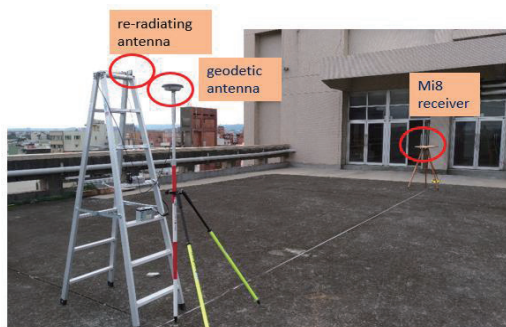


Fig. 12. Original and modified GNSS signals coexistence for outdoor testing

Table 5. Positioning errors of PPK solutions with re-radiating on or off

Baseline distance	Turning off (original signal)		Turning on (coexisted signal)	
	2D (cm)	H (cm)	2D (cm)	H (cm)
3 m	1.5	6.1	N/A	N/A
5 m	13.4	7.6	N/A	N/A
10 m	15.6	35.0	58.9	24.0

In addition, when the modified GNSS signal and the original signal coexist in the outdoor environment, the L1 phase observable cannot be effectively received at 3-m and 5-m distance from the re-radiating antenna, whereas the L5 signal which is believed to be more resistant to interference can be received. However, the satellites received in L5 is still insufficient and can only be an auxiliary observation in the GNSS processing software, thus, those solutions cannot be completed. Although the L1 phase observable can be received at a distance of 10 m from the re-radiating antenna, the positioning error is found to be large due to the possible interference effect between the original and modified signals.

3.4 Multi-session Testing with Sheltering

The near-far effect may occur when the original and modified GNSS signals coexist in the same outdoor space. Thus, this study proposed an operational improvement by placing the re-radiating antenna and Mi8 receiver to a space with sheltering (see Fig. 13). This shield is expected to block the original GNSS signal already existing in the open space. Meanwhile, only the modified GNSS signal from a re-radiating kit will be provided inside the shield.



Fig. 13. Outdoor smartphone observation with a shelter

Since the results of the previous multi-session test in Section 2.5 showed that the external accuracy of Mi8 observations was very unstable, this study adopted a re-radiating kit with a shelter to receive the modified signal only, expected to avoid smartphone centering problem and improve the stability of smartphone positioning at different time.

To carry out a complete test for the above purpose, a fixed point observation was made between 9:00 and 19:00 local time on February 26, 2022. The Mi8 smartphone was used to receive the original GNSS signal in the first 15 minutes of each hour and the modified GNSS signal with sheltering in the following 15 minutes. In addition, after combining with the base station data of PP6 observation, a one-second rate of PPK solution was performed using a precise ephemeris. The RMSEs of the two sets of the solution compared with the known coordinate of the test point are listed in Table 6, in which the improvement rates (IR) are also provided using the calculation of $(RMSE_{OS} - RMSE_{MS}) / RMSE_{OS} \times 100\%$. The variations in the plane errors based on the original and modified signals in each session are plotted in Fig. 14.

Table 6. RMSE and improvement rate (IR) of PPK positioning with original signal (OS) and modified signal (MS) at different local time (LT)

LT	2D RMSE			H RMSE		
	OS (cm)	MS (cm)	IR (%)	OS (cm)	MS (cm)	IR (%)
9	519.7	3.8	99	1053.8	1.3	100
10	263.9	0.8	100	660.4	1.8	100
11	281.9	22.2	92	718.2	12.8	98
12	289.3	20.3	93	253.2	15.7	94
13	84.4	8.4	90	69.3	2.9	96
14	52.1	34.8	33	137.8	6.7	95
15	24.7	9.5	62	44.2	5.0	89
16	159.5	22.9	86	60.4	16.2	73
17	39.5	14.7	63	102.9	5.1	95
18	63.7	19.3	70	126.7	9.2	93
19	72.6	15.9	78	109.2	15.0	86
Avg	168.3	15.7	91	303.3	8.3	97

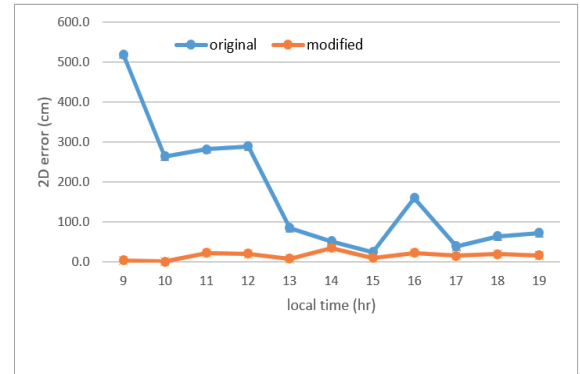


Fig. 14. Comparison of multi-session PPK plane error with different signals

From the external accuracy shown in Table 6 and Fig. 14, it can be seen that the results of PPK positioning with Mi8 observations can reduce the positioning errors by at least 30% during the operation hours from daytime to evening when the modified GNSS signal is received with sheltering. Besides, for the average improvement rate of more than 90%, the modified GNSS signal obtained with sheltering can reduce the average plane errors from 168 cm to 16 cm, and it can also low down the average vertical error from 303 cm to 8 cm.

Moreover, when looking at the detailed performance, it could be seen that the error in height could meet the requirement of 20 cm for pipeline positioning in all sessions when the modified GNSS signal was used. However, the plane error of larger than 20 cm still occurred in four sessions, e.g. 11h, 12h, 14h, and 16h.

Furthermore, for the two representative periods (15h and 19h) shown in Fig. 7, the variations of the plane errors using different signals in this test were also plotted in Fig. 15.

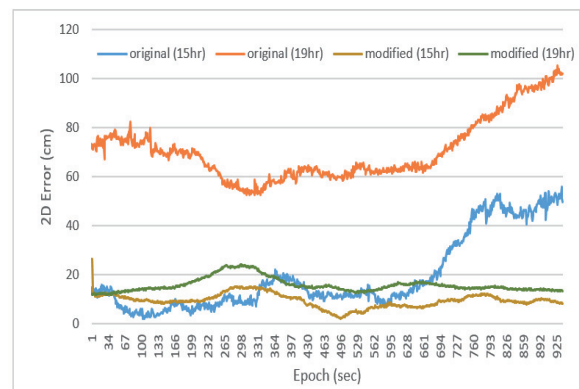


Fig. 15. Comparison of the plane error using different signals at 15:00 and 19:00

Compared with the original signal positioning error jump in Fig. 7, it did not occur in Fig. 15 of this test, and the modified signal positioning results with the sheltering reception were generally better and more stable than the original signal positioning. Observing the test results of near one year ago (March 2021 in Table 3), it can be seen that the average plane error has increased significantly from 40 cm to 168 cm in the test under the condition of using the original GNSS signal. It is possibly explained to be resulting from the influence of the ionospheric error. To further understand, the ionosphere vertical total electron content (TEC) maps, provided by International GNSS Service [15], were used to extract TEC information from the vicinity of the station, i.e. latitude 25° N, longitude 120° E, and altitude 450 m, and compare the two test periods in Fig. 16.

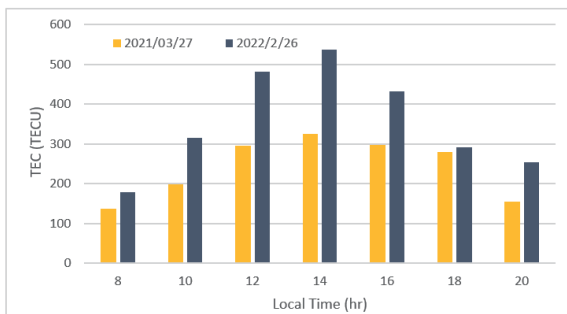


Fig. 16. Comparison of the TECs for the two test periods

From the figure, it can be seen that the TEC values in the second group (February 2022) were all higher in the same period, and the sessions with TEC values above 300 units, e.g. 10-16h local time, also correspond a higher level of positioning errors. However, the exact correlation is suggested to be further investigated.

IV. CONCLUSION AND SUGGESTIONS

In this study, a short baseline PPK positioning using the smartphone received L1 carrier phase observables can provide the following findings:

1. Mi8 smartphone observations could improve the positioning accuracy by 60-80% when using precise ephemeris, instead of using broadcast ephemeris, with an average difference

of 10-20 cm. The use of broadcast ephemeris could also lead to a bias of 75 cm in position.

2. The positioning error of the GNSS observables collected by the Mi8 smartphone in the slow-moving state was much larger than that of the fixed-point observations, and the error of moving test could be as high as 90 cm.

3. The external accuracy of smartphone positioning was significantly worse than the internal precision, which might be caused by the smartphone antenna or the signal reception anomaly. Thus, a GNSS signal re-radiator could be used to improve the signal transmission quality.

4. Regarding the number of satellites, estimated position accuracy, GPS L1 cycle slips, and L1 carrier/noise ratio (C/N_0), the quality of the original signal received by the Mi8 smartphone was indeed obviously worse than that of the geodetic receiver. However, the modified GNSS signal obtained using the proposed re-radiating kit could be much better than the original GNSS signal and closer to the signal quality of geodetic receiver.

5. Using the modified GNSS signal in the indoor zero baseline calibration, the error showed that the plane error of the geodetic receiver was 0.7 cm. The zero-baseline error of Mi8 slightly increased to 1.0 cm, and the stability of the performance was relatively poor.

6. In the outdoor environment where the original and modified GNSS signals coexisted, the L1 phase observed by smartphone near to the re-radiating antenna with 3 m could not be received effectively. Meanwhile, the L1 phase could be received for a 10-m baseline, but the positioning error would increase to 59 cm due to the interference of signal coexistence.

7. When the modified GNSS signal was provided in an open space, the re-radiating antenna and smartphone could be blocked from the original signal by sheltering so that the modified signal could show a positioning error of 3-9 cm.

8. During the operating hours from daytime to evening, the positioning error of the modified GNSS signal received by Mi8 with the shelter could be reduced by at least 30% compared with the original signal. The average plane error could be lowered down from 168 cm to 16 cm. However, there were still some hours to see the error greater than 20 cm.

From the test of using GNSS phase observables for short baseline PPK positioning with smartphones, the following suggestions for future development are provided:

1. When the Mi8 smartphone uses the Geo++ program to receive GNSS observations, only the observation file in the RINEX format is accessible. Thus, the satellite orbit information used for positioning calculation must be provided by other sources.

2. To make the GNSS observations received by the smartphone carry on a centimeter-level positioning, the antenna phase center, the instrument centering and leveling, the signal reception quality, and the influence of ionospheric effect should be continuously studied and overcome.

3. Precise Point Positioning (PPP) will be one of the mainstream technologies. The amount of observations provided by smartphone receivers should be increased with the navigation satellite modernization. Thus, it is worthwhile to explore the topics of using smartphone receivers' L1/L5 dual-frequency carrier phase observables to effectively achieve a decimeter-level positioning in both static and kinematic modes [16].

4. The GNSS signal re-radiating kit can provide the data with better quality, but the positioning performance is still not steadily meet a 20 cm requirement for underground pipeline surveying. However, its equipment and operation has potential to carry out some applications, such as rapid map revision etc. [17].

ACKNOWLEDGEMENTS

The author is grateful to the Ministry of Science and Technology for funding this project under the contract number of MOST 110-2121-M-231-001.

REFERENCES

- [1] Elmezayen, A. and El-Rabbany, A., "Precise Point Positioning Using World's First Dual-Frequency GPS/GALILEO Smartphone", *Sensors*, 19(2593), 15 pp. 2019.
- [2] Robustelli, U., Baiocchi, V. and Pugliano, G., "Assessment of Dual Frequency GNSS Observations from a Xiaomi Mi 8 Android Smartphone and Positioning Performance Analysis", *Electronics*, 8(91), 16 pp. 2019.
- [3] Riley, S., Landau, H., Gomez, V., Mishukova, N., Lentz, W. and Clare, A., "Positioning with Android: GNSS Observables", *GPS World*, January issue, <https://www.gpsworld.com/positioning-with-android-gnss-observables/>, 2018.
- [4] Banville, S. and van Diggelen, F., "Precision GNSS for Everyone: Precise Positioning Using Raw GPS Measurements from Android Smartphone", *GPS World*, November issue, pp. 43-48, 2016.
- [5] Odolinski, R. and Teunissen, P. J. G., "An Assessment of Smartphone and Low-cost Multi-GNSS Single-Frequency RTK Positioning for Low, Medium and High Ionospheric Disturbance Periods", *Journal of Geodesy*, 93(1), pp. 1-22, 2018.
- [6] Broadcom, "BCM47755: Third-Generation GNSS Location Hub with Dual Frequency Support", <https://www.broadcom.com/products/wireless/gnss-gps-socs/bcm47755>, 2020.
- [7] Haddrell, T., Phocas, M. and Ricquier, N., "Innovation: Mobile-Phone GPS Antenna, Can They Be Better?", *GPS World*, February issue, <https://www.gpsworld.com/professional-oemcomponent-technologiesinnovation-mobile-phone-gps-antennas-9457/>, 2010.
- [8] Netthonglang, C., Thongtan, T. and Satirapod, C., "GNSS Precise Positioning Determination Using Smartphone, 2019 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems", Thailand, pp. 401-404, 2019.
- [9] Smart Android, "GPS Problem on Xiaomi Mi 8, What to do", <https://smartandroid.fr/en/probleme-de-gps-sur-xiaomi-mi-8-que-faire/>, 2020.
- [10] Sharma, H., Bochkati, M., Lichtenberger, C., Pany, T., Darugna, F. and Wubbena, J. B., "Smartphone-based GNSS Positioning: Today and Tomorrow", *InsideGNSS*, Sep/Oct issue, pp. 40-53, 2021.
- [11] Hexagon and NovAtel, "Waypoint Software 8.90 User Manual", OM-20000166, Rev 9, 222 pp. 2020.
- [12] Dabove, P., Di Pietra, V. and Piras, M., "GNSS Positioning Using Mobile Devices with the Android Operating System",

- ISPRS International Journal of Geo-Information, 9(220), 13 pp. 2020.
- [13] Blot, A., Laurichesse, D., Rouch, C. and Granger, C., “PPP with External Antenna addition on Smartphones”, CNES, http://www.ppp-wizard.net/Articles/PPP_with_external_antenna_addition_on_smartphones.pdf, 2020.
- [14] Stone, J. M., LeMaster, E. A., Powell, J. D. and Rock, S., “GPS Pseudolite Transceivers and their Applications”, Presented at the ION National Technical Meeting 99, San Diego, California, January 25-27, 1999.
- [15] IGS (International GNSS Service), “Ionosphere”, https://igs.org/products/#ionospheric_products, 2022.
- [16] Chen, B., Gao, C., Liu Y. and Sun, P., “Real-time Precise Point Positioning with a Xiaomi MI8 Android Smartphone”, *Sensors*, 19(2835), 13 pp. 2019.
- [17] Robustelli, U., Baiocchi, V., Marconi, L., Radicioni, F. and Pugliano, G., “Precise Point Positioning with Single and Dual-Frequency Multi-GNSS Android Smartphone”, *ICL-GNSS 2020 WiP Proceeding*, Finland, 2020.

綠色起爆藥 DBX-1 形貌改良之研究

李文祥^{1*} 賴家同² 楊琮賢³ 李金樹³ 陸開泰³

¹國防大學理工學院國防科學研究所化學工程組

²國防大學理工學院化學工程碩士班

³國防大學理工學院化學及材料工程學系

摘 要

傳統的起爆藥通常是重金屬鹽類，尤其是鉛鹽，如疊氮化鉛及史蒂芬酸鉛，會造成環境污染的問題，因此，綠色起爆藥越來越受到關注，而5-硝基四唑亞銅(DBX-1)被認為是可取代疊氮化鉛的起爆藥之一。DBX-1通常利用5-硝基四唑鈉二水合物($\text{NaNT} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)及氯化亞銅(CuCl)反應合成，但合成產物大多為不規則的片狀，流動性和分散性較差影響裝填，因此，有必要改善合成產物的形貌。本研究首先合成 $\text{NaNT} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 因其無法商購取得，然後利用 $\text{NaNT} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 及 CuCl 合成 DBX-1 並分別添加羧甲基纖維素鈉(NaCMC)、聚乙醇醇(PVA)、聚山梨醇酯-20(Tween 20)、糊精等4種晶形調整劑改善合成產物的形貌，實驗結果顯示添加濃度0.5 wt.%的 Tween 20或濃度3 wt.%的糊精可成功合成球狀 DBX-1，其合成產物的粒徑分別為 39 ± 5 及 $83 \pm 10 \mu\text{m}$ 。

關鍵詞：綠色起爆劑、球狀5-硝基四唑亞銅、晶形調整劑、粒徑

Study on Morphology Improvement of Green Primary Explosive DBX-1

Wen-Hsiang Li^{1*}, Jia-Tong Lai², Tsung-Mao Yang³, Jin-Shuh Li³, Kai-Tai Lu³

¹ School of Defense Science, Chung Cheng Institute of Technology, National Defense University

² Master Program of Chemical Engineering, Chung Cheng Institute of Technology, National Defense University

³ Department of Chemical and Materials Engineering, Chung Cheng Institute of Technology, National Defense University

ABSTRACT

Traditional primary explosives are usually heavy metal salts, especially lead salts, such as lead azide (LA) and lead styphnate (LS), which can cause environmental pollution problems. Therefore, green primary explosives have attracted more and more attention. Copper(I) 5-nitrotetrazolate (DBX-1) is considered as one of the most promising alternatives to LA. DBX-1 is generally synthesized from sodium 5-nitrotetrazolate dihydrate ($\text{NaNT} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) and copper(I) chloride (CuCl). However, most of the synthesized products are irregular flakes with poor fluidity and dispersibility, which affects the filling. Therefore, it is necessary to improve the morphology of the synthesized products. In this study, $\text{NaNT} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ was synthesized because it was not commercially available. Afterward, DBX-1 was synthesized using $\text{NaNT} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ and CuCl , and four kinds of crystal form modifiers including sodium carboxymethylcellulose (NaCMC), polyvinyl alcohol (PVA), polysorbate 20 (Tween 20) and dextrin were added respectively to improve the morphology of synthesized product. The experimental results indicated that the spherical DBX-1 was successfully synthesized by adding Tween 20 with 0.5 wt.% of concentration or dextrin with 3 wt.% of concentration, and the particle sizes of the synthesized products were 39 ± 5 and $83 \pm 10 \mu\text{m}$, respectively.

Keywords: Green primary explosive, spherical DBX-1, crystal form modifier, particle size

一、前言

起爆藥是非常敏感的含能材料，很容易被靜電、火花、撞擊和摩擦等外部能量刺激引發爆炸，因此，這類含能材料在軍事上被用來引發主要(次要)炸藥、推進劑和煙火，通常裝填於底火(帽)、雷管、點火器、電起爆器等裝置。目前最被廣泛使用的兩種起爆藥是疊氮化鉛(Lead azide, LA)和史帝芬酸鉛(Lead styphnate, LS)，惟近年來因空氣和土壤中的鉛污染越來越引起大眾的關注，特別是在軍事訓練場和射擊場[1-2]，因此，亟須開發新的起爆藥以替代上述兩種起爆藥[3-6]，雖然目前已有新的起爆藥研發以作為 LA 的替代品，包括疊氮化銀(Silver azide, SA)、重氮二硝基酚(Diazodinitrophenol, DDNP)、5-亞硝基四唑鈣(Calcium 5-nitriminetetrazolate)[7]、5-氯四唑銅(copper(II) 5-chlorotetrazolate, CuCIT)[8]、5-硝基四唑陰離子的銅配位絡合物(copper(II) coordination complexes of the 5-nitrotetrazolate anion)[9]等，但它們都有一些限制難以廣泛使用[10]。另有研究顯示 5-硝基四唑亞銅(Copper(I) 5-nitrotetrazolate, DBX-1, $\text{Cu}_2(\text{NT})_2$, $\text{NT}=\text{CN}_5\text{O}_2$)是迄今最有可能成為替代 LA 的起爆藥之一，因其在起爆能力、撞擊、摩擦和靜電火花敏感度與 LA 相似，還具有高熱穩定性並在熱環境下更耐氧化，此外，LA 與火工元件使用的銅和若干金屬不相容，但 DBX-1 則無此問題[11]。然而，DBX-1 在取代 LA 的進展不如預期，而減緩 DBX-1 採用的主要因素顯然與其生產有關，為使 DBX-1 廣泛用於火工產品，完善製備程序是研究重點[12]。

DBX-1 最早是由 Friederich 博士利用 5-硝基四唑鈉二水合物($\text{NaNT} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{NT}=\text{CN}_5\text{O}_2$)和氯化亞銅(CuCl)反應合成，並於 1960 年獲得專利[13-17]，合成步驟係將 CuCl 水溶液緩慢滴入保持在 90-100°C 的 $\text{NaNT} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 水溶液中，俟滴加完畢後在相同溫度下繼續反應約 2 小時，可得到 DBX-1 的紅色結晶產物。Fronabarger 等人[18]也曾發表使用 $\text{NaNT} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、氯化銅(CuCl_2)和抗壞血酸鈉($\text{C}_6\text{H}_7\text{NaO}_6$)反應的另一種合成方法，抗壞血酸鈉係作為還原劑，在反應過程中將 Cu^{+2} 還原為 Cu^{+1} ，然

而，反應的再現性一直是 DBX-1 合成的主要挑戰[12]。此外， $\text{NaNT} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 的純度是影響 DBX-1 合成的重要因素，但目前 $\text{NaNT} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 還沒有市售的產品[10]。

$\text{NaNT} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 的合成方法於 1937 年由 von Herz[19]首先發表，其以 5-氨基四唑(5-AT, HN_4CNH_2)為起始原料，在硫酸(H_2SO_4)溶液中與亞硝酸鈉(NaNO_2)及硫酸銅(CuSO_4)反應，產生中間產物氫硝基四唑銅四水合物[Copper hydrogen nitrotetrazolate tetrahydrate, $\text{Cu}(\text{H-NT})(\text{NT})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$]沈澱，經過濾後再與氫氧化鈉(NaOH)水溶液反應生成包含少許氧化銅(CuO)沈澱物的 $\text{NaNT} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 溶液，再從 $\text{NaNT} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 溶液中除去 CuO 沉澱物後，蒸發溶液即可得到 $\text{NaNT} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 晶體，最後再以水為溶劑利用再結晶方式提純。由於中間產物 $\text{Cu}(\text{H-NT})(\text{NT})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 是凝膠狀的綠色固體，在過濾時不易從溶液中完全分離出來，因此，Gilligan 和 Kamlet[20]曾在 1978 年提出改良 $\text{NaNT} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 合成方法的專利，利用硝酸(HNO_3)溶液取代 H_2SO_4 溶液可減少 $\text{Cu}(\text{H-NT})(\text{NT})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 分離及純化所需的時間。此外，乾燥的 $\text{Cu}(\text{H-NT})(\text{NT})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 亦屬敏感性的炸藥，對操作該化合物的作業人員而言極具危險性，尤其是隨著反應規模的增加，為此，Klapötke 等人[10]開發了新的 $\text{NaNT} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 製備程序，透過將 NaOH 水溶液直接添加到反應混合物中，省略中間產物 $\text{Cu}(\text{H-NT})(\text{NT})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 的過濾步驟，然後將所得的 $\text{NaNT} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 水溶液蒸發至乾再用丙酮萃取純化。Bottaro 等人[21]於 2017 年也曾發表一個新的 $\text{NaNT} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 合成專利，其係使用 5-AT、酸(HNO_3 、 H_2SO_4 、 HClO_4 或 HCl)和 NaNO_2 在水中以高溫批次反應來製備 $\text{NaNT} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ，使用此程序，可以大幅提高 $\text{NaNT} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 的產率。

在起爆藥的形貌改良方面，目前尚無 DBX-1 合成產物形貌改良的相關研究，Feng 等人[22]曾在 KDNBF 的合成反應過程，藉由添加聚丙烯醯胺(PAM)、聚乙烯醇(PVA)及聚山梨醇酯-20(Tween 20)等 3 種晶形調整劑進行 KDNBF 合成產物的形貌改良，並發現使用極少量的晶形調整劑，不改變產物的物化特性；另 Li 等人[23]也曾利用 NaCMC 、PVA、Tween

80、糊精(Dextrin)及 Triton X-100 等晶形調整劑進行 KDNBF 合成產物的形貌改良研究。

本研究群[24]先前曾成功合成高純度的 NaNT·2H₂O，並藉由田口實驗設計法[25, 26]獲得 DBX-1 最大產率的最佳合成參數，惟合成產物的形貌與早期文獻[14-18]的研究成果相同，大多為不規則的片狀，其流散性不佳不利於後續的裝填使用。本研究首先將合成 NaNT·2H₂O 因其無法商購取得，然後利用 NaNT·2H₂O 及 CuCl 合成 DBX-1 並分別添加羧甲基纖維素鈉(NaCMC)、聚乙烯醇(PVA)、聚山梨醇酯-20 (Tween 20)及糊精等 4 種晶形調整劑改善合成產物的形貌，合成的 NaNT·2H₂O 及 DBX-1 則利用 SEM、NMR、FTIR、EA 及 STA DSC-TGA 進行分析鑑定，評估可用於合成球狀 DBX-1 的晶形調整劑。

二、實 驗

2.1 實驗藥品

- (1) 亞硝酸鈉(Sodium nitrite, NaNO₂): 試藥級，白色晶體，純度 97%，用於合成 NaNT·(H₂O)₂，友和貿易股份有限公司商購。
- (2) 5-胺基四唑(5-Aminotetrazole, HN₄CNH₂): 試藥級，白色晶體，純度 98%，用於合成 NaNT·(H₂O)₂，友和貿易股份有限公司商購。
- (3) 亞硝酸鈉(Sodium nitrite, NaNO₂): 試藥級，白色晶體，純度 97%，用於合成 NaNT·(H₂O)₂，友和貿易股份有限公司商購。
- (4) 硝酸(Nitric acid, HNO₃): 試藥級，無色液體，重量百分濃度 65%，用於合成 NaNT·(H₂O)₂，友和貿易股份有限公司商購。
- (5) 丙酮(Acetone, CH₃COCH₃): 試藥級，無色液體，純度 99.5%，用於合成 NaNT·(H₂O)₂ 的純化，友和貿易股份有限公司商購。
- (6) 5-硝基四唑鈉[Sodium 5-Nitrotetrazole, NaNT·(H₂O)₂]: 黃色晶體，用於合成 DBX-1，自行合成。
- (7) 氯化亞銅(Copper(I) chloride, CuCl): 試藥級，黃色粉末，純度 97%，用於合成 DBX-1，友和貿易股份有限公司商購。
- (8) 2-丙醇(2-propanol, (CH₃)₂CHOH): 試藥級，

無色液體，純度 99.8%，用於合成 DBX-1 的洗滌，友和貿易股份有限公司商購。

- (9) 羧甲基纖維素鈉(NaCMC): 白色粉末，合成球狀 DBX-1 的晶形調整劑，系製中心提供。
- (10) 聚乙烯醇[PVA, (C₂H₄O)_n]: 白色粉末，合成球狀 DBX-1 的晶形調整劑，友和貿易股份有限公司商購。
- (11) 聚山梨醇酯-20 (Tween 20, C₂₆H₅₀O₁₀): 透明液體，密度 1.1 g/mL，沸點>100°C，在水中的溶解度為 100 mg/mL，合成球狀 DBX-1 的晶形調整劑，友和貿易股份有限公司商購。
- (12) 糊精[Dextrin, (C₆H₁₀O₅)_n]: 淺黃褐色粉末，密度 0.8 g/mL，熔點 53.75-54°C，沸點 865.2°C，在水中的溶解度為 100 mg/mL，合成球狀 DBX-1 的晶形調整劑，系製中心提供。

2.2 實驗設備

- (1) NaNT·2H₂O 合成批次反應器: 自行組裝，由磁石攪拌加熱器(CORNING PC-420D: 溫度範圍/轉速範圍為 5-550°C/60-1150 rpm)、水浴鍋、三口圓底燒瓶(容量 250 mL)、溫度計(量測範圍為-20-150°C)、筒形分液漏斗(容量 60 mL)、帶狀加熱器(100W/1 吋×1 尺/玻璃纖維)及溫度調節控制器(CT-801: 溫度範圍為 0-400°C)組成。
- (2) DBX-1 合成批次反應器: 自行組裝，由磁石攪拌加熱器(CORNING PC-420D: 溫度範圍/轉速範圍為 5-550°C/60-1150 rpm)、油浴鍋、圓底燒瓶(容量 250 mL)、冷凝管及恆溫水槽(UNISS Recirculating Chillers RC6: 溫度範圍為-20-100°C)組成。
- (3) 旋轉濃縮裝置: 自行組裝，由加熱鍋、圓底燒瓶、緩衝瓶、真空系統、冷凝管、樣品收集瓶及真空幫浦(UNI-CROWN UN-50V)組成，用初產物的減壓蒸餾。
- (4) 索氏萃取裝置: 由加熱鍋(EYELA OSB-2100: 溫度範圍為室溫 5-90°C)、圓底燒瓶(容量 250 mL)、萃取管、冷凝管及恆溫水槽(Deng Yng/D-610: 溫度範圍為-20-100°C)組成。

- (5) 掃描式電子顯微鏡 (Scanning electron microscope, SEM): 使用日本 JEOL 公司製造的掃描式電子顯微鏡, 用於觀測合成產物的晶形結構。
- (6) 核磁共振光譜儀 (Nuclear Magnetic Resonance, NMR): 本研究使用臺大貴儀中心 BRUKER AVIII-500MHz FT-NMR 型液態核磁共振光譜儀, 主要測定樣品的 ^1H 圖譜 (500MHz)、 ^{13}C 圖譜 (125MHz) 及 ^{15}N 圖譜 (600MHz), 將合成產物以氘化氯仿 (Deuterated Chloroform, CDCl_3) 溶劑溶解檢測, 可確定合成產物之有機分子結構。
- (7) 傅立葉轉換紅外線光譜儀 (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR): 本研究使用 Varian 640-IR 型傅立葉轉換紅外線光譜儀, 主要用以量測合成產物的官能基吸收光譜, 藉以分析確認官能基, 掃描範圍: $4000\text{--}450\text{ cm}^{-1}$ 。
- (8) 元素分析儀 (Element Analyzer, EA): 本研究使用臺大貴儀中心 Heraeus CHN-O-Rapid 型元素分析儀, 燃燒管溫度 950°C , 還原管溫度 600°C 。用於量測合成產物之元素, 藉以分析確認 C、H、N 的重量百分比。本實驗委由臺灣大學貴重儀器中心代為量測。
- (9) 同步熱分析儀 (Simultaneous thermal analyzer, STA DSC-TGA): 本研究使用德國 Netzsch 公司所生產的 STA 449 F3 型熱分析儀, 具備微差掃描熱卡計 (Differential scanning calorimetry, DSC) 及熱重分析 (Thermogravimetric analysis, TGA) 的功能, 用於分析合成產物的熱化學特性。
- (2) 調配溶液 B: 將 20 mL 去離子水加入 250 mL 圓底燒瓶, 再加入 3.56 克亞硝酸鈉, 利用磁石攪拌加熱器, 設定轉速 1150 rpm 及溫度 65°C , 使溶液混合均勻。
- (3) 將包含溶液 B 的圓底燒瓶連接筒形分液漏斗, 溶液 A 則以滴加方式加入圓底燒瓶, 滴加速率約每 20 秒一滴, 當液滴加入出現大量沸騰氣泡時則停止, 待無氣泡產生後再繼續滴加, 直至溶液 A 添加完畢, 添加過程約 50 分鐘, 混合溶液逐漸從透明變為淺黃色, 沒有固體沉澱。
- (4) 利用旋轉濃縮裝置進行減壓抽氣, 使混合溶液濃縮乾燥, 油浴溫度控制在 $55\text{--}60^\circ\text{C}$ 。
- (5) 所得的固體殘留物, 以丙酮為萃取液, 利用索氏萃取法洗滌後, 在 50°C 的真空烘箱中乾燥 4 小時, 可得純化的 $\text{NaNT}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 。

2.3.2 DBX-1的合成步驟

- (1) 調配溶液 A: 將 1.0 g $\text{NaNT}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 加入包含去離子水 30 mL 的 250 mL 圓底燒瓶, 攪拌使其完全溶解。
 - (2) 調配溶液 B: 將 0.5 g CuCl 加入包含去離子水 5 mL 的 50 mL 燒杯, 攪拌使其完全溶解。
 - (3) 調配晶形調整劑: (a) 2wt.% 的羧甲基纖維素鈉 (NaCMC) 溶液; (b) 2wt.% 的聚乙烯醇 (PVA) 溶液; (c) 0.5wt.% 的聚山梨醇酯-20 (Tween-20) 溶液; (d) 3wt.% 的糊精溶液; 上述溶液均以去離子水為溶劑。
 - (4) 將包含溶液 A 的圓底燒瓶加入 5 mL 的晶形調整劑 (4 種晶形調整劑分別進行實驗), 放入油浴鍋內再安置於磁石攪拌器上, 設定轉速 1150 rpm 並加熱至 90°C , 後續利用吸管將溶液 B 緩慢滴加至溶液 A, 再將混合溶液加熱至沸騰 (約 100°C), 持續攪拌 60 分鐘使其完全反應, 混合溶液逐漸轉變為紅色。
 - (5) 待混合溶液溫度降至室溫後, 經由濾紙過濾獲得紅褐色的沈澱產物並移至 250 mL 的燒杯, 利用去離子水 100 mL 清洗, 經由清洗及過濾反覆 3 次。
 - (6) 將包含產物的濾紙利用對流烘箱進行乾燥, 設定溫度 50°C 及時間 60 分鐘, 後續
- 以批次反應進行 $\text{NaNT}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 的合成, 步驟詳述如下:
- (1) 調配溶液 A: 取 10.0 mL 去離子水加入 50 mL 燒杯, 再加入 2.0 mL 65% 硝酸, 最後加入 2.0 g 的 5-氨基四唑 (5-AT), 利用磁石攪拌加熱器, 設定轉速 1150 rpm 及溫度 65°C , 使溶液混合均勻。

2.3 實驗步驟

2.3.1 $\text{NaNT}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 的合成步驟

以刮勺取下濾紙上的固體產物置於樣品瓶內待後續分析使用。

三、結果與討論

3.1 合成產物 NaNT·2H₂O 的鑑定

3.1.1 SEM圖像

合成產物 NaNT·2H₂O 的形貌和尺寸藉由 SEM 觀測如圖 1 所示，合成產物具有不規則的塊狀形態且有團聚的現象。

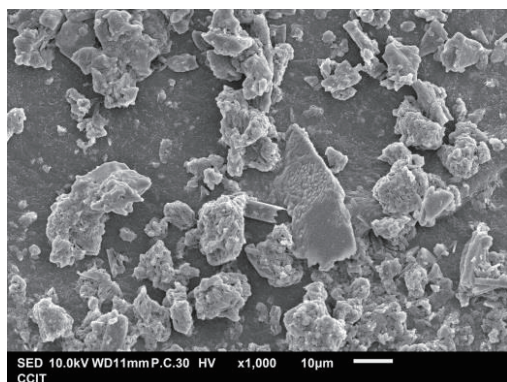


圖 1. 合成產物 NaNT·2H₂O 的 SEM 圖像

3.1.2 NMR圖譜

合成產物 NaNT·2H₂O 的結構藉由 NMR 圖譜分析，圖 2-4 顯示合成產物溶解在 DMSO-d₆ 溶劑的 ¹⁵N-NMR、¹H-NMR 及 ¹³C-NMR 圖譜。¹⁵N-NMR 圖譜顯示 316.615 ppm (N2, N5) 及 397.222 ppm (N3, N4) 處有兩個信號峰對應於四唑環中的氮原子，357.477 ppm (N1) 處的信號峰則對應於硝基中的氮原子。¹H-NMR 圖譜在 3.991 及 2.474 ppm 處顯示出兩個主要信號峰，分別對應於結晶水及 DMSO-d₆ 溶劑中的氫原子，另一個 8.233 ppm 的小信號峰可歸因於少量的副產物 5-硝基-1H-四唑(HNT)，HNT 上的酸性氫很容易被金屬陽離子取代，產生具有更好能量特性和更高熱穩定性的四唑陰離子鹽[27]。¹³C-NMR 圖譜在 168.711 及 39.221 ppm 處的兩個主要信號峰分別對應於四唑環(C6)及 DMSO-d₆ 溶劑中的碳原子，至於 149.408 ppm 的另一個小信號峰也可歸因於少量副產品 HNT，上述 NMR 分析可用於確認合成產物為 NaNT·2H₂O。

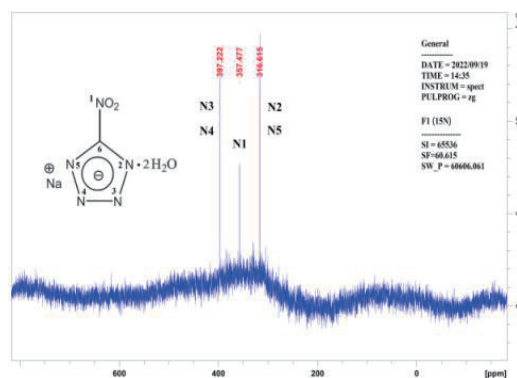


圖 2. 合成產物 NaNT·2H₂O 的 ¹⁵N-NMR 圖譜

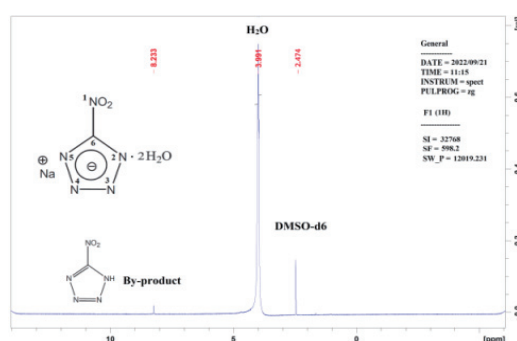


圖 3. 合成產物 NaNT·2H₂O 的 ¹H-NMR 圖譜

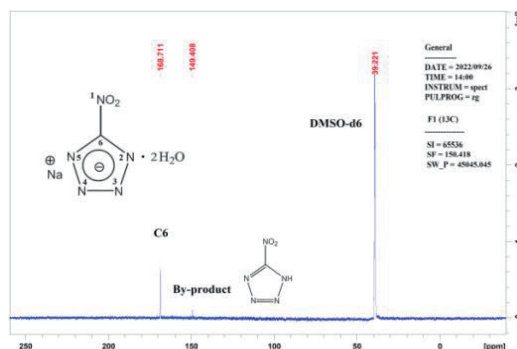


圖 4. 合成產物 NaNT·2H₂O 的 ¹³C-NMR 圖譜

3.1.3 FTIR圖譜

合成產物 NaNT·2H₂O 的官能基藉由 FTIR 圖譜分析如圖 5 所示，在 1447、1421、1399、1272、1192、1172、1066、1041、842、669 及 543 cm⁻¹ 處發現 C=N 及 C=C 的拉伸震動，顯示四唑環結構的存在，另 Tr-NO₂ 的對稱及不對稱的拉伸震動分別出現在 1323 及 1546 cm⁻¹，結晶水的 O-H 的拉伸震動則在 3443 cm⁻¹ 被發現，這些分析結果與 Klapötke 等人[28]的文獻相似，因此，可進一步驗證合成產物為 NaNT·2H₂O。

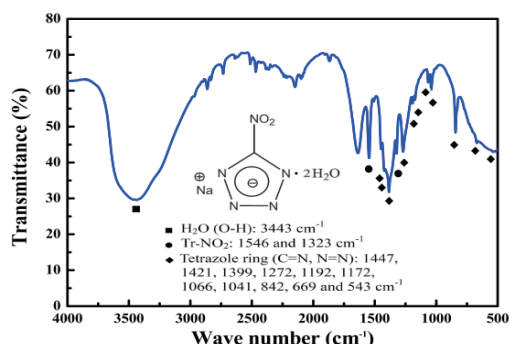


圖 5. 合成產物 NaNT·2H₂O 的 FTIR 圖譜

3.1.4 元素分析

合成產物 NaNT·2H₂O 的元素分析結果顯示含有 7.1 wt.% 的碳原子(C)、40.9 wt.% 的氮原子(N)、2.3 wt.% 的氫原子(H)、36.7 wt.% 的氧原子(O)及 13.0 wt.% 鈉原子(Na)，非常接近 NaNT·2H₂O 組成的理論值 (6.9 wt.% C、40.5 wt.% N、2.3 wt.% H、37.0 wt.% O 及 13.3 wt.% Na)，其中合成產物中氧和鈉含量略低，可能是由於少量 HNT 副產物的存在。

3.1.5 DSC-TG 圖譜

合成產物 NaNT·2H₂O 的熱化學特性藉由 DSC-TG 圖譜分析如圖 6 所示，DSC 曲線顯示在 75°C 附近有一個小的吸熱峰，而在 TG 曲線則顯示在該溫度下有約 20% 的重量損失，此吸熱峰可歸因於結晶水的解脫，Marimuthu 及 Talawar [29] 的研究也有相同的分析結果。此外，DSC 曲線在 228°C 附近顯示的放熱峰可合理歸因於 NaNT 的分解反應，因為 TG 曲線在該溫度下顯示連續的重量損失。

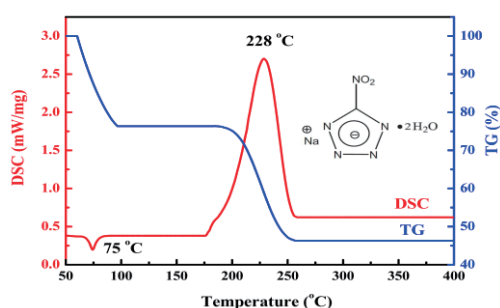


圖 6. 合成產物 NaNT·2H₂O 的 DSC-TG 圖譜

3.2 合成產物 DBX-1 的形貌觀測

DBX-1 合成過程未添加晶形調整劑及分別添加羧甲基纖維素鈉(NaCMC)、聚乙烯醇

(PVA)、聚山梨醇酯-20(Tween 20)及糊精等 4 種晶形調整劑的合成產物之形貌和尺寸藉由 SEM 觀測，各組實驗均在相同的實驗條件下進行三次，實驗結果顯示良好的再現性。

3.2.1 未添加晶形調整劑的合成產物

未添加晶形調整劑的合成產物如圖 7 所示，合成產物的形貌呈不規則片狀團聚的狀態，其流散性較差不利於後續的裝填使用。

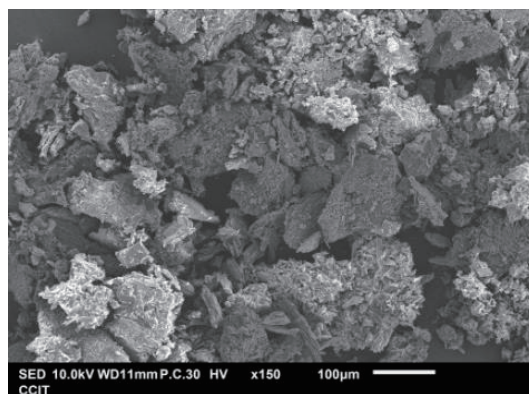


圖 7. DBX-1 合成過程未添加晶形調整劑之產物的 SEM 圖像

3.2.2 添加晶形調整劑 NaCMC 的合成產物

添加晶形調整劑 NaCMC 的合成產物如圖 8 所示，合成產物的團聚現象雖已有效改善，惟其形貌不佳，顆粒大小不一且形狀不規則。

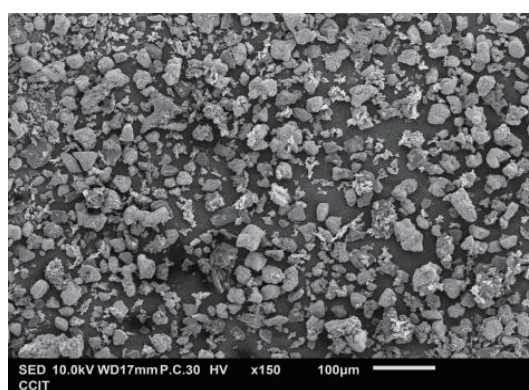


圖 8. DBX-1 合成過程添加晶形調整劑 NaCMC 之產物的 SEM 圖像

3.2.3 添加晶形調整劑 PVA 的合成產物

添加晶形調整劑 PVA 的合成產物如圖 9 所示，合成產物的團聚現象雖明顯減少，惟其形貌不佳，顆粒呈現不規則的形狀。

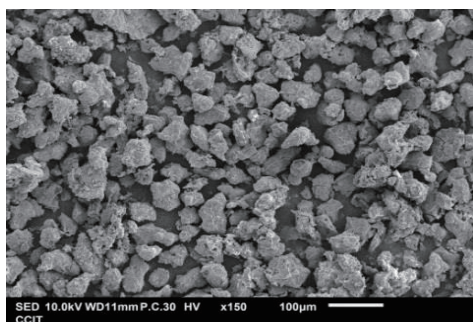


圖 9. DBX-1 合成過程添加晶形調整劑 PVA 之產物的 SEM 圖像

3.2.4 添加晶形調整劑 Tween 20 的合成產物

添加晶形調整劑 Tween 20 的合成產物如圖 10 所示，合成產物的形貌近似圓球形、顆粒較小且尺寸分布均勻，經由粒徑分析，其平均粒徑為 $39 \pm 5 \mu\text{m}$ 。

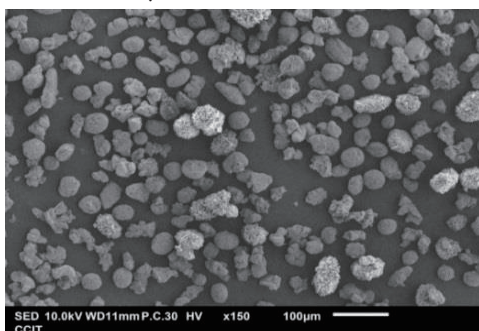


圖 10. DBX-1 合成過程添加晶形調整劑 Tween 20 之產物的 SEM 圖像

3.2.5 添加晶形調整劑糊精的合成產物

添加晶形調整劑糊精的合成產物如圖 11 所示，合成產物的形貌也近似圓球形、顆粒較大且尺寸分布均勻，經由粒徑分析，其平均粒徑為 $83 \pm 10 \mu\text{m}$ 。

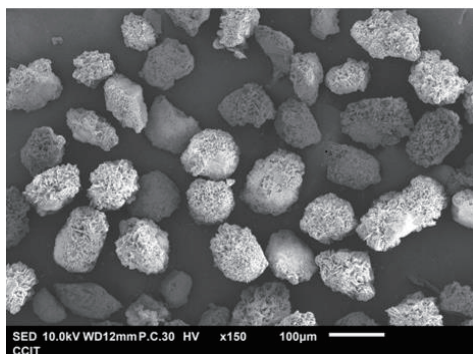


圖 11. DBX-1 合成過程添加晶形調整劑糊精之產物的 SEM 圖像

3.3 合成產物 DBX-1 的鑑定

3.3.1 FTIR 圖譜

合成產物 DBX-1 的官能基藉由 FTIR 圖譜分析如圖 12 所示，在 1488 、 1471 、 1452 、 1423 、 1122 、 1097 、 833 、 669 及 653 cm^{-1} 處發現 $\text{C}=\text{N}$ 及 $\text{C}=\text{C}$ 的拉伸震動，顯示四唑環結構的存在， Tr-NO_2 的對稱及不對稱的拉伸震動則分別出現在 1326 及 1548 cm^{-1} 。此外，在 3550 – 3000 cm^{-1} 範圍內發現水分子的 OH 拉伸震動，顯示 DBX-1 表面殘留有少量的水分，這些分析結果與早期文獻[14-17]的研究成果相似，因此，FTIR 光譜可以驗證合成產物為 DBX-1。

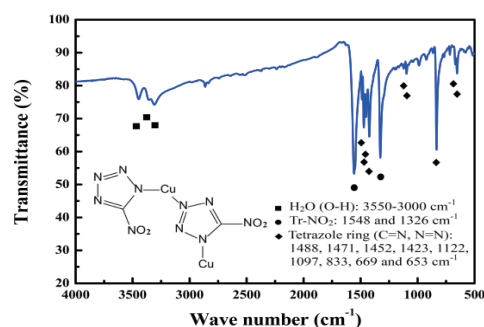


圖 12. 合成產物 DBX-1 的 FTIR 圖譜

3.3.2 元素分析

合成產物 DBX-1 $[\text{Cu}_2(\text{NT})_2]$, $\text{NT}=\text{CN}_5\text{O}_2^-$ 的元素分析結果顯示含有 7.3 wt.% 的碳原子(C)、42.5 wt.% 的氮原子(N)、11.5 wt.% 的氧原子(O)、0.2 wt.% 的氫原子(H)及 38.5 wt.% 的銅原子(Cu)，非常接近 DBX-1 組成的理論值(7.4 wt.% C、43.4 wt.% N、9.9 wt.% O 及 39.3 wt.% Cu)，其中合成產物存在少量的氫原子及氧原子量略高，可能是由於 DBX-1 表面殘存少量的水分子，此與 FTIR 圖譜分析相同。

3.3.3 DSC-TG 圖譜

合成產物 DBX-1 的熱化學特性藉由 DSC-TG 圖譜分析如圖 13 所示，DSC 曲線在 322°C 附近出現強的放熱峰可合理歸因於 DBX-1 的分解反應，因為 TG 曲線在該溫度下顯示連續的重量損失。Fronabarger 等人[18]及蒲彥利等人[16]發表的文獻也有類似的實驗結果，因此，DSC-TG 光譜可進一步驗證合成產物為 DBX-1。

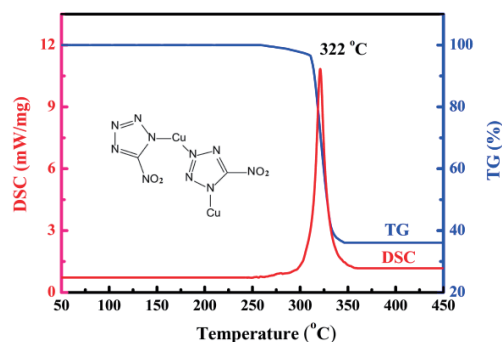


圖 13. 合成產物 DBX-1 的 DSC-TG 圖譜

四、結 論

本研究首先合成 $\text{NaNt} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 因其無法商購取得，並藉由 SEM、NMR、FTIR、EA 及 STA DSC-TGA 等儀器完成合成產物的鑑定，然後利用 $\text{NaNt} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 及 CuCl 合成 DBX-1 並分別加入 NaCMC、PVA、Tween 20 及糊精等 4 種晶形調整劑改善合成產物的形貌，實驗結果顯示添加 Tween 20 或糊精可成功合成球狀 DBX-1，其粒徑分別為 39 ± 5 及 $83 \pm 10 \mu\text{m}$ ，DBX-1 的合成產物最後藉由 FTIR、EA 及 STA DSC-TGA 等儀器鑑定確認。

致 謝

本研究承蒙國防部 111 年「國防先進科技研究計畫」提供經費補助(計畫案號：NCSIST-ACOM-111-2141002)得以順利完成，特此致謝；另感謝葉早發教授及黃其清教授在數據分析期間給予指導。

參考文獻

- [1] Landrigan, P. J., McKinney, A. S., Hopkins, L. C., Rhodes, W. W., Price, W. A., Cox, D. H., "Chronic Lead Absorption Result of Poor Ventilation in an Indoor Pistol Range," *Journal of the American Medical Association*, Vol. 234, No. 4, pp. 394-397, 1975.
- [2] Barsan, M. E., Miller, A., Health Hazard Evaluation Report 91-0346-2572, National Institute for Occupational Safety and Health: Cincinnati, Ohio, 1996.
- [3] Ilyushin, M. A., Tselinsky, I. V., Shugalei, I. V., "Environmentally Friendly Energetic Materials for Initiation devices," *Central European Journal of Energetic Materials*, Vol. 9, No.4, pp. 293-327, 2012.
- [4] Li, J. S., Chang, C. C., Lu, K. T., "Optimization of the Synthesis Parameters and Analysis of the Impact Sensitivity for Tetrazene Explosive," *Central European Journal of Energetic Materials*, Vol. 17, No.1, pp. 5-19, 2020.
- [5] Li, J. S., Chen, F. J., Yang, H. W., Lu, K. T., "Optimization of the Process Parameters for the Synthesis of High Purity 4,6-Dinitrobenzofuroxan (4,6-DNBF)," *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, Vol. 45, No.7, pp. 1102-1111, 2020.
- [6] Li, J. S., Chen, F. J., Yang, H. W., Lu, K. T., "Study on Synthesis and Characterization of Primary Explosive KDNBF with Different Morphologies," *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, Vol. 45, No.8, pp. 1313-1325, 2020.
- [7] Fischer, N., Klapötke, T. M., Stierstorfer, J., "Calcium 5-nitriminotetrazolate-A Green Replacement for Lead Azide in Priming Charges," *Journal of Energetic Materials*, Vol. 29, No.1, pp. 61-74, 2011.
- [8] Fischer, D., Klapötke, T. M., Piercey, D. G., Stierstorfer, J., "Copper salts of Halo Tetrazoles: Laser-ignitable Primary Explosives," *Journal of Energetic Materials*, Vol. 30, No.1, pp. 40-54, 2012.
- [9] Huynh, M. H. V., Hiskey, M. A., Meyer, T. J., Wetzler, M., "Green Primaries: Environmentally Friendly Energetic Complexes," *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 103, No.14, pp. 5409-5412, 2006.
- [10] Klapötke, T. M., Piercey, D. G., Mehta, N., Oyler, K. D., Jorgensen, M., Lenahan, S.,

- Salan, J. S., Fronabarger, J. W., Williams, M. D., "Preparation of High Purity Sodium 5-nitrotetrazolate (NaNT): An Essential Precursor to the Environmentally Acceptable Primary Explosive, DBX-1," *Zeitschrift für Anorganische und Allgemeine Chemie*, Vol. 639, No.5, pp. 681-688, 2013.
- [11] Sabatini, J. J., Oyler, K. D., "Recent Advances in the Synthesis of High Explosive Materials," *Crystals*, Vol. 6, No.1, Article Number, 5, 2016.
- [12] Ford, D. D., Lenahan, S., Jörgensen, M., Dubé, P., Delude, M., Concannon, P. E., Anderson, S. R., Oyler, K. D., Cheng, G., Mehta, N., Salan, J. S., "Development of a Lean Process to the Lead-free Primary Explosive DBX-1," *Organic Process Research & Development*, Vol. 19, No.6, pp. 673-680, 2015.
- [13] Meyer, R., Köhler, J., Homburg, A., *Explosives*, 7th ed., Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, pp. 65-66, 2015.
- [14] Fronabarger, J. W., Williams, M. D., Sanborn, W. B., "Lead-free Primary Explosive Composition and Method of Preparation," *International Application Published under the Patent Cooperation Treaty (PCT)* No.: WO 2008/048351 A2, 2008.
- [15] Fronabarger, J. W., Williams, M. D., Sanborn, W. B., "Lead-free Primary Explosive Composition and Method of Preparation," *United States Patent* No.: US 7,833,330 B2, 2010.
- [16] 蒲彥利、盛滌倫、朱雅紅、陳利魁、楊斌、王燕蘭、徐璿昊, "5-硝基四唑亞銅的合成與表徵", *化學工程, 火工品*, 第 5 期, 第 43-45 頁, 2009。
- [17] 蒲彥利、盛滌倫、朱雅紅、陳利魁、楊斌、王燕蘭、徐璿昊, "新型起爆藥 5-硝基四唑亞銅工藝優化及性能研究", *含能材料*, 第 18 卷, 第 6 期, 第 654-659 頁, 2010。
- [18] Fronabarger, J. W., Williams, M. D., Sanborn, W. B., Bragg, J. G., Parrish, D. A., Bichay, M., "DBX-1 - A Lead Free Replacement for Lead Azide," *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, Vol. 36, No.6, pp. 541-550, 2011.
- [19] von Herz, E., "C-nitrotetrazole Compounds," *United States Patent* No.: 2,066,954, 1937.
- [20] Gilligan, W. H., Kamlet, M. J., "Method of Preparing the Acid Copper Salt of 5-Nitrotetrazole," *United States Patent* No.: 4,093,623, 1978.
- [21] Bottaro, J. C., Petrie, M. A., Bragg, J. G., Fronabarger, J. W., Williams, M. D., "Facile Method for Preparation of 5-nitrotetrazolates Using a Batch System," *United States Patent* No.: 9,598,380 B2, 2017.
- [22] Feng, J. L., Zhang, J. G., Zhang, T. L., Li, Z. M., Yang, L., Wang, S. Z., "Morphology Control and its Influence on the Decomposition Behavior and Sensitivity of KDNBF," *Acta Phys. Chim. Sin.* Vol. 26, pp. 2613-2618, 2010.
- [23] Li, Y. F., Zhang T. L., Miao Y. L., Zhang J. G., "A New Way to Synthesize Spherical KDNBF," *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, Vol. 26, No. 3, pp. 53-56.
- [24] Li, W. H., Tseng, K. C., Yang, T. M., Li, J. S., Lu, K. T., "Optimization of Synthesis Parameters and Characterization of Green Primary Explosive Copper(I) 5-nitrotetrazolate (DBX-1)," *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, Vol. 45, No.12, pp. 1831-1840, 2020.
- [25] Taguchi, G., "Taguchi Methods and QFD: Hows and Whys for Management," *American Supplier Institute*, Michigan, p. 1, 1987.
- [26] Cochran, W. G. G., Cox, M., "Experimental Design, 2nd ed., John Wiley & Sons," New

York, p. 114, 1992.

- [27] Ahmad, S. R., Cartwright, M., Laser Ignition of Energetic Materials, John Wiley & Sons, West Sussex, pp. 200-201, 2015.
- [28] Klapötke, T. M., Sabat'e, C. M., Welch, J. M., "Alkali metal 5-nitrotetrazolate salts: Prospective Replacements for Service Lead(II) Azide in Explosive Initiators," Dalton Transactions, Vol. 45, pp. 6372-6380, 2008.
- [29] Marimuthu, A., Talawar, M. B., "An Improved Safe Method for the Synthesis of Ammonium 5-nitrotetrazolate (ANT), a key Intermediate for the Synthesis of Green Energetic Materials (GEMs)," Central European Journal of Energetic Materials, Vol. 14, No.4, pp. 861-875, 2017.

黑藥爆彈儀燃速數據擷取之改良平滑法

方友霖¹ 洪兆宇² 陳一葳³ 趙嘉琦^{2*}

¹空軍軍官學校航空太空工程學系

²陸軍軍官學校機械工程學系

³空軍航空技術學院應用外文科

摘 要

黑藥以爆彈儀求取燃速，原運算程式使用固定數據平滑法，其於整個壓力作用範圍，分段採計固定點數之壓力數據而平滑之，遇有限制。本文說明一可變平滑法，成功計算黑藥爆彈儀燃速。該法當壓力增加則平滑區段逐步擷取，在單一陡昇異常壓力值區間內運算亦精確，以之計算黑藥爆彈儀燃速，較固定法更為合適，因其在不穩定高壓段仍能獲得準確燃速。本文並將 2 階擬合法與 3 階擬合法比較，在無雜訊條件下，較之 3 階法，2 階法僅需較小的平滑區段。

關鍵詞：黑藥、爆彈儀、燃速

An Improved Smoothing Method for Black Powder Closed Bomb Burning Rate Data Reduction

Yu-Lin Fang¹, Chao-Yu Hung², Yi-Wei Chen³, and Chia-Chi Chao^{2*}

¹ *Department of Aeronautics and Astronautics, ROC Air Force Academy*

² *Department of Mechanical Engineering, ROC Military Academy*

³ *Department of Applied Foreign Languages, ROC Air Force Institute of Technology*

ABSTRACT

Closed bomb data reduction programs traditionally use a fixed method, which means that a smoothing interval of a fixed number of pressure points is chosen and used over the entire pressure range. This paper describes a variable smoothing method which was developed to compute closed bomb burning rates. For the variable smoothing method, the smoothing interval is gradually decreased as the pressure increase. The data can be smoothed to within one point of the slivering pressure without any inaccuracies resulting from using data in that region. The variable smoothing method was used for computing burning rates for black powder and was found to be preferable over the fixed smoothing method because accurate burning rates could be obtained to much higher pressures. Also in this paper, a smoothing routine with a second-degree polynomial fit is compared to a routine with a third-degree polynomial fit. The smoothing interval of the second-degree polynomial was smaller than that of the third-degree polynomial for a smooth pressure-time curve.

Keywords: black powder, closed bomb, burning rate

一、前言

在高空焰火研究實務中，實測最能求取發射數據，但因諸多限制因素與阻礙，實施困難，故焰火發射用黑藥研究師法發射藥研改經驗以爆彈儀燃速估測燃燒數據。查焰火藥球在發射筒內之過程非常複雜，為利於計算，於離開筒口前，可視為密閉系統(closed system)，即控制質量(control mass)，由固定的質量構成，無其他物質可流經邊界，亦即沒有物質可進入或離開具有移動邊界之密閉系統，僅其部份邊界(彈頭底部內表面)可移動，但能量可以熱或功之形式流經邊界。若有一已經實射合格之參考發射黑藥，並有一待測黑藥，二者配方成分、理化分析與燃速十分接近，則可推斷筒內爆壓燃燒性能極為相似。基於此，爆彈儀係將系統更進一步簡化假設為固定邊界之隔絕系統(isolated system)，即絕熱過程(adiabatic process)，系統與外界無熱和物質之交換，用以測定此條件下兩者類筒內動態燃速，及提供估測爆燃性能之資料。然在高空焰火研究中，因黑藥多成分混合製成，與類均質硝化棉基底單多孔槍砲發射藥之平階燃燒特性不同，壓力曲線跳動，雜訊時有影響，逕代入原有軟體計算求解，準確性受影響，須改良原有之數據平滑方法。

二、問題描述

估測焰火系統效能時，發射黑藥燃速為重要項目，最常見之燃速式以下式表示：

$$r = bP_c^n \quad (1)$$

式中 r 為燃速 (mm/s)， b 為燃速係數 $\text{mm/s}(\text{MPa})^n$ ， P_c^n 為燃燒壓力 (MPa)， n 為燃速指數。燃速係數與指數是壓力函數，文獻中 Price 與 Juhasz 等人[1-3]發表經由壓力-時間曲線可計算燃速。然黑藥在不同狀態下，有完全不同之燃燒特性與燃速[4、5]。而類似狀態之火箭、槍砲發射藥研究中，燃速(r) 受藥粒(柱)質量變化率($\dot{m}, \text{g/s}$)、藥粒表面積(A_b, mm^2)、藥粒密度($\rho_b, \text{g/mm}^3$)等相互影響，如下式

$$\dot{m} = A_b r \rho_b \quad (2)$$

積分(2)式，得

$$m = \rho_b \int A_b r dt \quad (3)$$

針對內彈道燃燒與相類似之狀況，受(2)或(3)式之限制，Krier 認為其為動態燃燒，另以動態燃速方程式表示[6,7]：

$$r = bP_c^n \left(1 + \Psi \frac{\alpha n}{b^2 P_c^{2n+1}} \frac{dP_c}{dt} \right) \quad (4)$$

(4)式中 r 、 b 、 P_c 、 n 之代表意義仍如同(1)式說明。 Ψ 為動態燃速係數，係壓力和火焰結構之函數，其真正關係尚未確認。 α 為固相熱擴散率 mm^2/s 。 t 為燃燒時間(s)。所謂動態燃燒是指膛內燃燒時，突然遭遇壓力變化，在此條件下產生一瞬時燃速，此燃速和穩態之值有極大差異。由(1)式與(4)式之比較，大異其趣，企圖藉黑藥於爆彈儀內之燃速，判斷與何者較為接近，利於焰火於發射筒內之燃燒性質推估，成為實驗觀察重點。

實驗中 P_c 數值之平滑去雜訊，避免 dP_c/dt 受干擾，振盪發散、正負值變號或趨近零，輔助計算軟體執行，十分重要。另焰火發射管內燃燒模式建立時，掌握 15~20MPa (1.5~2kpsi) 壓力下燃速具重要性。因爆彈儀於高壓區域求得之燃速是關鍵，如由低壓區數值外插求取高壓區數值偏差甚多。然高壓燃速因設備高昂、操作繁雜，外購獲得高壓燃速套件亦非易事。檢討黑藥為混合物非均質，造成燃燒 70% 至 80% 時燃燒燃速變異大，爆彈儀原始數據因含有雜訊非常粗糙，必須經過平滑處理，最常用者為多項式移動擬合橋接法。橋接過程在壓力-時間曲線分段使用最小平方方法(least square)選定區段內中間點，如此重複移往下一個區段，直至全部曲線平滑完成。然而黑藥高壓段因壓力變化率高且壓電轉換器(A/D converter)解析度限制及雜訊干擾，使用固定平滑法限制其精度，甚至無法輸入程式執行檔求取燃速。在燃速測試中，壓電轉換器之效能，直接影響實驗數據之獲得。受限解析度，較低壓區段獲得較多數壓力數據點數；然高壓區段，點數就少了許多。再者一個 10 位元類比/數位轉換器之最大計算量是 1024(2¹⁰)，爆彈儀壓力於 34MPa 時，將有 34/1024 之誤差；壓力降至 3.4MPa 時雖誤差減至 0.3%，但壓力變化速率非常敏感，

此造成燃速計算誤差也隨之增大。故知，低壓段壓力雖低，但變化速率卻較高。舉例，爆彈儀壓力於 3.4MPa 時，時間步階為 0.06ms ，壓力變化速率為 $0.69\text{MPa}/0.06\text{ms}$ ，誤差為 $\pm 0.69\text{MPa}$ 或 100% 。為避免誤差，原可改裝高解析度壓電轉換器，或加裝壓速率差轉換器，提供精密壓電訊號，然兩者皆須增加高額經費，權衡下，遂有本文研究，以改良之移動平滑法減低燃速之誤差。更者，為後續研究奠基，為判斷黑藥爆彈儀燃速方程式是否接近(4)式，高壓段壓力、壓力變化率與燃速間對應關係之精確性，首先要完成。

三、黑藥爆彈儀燃速

黑藥燃速之測定方法，隨裝藥設計用途、測試設備提升等逐漸演進。早期測得者為常壓燃速，後為低壓、真空燃速，其後為高壓、昇壓 (elevated pressure) 燃速，再後為爆彈儀 (closed bomb) 燃速[8]。上述各壓力環境條件下導出之燃速方程式與燃速值，相差甚大，引發關注。首由美國陸軍彈道實驗室報告曾實驗於相同壓力範圍時，由昇壓與爆彈儀測試所得結果，存有大量差異，此觀察亦被海軍實驗室證實。美軍深入研究，昇壓實驗使用常溫高壓氮氣加壓，爆彈儀由自身爆燃產生爆溫及壓力，兩者火焰傳播溫度與壓力波並不相同，造成實驗結果差異。縱同於爆彈儀環境下，測得美國各知名廠牌之黑藥燃速仍非定值，甚有同廠牌不同型號者亦存差距[9]。因爆彈儀測試燃速，比較接近真實發射狀態，檢討採用國造黑藥為高空焰火發射藥，須首先掌握國造黑藥之爆彈儀燃速[10]。

四、爆彈儀裝置

爆彈儀是一厚壁、固定容積之裝置，其容積範圍大約從 $25\sim 700\text{cm}^3$ ，奧地利 AVL 公司製造，使用時依實驗目的及配合條件，選用不同容積之爆體。在定容條件下，量測待測物在密閉爆體內燃燒壓力，以壓電晶體偵知，將類比訊號轉為數位資料，紀錄、存取、繪圖。另外輸入熱力參數、化學組程等資料，由程式運

算獲得燃速。

五、移動平滑法

習慣上，固定平滑法以每 50 點數據為一區間，運用最小平方方法運算獲得數據平滑。移動平滑法則視狀況增減平滑區段之大小，並採二階或三階曲線擬合 (curve fitting) 來平滑數據。

六、實驗比較

首先以 25cc 爆體裝入第二 0 三廠製國造軍規 8 級黑藥 9.621g，取樣時間為 $20\mu\text{s}$ ，上升時間為 3.74ms 。再以相同條件裝入德國製 SAMP 黑藥 9.681g，上升時間增為 4.36ms 。圖 1 為擷取國造軍規 8 級黑藥與德國 SAMP 黑藥之爆彈儀顯示讀數[10]，合併處理顯示於同一圖上。其圖形為爆彈儀量測之爆體內壓力 P_c 數值對作用時間之作圖 ($P-t$ 曲線)，曲線顯示國造八級黑藥初始壓力較高，後續壓力較低， dP/dt 變化較大，且有較多雜訊，其中 2 次跳動較大。相對之，德造 SAMP 黑藥初始壓力較低，後續壓力較高， dP/dt 變化較小，亦較無雜訊。但是，二者尖峰壓力相差有限，最終壓力趨同，以此用來觀察燃速之變化情形與數值。圖 2 為國造八級黑藥輸入 $P-t$ 曲線數據，求取爆彈儀燃速，分別使用固定與移動法，均以最小平方方法擬合搭配之比較。圖 2 中二曲線大致貼近，直到壓力升高至 17MPa ，此時移動法顯示平滑區間對燃速之影響。由於壓力變化在高壓段對發射性能十分敏感，高壓力值是否產生高燃速，成為觀察重點。由結果顯示，固定法所產生之燃速較不穩定，壓力起伏，有重複值 (相同壓力時對應 2 燃速值)，雜訊不能消除。固定法於壓力較低狀況卻產生較高燃速，移動法壓力高卻產生較低燃速，尖峰壓力時二者燃速差 80%。圖 2 說明固定法與移動法，將產生不同之燃速狀況，且誤差大。曲線擬合時，常採用之方法除 1 階 (最小平方方法) 外、2 階、3 階多項式調適等亦常運算操作。圖 3 為國造八級黑藥使用移動法，分以 2 階與 3 階擬合之比較。由圖 3 知，2 階擬合較 3 階平滑，雖理論

上，階數高較易於契合曲線彎曲，但平滑區段短或計算軟體有效數字位數較少時，反而誤差較大。圖 4 為國造八級黑藥分別使用固定與移動法，均以 3 階擬合比較。圖 4 說明移動法使

用 3 階，雖因軟硬體限制，誤差較 2 階大，但與固定法比較，仍較平滑精準。調整平滑區間效果未受變換調適多項式階數影響。因此計算燃速時，使用不同平滑區段，對結果影響較大。

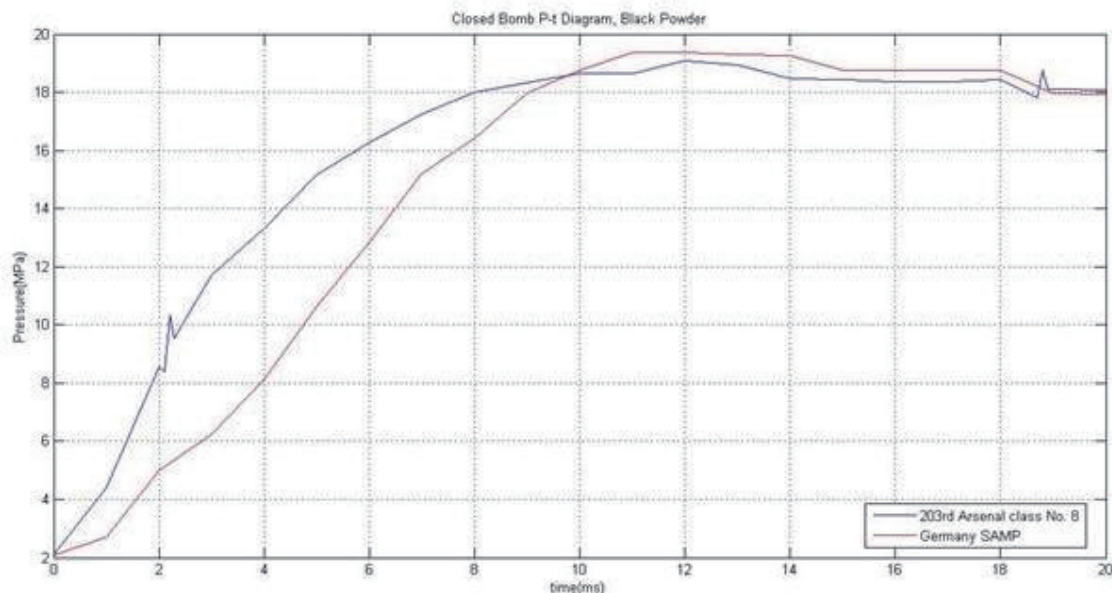


圖 1. 國造八級與德造 SAMP 黑藥之爆彈儀 P-t 曲線比較

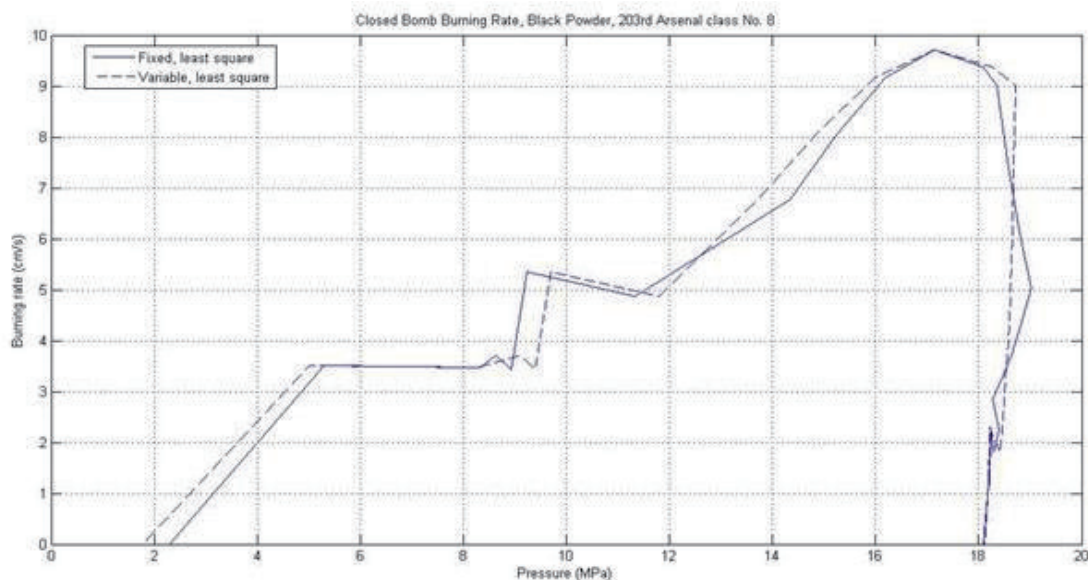


圖 2. 國造八級黑藥以固定法與移動法求取爆彈儀燃速之比較

圖 5 為國造八級黑藥分別使用固定與再調整移動法，均以 3 階擬合之比較。由曲線比較知，較圖 2 使用固定與移動法均搭配最小平方方法之誤差大幅減少。同為 3 階，但在高壓區

域，移動再調整法減少雜訊，降低 dP/dt 對燃速造成之振盪表現較佳，且尖峰壓力更為正確。圖 5 並說明，使用更長區段平滑，有利 3 階性能表現。

圖 6 為國造八級黑藥使用固定法，分以 2 階與 3 階擬合之比較。與圖 3 比較，移動法無論使用 2 或 3 階擬合，仍較精準平滑。

圖 7 為德國 SAMP 黑藥分別使用固定與移動法，均 2 階擬合之比較。其二曲線十分接近，顯示使用不同之平滑法對其影響不大。由圖 2 與圖 7 比較國造八級與德造 SAMP 黑藥尖峰壓力約等，但德藥燃速慢了許多，證明黑藥爆彈儀燃速並非壓力指數函數，深受壓力變化率影響。雖然由實驗證明，黑藥爆彈儀燃速方程式並非簡單如(1)式所描述，但考量美軍

仍以(1)式為數學模型來分析各廠牌黑藥之爆彈儀燃速，並彙整為表 1。觀察表 1，判斷美軍係將燃速-壓力曲線以最小平方法取其直線線段，代入(1)式而成。表中燃速係數 b 介於 0.2~0.6 間，表示截距為正，燃速指數 n 介於 0.4~0.7，表取全對數圖形時之斜率。故亦將國造八級與德造 SAMP 黑藥之壓力-燃速曲線於移動法搭配 2 階平滑後再取全對數作圖如圖 8，並取圖 8 中之二平坦線段計算其 b 值及 n 值，製作圖 9。

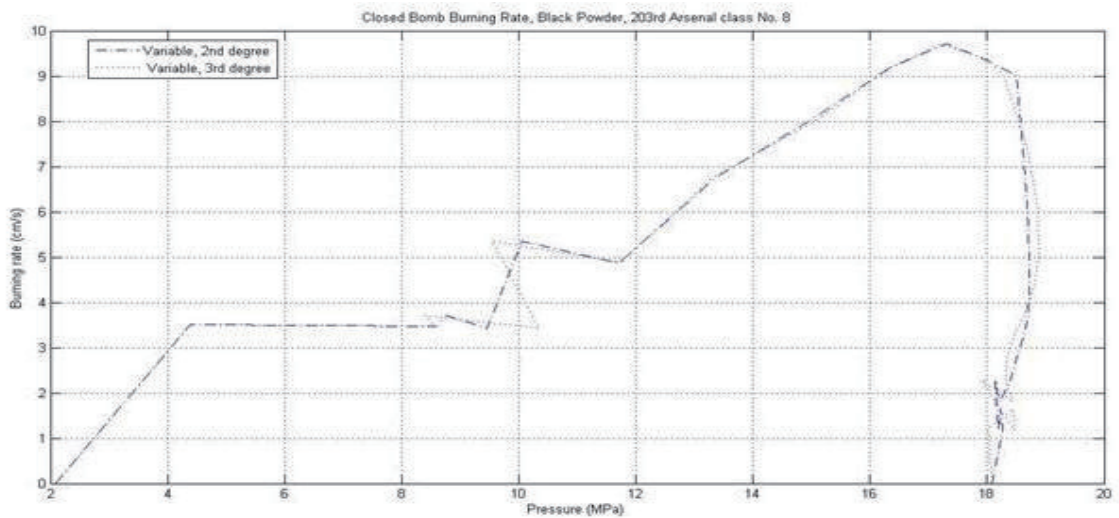


圖 3. 國造八級黑藥分以 2 階與 3 階移動法求取爆彈儀燃速之比較

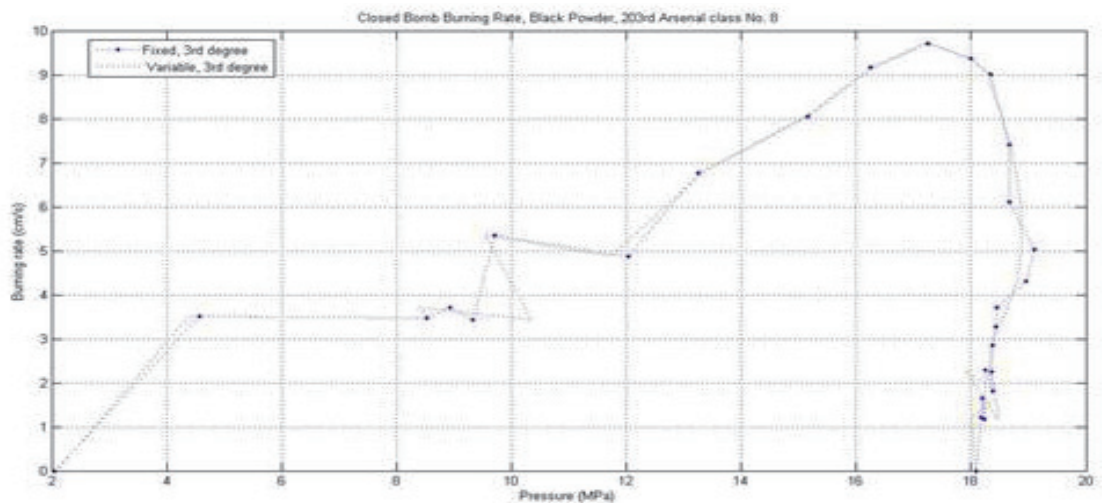


圖 4. 國造八級黑藥分以固定與移動法搭配 3 階調適求取爆彈儀燃速之比較

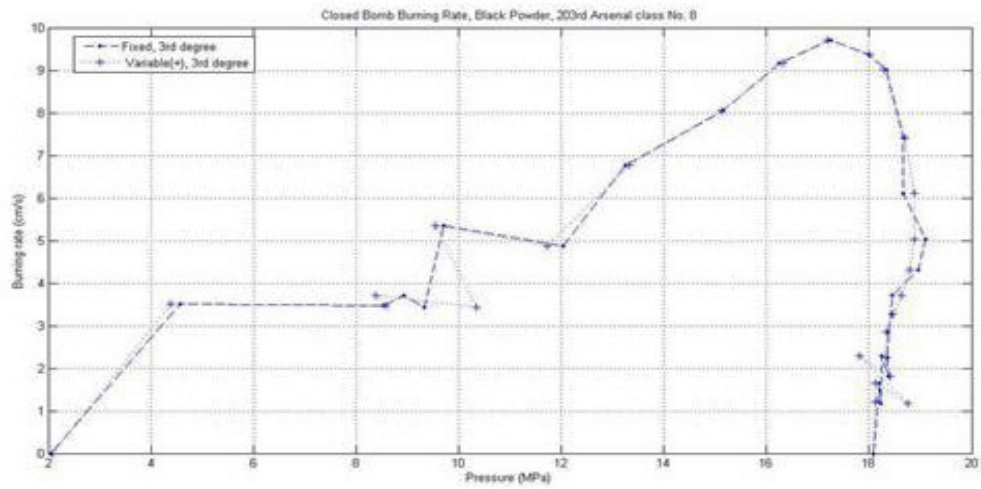


圖 5. 國造八級黑藥分以固定與再調整移動法搭配 3 階調適求取爆彈儀燃速之比較

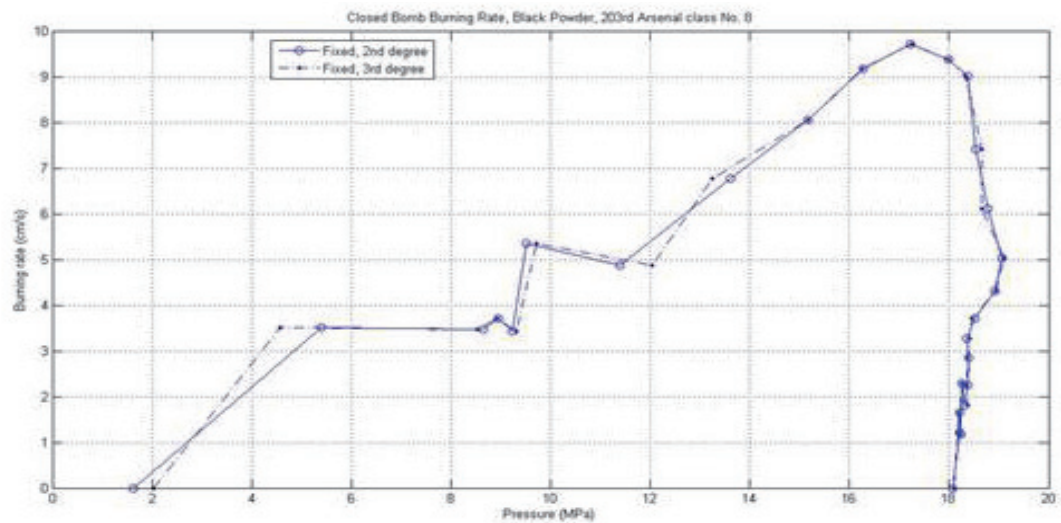


圖 6. 國造八級黑藥以固定法分別搭配 2 與 3 階調適求取爆彈儀燃速之比較

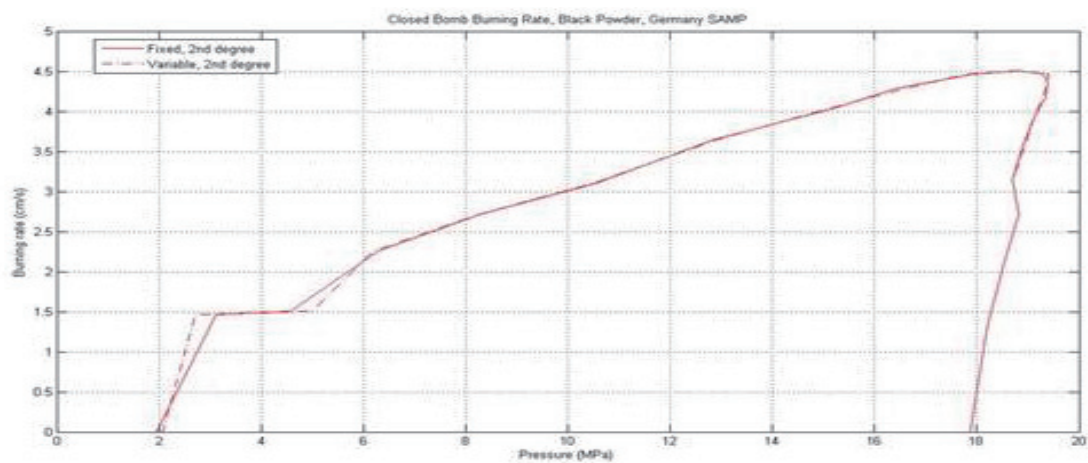


圖 7. 德造 SAMP 黑藥分以固定與移動法搭配 2 階調適求取爆彈儀燃速之比較

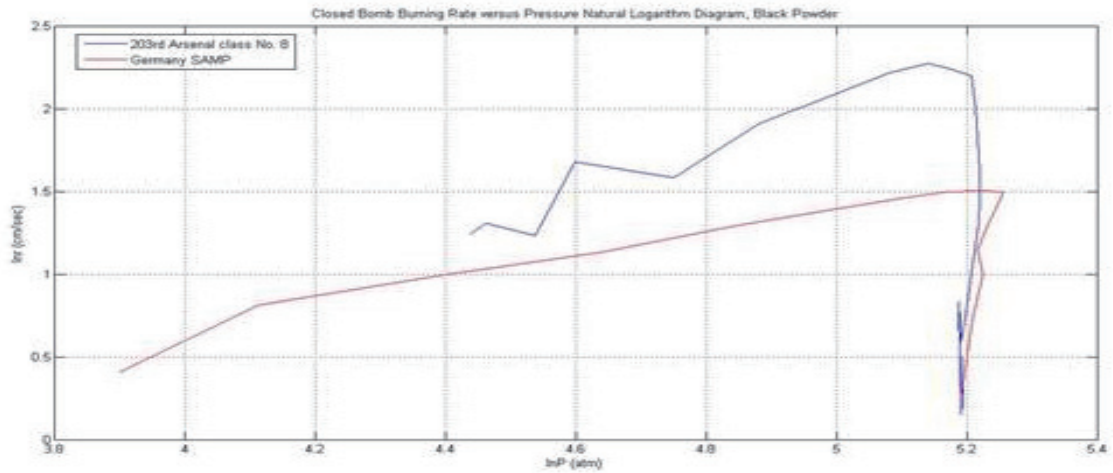


圖 8. 國造八級與德造 SAMP 黑藥之爆彈儀燃速全對數圖形比較

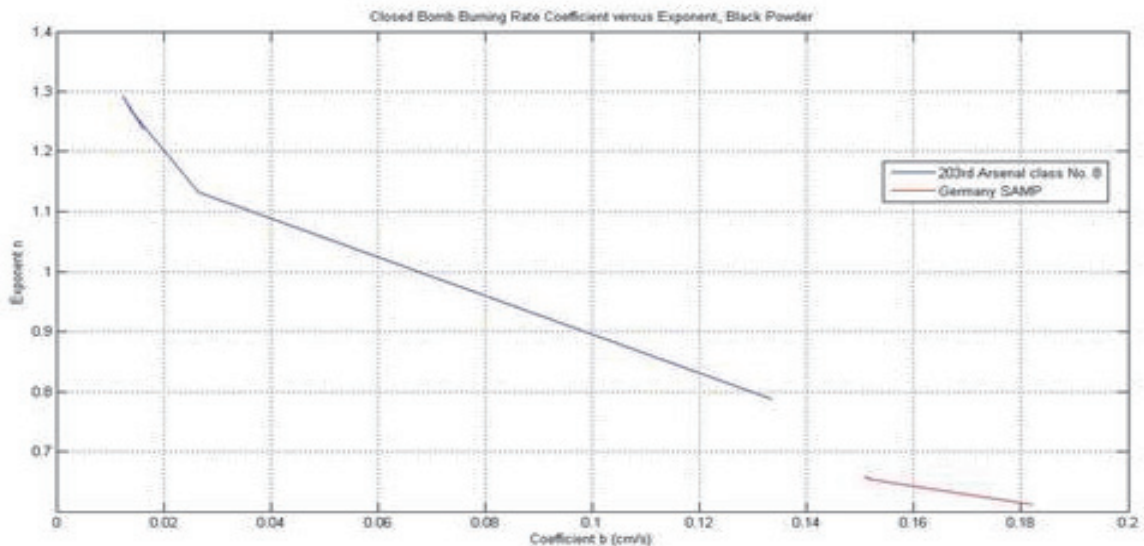


圖 9. 國造八級與德造 SAMP 黑藥之燃速指數-係數圖比較

七、討 論

理論上，高階多項式可以更契合資料集，因為它有比較多係數，也可以彎曲更多次，更容易隨著數據做彎曲的變化。一般都傾向用高階的多項式以得到較佳的曲線擬合。然而在使用高階多項式會產生兩種風險，其在每平滑段之第一及最後一對數據點上會產生很大的弧圈，於此二處估計燃速將會產生很大的誤差。第二種風險為運用高階的多項式，假如它的係數無法使用一個較大的有效位數來表示的話，就會產生較大的誤差。一般計算軟體係數的位

數如非特別設計與程式宣告，並無過多位數來表示，如此就會逐漸累積誤差。以此說明，2 階反較 3 階容易使用之原因。因此，為避免過多的首尾數據對弧圈影響燃速精準度，及配合壓力曲線趨勢尋找合適的調適階數，移動調整平滑區段是有效的。

由實驗結果，爆彈儀燃速非遞增函數，故非壓力指數函數，圖形比較類似拋物線函數，推斷其燃速方程式應與(4)式相似。但其壓力上升段之燃速以(1)式評估，仍有可信性，故國造軍用八級黑藥以移動法實施平滑後，回歸計算(1)式之係數與指數[11]，並與文獻比較。表

1 是轉錄文獻[9]中美國著名廠牌黑藥之爆彈儀燃速係數、指數及尖峰壓力數值表。表 2 為本文移動法 2 階擬合數據之計算結果，依文獻紀錄，計算時壓力單位須為大氣壓(atm)，但表仍以爆彈儀數據轉錄。兩表比較，表 1 為更高壓力下之黑藥爆彈儀燃速，壓力值為表 2 之二倍，不論何種基準概估，德造 SAMP 黑藥為爆彈儀燃速低之焰火發射藥，國造八級黑藥爆彈儀燃速過高，若選擇焰火發射藥應注意此關鍵。再者，依照美軍研究[12]，M1 多效發射藥在低裝藥(#5 藥包裝藥以下)、低作用壓力等之邊界條件下，爆彈儀測試值與火炮射擊值尚能關聯，以此解釋爆彈儀用於低裝藥量、低壓力時比較接近實際系統，故本工作未若表 1 中使用高裝藥造成高壓力，致表 2 與表 1 燃速有一些差異。

綜觀爆彈儀燃速，應比較類似動態燃燒的理論，所謂動態燃燒是指類似腔內裝藥在燃燒時，突然遭遇壓力迅速變化，在此條件下會產生一瞬時的燃燒速率，此燃燒速率和穩定狀態下之值有極大差異，亦即(4)式所描述。從爆彈儀實測黑藥 dp/dt 對燃燒速率關係並不完全合

乎線性，應係動態燃燒所致[13,14]。

文獻[6]解釋動態燃燒最有可能形成之原因為燃燒氣流破壞藥粒之對稱性，即在穩定燃燒時，其藥粒形狀維持原形；動態燃燒時，藥粒形狀變為不對稱，可能為藥粒碎裂、粉化，甚至為熱質點擴散。制式發射藥有許多控制燃面的技術，使藥粒以平行層燃燒方式進行潰縮，就燃速表現而言，燃速指數 n 值希望比較低，一般推估在 0.3 以下，因 n 值大於 0.8 時，腔內燃燒壓力快速增加，燃速加快，惡性循環。然而 n 值低時，壓力影響燃速較小，以全對數圖觀之，得到一條比較趨近於平行 x 軸的直線，亦即燃速趨於定值，稱之平階燃燒現象。但黑藥非制式發射藥，能控制藥型及燃面之手段受限，故國造軍用 8 級黑藥於 r - P 圖出現燃速近似垂直上升之變化，從動態燃燒理論解釋，應為燃燒中途 8 級黑藥產生碎藥，再者粒徑本小，形成熱質點固相擴散，燃燒面積擴大，生成氣體變多，壓力上升，燃速陡增。然而德國 SAMP 黑藥未出現燃速陡升之狀況，推斷其藥形於燃燒過程未被破壞，可能為藥粒密度甚高，粒徑較大之原因。

表 1. 美國著名廠牌黑藥之爆彈儀燃速、指數及尖峰壓力數值

Sample type	$r(cm/s)$	$b (cm/s)$	n	Peak pressure (atm)
Goex	15.9529	0.263	0.671	454
	14.2087	0.551	0.531	455
	16.2757	0.287	0.660	454
	16.4353	0.326	0.641	453
Du Pont	11.6373	0.561	0.493	469
	10.1976	0.518	0.485	466
	10.0053	0.457	0.503	462
	7.2239	0.251	0.547	465
Indiana	10.2875	0.179	0.661	459
	9.16096	0.309	0.553	459
	9.13311	0.328	0.542	463
	9.13198	0.345	0.533	467

表 2.估算黑藥爆彈儀燃速、指數及尖峰壓力數值

Sample type	$r(cm/s)$	$b (cm/s)$	n	Peak pressure (MPa)
國造八級	9.75	0.135	0.792	19.071
德造 SAMP	4.51	0.182	0.612	19.375

八、結 論

- (1) 因於雜訊壓力時仍較能獲得較準確燃速，移動平滑法優於固定平滑法。對測試國造八級黑藥而言，爆彈儀尖峰壓力燃速減少差異 80%。對德造 SAMP 黑藥而言，爆彈儀尖峰壓力燃速更具代表性。對各類黑藥而言，將可適用於更高爆彈儀尖峰壓力之燃速，具有實用重要性。
- (2) 使用移動平滑法，選擇多項式擬合階數時，2 階在較短平滑區段，效果優於 3 階。
- (3) 使用 3 階擬合，須有較長平滑區段，並注意計算軟體對係數有效位數之處理。
- (4) 從爆彈儀實測黑藥 dp/dt 對燃燒速率關係並不完全合乎線性，應係動態燃燒所致。
- (5) 從爆彈儀實測黑藥 dp/dt 對燃燒速率關係較平坦段，屬穩定狀態，可以通用燃速方程式描述。

參考文獻

- [1] Price, C. and Juhasz, A., "A-Versatile User-Oriented Closed Bomb Data Reduction Program (CBRED)," Ballistic Research Laboratory, USA-ARRADCOM, Aberdeen Proving Ground, MD, Rept. BRL-R-2081, 1977.
- [2] Lenchitz, C., Shulman, L., and Young, R. F., "Comparison of closed bomb testing and actual firing of M1 multipurpose propellant," Technical report ARLCO-TR-81015(AD A111286), Large caliber weapon systems laboratory, US army armament research and development command, 1981.
- [3] Stiefel, L. "Gun propellants," AIAA Journal, Progress in Astronautics, "Interior Ballistics of Guns," edited by Krier, H. and Summerfield, M., Vol. 66, 1979.
- [4] Sutton, G. P., and Ross, D. M., Rocket Propulsion Elements – An Introduction to the Engineering of Rocket, Fourth Edition, John Wiley & Sons, pp. 358, 1976.
- [5] Kuo, K. K., and Summerfield, Fundamentals of Solid Propellant Combustion, Progress in Astronautics and Aeronautics, American Institute of Astronautics and Aeronautics, Inc., Vol. 90, pp. 8&31, 1984.
- [6] Krier, H., "Solid Propellant Burning Rate During a Pressure Transient," Combustion Science and Technology, Vol. 5, pp. 69-73, 1972.
- [7] Osborn, J. R., "Evaluation of Solid Propellant Ballistic Properties," Combustion and Flame, Vol. 20, pp. 193-197, 1973.
- [8] Urbanski, T., Chemistry and Technology of Explosives, Pergamon Press, Oxford-based, Vol. 3, pp. 340~342, 1984.
- [9] Stiefel, L., Gun Propulsion Technology, Progress in Astronautics and Aeronautics, American Institute of Astronautics and Aeronautics, Inc., Vol. 109, pp. 49~58, 1988.
- [10] 王振宇、陳一葳、趙嘉琦、洪兆宇，"焰火彈道之解算研究"，第 21 屆三軍官學基礎學術研討會論文集，高雄岡山，第 67 頁，2014。
- [11] 許亞龍、李俊明、趙嘉琦、程德輝、何金新、陳治安，"黑藥量產之技術與經驗"，火藥論文專輯，火藥學會，第 50 頁，2005。
- [12] Lenchitz, C., Shulman, L., and Young, R. F., "Comparison of closed bomb testing and actual firing of M1 multipurpose propellant," Technical report ARLCO-TR-81015 (AD A111286), Large caliber weapon systems laboratory, US army armament research and development

command, 1981.

- [13] 趙嘉琦、洪兆宇、方友霖，“黑藥之爆彈儀燃燒行為”，第三十二屆燃燒與能源學術研討會論文集，台南，第 40 頁，2022。
- [14] 洪兆宇、趙嘉琦、方友霖、方淳民、陳一葳，“改良平滑法求黑藥爆彈儀燃速”，第三十二屆燃燒與能源學術研討會論文集，台南，第 41 頁，2022。

黑藥於爆彈儀之燃燒

方友霖¹ 洪兆宇² 方淳民³ 趙嘉琦^{2*}

¹空軍軍官學校航空太空工程學系

²陸軍軍官學校機械工程學系

³國立台北科技大學光電工程學系

摘要

黑藥爆彈儀分析可用於新型高空焰火的設計、現有焰火性能的改進，及現有焰火問題的解決。文中為黑藥於爆彈儀燃燒建立一個分析的模式，將來可藉此得出相對敏捷值及相對力的關係。雖然焰火系統最後設計時，所有藥粒的特性同時決定焰火的彈道性能，但是將藥粒特性在爆彈儀升壓速率-壓力取線上的各別作用予以區分，分析較為方便。本文工作指出黑藥的物性結構與水分干擾密閉容器內之燃燒。燃燒中碎粒改變燃燒面積對體積的比率，另壓塊程序決定之密度，造粒程序決定之外型尺寸，皆造成影響。因黑藥水分停留淺層且因固有燃速迅速通過外層間隙，致規格上限水份對黑藥燃燒影響以初期較大。

關鍵詞：黑藥、爆彈儀、燃燒

The Combustion of Black Powder in Closed Bomb

Yu-Lin Fang¹, Chao-Yu Hung², Chun-Min Fang³, and Chia-Chi Chao^{2*}

¹ Department of Aeronautics and Astronautics, R. O. C. Air Force Academy

² Department of Mechanical Engineering, R. O. C. Military Academy

³ Department of Electro-Optical Engineering, National Taipei University of Technology

ABSTRACT

Analyzing combustion of black powder in closed bomb is available for the design of new high altitude pyrotechnics, improving the performance of existing pyrotechnics, and solving problems in existing pyrotechnics. An analytical model for the closed chamber combustion process is set up for the derivation of explicit relationships for relative quickness and relative force in the future. The shaping of characteristic $dP/dt-P$ curve for a high altitude pyrotechnics system is dependent upon several grain characteristics. Although, in the final design of a pyrotechnics system, all grain characteristics may act simultaneously to determine the ballistic performance of the pyrotechnics, it becomes convenient to categorize the independent effects of several grain characteristics on the $dP/dt-P$ curve. The work shows that the physical structure of black powder breaks up during combustion. Combustion proceeds on fragment with a new surface to volume ratio. The size, shape, and number of fragments are determined by the corning property permitted to development granulation procedure. The density is decided by press operation. The intrinsic burning rate of black powder is very fast in relation to the rate of structural dissociation. Moisture, the insensitivity volatile used with black powder in the pyrotechnic charge does not interact with black powder to modify its burning behavior.

Keywords: black powder, closed bomb, combustion

一、前言

較之於槍砲發射藥，黑藥燃燒具有不規則的特性。黑藥試樣之燃燒行為取決於初始物性構造，諸如粒徑、密度、碎藥等。因黑藥在高空焰火中裝填為發射裝藥，且為焰火藥球之主成分，瞭解其燃燒行為具有重要性，俾於解釋其不規則之現象與對應之。本文工作旨在研究影響黑藥燃燒行為之因子，說明其於焰火發射中之角色，提供爾後焰火研究之基礎。

二、黑藥燃燒之奇妙

高空焰火彈道之研究，係計算藥球第一組黑藥在發射筒內燃燒、爆燃，以內彈道熱機單行程作功將藥球推出，經由藥球初速、射角、氣象參數等諸元設定，推送至指定位置之計算過程。渠與現今槍砲彈道之研究，有些相似，但槍砲已隨時代進步，採用硝化棉、硝酸酯為發射藥，然僅焰火仍沿用黑藥為發射藥。黑藥未獲青睞為現代槍砲發射藥，相關發射性能之研究也少見。甚至查美國軍規[1]內雖說明各級黑藥尚有數十項用途，然實際上多半只用於點火、引火、傳火、及延期等輔助裝藥用途而已。復查美軍技術手冊[2]，將其併入炸藥，亦無發射用之數據。國造黑藥雖已引入德國技術設備，具多年量產經驗，但對其使用方法與研究方向全仿效美軍[3-5]。久夢初醒，改弦易轍，試由追查黑藥的燃燒性質著手，藉精確的數據，瞭解各種條件下黑藥的燃燒行為。

黑藥成分為硝酸鉀、碳及硫磺，磨成細粉狀的碳和硫磺會快速燃燒，硝酸鉀則負責提供快速燃燒需要的氧氣。三種原無爆性物質，兩兩相混後亦無，但三者互混，卻可產生奇妙爆燃，當年縱使牛頓等大師，亦對此苦思不解。傳火研究中，黑藥最可取的燃燒特點，低溫、低壓可燃燒性乃是最重要性質之一，此性質可使其作為不須在正常大氣壓力下之點火藥。黑藥在遇到高的空層、壓力減少時，其點火功用仍是可信賴的，揮發性含量被發現在低壓燃燒時，佔有很重要的角色。研究發現木炭低揮發物含量（25.6%）時，點火壓力限制為135mmHg；當木炭高揮發物含量（62%）時，

點火壓力限制15mmHg[4,16,17,19]。黑藥燃燒產生氣體比較複雜，膨脹範圍為250~450倍，含有大量熱質點(Hot particles)。然而，黑藥充當發射藥之研究，少之又少，亟待努力，以供發射高空焰火之用。

三、敏捷值原理

在火炸藥測試中，運用壓力速率(dp/dt)為敏捷值指標之研究，首先由 Vieille 於 1879 年以測壓彈(manometric bomb)測試硝化纖維燃燒時，認(dp/dt)為活性係數(coefficient of vivacity)[6]，實則代表燃燒後氣體於定時內造成壓力改變量。近代美軍以爆彈儀估測發射藥性能之研究[7]，M1 多效發射藥在低裝藥(#5 藥包裝藥以下)、低作用壓力等之邊界條件下，爆彈儀測試值與火砲射擊值尚能關聯，內彈道實射之初速變異與爆彈儀相對敏捷值變異與相對力變異間有一實驗模式，可以下式表示[7, 18]:

$$\Delta MV = k_1 \Delta RQ + k_2 \Delta RF \quad (1)$$

ΔMV 為實射初速差異， k_1, k_2 為常數準此，某些條件下常用爆彈儀估測內彈道性能，其中相對敏捷值(Relative Quickness, RQ)常用來評估發射效能。

$$RQ \equiv \frac{1}{N} \sum \frac{\left(\frac{dp}{dt}\right)_{test}}{\left(\frac{dp}{dt}\right)_{test}} \quad (2a)$$

RQ ，相對敏捷值其定義為在相同配方、壓力、藥室、點火、裝填密度等條件下，受測發射藥其平均壓力升高速率對標準發射藥壓力升高速率之比值。因此壓力速率(dp/dt)常被用於評估燃燒行為之關鍵指標，是量測燃速外，另一種直接明顯的檢視方法，不失為一簡便判讀依據，甚有文獻認敏捷值可以壓力上升速率代表[8,9]。本工作進一步以 $dp/dt-p$ 曲線作為分析之憑藉，另爆彈儀本身具有計算功能產出活性(vivacity)數據亦可共分析。

$$RF \equiv \frac{(P_{max})_{test}}{(P_{max})_{std}} \quad (2b)$$

RF ，相對力其定義為在相同配方、藥室、點火、裝填密度等條件下，受測發射藥其最大

膛壓對標準發射藥最大膛壓之比值。

在內彈道研究時，為研判測試藥之性能，最常被使用的方法是將經實測彈道性能良好之發射藥指定為標準(參考)藥，將其再以爆彈儀測試之數據，視為標準樣板。研判測試藥時，將其爆彈儀測試數據與標準樣板比對，如存在線性關係，試圖由相對敏捷值及相對力之偏差，推估實射時砲口初速之偏差。導致升壓速率及最大壓力差異，即測試藥與標準藥在相對敏捷值及相對力之偏差。

換句話說，在某些限制條件下，測試藥與標準藥間初速變異和二者相對敏捷值變異與相對力間變異存在近似線性關係，即意味初速變異可以經由相對敏捷值變異與相對力變異求得，其關係式如(1)式。就本文而言，亦即是德國 SAMP 黑藥與國造各型黑藥於爆彈儀測試中之差異，本文將可能之因素加以分析。

四、實驗

本工作因屬國內率先研究黑藥之發射藥性質，尚無標準參考藥比對。因德造 SAMP 黑藥，理化均勻性甚佳，乃將其當作參考藥，再將國造各級軍規黑藥與之比對，瞭解異同之處，除可標定德國黑藥性質，並可做為爾後軍用黑藥(傳火藥)轉換生產民用黑藥(高空烟火發射藥)時調整之用。將德國製 SAMP 黑藥與二 0 三廠生產之軍用四、五、六、八級黑藥在相同條件下以爆彈儀測試密閉系統燃燒壓力速率-壓力($dp/dt-p$)曲線與活性-燃燒分率(V_i-Z)曲線相互比較。

4.1 試樣

本文研究高空焰火發射用黑藥，以德國 SAMP 黑藥為最為業界稱道，為瞭解其性能，以其為參考樣藥，並再取國造四級、五級、六級、與八級黑藥為對照。

4.1.1 理化分析

德造 SAMP 黑藥之化性分析如表 1。國造黑藥的化性分析依據製程檢驗數據整理如表 2。表 1、2 中成分占比為重量百分比。密度採水銀比重瓶法，其程序按 MIL-P-223C 分析。

表 1. 德國 SAMP 黑藥化性分析

KNO ₃	75.07%
S ₈	9.91%
C	15.02%
密度	1.9877g/cc
水份	0.53%

表 2. 二 0 三廠製國造黑藥化性分析

品名	四級	五級	六級	八級
KNO ₃	74.0±1.0%			74.0±2.0%
S ₈	10.4±1.0%			10.4±1.5%
C	15.6±1.0%			15.6±1.5%
密度	1.72-1.80 g/cc			
水份	0.6%(Max)			
灰分	0.8%(Max)			

4.1.2 粒徑分析

德造 SAMP 黑藥之粒徑分析如表 3，國造黑藥粒徑分析如表 4。粒徑分析採美國標準篩，其孔徑資訊:ASTM11 號篩(2.0mm)、16 號篩(1.18mm)、20 號篩(0.85mm)、24 號篩(0.710mm)、30 號篩(0.60mm)、35 號篩(0.50mm)、40 號篩(0.425mm)、50 號篩(0.30mm)、100 號篩(0.15mm)、270 號篩(0.053mm)。

表 3. 德國 SAMP 黑藥粒徑分析

篩網號	SAMP
11	45.6%
20	40.8%
24	9.6%
30	1.6%
35	1.6%

表 4. 二 0 三廠製國造黑藥粒徑分析

篩網號	四級	五級	六級	八級
16	3%殘留	3%殘留		
20			3%殘留	
30	5%通過			
40		5%通過		
50			5%通過	
100				3%殘留
270				5%通過

4.2 爆彈儀燃燒壓力測試

本文研究使用 High Pressure Instrumentation 公司 B173 Proputer 型爆彈儀，操作使用按該公司 B173-MA-01-06 手冊執行。德造與國造黑藥同時再取樣二份，一份直接實施爆彈儀測試性能參數如表 5，因本身即為黑

藥，無再以點火黑藥引燃問題，點火時間視為零。另一份以標準程序再烘藥後方實施爆彈儀測試如表 6。由測試壓力值計算燃燒壓力速率，得出燃燒壓力速率-壓力($dp/dt - p$)曲線圖，同時利用爆彈儀直接產生之活性數據，作圖得活性-燃燒分率(V_i-Z)曲線。

表 5. 庫存黑藥爆彈儀測試性能參數

品項	Weight (g)	Ign. Delay time (ms)	Max. pressure (bar)	Rise time (ms)	Force (j/g)	Vivacity (100/bar.s)	Sampling rate(μ s)
SAMP	9.681	0	199	4.36	217.39	117.59	20
四級	9.762	0	197	4.26	215.86	126.02	20
五級	9.528	0	174	7.5	190.85	75.73	20
六級	9.585	0	185	5.3	202.78	101.96	20
八級	9.621	0	193	3.74	211.05	182.67	20

表 6. 回烘黑藥爆彈儀測試性能參數

品項	Weight (g)	Ign. Delay time (ms)	Max. pressure (bar)	Rise time (ms)	Force (j/g)	Vivacity (100/bar.s)	Sampling rate(μ s)
SAMP	9.672	0	191	4.82	208.85	110.94	20
四級	9.743	0	186	4.84	203.61	113.03	20
五級	9.512	0	163	7.61	181.17	70.14	20
六級	9.503	0	176	4.08	192.91	143.68	20
八級	9.518	0	170	5.67	186.13	147.54	20

4.2.1 藥粒粒徑影響測試

本項目的在瞭解黑藥燃燒是否隨著外部表面積變化。如此情形發生，不同粒徑的黑藥，在相同的測試重量下，總表面積隨粒徑變小而增加，使 $dp/dt-p$ 曲線必為表面積變化影響。分析中先取國造四、五、六、八級黑藥，其配方組成、密度範圍概同，惟粒徑分佈如表 4 顯示由大至小，同質量裝藥之藥粒表面積則由小至大，在相同操作條件下，以爆彈儀測出壓力後轉化為 $dp/dt-p$ 曲線及 V_i-z 曲線如圖 1、3。將上述黑藥回烘後其配方組成、密度範圍仍概同，粒徑分佈應不變，再獲得 $dp/dt-p$ 及 V_i-z 曲線如圖 2、4。文中各圖藍色曲線為國造四級、黑色為國造五級、黃色為國造六級、紫色

為國造八級為、紅色為德國 SAMP 黑藥；實線為合格出廠之庫存品，虛線為將之回烘後的檢整品。

4.2.2 藥粒密度影響測試

文獻中知密度顯著影響其燃速[8,9]，為瞭解對國造黑藥與德造 SAMP 黑藥於爆彈儀中燃燒之影響，因國造四級與 SAMP 黑藥粒徑比較接近者，粒徑大小 SAMP>四級，但成分概同。然密度有明顯差異，國造黑藥之密度範圍為 1.72-1.80g/cc，德造者為 1.9877g/cc，密度大小 SAMP>四級。將之 $dp/dt - p$ 曲線、 V_i-z 曲線比較如圖 5、7。回烘後 $dp/dt - p$ 曲線、 V_i-z 曲線如圖 6、8。

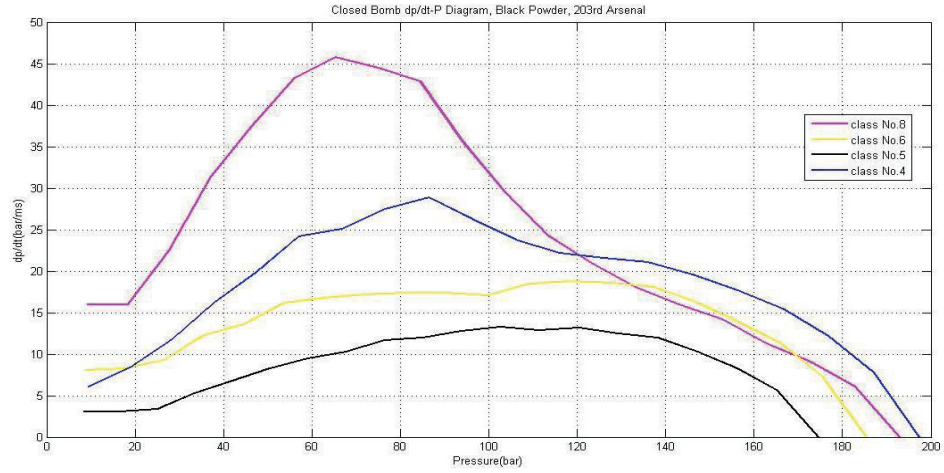


圖 1. 藥粒粒徑對 $dp/dt-p$ 曲線影響比較之一

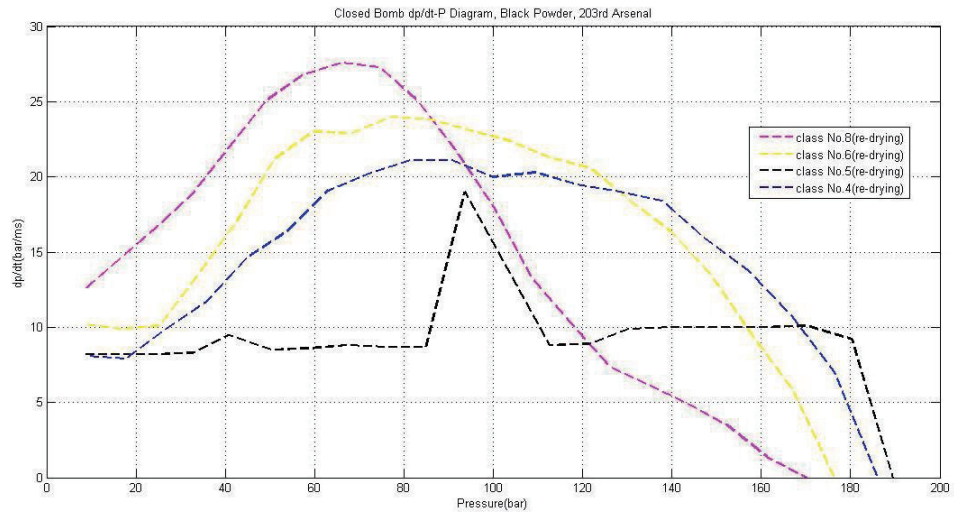


圖 2. 藥粒粒徑對 $dp/dt-p$ 曲線影響比較之二

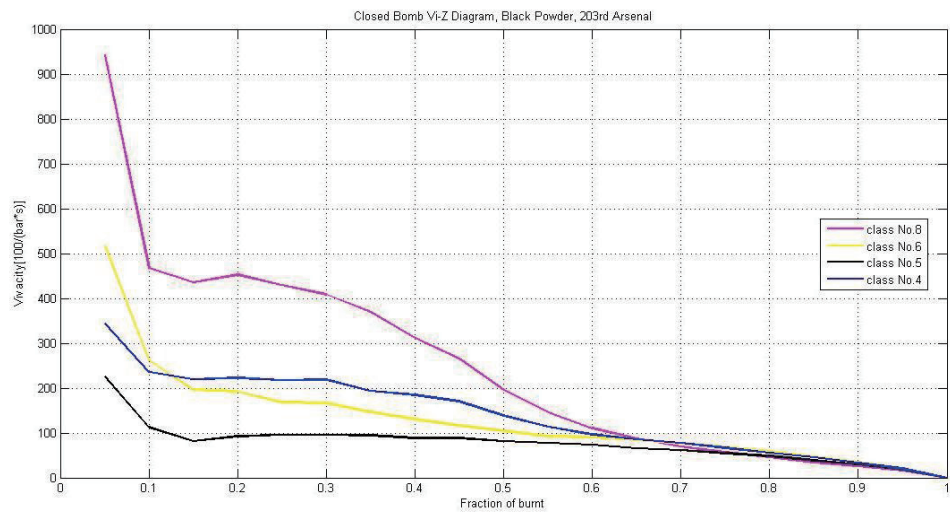


圖 3. 藥粒粒徑對 $Vi-z$ 曲線影響比較之一

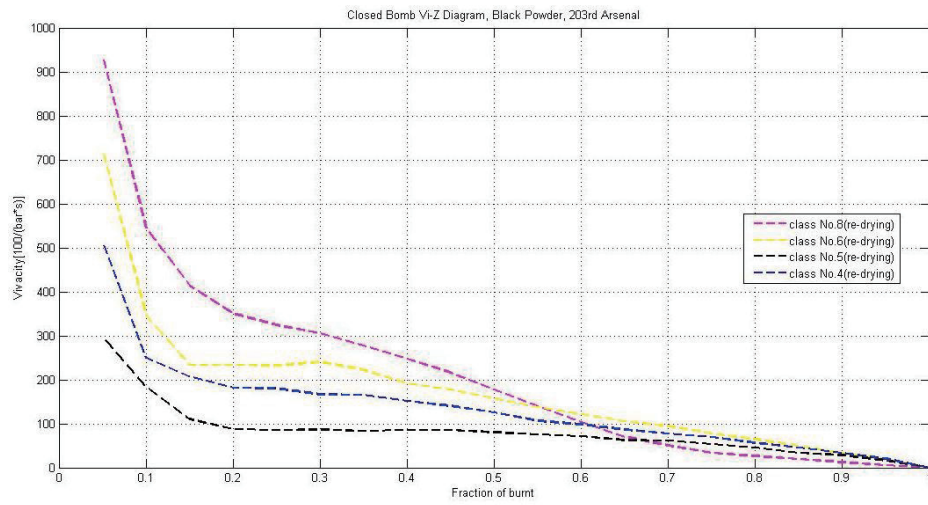


圖 4. 藥粒粒徑對 V_i - z 曲線影響比較之二

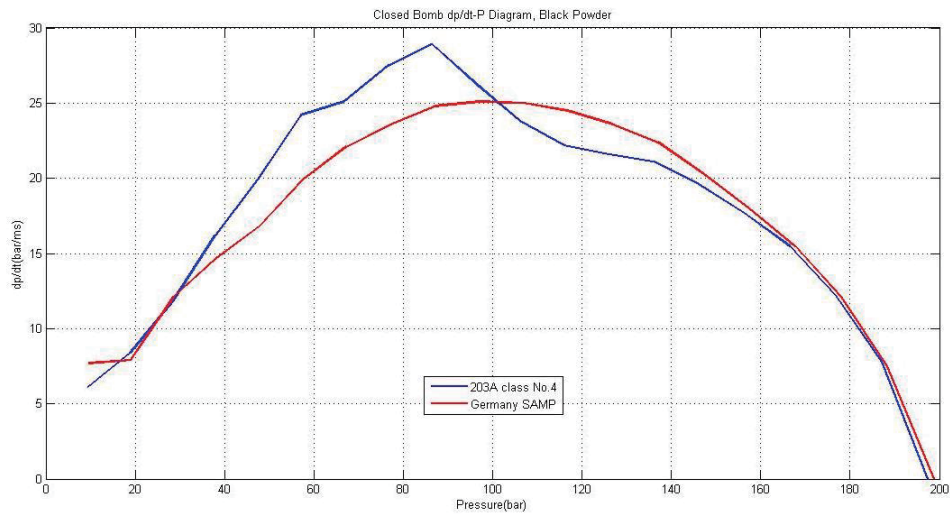


圖 5. 藥粒密度對 dp/dt - p 曲線影響比較之一

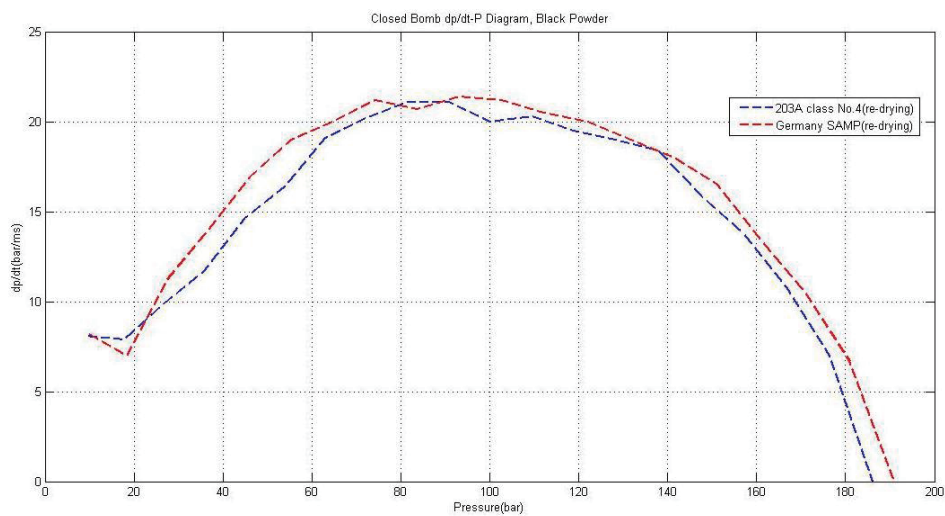


圖 6. 藥粒密度對 dp/dt - p 曲線影響比較之二

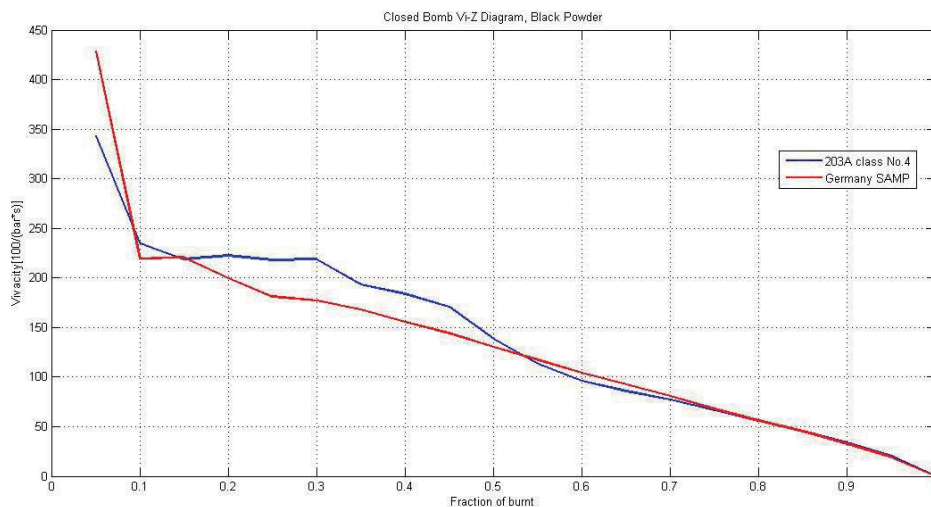


圖 7. 藥粒密度對 Vi - z 曲線影響比較之一

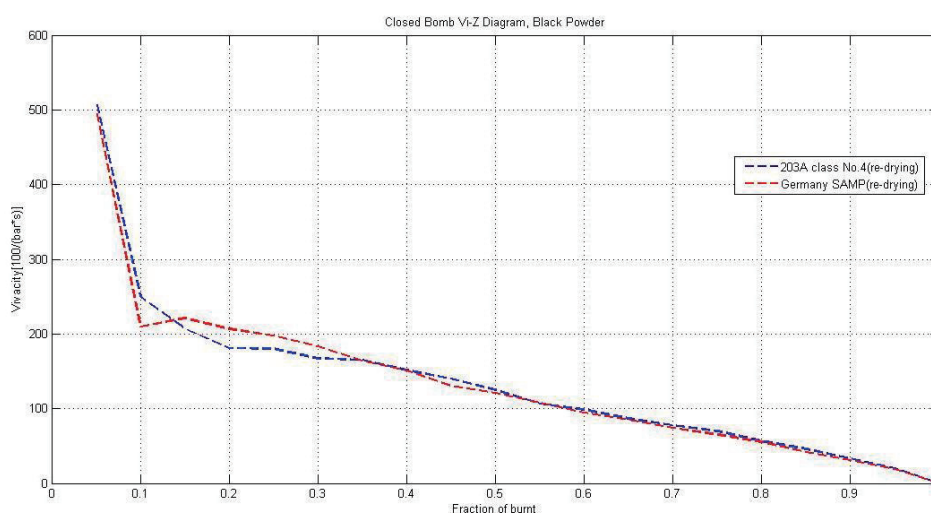


圖 8. 藥粒密度對 Vi - z 曲線影響比較之二

4.2.3 藥粒水份影響測試

製造規格中要求水份低於 0.6%，對此須估計其對燃燒行為影響之程度。實驗設計分別將國造四、五、六、八級及德造 SAMP 黑藥回烘前後之 dp/dt - p 曲線比較如圖 9~13， Vi - z 曲線影響比較如圖 14~18。

五、討論

5.1 藥粒粒徑之影響

藥粒影響燃燒，亦由 Vieille 於早年發現 [6]。理想狀況下，藥粒燃燒的 P - t 曲線很快上升到尖峰壓力，然後停留於此值，直到藥粒燃完，而後經燃燒氣體的絕熱膨脹降至零。實際上， P - t 曲線是逐漸上升到尖峰壓力，且停留於此值時間很短，最後由於氣體生成物的絕熱膨脹體積保持固定，升壓速率逐漸下降至零，這上升與下降的速度即為 dP/dt 。藥型是控制燃速的重要參數，因此現代發射藥被精準的製造成設計的形狀、孔數、尺寸，於定壓下，其燃速與暴露燃燒的表面積總量成正比，而且由

燃燒表面積與尺寸而決定，亦即當燃燒繼續時，暴露表面是增加或減少，更精確定義為受燃燒表面積對體積之比率(S_x/V_0)決定較為正確。由於黑藥為非常規發射藥，其藥形為不規則顆粒，無法如現代發射藥以精準的藥型函數來描述，完全用數學來處理黑藥形狀燃燒，十分困難，故沿用其規格粒徑分級來分析。理論上，同裝藥量，粒徑小者表面積大。由表 4 知八級黑藥粒徑最小，範圍與四、五、六級明顯區隔，接續其後，六、五、四級粒徑接近，但規格上下限逐漸增大。由圖 1 知，未回烘者，國造黑藥之初始 dp/dt 值為八級>六級>四級>五級，尖峰 dp/dt 值八級>四級>六級>五級，最大 p 值為四級>八級>六級>五級。由圖 3 知，國造黑藥之 $Vi-z$ 值起始為八級>六級>四級>五級，中間變為八級>四級>六級>五級，燃燒後期各級趨一致，活性漸減。由圖 2 知，回烘者，國造黑藥之初始 dp/dt 值為八級>六級>四級>五級，尖峰 dp/dt 值為八級>六級>四級>五級，最大 p 值為五級>四級>六級>八級。由圖 4 知，國造黑藥之 $Vi-z$ 值起始為八級>六級>四級>五級，維持至後期各級趨一致，活性漸減。由上知，粒徑小者，上升時間短；初始及平均活性大； dp/dt 值上升快、尖峰值高、下降也快，最高 p 值卻較小。其間八級粒徑明顯小於四、五、六級，性能表現最為明顯。四、五、六級粒徑接近，惟依規格粒徑仍應四>五>六級，但四級

黑藥，規格粒徑雖較五、六級大，活性卻較五、六級高。將四級燃燒性能綜合研判，依經驗因粒徑大、密度低者，較易形成碎裂藥，懷疑是燃燒過程中發生藥粒碎裂狀況。另粒徑大小對燃燒後期降壓段，較無影響，判斷係四、五、六級粒徑分佈甚多重疊，僅以現有規格訂定之上下範圍，無法掌握細部粒徑分佈情形，且未若現代發射藥控制 S_x/V_0 ，致燃燒末期暴露表面積排列次序發生變化所致。整體而言，粒徑大小對黑藥爆彈儀燃燒敏捷性有重大影響，粒徑小，活性大， $dp/dt-p$ 曲線陡峭；反之，粒徑大，活性小， $dp/dt-p$ 曲線坡度趨緩。

另國造各級黑藥主要用途為各式傳火藥或點火藥，其粒徑分佈依美軍規格選分。德造黑藥公稱為高空焰火發射藥，兩者用途不同，設計自有差異！一般而言，發射藥顆粒須經精密設計之大小顆粒組成，較大的顆粒具有較低膛內壓力與較高的砲口初速，因顆粒較小時，燃燒性質變為減面燃燒，推測德藥粒徑分佈應經專門設計，致粒徑分佈因應發射效能，而非火焰傳播。

由爆彈儀測試知，氣體從黑藥放出的速率隨暴露燃燒表面積而定。而黑藥裝藥量的最初總表面積隨各個顆粒的藥型與尺寸而定，觀察德藥其粒徑為精心設計且大於國藥，使其完全發揮發射效能。

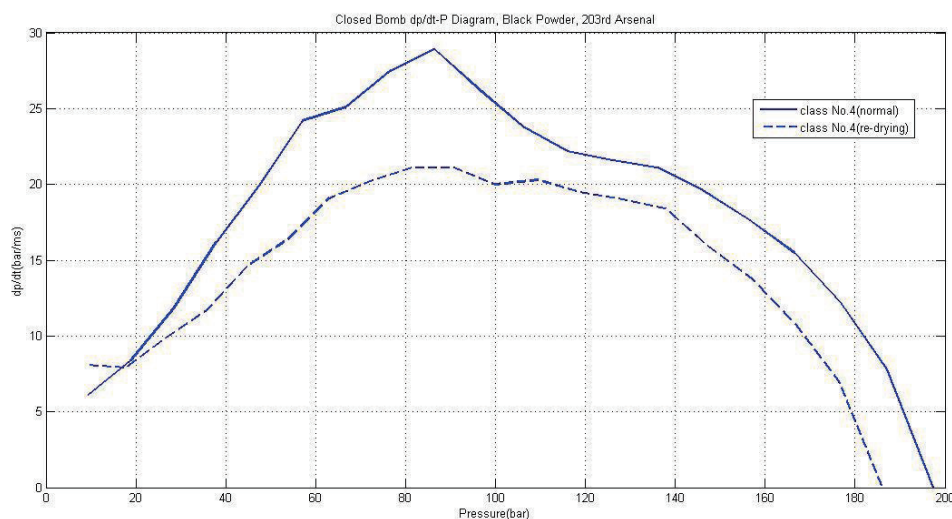


圖 9. 藥粒水份對 $dp/dt-p$ 曲線影響比較之一

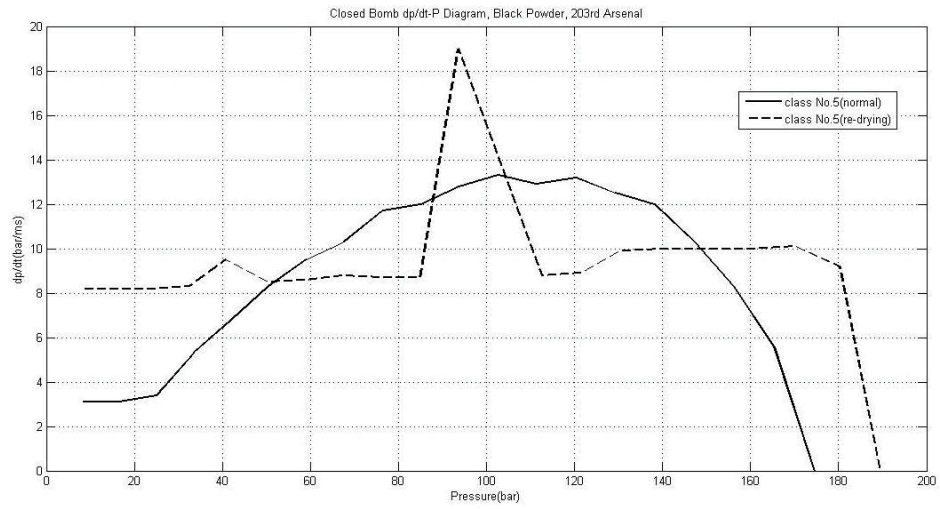


圖 10. 藥粒水份對 $dp/dt-p$ 曲線影響比較之二

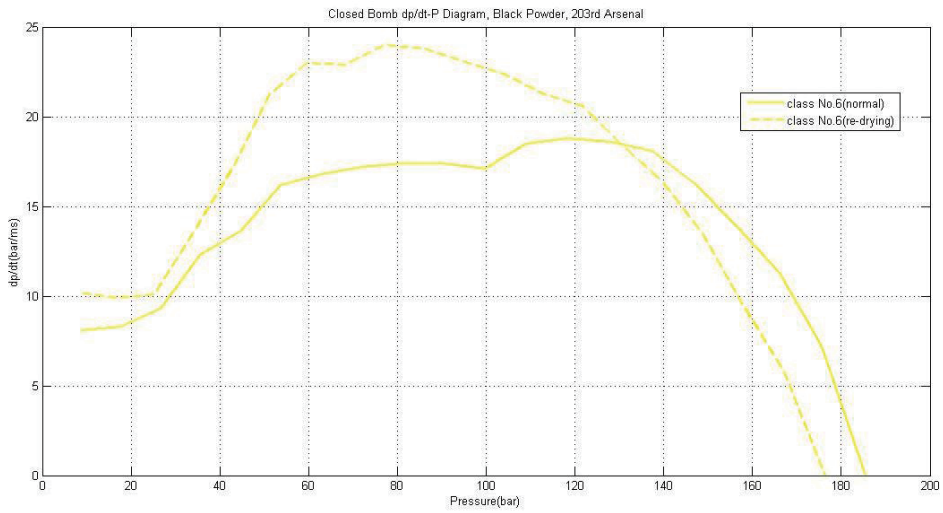


圖 11. 藥粒水份對 $dp/dt-p$ 曲線影響比較之三

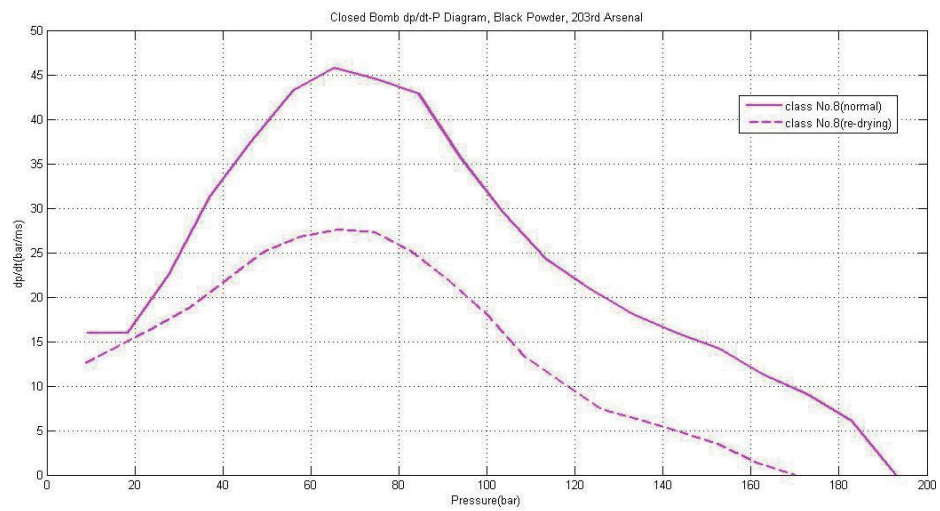


圖 12. 藥粒水份對 $dp/dt-p$ 曲線影響比較之四

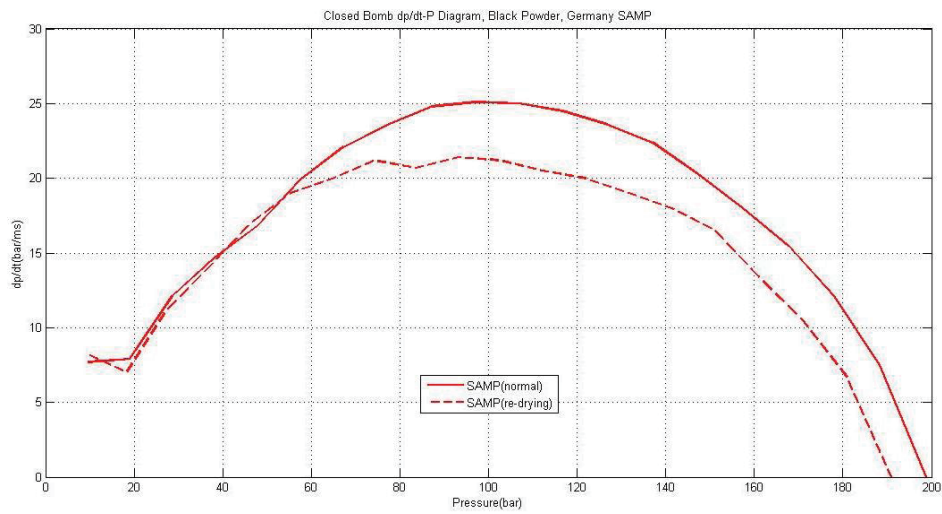


圖 13. 藥粒水份對 dp/dt - p 曲線影響比較之五

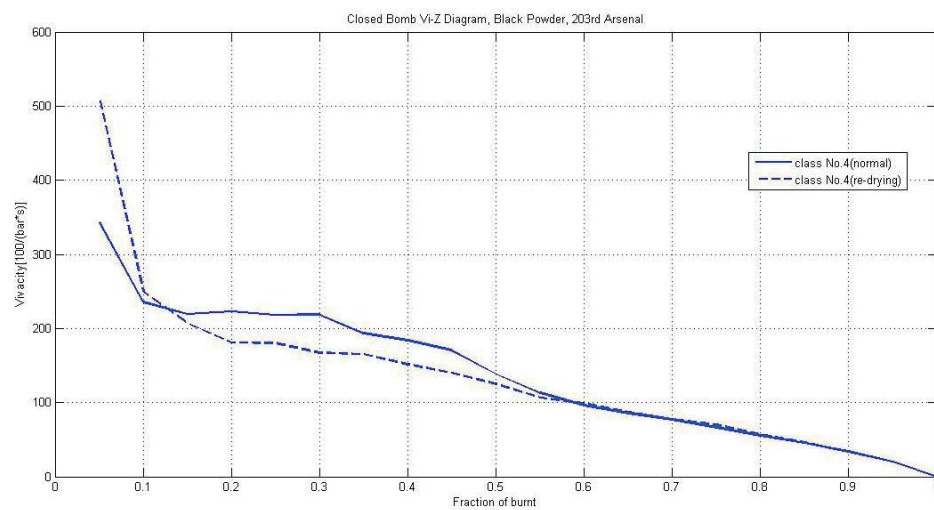


圖 14. 藥粒水份對 Vi - z 曲線影響比較之一

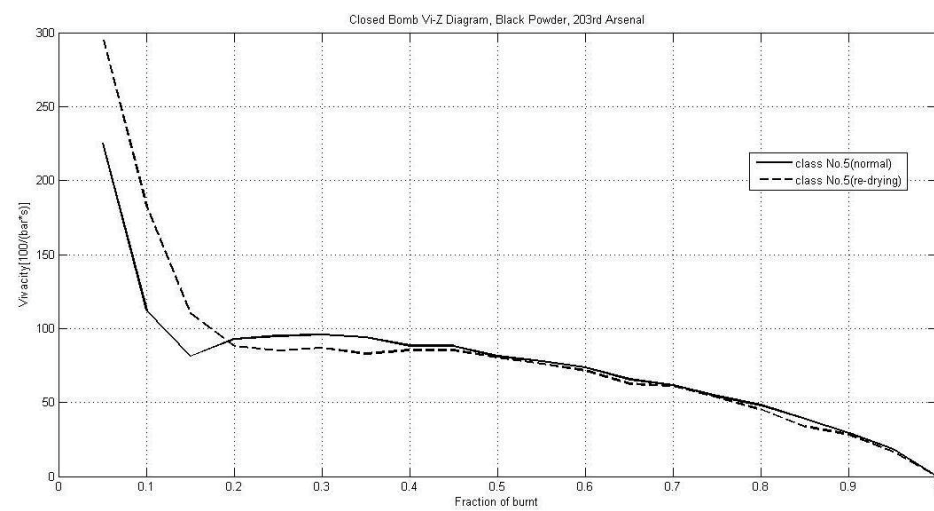


圖 15. 藥粒水份對 Vi - z 曲線影響比較之二

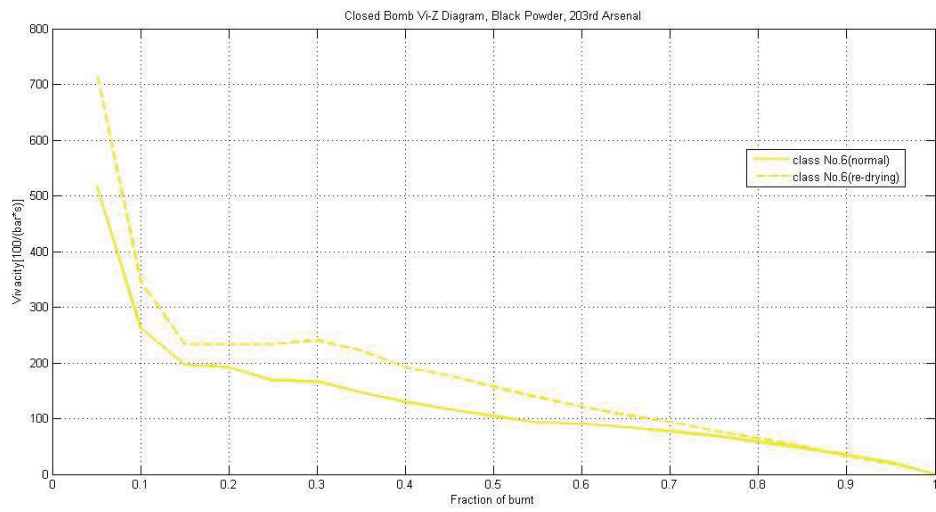


圖 16. 藥粒水份對 V_i - z 曲線影響比較之三

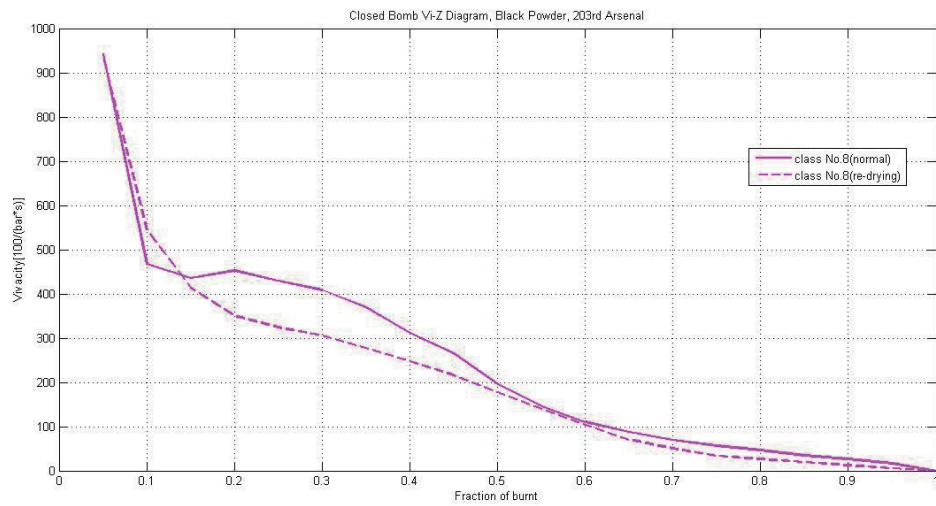


圖 17. 藥粒水份對 V_i - z 曲線影響比較之四

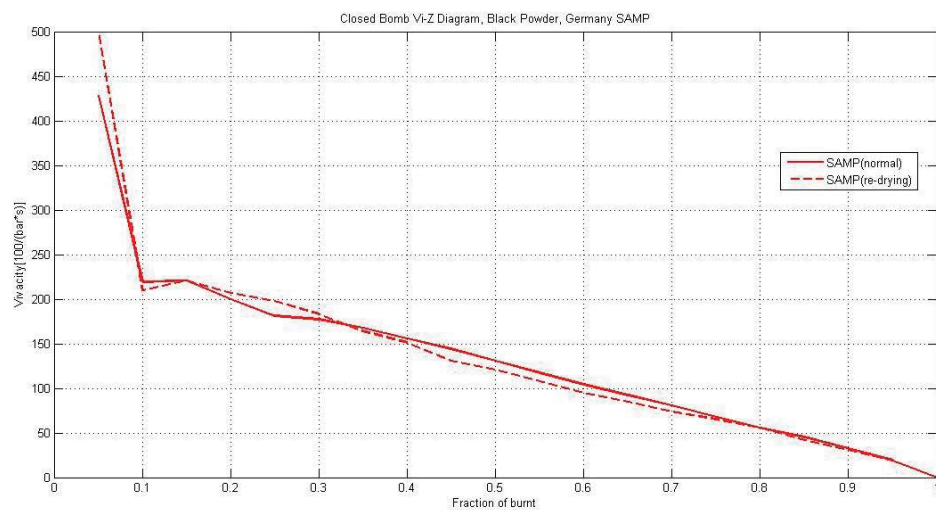


圖 18. 藥粒水份對 V_i - z 曲線影響比較之五

5.2 藥粒密度之影響

文獻中記載低密度(約 1.67)黑藥, 燃燒非常快速, 高密度(約 1.87)卻燃燒緩慢。經研究, 藥粒密度與內部構造相關, 密度低者, 內部多空隙, 具多孔性, 缺少晶體銳角[10]。其成因與壓藥道次有非常高之關聯與互動, 形成內部構造變化, 並影響燃燒, 藥粒密度僅為其結果與表徵[11-13]。綜上述藥粒密度對燃燒之影響, 雖十分重要, 但再增加密度是否仍必要, 成為關注[14,15]。檢討四級與 SAMP 黑藥之化性、最高壓力、上升時間、火藥力均概同, 惟粒徑 SAMP 稍大於四級但密度 SAMP 遠高於四級, 可由此觀察密度對燃燒活性之影響。依圖 5 顯示, 燃燒初期低壓時四級 dp/dt 值大於 SAMP, 後期高壓時 SAMP 稍大於四級, 尖峰值四級高於 SAMP; 圖 7 顯示四級活性大於 SAMP。重烘後情形, 依圖 6 顯示, 燃燒全期 dp/dt 值 SAMP 稍大於四級; 圖 8 顯示四級活性大於 SAMP。SAMP 活性雖低於四級, 然火藥力與最大壓力均高於四級, 判斷密度使 SAMP 之 dp/dt 曲線平坦, 避免陡峭之 dp/dt 尖峰值出現, 役使活性下降。SAMP 回烘前後, dp/dt 穩定增加或下降, 曲線幾無波動, 類似半圓; 四級則上下跳動, 顯然燒不穩定, 尤其回烘前更為明顯。 $Vi-z$ 曲線亦有相同情形, SAMP 無論回烘前後, 活性穩定下降, 四級則活性不穩定, 明顯產生於回烘前。綜觀之, 高密度產生極佳之燃燒穩定性, 密度低時燃燒較不穩定; 另粒徑條件相同時, 密度增加可能使 dp/dt 及活性降低。

5.3 藥粒水份之影響

黑藥特性為吸濕性甚強, 當水分超過 0.5% 實已開始影響性能, 當水分超過 2% 時, 則不易點燃。此外, 密度控制除運用壓藥外, 亦需水份條件配合, 故水份也影響密度。將回烘前後試樣爆彈儀 $dp/dt-p$ 曲線與 $Vi-z$ 曲線自身前後比較。 $dp/dt-p$ 曲線部份, 四級黑藥回烘之起始 dp/dt 值超越未回烘者, 但迅即落後於未回烘者, 全程論則回烘使 dp/dt 曲線下降, 且最大壓力下降; 五級較為特殊, 回烘者超越後拉平致落後, 隨後竄起再超越立即跌落, 又瞬

間拉平超越, 但最大壓力增加; 六級亦為回烘後 dp/dt 曲線先高後低, 但交叉變換點延後出現於中後期高壓段, 全程論則回烘使 dp/dt 曲線稍下降, 最大壓力仍下降; 八級黑藥回烘之 dp/dt 值全程未超越未回烘者, 但 dp/dt 曲線及最大壓力均下降; SAMP 情形類似四級。 $Vi-z$ 曲線部份, 四級、五級、八級、SAMP 回烘者活性均初始期短暫超越未回烘者, 但 SAMP 前後差異甚小; 六級回烘後活性全程超越未回烘者, 但前後差異亦小。綜觀之, 因黑藥水分停留表淺層間隙, 且固有燃速僅於表淺層間隙受干擾, 致規格內水分對黑藥燃燒影響以初期較大, 亦對粒徑大者之影響較大, 更對密度低者之影響較大。

黑藥特性, 德藥、國藥回烘前均含有少量水分超出規格, 但德藥回烘後藥性變化較小, 國藥受回烘則有較大影響。回烘後, 國造四、六及八級黑藥最大(尖峰)壓力均降低, 然五級黑藥卻增高。以爆彈儀研究觀點, 最大壓力增加意味氣體產物數量或體積增加。四、六及八級黑藥回烘後, 水分移除, 氣體數量減少, 而熱力條件未使氣體體積增加, 甚至減少。此熱力條件為狀態函數, 與路徑無關, 只要達到某一狀況, 氣體就具有此熱力性質。觀五級黑藥回烘後, 水分可能減少, 但熱力條件可能變化, 尤其是燃燒溫度增加, 可使氣體比容增高, 或使黑藥燃燒之熱質點(固、液態)汽化為熱氣體, 氣體總量或體積皆可能增加, 致最大壓力反而提高。此借 dp/dt 的變化觀察熱力條件的端倪, dp/dt 代表反應速率, 反應速率為溫度之函數。四、八級黑藥回烘後之 dp/dt 相對較前低, 六級者則前段高後段低, 惟五級黑藥者平均較高且有陡升狀況。此情足以說明五級黑藥反應溫度可能累積最快, 改變熱力條件, 增加氣體產物總量或體積, 超過水分減損之氣體量, 反使最大壓力增加。

六、結論

黑藥擔任發射藥的角色, 最為久遠, 但不若現今槍砲發射藥能以精密藥型與平階燃燒等控制。本工作經爆彈儀實驗, 認經由藥粒粒徑、密度、水份之控制, 仍可獲得規律性之趨

勢。粒徑而言，粒徑大小對黑藥爆彈儀燃燒敏捷性有重大影響，粒徑小，活性大， $dp/dt-p$ 曲線陡峭；反之，粒徑大，活性小， $dp/dt-p$ 曲線坡度趨緩，觀察德藥其粒徑為精心設計且大於國藥，使其完全發揮發射效能。密度而言，高密度產生極佳之燃燒穩定性，密度低時燃燒較不穩定；另粒徑條件相同時，密度增加可能使 dp/dt 及活性降低，觀察德造 SAMP 黑藥的密度較高，呈現平行層燃燒的現象，燃燒較為穩定，而國造黑藥密度較低，燃燒現象不穩定。水分而言，因黑藥水分停留淺層且固有燃速遠快於外部間隙，致規格內水分對黑藥燃燒影響以初期較大，亦對粒徑大者之影響較大，更對密度低者之影響較大。

參考文獻

- [1] MIL-P-223C Powder, Black, Military Specifications and Standards, 1993.
- [2] 阮望聖、林國雄、楊祖印、張光中、陳澍聖、賈文豪、張繼國、陳嘉孟、羅惠生、陳益明、楊清龍、曾卓凡、黃俊浩，炸藥理論與應用，聯勤第 203 廠，pp. 420~425 & 532-536，1987。
- [3] 周金良、黃振家、趙嘉琦、陳治安，火炸藥特論講義，中正理工學院兵器研究所，pp. 157，1995。
- [4] 許亞龍、李俊明、趙嘉琦、程德輝、何金新、陳治安，黑藥量產之技術與經驗，火藥論文專輯，火藥學會年會，第 9-18 頁，2005。
- [5] 王振宇、陳一葳、趙嘉琦、洪兆宇，“焰火彈道之解算研究”，第 21 屆三軍官學基礎學術研討會論文集，高雄，第 B3-3 頁，2014。
- [6] Urbanski, T., Chemistry and Technology of Explosives, Pergamon Press, Vol. 3, pp. 529~530, 1984.
- [7] Lenchitz, C., Shulman, L., and Young, R. F., “Comparison of closed bomb testing and actual firing of M1 multipurpose propellant,” Technical report ARLCO-TR-81015(AD A111286), Large caliber weapon systems laboratory, US army armament research and development command, 1981.
- [8] Urbanski, T., Chemistry and Technology of Explosives, Pergamon Press, Vol. 3, pp. 340-342, 1984.
- [9] Stiefel, L., Gun Propulsion Technology, Progress in Astronautics and Aeronautics, American Institute of Astronautics and Aeronautics, Inc., Volume 109 pp. 49-58, 1988.
- [10] Sassé, R. A., The Influence of Physical Properties on Black powder Combustion, Ballistic Research Laboratory, USA-ARADCOM, Aberdeen Proving Ground, MD, Rept, ARBRL-TR-0308(ADA-100273), March 1981.
- [11] Sassé, R. A., Strand Burn Rates to One One Hundred Atmospheres, Ballistic Research Laboratory, USA-ARRADCOM, Aberdeen Proving Ground, MD, Rept, ARBRL-TR-0249(ADA-129087), May 1983.
- [12] Knudsen, F. D., “Dependence of Mechanical strength of Brittle Poly crystalline Specimens Porosity and Grain Size,” Journal of the American Ceramic Society, Vol. 42, pp. 376-387, 1959.
- [13] Sassé, R. A., Holmes, H., Hansen, D., Evaluation of Black powder Produced by the Army Ammunition Plant, Ballistic Research Laboratory, USA-ARRADCOM, Aberdeen Proving Ground, MD, Rept, ARBRL-TR-02596(ADA-147801), 1984.
- [14] 趙嘉琦、洪兆宇、方友霖，“黑藥之爆彈儀燃燒行為”，第三十二屆燃燒與能源學術研討會論文集，台南，第 12-7 頁，中華 2022。
- [15] 洪兆宇、趙嘉琦、方友霖、方淳民、陳一葳，“改良平滑法求黑藥爆彈儀燃速”，第三十二屆燃燒與能源學術研討會論文集，台南，第 111-04 頁，2022。
- [16] Douillet, A., “Etude Experimentale des Lois de Combustion des Poudres Noires a la Pression Atmospherique et Au-Dessous,”

Memorial des Poudres 37, pp. 167, 1955.

- [17] Rose, J. E., The Role of Charcoal in The Combustion of Black Powder, Naval Ordnance Station, pp. 554, 1980.
- [18] Krier, H., and Summerfield, M., Interior Ballistics of Gun, Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 66, pp. 248, 1979.
- [19] Rose, J. E., "Investigation on Black Powder and Charcoal," TMTR 433, Naval Ordnance Station, 1975.

大數據分析技術結合時間序列預測應用-以區間式改良神經網路為例

林秀怡¹ 徐彬偉^{2*}

¹健行科技大學財務金融系

²健行科技大學企業管理系

摘要

文獻中常利用倒傳遞式類神經網路(BPN)、長短期記憶(LSTM)等深度學習模型進行時序性預測，並以點估計值為預測方法，然而點估計卻常造成預測準確率趨近 0 之現象。本研究提出一區間式 LSTM 模型，並與傳統 BPN 及 LSTM 進行預測精確度比較。以新冠肺炎爆發後台灣生技指數日收盤指數為標的，結果顯示 LSTM 之 RMSE、MAPE 及 MAE 均優於 BPN 模型。區間式 LSTM 分別在信賴水準 99%、95%與 68%測試樣本指數值的準確預測率分別達 100%、99.33%與 94%，實可提升深度學習模型於時序性預測之實用性，疫情期間若應用於國軍確診個案數預測，提升疫情防控策略措施之有效性，以提供後續國軍醫療資源超前部署。

關鍵詞：長短期記憶、倒傳遞式類神經網路、疫情防控措施、深度學習

Application of Big Data Analysis Combined with Time Series Prediction-Using Interval Improved Neural Networks

Hsio-Yi Lin¹ and Bin-Wei Hsu^{2*}

¹Department of Finance, Chien Hsin University of Science and Technology

²Department of Business Administration, Chien Hsin University of Science and Technology

ABSTRACT

In the literatures, deep learning models such as backpropagation neural network (BPN) and long short-term memory (LSTM) are often used for time series prediction, and point estimation is used as prediction method. However, point estimation often causes the phenomenon of prediction accuracy to approach 0. This study proposed an interval-type LSTM model, and compared the prediction accuracy with traditional BPN and LSTM models. Taking the daily closing index of Taiwan's listed biotechnology and medical index after the outbreak of the new crown pneumonia as the target, the results show that the RMSE, MAPE and MAE of LSTM are all better than the BPN model. Interval-based LSTM has an accurate prediction rate of 100%, 99.33% and 94% respectively at the confidence level of 99%, 95% and 68% of the test sample index values, which can really improve the practicability of deep learning models in time series prediction. During the epidemic, if it was applied to the prediction of the number of confirmed cases in the national army, it would improve the effectiveness of the epidemic prevention and control strategies and measures, so as to provide the follow-up medical resources for the advance deployment of the national army.

Keywords: LSTM, BPN, epidemic prevention and control strategies and measures, deep learning

文稿收件日期 111. 12. 01; 文稿修正後接受日期 112. 03. 19; *通訊作者

Manuscript received Dec. 1, 2022; revised Mar. 19, 2023; *Corresponding author

一、前言

時間序列分析是一系列按時間排序的資料，透過參數估計以及曲線擬合來建立分析模型。其中差分整合移動平均自我迴歸 (autoregressive integrated moving average, ARIMA) 為最常見的時間序列統計迴歸模型之一。然而，ARIMA 模型的實證資料必須具有平穩性，數據需先進行差分，在差分平穩後再予建模，故本質上只能應用於線性關係的資料，因此對於高離散程度、高度非線性的資料（如傳染病預測等...）應用於 ARIMA 也有所侷限。故近年來有關時間序列預測研究，常搭配深度學習模型進行分析[1]。

深度學習是一種以人工神經網路為架構，對資料進行表徵學習的演算法。主要邏輯是將資料轉換成多層式神經網路結構表徵來進行學習，可擷取資料中複雜的特徵，並進行預測和判讀[2]。優點是無須耗費大量人力成本進行特徵工程與模型設計[3]，也廣泛地被應用於時間序列特徵的提取，如：股市漲跌變化、銷量預測、傳染病傳播等...

自 2019 年新型冠狀病毒(COVID-19)疫情爆發以來，對全世界各國人民之健康與生活秩序產生重大衝擊，也對國軍戰力產生嚴重威脅。由於軍隊訓練屬於群聚生活型態，同袍間生活互動頻繁，長時間在密閉空間群聚活動，具有高度疾病散播的風險。為即時偵測國軍各單位突發群聚感染，國防部特設立國軍疫情指揮中心，期務實執行防控措施。然而新冠疫情詭譎多變，近來許多研究嘗試利用各種深度學習模型，以新冠病毒確診人數為時間序列資料進行預測，期望透過準確預測，幫助政府合理分配醫療資源，並及時調整防控策略。

各種深度學習預測模型中，由 Rumelhart 於 1986 年提出的倒傳遞式類神經網路(Back-propagation Neural Network, BPN)可視為最具代表性且應用最普遍的模型[4]。BPN 主要是以多層感知機為架構，使用誤差倒傳遞演算法 (error back propagation)，屬於監督式學習網路，廣泛的運用於診斷、預測等研究領域。QU [5]曾利用 BPN 進行傳染病預測，證實了 BPN

對於呼吸道傳染病預測效果良好，預測效果亦優於傳統的多元逐步回歸模型。然而亦有文獻指出，在以 BPN 進行時間數列資料預測時，其效果仍有侷限，主因是 BPN 模型之學習目的是建立輸入及輸出間之對應關係，並不考慮輸出間的相互影響；此外，BPN 的預測是以樣本比對方式來進行，並非實質學習數列間之關係。因此，當數列間彼此有相互影響關係，其運算成效就會受到限制[6]。

另一常見的深度學習模型-遞迴神經網路 (recurrent neural networks, RNN)，也被認為是處理時間序列數據中最強大的模型之一。然而 RNN 的一大缺點是其忽略了記憶的能力，而且無法捕捉長時間（當序列的距離太大）各節點之間的關聯。此外，簡單的 RNN 結構亦無法處理梯度容易歸零，以及隨著遞歸權重指數級爆炸等問題 (Vanishing gradient problem)，這些問題最終會造成訓練無效之情況，因此在深度學習的理論及實務上，很少有好的預測效果是透過簡單 RNN 模型(vanilla RNN)完成的，大部分模型都會再改良其中遞迴神經單元。改良方法通常有兩個方向：(1)設計較好的梯度下降演算法、(2)神經單元中設計較佳的激勵函數。基於上述(2)的改良方向，Hochreiter et al.[7]於 1997 年提出一最有名的改良式 RNN 模型『長短期記憶網路』(Long Short Term Memory Network, LSTM)。LSTM 主要是透過記憶功能增加『長期依賴』(long-term dependency)的狀況。對比於 RNN 模型，LSTM 改良處在於神經元中加入了遺忘、更新、輸出等 3 步驟，藉此大幅提升了長期記憶之表現。由此，RNN 的梯度歸零問題在 LSTM 中也得到了一定程度改善。因此近年來 LSTM 已然成為 RNN 中最常被使用的模型之一。在預測 COVID-19 疫情方面，Yudistira (2020)指出由於新冠病毒傳染的時序資料屬於高離散程度、高度非線性的特性，因此傳統統計模型難以有效預測，故建議採用能解決梯度消失的 LSTM 模型更為妥適，且因疫情傳播受到多重外在因素影響，故使用含有多重自變數資料集的 LSTM 來預測，在理論上更為適合，尤其是在預測時序資料的增長變化時，預測效果更佳

[8]。Liu et al. (2018)亦指出 LSTM 提取特徵值做預測有 72%的準確度，雖然已達較高精準度，但仍有可改善的空間[9]。此外，LSTM 對於 1000 個量級或更長之序列資料，依然難以處理；每個 LSTM 的 cell 裡都有著 4 個全連接層(Multilayer Perceptron, MLP)，此結構也造成若 LSTM 時間跨度變大、網路加深時，計算量會變得很大，也很耗時。

為了更優化 LSTM 模型，學者也提出許多改良方式，如：李聰聰(2020)提出利用深度自編碼器方法對時間序列特徵進行降維後，可增加 LSTM 對時間序列預測的精確度[10]。Zhao(2017)提出在 LSTM 中加入時間加權函數後，其結果會優於其他深度學習模型[11]。

然而上述的深度學習模型，在真實世界的時序資料預測中是否實用？從統計角度來看，任何模型預測若只有點估計(二分法或單點預測)，將會造成估計完全正確的機率趨近於 0，因連續型隨機變數在任何一點發生的機率是 0，這缺失將大大限制了深度學習模型在真實世界的可用性[12]。事實上，預測值隱含著對未來某段週期的機率分佈之估計才較為合理。因此，在模型發展概念上，若以區間估計修正現有模型點估計之做法，是否會讓深度學習模型更符合真實狀況？這將是本研究有興趣探討之處。基於前述 BPN 及 LSTM 模型點估計的缺點改良，本研究希望提出一套適用於時間序列預測之區間式 LSTM 模型，期能提高時間序列之預測能力。

實務上，未來若取得國軍 Covid-19 染疫人數之實際數據，則可將此改良式模型套用至國軍在防疫大數據分析的預測，應可提高國軍在疫情防控策略措施的有效性。然而，因國軍染疫人數之時序資料目前尚無法取得，模型實證過程確有困難，故本研究以極具代表性之臺灣經濟新報(Taiwan Economic Journal, TEJ)所編列「M1722 上市生技醫療指數」(以下簡稱臺灣 TEJ 生技指數)之時間序列資料集合為模型實證範例。臺灣 TEJ 生技指數是以臺灣證券交易所上市生技醫療類普通股股票市值排序(不含全額交割股、TDR、海外回台第一上市公司)，並考量自由流通市值加權等條件，納入時

點以生技醫療公司上市後滿一年之次年資料納入指數計算，用以表彰臺灣上市生技醫療股票市場產業之績效。本研究將以此實證結果證明區間式 LSTM 在實務上之可用性，而有關國軍之染疫人數之時序預測，將待未來國軍資料開放後再行驗證。本研究資料集將設定自 Covid-19 爆發後至 2022 年 6 月底為區間，並加入此區間時間序列的各項指數變數、技術指標與變異數作為解釋變數，以此加強預測模型之可解釋性。綜上，本研究主要目的如下：(一)以深度學習 BPN 及 LSTM 模型建立 Covid-19 爆發後台灣生技指數預測模型、(二)修正現有 BPN 及 LSTM 模型點估計方式，進而開發區間式 LSTM 模型，並比較其與傳統點估計模型之精確度。

二、研究方法

2.1 研究變數

已有許多文獻[13][14][15]指出大盤指數資料具有時間序列特性，故本研究以「台灣 TEJ 生技指數」為研究標的，研究對象為 Covid-19 爆發期間台灣生技指數之收盤價格，資料來源主要為 TEJ 資料庫。本研究將比較 BPN、LSTM、區間式 LSTM 等 3 種模型之預測精確度。首先，本研究蒐集歷史文獻中用來預測指數之各項變數資料，變數包含台灣指數資料、各國指數資料、期貨價格、消息面指標、總體經濟分析等 23 項變數。接著利用因素分析法先篩選 Covid-19 爆發期間與台灣生技指數有顯著影響之變數，再以 Matlab 建立模型預測台灣 TEJ 生技指數之收盤價，以驗證本研究方法的可行性。研究架構共分為以下 9 步驟，茲分述如下：

- (1) 資料蒐集：含技術指標共 7 項、台灣生技醫療類買賣超及成交量資料共 5 項、台灣及各國指數行情共 8 項、消息面指標 1 項、期貨價格指數 1 項、總體經濟分析 1 項等，共計 23 項變數指標(如表 1)。

表 1. 本研究各項變數指標

類別	輸入變數指標
技術指標	MA_5、MA_20、K_9、D_9、RSI_6、RSI_12、MACD_9
生技醫療類指標	上市生技醫療類成交量週轉率、生技醫療類投信買賣超、生技醫療類自營商買賣超、生技醫療類外資買賣超、生技醫療類券資比
台灣及各國指數	台灣加權指數、美國道瓊工業指數、美國 S&P500 指數、美國 NBI 生技指數、上海綜合指數、香港恆生指數、南韓綜合指數、日經 225 指數
消息面指標	VIX 恐慌指數
期貨指數	CRB 指數
總體經濟分析	景氣對策訊號

- (2) 資料前處理：因國際間之大盤指數休市日期略有不同，若逢各國大盤指數交易休市日或其他原因而無法取得交易資料，則預先將整筆資料刪除。
- (3) 刪除無效變數：利用驗證性因素分析法(CFA, Confirmatory Factor Analysis)篩選適當變數作為研究模型輸入之變數指標，並將無效變數刪除，以提高模型預測準確率。
- (4) 將資料進行正規化處理（正規化至 0~1 間）。
- (5) 建立模型：本研究以 TEJ 上市生技醫療類指數分別建立 BPN、LSTM、區間式 LSTM 等 3 個模型，如表 2。

表 2. 本研究建立之深度學習模型

模型 研究標的	BPN	LSTM	區間式 LSTM (M_LSTM)
臺灣 TEJ 生技指數	MODEL1	MODEL2	MODEL3

- (6) 設定訓練及測試參數：將資料按 7:3 比例區分，分別設定為學習資料及測試資料。
- (7) 訓練模型。
- (8) 檢驗預測結果：若預測結果不如預期，則重複 5~7 步驟。
- (9) 模型比較：將(5)的 MODEL1~MODEL3 之

預測準確度分別進行比較，並進行平均誤差百分比值 (Mean Absolute Percentage Error, MAPE) 之預測能力比較。

2.2 資料處理

本研究資料取樣時間自 2020 年 1 月台灣首例 Covid-19 確診月份起，至 2021 年 6 月底為止，扣除台灣及國際指數市場休市日期，共計取樣 513 筆樣本，其中學習樣本數占 359 筆、測試樣本數占 154 筆。本研究將 23 項變數資料進行驗證性因素分析，將特徵值(eigenvalue)大於 1 的因素萃取出來[16]，再以最大變異旋轉法旋轉。結果顯示 23 項變數中應刪除 9 項變數，分別是景氣對策訊號、南韓綜合指數、上海綜合指數、生技醫療類券資比、CRB 指數、VIX 恐慌指數、美國那斯達克生技 NBI、上市生技醫療類成交量週轉率、投信買賣超。剩餘 14 項變數(MA_5、MA_20、K_9、D_9、RSI_6、RSI_12、MACD_9、生技醫療類自營商買賣超、生技醫療類外資買賣超、台灣加權指數、美國道瓊工業指數、美國 S&P500 指數、香港恆生指數、日經 225 指數)為本研究最終之輸入變數指標，其總解說負荷量為 80.48%。上述指標變項修正後，其適合性檢定 KMO=0.679，大於文獻建議的標準值 0.6 [17]，Bartlett 球形檢定近似卡方分配值=9668.408，在自由度 91 的情形下，p-value=0.000。以上數值顯示此 14 項輸入變數指標資料適合用於後續分析。接著為了標準化資料間之殘差，本研究將變數資料進行正規化(normalization)處理，正規化的方式是以抽樣數據資料與區間內最大值(X_{max})與最小值(X_{min})進行運算，並依據變數初始值大於等於 0，或有負值等 2 種情境，分別利用公式 (1)、(2)處理，得到正規化值(X_{nom})，此正規化值即為本研究深度學習模型之輸入變數資料。

若變數初始值皆大等於 0 時

$$X_{nom} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (1)$$

若變數初始值有負值時

$$X_{nom} = \frac{X}{\max|X|} \quad (2)$$

(分母為 X 取絕對值後的最大值)

2.3 深度學習模型

2.3.1 BPN

BPN 是 Rumelhart 等人於 1986 年發表之具監督式學習能力的前饋式的多層網路架構，含有隱藏層以及偏權值(bias)的概念[4]。網路架構如圖 1。其主要架構可分為 3 個層次，分別是輸入層、隱藏層及輸出層，各層均包含多個處理單元，不同層中之單元以閥值和權重值相互連接。輸入變數由輸入層傳至隱藏層，經計算後再將結果傳至輸出層。經比較實際數值和輸出變數的差距後，將結果回傳至隱藏層，並據此修正連接鍵之權重值，此不斷重複訓練的過程，採用最陡坡降法，每當輸入一訓練樣本，網路即調整權數變動幅度 Δw_{ij} (以公式(3)、(4)表示)，並持續至誤差收斂達預設條件為止。

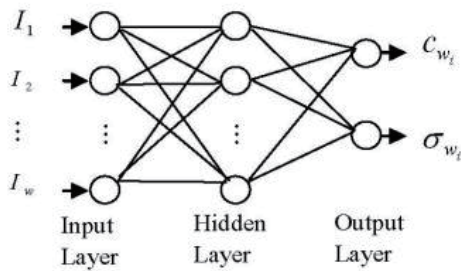


圖 1. BPN 之架構圖[18]

$$\Delta w_{ij} = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{ij}} \quad (3)$$

其中 η 為學習速率，目的在控制每次最陡坡降法最小化誤差函數的步幅； E 為誤差函數

$$E = \frac{1}{2} \sum (T_j - A_j)^2 \quad (4)$$

T_j 表示輸出層的第 j 個單元目標輸出值

A_j 表示輸出層的第 j 個單元推論輸出值

2.3.2 LSTM

LSTM 是遞歸神經網路(RNN)衍生出來具備記憶單元的模型，是由 Hochreiter & Schmidhuber 於 1997 年所提出[7]。LSTM 主要透過 Sigmoid 激勵函數及點積運算控制 3 層匣門（輸入門、輸出門、遺忘門）的開關，以決定哪些資料能被存進記憶單元。輸入門主要

控輸入值是否流入記憶單元；輸出門則控制經由 Tanh 激勵函數計算後的資料是否應輸出；遺忘門主要目的在於判斷上一時間步的儲存訊息是否要遺忘，或保存於記憶單元中。LSTM 因為具有記憶單元，所以能記錄的資訊比 RNN 長，同時也解決了 RNN 在長期記憶上表現不佳的缺點。因此比 RNN 更常被使用。LSTM 架構運作模式如圖 2 [19]。

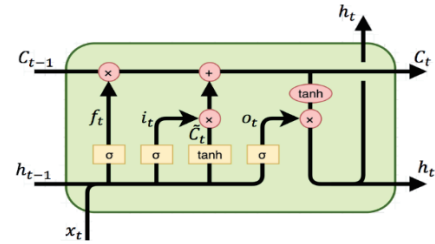


圖 2. LSTM 架構運作模式

LSTM 在 t 時間之表示函式如公式(5)~(11)

$$f_t = \sigma_g(x_t w_f + h_{t-1} U_f + b_f) \quad (5)$$

$$i_t = \sigma_g(x_t w_i + h_{t-1} U_i + b_i) \quad (6)$$

$$o_t = \sigma_g(x_t w_o + h_{t-1} U_o + b_o) \quad (7)$$

$$\tilde{c}_t = \sigma_h(x_t w_c + h_{t-1} U_c + b_c) \quad (8)$$

$$c_t = f_t \times c_{t-1} + i_t \times \tilde{c}_t \quad (9)$$

$$h_t = o_t \times \sigma_h(c_t) \quad (10)$$

$$h_t = o_t \times \sigma_h(c_t) \quad (11)$$

x_t 為時間 t 時所輸入之資料

h_t 為時間 t 時隱藏層之輸出

w_f 、 w_o 、 w_c 、 w_i 、 U_f 、 U_o 、 U_c 、 U_i 為 權重函數

b_f 、 b_o 、 b_c 、 b_i 為偏移參數

σ_g 為 sigmoid 函數、 σ_h 為 tanh 函數

f_t 、 i_t 、 o_t 分別為遺忘、輸入及輸出閥門

2.4 信賴區間與深度學習模型

一般常用的類神經網路模型僅能以點估計值進行預測，無法建立預測值之信賴區間，因此使用者難以衡量預測值的可信度，也造成模型可用範疇的侷限性。為改善此缺點，Garchi-Jurado 等學者於 1995 年提出結合信賴區間與網路模型之方法[20]。首先利用無母數法進行預測，並求出預測值與實際值之殘差，

接著利用自回歸移動平均模型(Autoregressive Integrated Moving Average model, ARIMA)對殘差值進行預測,將此殘差預測值與原無母數法所得預測值進行相加,可得最終預測結果。過程中可將網路模型結合 ARIMA 所產生之信賴區間,進而發展出整體模型之信賴區間。蔡裕春[21]亦曾以 ARIMA 輔助 BPN 進行信賴區間之建構,並以台灣營造工程物價指數的預測為驗證,結果顯示 90%及 95%預測信賴區間,可成功包含幾乎所有的實際資料。Chen & Lin [18]也提出模糊區間架構的概念來改善 BPN 單點預測的問題。該模糊區間架構是以高斯隸屬函數(membership function)為特徵(參數值 $\{c, \sigma\}$, 其中 c 為高斯隸屬函數的中心值; σ 為隸屬函數的寬度), 函式如下:

$$f(x; c, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}} \quad (12)$$

據此, Chen & Lin 以模糊區間架構應用於 BPN 動態預測模型,成功的保留類神經網路之非線性預測特性。實證結果顯示,此區間式類神經網路能有效的應用於資產/價格報酬的動態風險值評價,並改良傳統類神經網路之點估計缺點,其概念圖如圖 3 [18]。

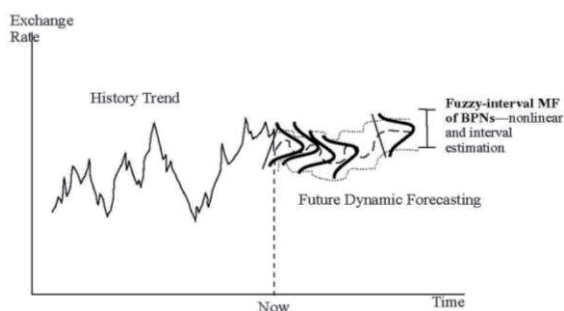


圖 3. 信賴區間應用於 BPN 模型概念圖[18]

2.5 模型評估指標

本研究訓練模型測量結果的評估指標分別為平均誤差平方根 RMSE (Root Mean Squared Error)、平均絕對百分比誤差 MAPE (Mean absolute percentage error)、平均絕對誤差 MAE (Mean Absolute Error), 如(13)~(15)。公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2} \quad (13)$$

$$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\hat{Y}_i - Y_i}{Y_i} \right| \quad (14)$$

$$MAE = \frac{\sum |\hat{Y}_i - Y_i|}{n} \quad (15)$$

Y_i : 實際值、 $\hat{Y}_i$: 網路預測輸出值

n : 測試範例個數

上述指標中 RMSE 常用來評估模型準確度,但由於它與數值範圍有關,因此只適用於比較不同模型間特定變數的預測誤差。而 MAPE 則為相對的數值,可用來判斷預估值與實際值之間的差異程度,不受數值的單位影響,一般來說 MAPE%值<10 可認為具高準確度;介於 10~20 間,被認為是良好準確度;介於 20~50 間,被認為是合理準確度;其值大於 50,被認為是不準確的[22]。而 MAE 則代表目標值和預測值之差的絕對值之和。只衡量了預測值誤差的平均長度,而不考慮方向,取值範圍是從 0 到正無窮。此外,本研究在評量區間式 LSTM 時,亦利用預測準確率 (Accuracy, ACC)進行評估,評量模型之準確預測比率,公式如(16)。

$$ACC = \frac{t}{n} \quad (16)$$

t : 準確預測個數、 n : 測試範例個數

三、實證分析

如前所述, MODEL1 為 BPN 模型架構之建立、MODEL2 為 LSTM 模型架構,而 MODEL3 則是區間式 LSTM(M_LSTM)之模型建構。本研究訓練範例與測試範例個數如表 3 所示:

表 3. 本研究訓練範例與測試範例個數(7:3)

模型	範例總數	訓練數	測試數
BPN(MODEL1) LSTM(MODEL2) M_LSTM(MODEL3)	513	359	154

3.1 BPN 實證分析

Zhang[23]指出最常應用的神經網路層數為 1 層或 2 層，而通常 1 層隱藏層就可以達到高度有效預測度。Yoon et al.[24]實證研究發現 2 層隱藏層預測時間序列有較佳的預測能力。因此，本研究將以 1 至 2 層隱藏層做為參數測試。

此外，關於隱藏層節點數之決定，Davies[25]表示只能透過試誤法(trial-and-error approach)找出各隱藏層之適合節點數；而 Lawrence 與 Petterson [26]則建議各隱藏層節點數應該依據輸入變數與輸出變數個數總和之 50%至 75%來測試。因此本研究擬以 14 個輸入變數與 1 個輸出變數總和為 15 的 50%至 75%，也就是大約 7 至 12 個之間節點數以試誤法做參數測試。

至於 Freeman 與 Skapura [27]則說明類神經網路的學習速率應該小於 1 會達到較佳學習狀態與收斂效果。因此本研究擬採 0.5 做學習率測試，並將訓練週期設定 1,000 次或 RMSE 已達收斂條件則結束 BPN 之學習。本研究以 Matlab 2021 版為實證執行軟體，相關 BPN 參數設定列表如表 4：

表 4. 本研究 BPN 參數設定值

參數名稱	設定值
隱藏層層數	1 或 2 層
各隱藏層節點數	1 層：7、10、12 2 層：7*7、7*10、7*12、10*10、10*12
訓練週期	1000
學習速率	0.5
其他參數	MATLAB 2021 版軟體預設值

茲將表 4 參數做為 BPN 實證訓練與測試執行，以 RMSE、MAE、MAPE 指標評估，其相關比較結果如表 5 所示：

表 5. BPN 實證執行績效

隱藏層參數	樣本	RMSE	MAE	MAPE
7	訓練	1.5897	1.1950	1.3756%
	測試	1.2894	0.9495	1.4010%
10	訓練	1.6292	1.1643	1.3060%
	測試	1.1983	0.8613	1.2709%
12	訓練	1.4818	1.0725	1.3371%
	測試	1.1131	0.8303	1.2252%
7*7	訓練	1.6219	1.1939	1.3753%
	測試	1.2765	0.9636	1.4219%
7*10	訓練	1.7902	1.4344	1.4509%
	測試	1.4707	1.2094	1.7845%
7*12	訓練	1.7450	1.2701	1.3992%
	測試	1.3223	1.0784	1.5912%
10*10	訓練	1.6006	1.1983	1.3767%
	測試	1.2500	0.9607	1.4176%
10*12	訓練	1.6787	1.2231	1.3844%
	測試	1.3392	1.0107	1.4914%

經由試誤法測試發現，本研究 BPN 較佳之參數為隱藏層層數 1 層、12 個節點數組合。

3.2 LSTM 實證分析

本研究 LSTM 模型之實證亦以 Matlab2021 軟體執行，其參數調整方法目前並沒有一個比較絕對的規範來設定，唯透過「試誤法」才能找出適合的學習相關參數[28]，故本研究 LSTM 參數之實驗調整設定列表如表 6 所示：

表 6. 本研究 LSTM 參數設定值

參數名稱	設定值
隱藏層層數	2 層至 3 層測試
各隱藏層節點數	第 1 層：60 至 256 測試
	第 2 層：60 至 256 測試
	第 3 層：60 至 256 測試
最大迭代次數	100 至 1000 測試
隱藏層權重丟失率	0.2~0.5 測試
初始學習速率	0.005 至 0.01 測試
梯度門檻值	1
學習率衰落因子	0.2
其他參數	MATLAB 2021 版軟體預設值

歸納許多文獻之參數，本研究擬以表 7 之參數值做試誤法檢測 [29][30][31][32]：

表 7. 本研究 LSTM 試誤法參數列表

模型	隱藏層	權重 丟失值	迭代 次數	學習 率
LSTM1	60*180*60	0.2/0.3/0.2	300	0.005
LSTM2	128*128*128	0.2/0.2/0.2	100	0.001
LSTM3	128*256*64	0.3/0.3/0.3	300	0.005
LSTM4	256*256*64	0.5/0.5/0.5	1000	0.01
LSTM5	128*128	0.2/0.2	300	0.005
LSTM6	60*180	0.2/0.2	100	0.001
LSTM7	128*256	0.3/0.3	1000	0.005
LSTM8	180*180	0.5/0.5	100	0.01

經由 MATLAB 實證執行本研究 LSTM 模型，可得知下列評估結果：

表 8. LSTM 各組實證執行績效

樣本		RMSE	MAE	MAPE
LSTM1	訓練	0.6889	0.5315	0.8023%
	測試	1.5719	1.2889	1.9601%
LSTM2	訓練	4.1600	3.0730	4.7603%
	測試	4.7713	3.4633	5.5231%

LSTM3	訓練	1.9659	1.6023	2.4702%
	測試	2.3904	1.8512	2.9331%
LSTM4	訓練	4.5501	3.2104	4.9538%
	測試	4.8382	3.4790	5.5118%
LSTM5	訓練	0.6200	0.4804	0.7268%
	測試	0.7646	0.5811	0.8989%
LSTM6	訓練	2.2968	1.7034	2.6558%
	測試	2.7422	1.9105	3.0798%
LSTM7	訓練	0.4009	0.3088	0.4637%
	測試	0.6486	0.4880	0.7603%
LSTM8	訓練	1.2653	0.9750	1.5053%
	測試	1.5645	1.1268	1.7844%

實證執行結果如表 8 所示，可得知本研究最佳 LSTM 參數設定值為第 7 組模型，整體 RSME、MAE、MAPE 值皆優於本研究 BPN 試誤法測試參數之模型。

圖 4、圖 5 與圖 6 則為第 7 組最佳參數組合之中 LSTM 學習收斂圖、訓練與測試實際值與預測值之曲線圖。由圖 5 與圖 6 得知，訓練樣本與測試樣本實際值和預測值之 RMSE、MAPE 與 MAE 誤差值符合收斂標準，其預測結果亦大致皆貼近實際值。

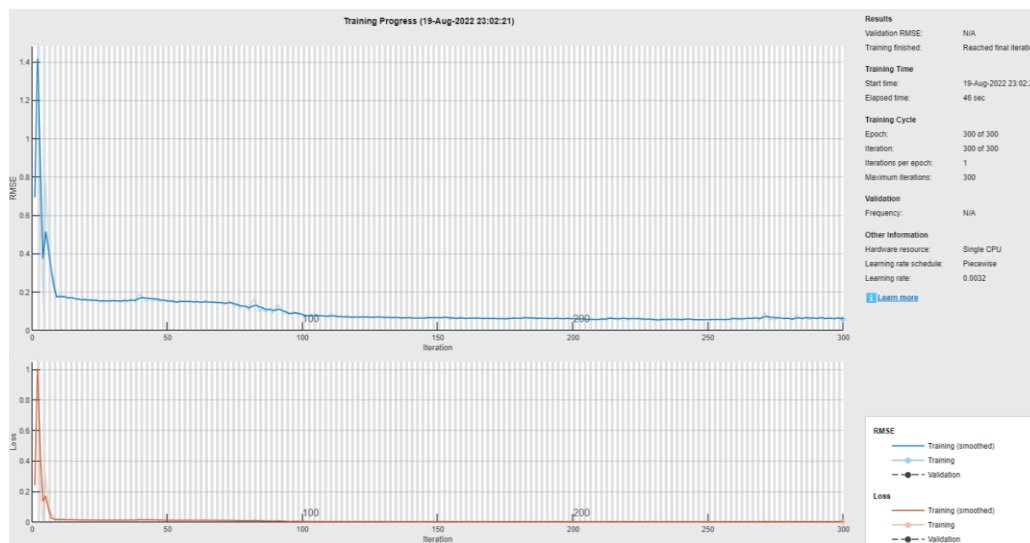


圖 4. LSTM 學習收斂圖(最佳參數組)

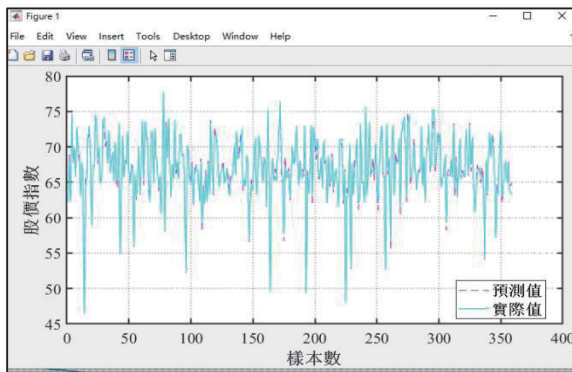


圖 5. LSTM 訓練樣本與預測值(最佳參數組)

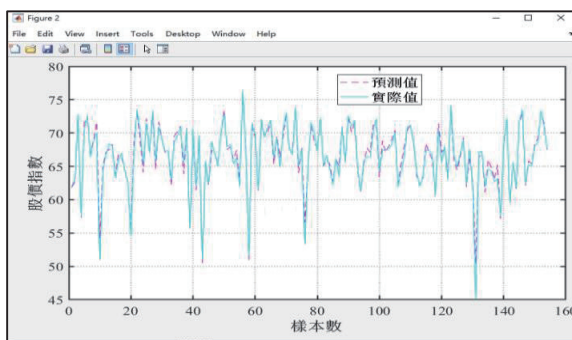


圖 6. LSTM 測試樣本與預測值(最佳參數組)

3.3 區間式 LSTM 實證分析

為了改良傳統點估計預測之不足，本研究結合區間估計改良 LSTM 模型之預測準確度，並將 MODEL1(BPN 模型)、MODEL2(LSTM 模型)與 MODEL3(改良後之區間式 LSTM，

M_LSTM)三者比較其猜中準確度。經由實證資料之實際值與預測值的比對後，MODEL1 與 MODEL2 之預測準確率為 0%，即使預測值與實際值誤差甚小，仍符合統計學中所謂「單點無機率」之論證；另外，MODEL3 之區間式 LSTM 係假設區間估計服從常態分配，分別以信賴區間為 99%、95%與 68%取 2.58、1.96 與 1 倍週(5 個交易日)標準差延展，其預測結果如表 9 所示：

表 9. 區間式 LSTM 之預測準確率 Acc 比較

Acc 值	信賴水準區間		
	99%	95%	68%
訓練範例	99.72%	99.44%	97.18%
測試範例	100%	99.33%	94.00%

由表 9 得知，區間式 LSTM 模型另以區間延伸合理預測範圍，較符合時間序列預測分析特質，表 9 亦顯示本次抽樣樣本之分佈特質應該較常態分佈為狹窄，樣本資料分佈較為集中，並以正負 1 倍週標準差(68%信賴區間)延展區間之估計即可達到有效之預測準確度，故區間式 LSTM 模型優於傳統 BPN 與 LSTM 模型之預測，較符合實際指數之預測所需。

有關本研究之區間式 LSTM 實際值與區間估計之訓練與測試樣本圖，以 1 倍週標準差為例，如圖 7 與圖 8 所示：

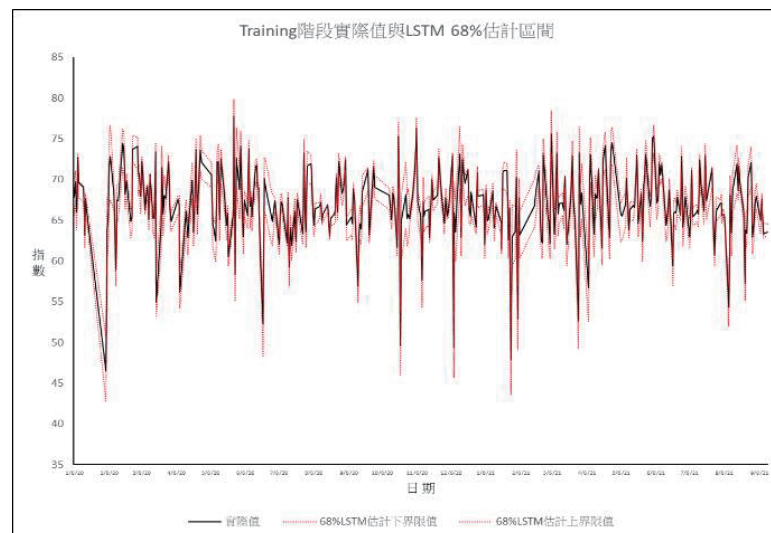


圖 7. 訓練階段區間式 LSTM(實際值與 68%信賴區間)

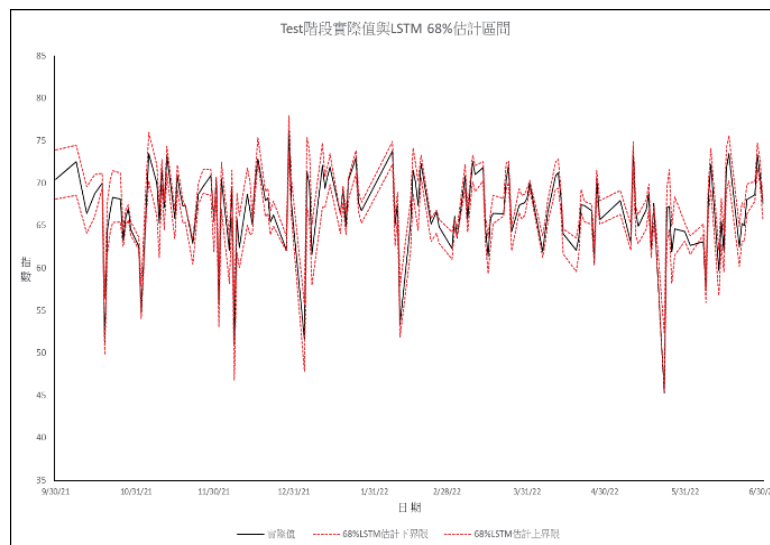


圖 8. 測試階段區間式 LSTM(實際值與 68%信賴區間)

四、結論

本研究旨在以區間估計原理改良傳統 LSTM 模型點估計之不足，並期望提升時間序列預測之能力，經實證驗證後，結果歸納如下：

- (1) 傳統 LSTM 模型與傳統 BPN 模型皆需以試誤法找出較佳參數組合，經文獻建議與試誤後比對，本研究 LSTM 模型相關誤差值皆較 BPN 模型為低，其結果亦顯示 LSTM 模型較 BPN 模型較適合預測 Covid-19 期間之生技醫療類指數時序資料。
- (2) 雖然受 Covid-19 疫情衝擊，但台灣生技指數之波動並未像服務業或觀光產業等有太大衝擊，呈現平穩狀況，故取樣期間雖然較短，但仍能被深度學習模式有效學習。
- (3) 如(2)所述，因所取樣之疫情區間指數波動較為平穩，經實證發現採 68%信賴水準之區間式 LSTM 模型估計，預測準確度即能有效與合理作出預測。
- (4) 本研究所提出之改良式區間 LSTM 對於時間序列之預測準確度非常高，未來建議可套用至我國國軍 Covid-19 染疫人數之時間序列預測，應可提高國軍在防控策略措施的有效性。

參考文獻

- [1] Lim, B., and Zohren, S., "Time Series Forecasting with Deep Learning: A Survey," Philosophical Trans. of the Royal Society No. 379, pp. 202-209, 2021.
- [2] 張家齊，"基於深度學習與使用技術分析跟頻率分解的股票價格預測"，國立臺中科技大學資訊工程系碩士論文，台中市，2022。
- [3] Bengio, Y., Courville, A. C., and Vincent, P., "Representation Learning: A Review and New Perspectives," IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 35, pp. 1798-1828, 2013.
- [4] Rumelhart, D. E., and McClelland J. L., "Parallel distributed processing, explorations in the microstructure of cognition," in Vol. 1: foundations, Cambridge, MA, MIT Press, 1986.
- [5] Qu, Bo, "The Research of the Effect and Forecast of Meteorological Factors on Epidemic Situation of Common Infectious Diseases in Drought Area, Master's Theses of China Medical University, TaiChung,

- 2003.
- [6] 粘鎮撰，應用資料採礦與果蠅演算法建構財務危機預警模型-以台灣上市櫃公司為例，東吳大學經濟學系碩士論文，台北市，2011。
- [7] Hochreiter, S. and Schmidhuber, J., "Long Short-Term Memory," *Neural Computation*, Vol. 9, pp. 1735-1780, 1997.
- [8] Yudistira, N., "COVID-19 growth prediction using multivariate long short term memory," *International Journal of Computer Science*, Vol. 47, no. 4, pp. 829-837, 2020.
- [9] Liu, S., Liao, G., and Ding, Y., "Stock transaction prediction modeling and analysis based on LSTM," *Proc. IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, Wuhan, pp. 2787-2790, 2018.
- [10] 李聰聰，基於 LSTM 模型的股票價格預測研究，大連理工大學碩士論文，遼寧省，2020。
- [11] Zhao, Z., Rao, R., and Tu, S., "Time-Weighted LSTM Model with Redefined Labeling for Stock Trend Prediction," *Proc. IEEE 29th ICTAI*, Boston, pp. 1210-1217, 2017.
- [12] Lowe, D. and Zapart, K., "Point-wise confidence interval estimation by neural networks: A comparative study based on automotive engine calibration," *Neural Computation Application*, Vol. 8, No.1, pp. 77-85, 1999.
- [13] 林茂文，時間數列分析與預測：管理與財經之應用 -Time series analysis and forecasting, 第三版，台北，華泰文化，2006。
- [14] 林煌凱，時間序列能否準確預測股票報酬？-以美、英、法、德、日等五大工業國為例，朝陽科技大學財務金融系碩士論文，台中，2003。
- [15] 蔡佳珍，股價之多變量時間序列變異成份(MTV)分析，國立中興大學經濟研究所碩士論文，台中，1992。
- [16] Kaiser, H. F., "The Application of Electronic Computers to Factor Analysis," *Educational and Psychological Measurement*, Vol. 20, pp. 141-151, 1960.
- [17] Tabachnick, B. G. and Fidell, L. S., *Using Multivariate Statistics* (3rd ed.), Harper Collins, NY, 1996.
- [18] Chen, A. P., Lin, H. Y., "Exchange rates forecasting using a hybrid fuzzy and neural network model," *Pro. IEEE Symposium on Computational Intelligence and Data Mining (CIDM)*, Honolulu, pp. 758-763, 2007.
- [19] Liu, D. , Wei, A., "The Performance of Hybrid Artificial Neural Network Models for Option Pricing during Financial Crises," *Journal of data science: JDS*, Vol. 14, No.1, pp. 1-18, 2022.
- [20] Garcia-Jurado, I., Gonzalez-Manteiga, W., Prada-Sanchez, J. M., Febrero-Bande, M., Cao, R., "Predicting using Box-Jenkins, nonparametric and boot-strap techniques," *Technometrics*, Vol. 37, pp. 303-310, 1995.
- [21] 蔡裕春，台灣地區營造工程物價指數預測之研究—以類神經網路與 ARIMA 模式，輔仁大學應用統計學研究所碩士論文，新北市，2001。
- [22] Lewis, E.B., "Control of body segment differentiation in drosophila by the bithorax genecomplex," *Embryonic Development*, Vol. 1, pp. 383-417, 1982.
- [23] Zhang, G., Patuwo, B. E. and Hu, M. Y., "Forecasting with Artificial Neural Networks: the State of the Art," *International of Journal Forecasting*, Vol. 14, pp. 35-62, 1998.
- [24] Yoon, Y., Swales, G., and Margavio, T. M., "A comparison of discriminant analysis versus artificial neural networks". *J. Oper. Res. Soc.*, Vol. 44, No.1, pp. 51-60.1993.

- [25] Davies P. C., “Design Issues in Neural Network Development,” *Neurovest Journal*, Vol. 5, pp. 21-25, 1994.
- [26] Lawrence, M. and Pettersen, A., Getting Started with Brain Maker: Neural Network Simulation Software User's Guide and Reference Manual/Introduction to Neural Networks and Disk, California Scientific Software, 1991.
- [27] Freeman, J. A. and Skapura, D. M., *Neural Networks Algorithms, Applications, and Programming Techniques*, Addison-Wesley, Michigan, 1992.
- [28] Chen, Z. H., Chen, Y. L., Chang, W. Y. and Tsai, C. W., “A Hybrid Classification Algorithm for Intrusion Detection System,” *Communications of the CCISA*, Vol. 25, No.1, pp. 14-27, 2019.
- [29] 林逸青，以深度學習建構股價預測模型：以台灣股票市場為例，國立台中科技大學財務金融研究所碩士論文，台中，2019。
- [30] 陳軾杰，利用 LSTM 模型和外資買賣超進行短期股價預測，輔仁大學金融與國際企業學系金融碩士論文，新北市，2021。
- [31] 劉祖欣，以決策樹、邏輯斯迴歸及 LSTM 預測股價漲跌之比較-台灣 50(0050)、金融股(0055)、科技股(0052)為例，東吳大學巨量資料管理學院碩士學位學程碩士論文，台北市，2021。
- [32] 王豐銓，應用 LSTM 模型進行台灣股市的股價預測研究以產業龍頭股為標的，國立台北教育大學資訊科學系碩士論文，台北市，2020。

可擴充主從式 IOT 溫控延長線

謝哲人¹ 李俊德^{1*} 朱奐政² 梁瑋傑³

¹正修科技大學電競科技管理系

²正修科技大學機械系

³正修科技大學企業管理系

摘 要

目前全世界的用電量迅速增長，對於能源需求量如此之大，在過去的幾十年中，已經採取了各種措施來改善設備和系統設計，以提高生產與傳輸效率並降低功耗。為了解決電源短缺問題，本研究提出一種新型的溫控延長線，設有降溫與升溫二種工作模式，透過溫度感測元件精確地適時開啟或關閉電源，藉此免除不必要的耗電，達到「節能」之目的。本研究可透過物聯網（IoT）的微控制器（microcontrollers）和 Internet 來直接對插座開啟或關閉電源，更可藉由 Wi-Fi 2.4G 無線傳輸將即時溫度資訊、開關狀態及主從模式等控制及蒐集資料上傳至雲端，並由終端設備進行參數設定，可統一設定大型場域內每一個插座的溫度設定，不再浪費人力分別一一去現場設定。以一般工業電扇為例，若將其改為本溫控延長線來驅動，且假設每小時有 900 秒工業電扇處於啟動狀態時，經過本研究之計算，其省電率也還有 74.75%。

關鍵詞：節能、延長線、溫控、物聯網、智慧家庭

An Expandable Modular Internet of Things (IoT)-Based Temperature Control Power Extender

Che Jen Hsieh¹, Chun-Te Lee^{1*}, Huan-Mei Chu², and Wei-Chieh Liang³

¹ Department of E-Sport Management, Cheng-Shiu University

² Department of Mechanical Engineering, Cheng-Shiu University

³ Department of Business Administration, Cheng-Shiu University

ABSTRACT

Today, the world's electricity consumption is growing rapidly, and therefore energy demand is also increasing. In the past few decades, various measures have been taken to improve equipment and system design to increase production and transmission efficiency and reduce power consumption. This article proposes a novel Internet of Things (IoT)-based temperature control power extender with two working modes of cooling and heating to solve power shortage. The power is turned on or off accurately and timely through the temperature sensing element, thereby avoiding unnecessary power consumption to achieve the purpose of energy-saving. This work can directly power on or off the power extender through the Internet. It can also use a 2.4G Wi-Fi wireless transmission to transmit real-time temperature information, switch status and master-slave mode, etc. Related data can be controlled, collected, and uploaded to the cloud. Each proposed power extender's temperature setting in a large-scale field can be set uniformly, and no staffing is wasted to set the temperature separately.

Taking a general industrial electric fan as an example, if it is changed to this temperature control extension cable to drive, and assuming that the industrial electric fan is activated for 900 seconds per hour, its power-saving rate is 74.75%.

Keywords: Energy Saving; Power Extender; Temperature Control; Internet of Things (IoT); Smart Home.

一、前言

全球暖化日益嚴重，世界各地氣候異常接連發生，抑制全球溫室效應之氣體排放的京都議定書正式生效後，能源技術創新與節約能源將成為二氧化碳減量的有效策略。由於全球暖化的影響範圍逐漸擴大、生態環境過於快速的變遷，讓全球各地開始產生許多異於往常的生態危機，因此節能減碳這件事情，是所有政府組織以及非政府組織十分重視的[1]。

目前全世界的住宅用電迅速增長，對於能源需求量如此之大，人們對更高效的裝置越來越感興趣，尤其是在油價格翻倍導致電費率上升後[2]。人口的增長帶來了自然資源缺乏的問題，諸如電力之類的人造資源無法應付人口快速增長的需求，在過去的幾十年中，已經採取了各種措施來改善設備和系統設計，以提高生產與傳輸效率並降低功耗[3]。

許多智能機器和設備都致力於降低功耗，可是機器和設備只要是掛上「智能」，其價格通常是昂貴的，且現有的機器和設備都沒有智能節電的功能，於是智能型的 Internet of Things(IoT)插座便因此產生，舊的機器和設備可以透過該插座監控其耗能狀況，也可以透過手機從遠程控制其開關，所以只要舊的機器和設備接上智能插座，便可立即變為智能型的機器和設備。

二、相關研究

許多與智能插座相關的研究陸續被討論，Musleh 等[4]建立主從架構智能插座，該插座使用電壓和電流感應電路進行智能插座的功率測量，主機通過 WiFi 連接到 Internet，並通過網狀配置中的 ZigBee 協議與從機進行通信。但是對於有多個插孔的插座而言，整個電路將不得不重複多次，這將增加大量成本。

Thongkhao 等[5]提出了一單插座解決方案，它是利用 WiFi 來作通信。該文章著重於插座的詳細硬體設計，這超出了本研究的範圍。

Patil 等[6]開發了 Android 應用程序控制的電源插座，該插座藉由 GPRS(General Packet Radio Service)與電源插座通信。除了連接設備的繼電器外，ARM 7 控制器還連接到各種傳感器，如溫度、氣體、LDR 和 PIR。由於他們的模型使用 GPRS，因此實際上每月會有額外的通信費用產生，且其成本會依據安裝插座的數量而增加。在[7]中，低功耗藍牙 (Bluetooth Low Energy, BLE) 智能插頭是一種單插座解決方案（每個插座一個無線模組），其中低功耗藍牙用於插座通信，該插座由智能手機控制。

Lin 等文獻[8]提出了一種智能插座，稱為 MorSocket，用於智能校園部署，該系統允許用戶使用一個控制頁面控制多個單獨的插座，該插座可以使用智能手機透過 Wi-Fi 或藍牙來控制。這些插槽共享相同的無線通信模組，因此 MorSocket 的硬體成本低於單一插座解決方案。

Ramavarapu 等文獻[9]為智能電源插座的實現提供了有價值的範例，他們的產品 'Belkin WeMo smart Plus' 是透過具有 Wi-Fi 的 Intel Edison 開發板來進行控制的，實時定價信息(Realtime pricing information)用來啟用或停用插座的電源，在價格較低的時段內電源插座將被打開（通常用於高負載），透過此方法來達成節省成本之目的。研究[10]中為能源管理提供了類似的分析。

新興的物聯網 (IoT) 技術通常採用無線網路來傳播命令並接收響應[11]，但是，如果大量節點同時通過無線網路進行響應，則可能會發生嚴重的衝突-這種現象眾所周知為 "ACK/feedback - implosion" 問題[12]。此外，如果節點在接收到命令後立即做出響應，則響

應也將干擾命令的分發，另一方面，如果節點響應緩慢（例如，等待一段時間以使命令分發完成），則響應將被延遲，從而增加了系統的總體延遲。

為了改善可靠性和/或等待時間，有許多現有的研究試圖減輕低功率無線網絡中的擁塞。但是，它們中的大多數只集中在問題的一側：有的只試圖改善向下的命令傳播階段[13-18]，有的則專注於改善向上的響應收集階段[19-24]。由於命令階段數據包和響應階段數據包不僅會自己發生衝突，而且還會相互衝突，因此僅集中在一側不足以提供足夠的性能；對於實際的物聯網應用，必須將它們“聯合”考慮[11]。

在此本研究提出一種新型的溫控延長線--可擴充主從式 IOT 溫控延長線，設有降溫與升溫二種工作模式，透過溫度感測元件精確地適時開啟或關閉電源，藉此免除不必要的耗電，另外，可藉由 Wi-Fi 2.4G 無線傳輸將即時溫度資訊、開關狀態及主從模式等控制及蒐集資料上傳至雲端，並由終端設備進行手動、半自動及全自動參數設定，可達到節能及多元應用。因此研究規劃各功能為模組化設計，經由連接板串聯起各功能模組，進而達到低成本、高自由度及小型化等多種優勢。

本研究最主要的目的便是「節能」，在許多地區夏季氣候炎熱難耐，人們通常會使用冷氣機來降低室內溫度，但冷氣機耗電成本高，故有許多人只將冷氣機開啟 2-3 小時，之後便將冷氣機關閉(利用定時功能)，但此時室內溫度會慢慢升高，可能不到 30 分鐘人就會被熱醒，必須起身開啟電風扇散熱，如此睡眠會被中斷，長時間下來會導致睡眠品質不良。此時若利用本新型的溫控延長線來輔助，便可大大改善此情況，在降溫模式中，當溫度升高到超過所設定的溫度時，溫控延長線便會開始供應電源給連接到插座的降溫設備（如電風扇），此時開始進行降溫，當溫度太低時，溫控延長線便會停止供應電源，以免浪費電力。

如此一來，人們便可將冷氣機與耗電量低的電風扇搭配使用，不用整晚都用耗電量大的冷氣機來降溫，只要一開始將冷氣機開啟 2-3 小時，之後用溫控延長線來開啟電風扇散熱，

如圖 1，便可輕易達到室內降溫與節約能源之目的。當然也可在冷氣機開啟時，便同時用溫控延長線來開啟電風扇，一同降低室內溫度，這是因為有專家研究發現，設定之溫度每下降一度，大約須多耗費 2~3% 電力，故建議於使用冷氣機的同時，另外加開耗電力低的電風扇，當室內溫度已到達足夠冷度時，溫控延長線便會自動關閉電風扇，不會造成電力的不當浪費。

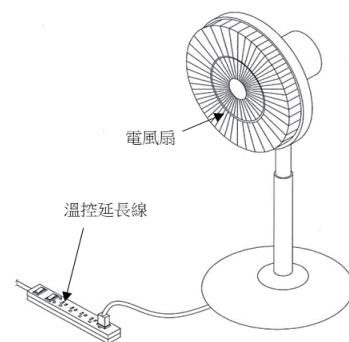


圖 1. 電風扇連接溫控延長線示意圖

本研究也可用在牲畜的養殖方面，例如，一般的豬隻養殖場對溫度控制之要求非常高，在環境溫度超過 33℃ 且持續時間較長的情況下，容易發生熱應激 (Heat Stress) 反應；如不採取通風降溫措施，改善環境溫度和濕度，豬的健康就會受到侵害，從而影響養殖效益。因此，一到炎熱的夏季，豬隻養殖場即面臨高溫高濕不利氣候的挑戰，但基於電費的考量，養殖場不可能安裝冷氣空調來控制溫度，一般僅會用大型工業風扇來降溫，但用大型工業風扇降溫其電費也是非常可觀，再者，工業風扇僅能降溫，若深夜溫度大幅降低時，反而又會太冷造成部分豬隻之不適。此時若將工業風扇接在溫控延長線上，則當養殖場溫度太高時，工業風扇便會自動啟動，當溫度太低時，工業風扇便會自動關閉。

本研究除了可應用於居住環境與牲畜的養殖降溫外，也可用於戶外機器設備之降溫，Benoit-Cattin et. al [25] 評估長期高溫對 CPU-Based Edge Device 效能的影響，該實驗證明散熱對 CPU-Based Edge Device 效能之提升有很大之幫助。故若將溫控延長線應用於戶外機器設備之降溫，是一個不錯的節能選擇，

因為通常白天大太陽時，降溫的需求是非常高的，而夜晚溫度較低，比較不需要額外的降溫。

相反地，本新型的溫控延長線也可提供升溫模式，當溫度降低到低於所設定的溫度時，溫控延長線便會開始供應電源給連接到插座的升溫設備（如電暖器），此時開始進行升溫，當溫度太高時，溫控延長線便會停止供應電源。老人或小孩在寒冷的冬天時，便需要溫控延長線的升溫模式，而在養殖小雞或小豬時，也是非常需要此功能。

三、可擴充主從式 IOT 溫控延長線

本新型的溫控延長線可透過溫度感測元件精確地適時開啟或關閉電源，也可通過物聯網（IoT）的微控制器（microcontrollers）和 Internet 來直接對插座開啟或關閉電源，更可透過 Wi-Fi 2.4G 無線傳輸模組，統一設定大型場域內每一個插座的溫度設定。

3.1 系統流程與架構

本新型的溫控延長線之系統流程圖如圖 2 所示：

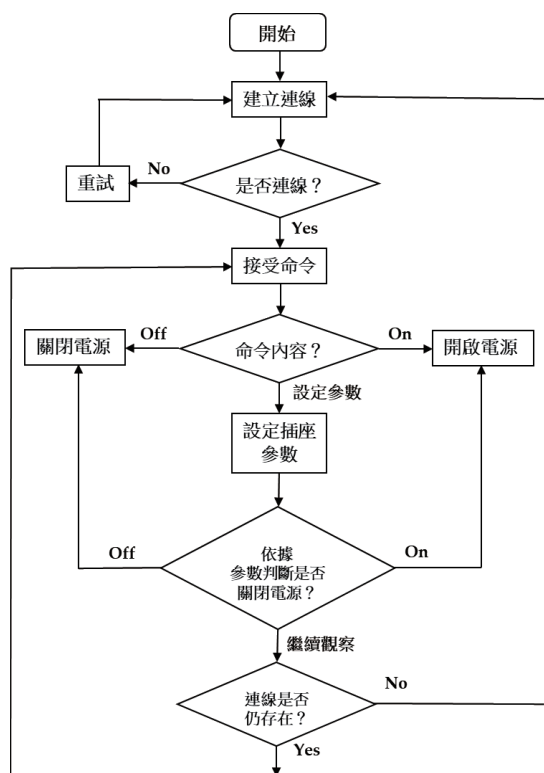


圖 2. 系統流程圖

系統首先與雲伺服器(Cloud Server)建立連接，在沒有連接的情況下，系統會反覆嘗試建立連線，建立連線後，系統將等待來自應用程式的命令，依據命令的內容將插座的電源開啟或關閉，或是設定插座的升溫/降溫模式、高溫值(High Temperature Value)、低溫值(Low Temperature Value)，然後，系統檢查連線是否持續，並重複整個過程。系統架構圖如圖 3：

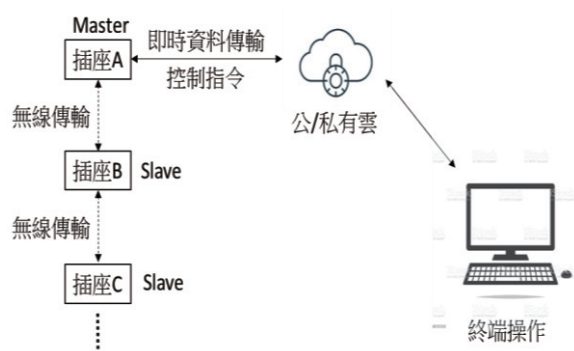


圖 3. 系統架構圖

溫控延長線可藉由 Wi-Fi 2.4G 無線傳輸將即時溫度資訊、開關狀態及主從模式等控制及蒐集資料上傳至雲端，並由終端設備進行手動、半自動及全自動參數設定，終端設備可以是手機、平板或是電腦都可以，當 Master 插座 A 接收到雲端上面的命令資訊後，會立即藉由 Wi-Fi 2.4G 無線傳輸將命令轉傳至其他 slave 插座。

3.2 作品介紹

單一插座之方塊圖如圖 4 所示：

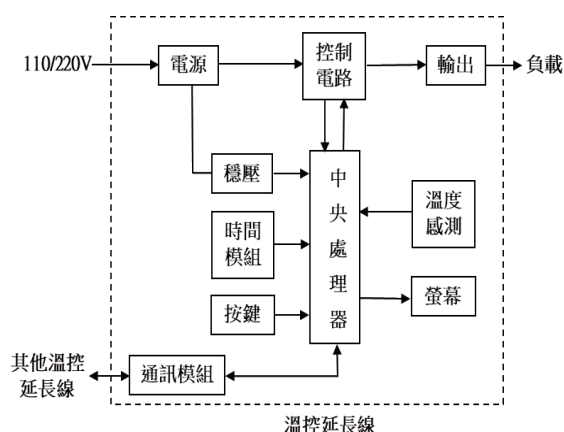


圖 4. 單一插座之方塊圖

電源供應模組為 110/220V 通用電壓，中央處理器 (Microcontroller Unit,MCU) 依據所設定的溫度資訊以及目前溫度，下指令給控制電路，決定插座是否要供電至輸出端，其判斷是否供電之原則如表 1。而通訊模組是 Wi-Fi 2.4G 無線傳輸模組，可負責與雲端的資料傳輸與插座間彼此的傳輸。

表 1. LED 參數的預設值與調整範圍

插座狀態 工作模式	通電狀態	斷電狀態
降溫模式	目前溫度高於 Max 高溫值時，需啟動降溫設備(如電風扇)	目前溫度低於 Min 低溫值時，此時不需再降溫了
升溫模式	目前溫度低於 Min 低溫值時，需啟動升溫設備(如電暖器)	目前溫度高於 Max 高溫值時，此時不需再升溫了

在本新型的溫控延長線中高溫值標為 Max，低溫值標為 Min，在降溫模式中，當溫度升高到超過所設定的高溫值時，溫控延長線便會供應電源給連接到插座的降溫設備，此時便會對目標物開始進行降溫，當溫度低於所設定的低溫值時，溫控延長線便會停止供應電源。相反地，在升溫模式中，當溫度降低到低於所設定的低溫值時，溫控延長線便會供應電源給連接到插座的升溫設備，此時便會對目標物開始進行升溫，當溫度高於所設定的高溫值時，溫控延長線便會停止供應電源。完成模型如圖 5 所示：



圖 5. 可擴充主從式 IOT 溫控延長線完成圖

上圖中，設定面板可設定插座的升溫/降溫模式、高溫值、低溫值等資訊，其中  為溫度設定鈕， 與  則是增加或減少溫度。以圖

6 為例，其目前設為「降溫模式」，高溫值 26°C，低溫值 24°C，目前溫度 20.6°C，若溫度升高至 26°C 時，延長線的插座便會供電給負載(如電風扇)，當溫度降至 24°C 時，延長線的插座便會停止供電(斷電)。



圖 6. 延長線設為「降溫模式」之狀態

而圖 7 所顯示的是「升溫模式」，高溫值 24°C，低溫值 21°C，目前溫度 20.7°C，若溫度低於 21°C 時(目前便是低於 21°C)，延長線的插座便會供電給負載(如電暖器)，當溫度升高至 24°C 時，延長線的插座便會停止供電(斷電)。

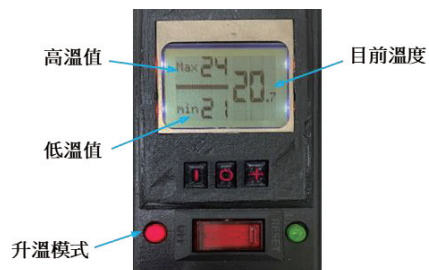


圖 7. 延長線設為「升溫模式」之狀態

除了透過溫控延長線的設定面板來設定外，也可透過手機 APP 來設定插座的各項參數，如圖 8 所示：

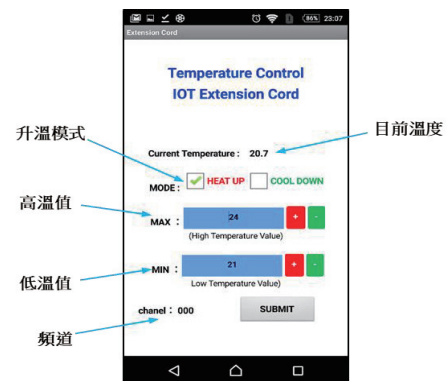


圖 8. APP 設定畫面

上圖中，除了可設定插座的升溫/降溫模式、高溫值、低溫值外，還看到延長線的頻道(Channel)值，這是為了大型養殖場而設計的功能，因為在大型養殖場中，需設定的延長線可能多達數百個，要設定這麼多數量的延長線是一個巨大的工程，故可將頻道值相同之延長線，一起同時設定為相同的參數值，如此可省去非常多的工作。例如，圖 9 的 Master 延長線之頻道設為'000'(Dip Switch 設為'000')，則可藉由 Wi-Fi 2.4G 無線傳輸，將設定之參數轉傳至其他頻道也設為'000'之 slave 插座，至於其他頻道的 slave 插座，則無法接收此設定。

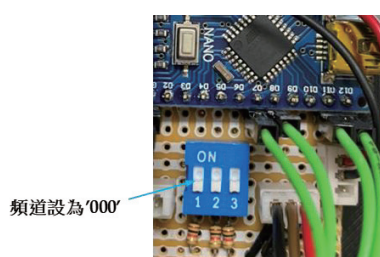


圖 9 頻道設為'000'之延長線

本新型的溫控延長線主要之硬體元件如表 2：

表 2. 主要之硬體元件

NO	名稱	說明
1	Arduino nano 微控制器 (MCU)	附有 ATMELE Chip 的控制器
2	開關盒	85~265V 電源插座
3	繼電器	5V 10A 雙通道中繼模組
4	溫度檢測模組	溫度感測器
5	通訊模組	2.4G Wi-Fi 模組
6	雜項	微動開關、撥碼開關(Dip Switch)、液晶顯示器、電線等

繼電器模組是 5V 10A 兩通道繼電器板，每個通道大約需要 15-20 mA 的驅動器電流，並且可以安全地連接高達 250V 和 10A 的交流電壓以及 30V 和 10A 的直流電壓的負載，該繼電器在大多數控制應用中非常有用，因為它可直接由 PIC、DSP、AVR、Arduino、MCU 等微控制器的 3.3V 或 5V 信號來控制繼電器。

本研究使用的通訊模組為 Wi-Fi 模組，其

傳輸資料的方式一般可分為 MQTT(Message Queuing Telemetry Transport)與 HTTP(Hyper Text Transfer Protocol)二種，而我們採用的是 MQTT 架構，這是因為相較於 HTTP 架構，MQTT 架構在傳輸時可減少功耗，且系統每隔一段時間會與主伺服器進行對時作業，可避免資料傳輸上的缺失或遺漏。故本研究的通訊方面有下列特色：

1. 本研究採取有限元素機架構撰寫程式，幫 false data injection 時設備會自動忽略避免發生錯誤。
2. 本研究有採用時間戳記做為資料認可的判別，故同一時間戳記只會認可一筆資料並且因延遲導致錯誤之資料會被忽略。
3. 因為前兩個問題的解決方式，可避免系統資源被大量占用導致耗盡。

四、節能計算與討論

4.1 消耗電能之計算

在不同環境溫度與所使用的電器功率不同時，計算出的溫控延長線之節能效果是不一樣的，甚至在相同的環境與電器下，溫控延長線所設定的 Max 高溫值、Min 低溫值不同時，所得到的節能效果也不盡相同，例如，在某牲畜的養殖場中，其某一天的溫度落於 280C-230C 之間，若將溫控延長線「Max 高溫值設為 270C、Min 低溫值設為 260C」，與另一組「Max 高溫值設為 280C、Min 低溫值設為 270C」所得到的節能效果絕對是不同的。

在計算有接溫控延長線之電器的消耗電能比較複雜，不像一般電器的消耗電能單純，影響消耗電能因素有：溫度的設定、環境溫度、電器種類……等，但為了方便導出公式，以牲畜養殖場的工業電扇為例，並參考文獻[1]的消耗電能計算方式，來計算使用溫控延長線之工業電扇每小時所消耗之電能，並與未使用溫控延長線之工業電扇來計算其節能率(ESR, Energy-Saving Rate)。

圖 10 為有使用溫控延長線之工業電扇每小時消耗功率曲線，利用此圖來說明如何計算有使用溫控延長線之工業電扇「每小時所消耗之電能」：

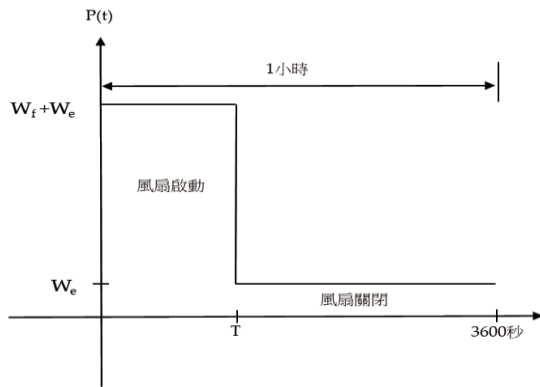


圖 10. 每小時消耗功率曲線

$P(t)$ 用來描繪有使用溫控延長線之工業電扇每小時消耗功率變化，其他參數之意義如下：

T ：平均每小時工業電扇累積啟動之秒數

W_f ：工業電扇啟動時功率，一般工業電扇之功率大都介於 150W~400W

W_e ：本溫控延長線之功率，本產品實際測得之功率為 0.7W

由圖 10 可知，使用新型 LED 感應燈在 1 小時中有 L 秒是維持啟動之狀態(累積總共 L 秒是弱光模式狀態，並不是 0~ L 秒是弱光模式)，而有 $3600-L$ 秒是維持強光模式狀態，故我們用計算面積之方式，便可計算出新型 LED 感應燈每小時所消耗之電能 E_{ph} ：

$$\begin{aligned} E_{ph} &= \left(\int_0^T P(t) dt + \int_T^{3600} P(t) dt \right) J \\ &= \left(\int_0^T (W_f + W_e) dt + \int_T^{3600} W_e dt \right) J \\ &= (T \times (W_f + W_e) + (3600 - T) \times W_e) J \\ &= (T \times W_f + 3600 \times W_e) / 3.6 \times 10^6 \text{ kw} \cdot \text{h} \text{----- (1)} \end{aligned}$$

另外，假設牲畜養殖場中，工業電扇每天開啟 24 小時，一年總共開啟 $24 \times 365 = 8,760$ 小時，故每隻工業電扇每年所消耗之電能 E_{py} 為：

$$E_{py} = \sum E_{ph} = E_{ph} \times 8,760 \text{ kw} \cdot \text{h} \text{----- (2)}$$

相對於未使用溫控延長線之工業電扇，因

為工業電扇永遠都是維持在啟動狀態，故其每隻電扇每年所消耗之電能為 $F_{py} = (W_f/1000) \times 8,760 = 8.76 \times W_f \text{ kw} \cdot \text{h}$ ，若將牲畜養殖場中的一般「工業電扇」改為「使用溫控延長線之工業電扇」，則其節能率(ESR, Energy-Saving Rate)、每隻電扇一年所節省的用電度數 D_{py} 、一年所節省的費用 M_{py} (假設每度電費 4 NT\$)、一年所減少的碳排放量 C_{py} 分別計算如下(每一度電(Kw·h)可產生 0.623 kgCO₂e 的碳排放量)：

$$ESR = ((W_f/1000) - E_{ph}) / (W_f/1000) \times 100\% = (W_f - 1000 \times E_{ph}) / W_f \text{----- (3)}$$

$$D_{py} = F_{py} - E_{py} = 8.76 \times (W_f - 1000 \times E_{ph}) \text{ kw} \cdot \text{h} \text{----- (4)}$$

$$M_{py} = (F_{py} - E_{py}) \text{ kw} \cdot \text{h} \times 4 \text{ dollar} / \text{kw} \cdot \text{h} \text{----- (5)}$$

$$C_{py} = (F_{py} - E_{py}) \text{ kw} \cdot \text{h} \times 0.623 \text{ kgCO}_2\text{e} / \text{kw} \cdot \text{h} \text{---- (6)}$$

4.2 節能率探討

由於使用溫控延長線之工業電扇的節能率(ESR, Energy-Saving Rate)跟平均每小時工業電扇累積啟動之秒數 T 密切相關，本節便是要探討「節能率 ESR」與「平均每小時工業電扇累積啟動之秒數 T 」二者之關係，並計算節能率的最大值與最小值。

首先，由方程式(3)可得知，「節能率」與使用溫控延長線的「工業電扇每小時所消耗之電能 E_{ph} 」成反比，而從方程式(1)可得知， E_{ph} 是與 T 成正比，故由此可知，ESR 與 T 成反比關係，啟動時間越長則節能率越差。

接下來，為了實際算出節能率， W_e 與 W_f 必須帶入實際的功率值， W_e 實際測得之功率為 0.7W，而一般工業電扇之功率大都介於 150W~400W 之間，故取其中間值大約為 280W 來計算方程式(1)。底下，將不同的 T 值帶入 E_{ph} 公式中，以計算出不同 T 值每隻工業電扇(有使用溫控延長線)的 E_{py} 、ESR、 D_{py} 、 M_{py} 、 C_{py} 值為何(與未使用溫控延長線之工業電扇來比較)，下表因篇幅之故僅列出重要部分(T 值間隔 180 秒列出)：

表 3. 電扇的 E_{ph} 、 E_{py} 、ESR、 D_{py} 、 M_{py} 、 C_{py} 值

T (Sec)	E_{ph} (kw·h)	E_{py} (kw·h)	ESR (%)	D_{py} (kw·h)	M_{py} (NT\$)	C_{py} (kgCO ₂ e)
0	0.0007	6.132	99.75%	2446.668	9786.672	1524.274
180	0.0147	128.772	94.75%	2324.028	9296.112	1447.869
360	0.0287	251.412	89.75%	2201.388	8805.552	1371.465
540	0.0427	374.052	84.75%	2078.748	8314.992	1295.060
720	0.0567	496.692	79.75%	1956.108	7824.432	1218.655
900	0.0707	619.332	74.75%	1833.468	7333.872	1142.251
1080	0.0847	741.972	69.75%	1710.828	6843.312	1065.846
1260	0.0987	864.612	64.75%	1588.188	6352.752	989.441
1440	0.1127	987.252	59.75%	1465.548	5862.192	913.036
1620	0.1267	1109.892	54.75%	1342.908	5371.632	836.632
1800	0.1407	1232.532	49.75%	1220.268	4881.072	760.227
1980	0.1547	1355.172	44.75%	1097.628	4390.512	683.822
2160	0.1687	1477.812	39.75%	974.988	3899.952	607.418
2340	0.1827	1600.452	34.75%	852.348	3409.392	531.013
2520	0.1967	1723.092	29.75%	729.708	2918.832	454.608
2700	0.2107	1845.732	24.75%	607.068	2428.272	378.203
2880	0.2247	1968.372	19.75%	484.428	1937.712	301.799
3060	0.2387	2091.012	14.75%	361.788	1447.152	225.394
3240	0.2527	2213.652	9.75%	239.148	956.592	148.989
3420	0.2667	2336.292	4.75%	116.508	466.032	72.584
3600	0.2807	2458.932	-0.25%	-6.132	-24.528	-3.820

由上表可知，節能率(ESR)的最大值 99.75%發生在 $T=0$ 時(表示 1 小時內工業電扇都沒有啟動)，其他的 D_{py} 、 M_{py} 、 C_{py} 值也是如此，節能率隨著 T 值增加呈線性下降，在 $T=3600$ 秒時(表示 1 小時內工業電扇都是啟動狀態)，節能率下降為 -0.25%，不過這是不太可能發生的，因為只要適當地調整溫控延長線的 Max 高溫值、Min 低溫值，這種情形便不會發生。下圖是將節能率(ESR)與 T 值的關係圖畫出：

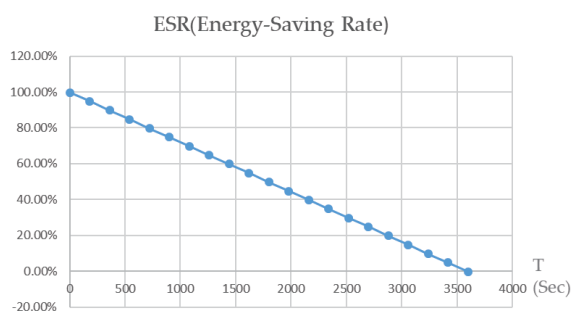


圖 11. ESR(Energy-Saving Rate)與 T 的關係圖

五、結論與檢討

本研究所提出的可擴充主從式 IOT 溫控延長線，設有降溫與升溫二種工作模式，透過溫度感測元件精確地適時開啟或關閉電源，藉此免除不必要的耗電，另外，可藉由 Wi-Fi 2.4G 無線傳輸將即時溫度資訊、開關狀態及主從模式等控制及蒐集資料上傳至雲端，並由終端設備進行參數設定。

實際運用於大型養殖場時可發現，由於養殖場中各種大小豬隻之溫度要求不一，夜晚與白天所需設定的 Max 高溫值、Min 低溫值更是不同，在實務上必須時常調整各區域之溫度設定，所幸本溫控延長線可以先設定 Master 插座的參數後，立即藉由 Wi-Fi 2.4G 無線傳輸將命令轉傳至其他 slave 插座，如此不再浪費人力分別一一去現場設定每一個插座。

許多智能機器和設備都致力於降低功耗，可是機器和設備只要是掛上「智能」，其價格通常是昂貴的，且現有舊型的機器和設備都沒有智能節電的功能，於是智能型的 IOT 插座便因此產生，舊的機器和設備可以透過本溫控延長線便具有智能的功能，也可以透過手機從遠程控制其開關，所以只要舊的機器和設備接上本溫控延長線，便可立即變為智能型的機器和設備。

本研究與其他系統之差異與優點如下：

1. 本研究提出一種新型的溫控延長線，設有降溫與升溫二種工作模式，可有效節能，免除不必要的耗電。
2. 舊的機器和設備接上智能插座，便可立即變為智能型的機器和設備，舊的機器和設備可以透過該插座監控其耗能狀況，也可以透過手機從遠程控制其開關。
3. 延長線可設定不同的頻道(Channel)值，透過物聯網 (IoT) 對頻道值相同之延長線，同時設定為相同的參數值，如此可省去非常多的工作，此為創新的作法。

最後，在未來工作重點中，先前的「節能計算與討論」章節，節能損耗皆是透過假設與公式的計算，容易令人詬病，如果能夠實際佈置一個小型場域，採用實驗組與對照組的方式，經透過實際的檢測而得到節能的實驗數

據，如此作法會更具說服力。

參考文獻

- [1] Lee, C.-T.; Ho, P.-T. Energy-Saving Research on New Type of LED Sensor Lamp with Low-Light Mode. *Electronics* 2020, 9, 1649.
- [2] Lee, C.-T.; Ho, P.-T.; Lee, Y.-Y.; Chen, L.-B. A Research on the 4th Generation Intelligent Energy-Saving Solar Water Heating Tank. *Electronics* 2020, 9, 1941.
- [3] S. Karanchery and N. Rakesh, "Smart Power Socket using Internet of Things," 2020 International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT), Coimbatore, India, 2020, pp. 1060-1064, doi: 10.1109/ICICT48043.2020.9112377.
- [4] A. S. Musleh, M. Debouza and M. Farook, "Design and implementation of smart plug: An Internet of Things (IoT) approach," 2017 International Conference on Electrical and Computing Technologies and Applications (ICECTA), Ras Al Khaimah, 2017, pp. 1-4.
- [5] Y. Thongkhao and W. Pora, "A low-cost Wi-Fi smart plug with on-off and energy metering functions," in *Proc. 13th Int. Conf. Elect. Eng./Electron., Comput., Telecommun. Inf. Technol. (ECTI-CON)*, Jun. 2016, pp. 15.
- [6] K. Patil, J. Metan, T. S. Kumaran and M. Mathapatil, "IoT based power management and controlled socket," 2017 International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer, and Optimization Techniques (ICEECCOT), Mysuru, 2017, pp. 243-247.
- [7] I. Horvat, N. Lukac, R. Pavlovic, and D. Starcevic, "Smart plug solution based on Bluetooth low energy," in *Proc. IEEE 5th Int. Conf. Consum. Electron.-Berlin* (ICCE-Berlin), Sep. 2015, pp. 435-437.
- [8] Y. Lin, C. Huang, L. Chen, G. Sung and C. Yang, "MorSocket: An Expandable IoT-Based Smart Socket System," in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 53123-53132, 2018.
- [9] V. P. Ramavarapu, R. Sowers and R. S. Sreenivas, "A smart power outlet for electric devices that can benefit from Real-Time Pricing," 2017 International Conference on Control, Electronics, Renewable Energy and Communications (ICCREC), Yogyakarta, 2017, pp. 11-17.
- [10] S. Zhai, Z. Wang, X. Yan, and G. He, "Appliance exibility analysis considering user's behavior in home energy management system using smart plugs," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, to be published.
- [11] Park, M.; Paek, J. On-Demand Scheduling of Command and Responses for Low-Power Multihop Wireless Networks. *Sensors* 2021, 21, 738. <https://doi.org/10.3390/s21030738>
- [12] DeLucia, D.; Obraczka, K. Multicast feedback suppression using representatives. In *Proceedings of the INFOCOM '97*, Kobe, Japan, 7-11 April 1997; pp. 463-470.
- [13] Ferrari, F.; Zimmerling, M.; Thiele, L.; Saukh, O. Efficient network flooding and time synchronization with glossy. In *Proceedings of the 10th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks*, Chicago, IL, USA, 12-14 April 2011.
- [14] Bedewy, A. M.; Sun, Y.; Shroff, N.B. Age-optimal information updates in multihop networks. In *Proceedings of the 2017 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*, Aachen, Germany, 25-30 June 2017; pp. 576-580.
- [15] Lu, J.; Whitehouse, K. Flash Flooding: Exploiting the Capture Effect for Rapid Flooding in Wireless Sensor Networks. In

- Proceedings of the IEEE INFOCOM 2009, Rio de Janeiro, Brazil, 19-25 April 2009.
- [16] Ye, F.; Luo, H.; Cheng, J.; Lu, S.; Zhang, L. Hexagonal Two Tier Data Dissemination model for large scale wireless sensor networks. In Proceedings of the 2012 Japan-Egypt Conference on Electronics, Communications and Computers, Alexandria, Egypt, 6-9 March 2012.
- [17] Shu, T.; Liu, W.; Wang, T.; Deng, Q.; Zhao, M.; Xiong, N.N.; Li, X.; Liu, A. Broadcast Based Code Dissemination Scheme for Duty Cycle Based Wireless Sensor Networks. *IEEE Access* 2019, 7, 105258-105286. [CrossRef]
- [18] Jeong, G.; Park, M.; Paek, J. A2-Trickle: Adaptive & Aligned Trickle for Rapid and Reliable Dissemination in Low-Power Wireless Networks. *IEEE Access* 2020, 8, 214374-214382. [CrossRef]
- [19] Gnawali, O.; Fonseca, R.; Jamieson, K.; Moss, D.; Levis, P. Collection Tree Protocol. In Proceedings of the 7th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, Berkeley, CA, USA, 4-6 November 2009; pp. 1-14.
- [20] Winter, T.; Thubert, P.; Brandt, A.; Hui, J.; Kelsey, R.; Levis, P.; Pister, K.; Struik, R.; Vasseur, J.; Alexander, R. RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks. Available online: <https://tools.ietf.org/id/draft-ietf-roll-rpl-13.html> (accessed on 21 January 2021).
- [21] Kim, H.S.; Paek, J.; Bahk, S. QU-RPL: Queue Utilization based RPL for Load Balancing in Large Scale Industrial Applications. In Proceedings of the 2015 12th Annual IEEE International Conference on Sensing, Communication, and Networking (SECON), Seattle, WA, USA, 22-25 June 2015.
- [22] Jeong, S.; Paek, J.; Kim, H.S.; Bahk, S. TESLA: Traffic-aware Elastic Slotframe Adjustment in TSCH Networks. *IEEE Access* 2019, 7, 130468-130483. [CrossRef]
- [23] Kim, H.S.; Paek, J.; Culler, D.E.; Bahk, S. PC-RPL: Joint Control of Routing Topology and Transmission Power in Real Low-Power Lossy Network. *ACM Trans. Sens. Netw.* 2020, 16. [CrossRef]
- [24] Jeong, S.; Park, E.; Woo, D.; Kim, H.S.; Paek, J.; Bahk, S. MAPLE: Mobility Support using Asymmetric Transmit Power in Low-power and Lossy Networks. *J. Commun. Netw.* 2018, 20, 414-424. [CrossRef]
- [25] Benoit-Cattin, T.; Velasco-Montero, D.; Fernández- Berni, J. Impact of Thermal Throttling on Long-Term Visual Inference in a CPU-Based Edge Device. *Electronics* 2020, 9, 2106.