

運用多準則分析於不同反制無人機方法之排序

作者/賀增原

提要

- 一、無人機作為戰場情監偵與攻擊的武器已成為一種趨勢，是故，反制無人機的方法，亦如雨後春筍般出現。因此，本文研究目的，即以評估不同的條件下，何種反制方式能以最低成本獲得最佳攔截成功率。
- 二、儘管網路上存在眾多的反制方法，包含有軟、硬殺，然是否可採用一套客觀的方式，將不同反制無人機相關數據代入研究方法中，並綜整比較其優劣排序，目前在各種文獻中仍屬少見。
- 三、由於系統獲得成本並不容易獲得，故本文將反制無人機系統分為五種方式，且因各種反制無人機系統的攔截成功率，均需藉由實驗獲得，不會輕易公布，除部分攔截成功率參考網路數據外，另透過CPE模擬工具進行分析獲得。
- 四、無人機類型參考美國國防部分為五種等級，本文研究之反制來襲無人機，是以第二級定翼型無人機為目標，蒐整不同反制無人機系統價格、單枚價格、接戰距離、接戰速度及攔截成功率等特性，採用理想解類似度偏好順序評估法（Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, TOPSIS），以客觀方式評估不同反制無人機之排序，提供未來決策者參考。

關鍵詞：反制無人機、成本效益、模擬工具

圖片來源：Department of Defense

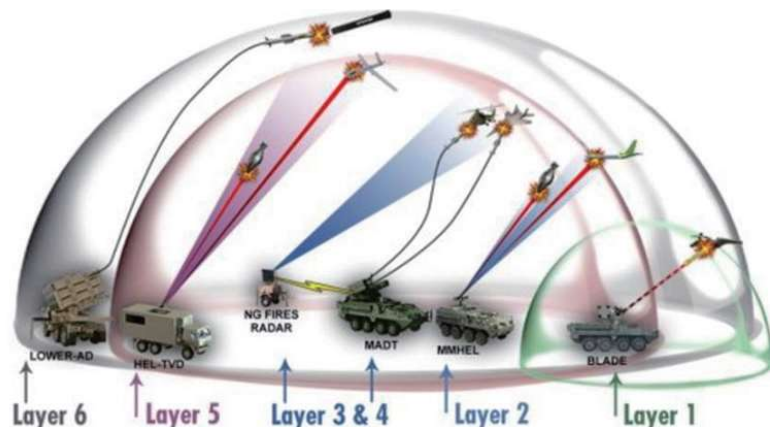


壹、前言

無人機在戰場的運用已成為各國關注的重點。自「2019年9月沙烏地阿拉伯兩處油田設施，分別遭受無人機及巡弋飛彈攻擊事件」；¹ 2022年2月24日烏俄戰爭中，「由於烏克蘭前線彈藥數量告急，前線烏克蘭軍隊越來越仰賴FPV無人機抵擋俄軍的進攻。…，俄軍有90%的重裝備是毀在FPV無人機的手上」；² 哈瑪斯自2023年10月7日「發起跨境襲擊以來，已使用小型商用無人機向坦克、救護車、邊境哨所以及重要的通訊塔投擲手榴彈」；³ 繼哈瑪斯對以色列攻擊後，葉門的反政府武裝胡希青年運動組

織（Houthi Movement）開始攻擊途經紅海、蘇伊士運河航道的商船，2024年1月9日美國與英國海軍「在紅海南部大量攔截來自武裝組織『青年運動』、朝向國際海運路徑海域發射的無人機與飛彈攻擊，次數達21次」；⁴ 乃至近期中共無人機「在騷擾臺任務中的角色日益重要，不僅是軍事行動，還涉及認知操作和假新聞，對臺灣進行『資訊化戰爭』」。⁵ 鑑此，可知無人機已在戰場上崛起，並在全球各地的軍事行動中扮演關鍵角色。是故，美陸軍規劃未來用6層防空網以對付無人機威脅（如圖一）。⁶ 分為第一層低空高機動防護系統（Ballistic Low Altitude Drone Engagement, BLADE）、

- 1 洪安妮、謝志淵，〈2019年沙烏地阿拉伯油田遭無人機攻擊事件研究—論陸軍野戰防空〉，《陸軍學術雙月刊》，第56卷第573期，西元2020年10月，頁45。
- 2 楊祖宇（民國113年1月18日），〈前線砲彈數量告急！烏軍只能仰賴無人機 毀俄軍90%重裝備都靠它〉，《Newtalk新聞》，〈<https://newtalk.tw/news/view/2024-01-18/905888>〉（檢索日期：民國113年1月19日）。
- 3 新聞編輯（民國112年10月19日）〈新世代戰爭！外媒解析以色列、哈瑪斯「無人機大戰」策略〉，《聯合新聞網》，〈<https://udn.com/news/story/123777/7516700>〉（檢索日期：民國113年1月19日）。
- 4 黃淑玲（民國113年1月10日），〈胡塞向紅海發動迄今最大攻擊 美英海軍擊落21無人機與飛彈〉，《聯合新聞網》，〈<https://udn.com/news/story/6809/7698291>〉（檢索日期：民國113年1月19日）。
- 5 新聞編輯（民國112年9月18日），〈共軍無人機成擾臺新主力 臺海空防規則恐顛覆〉，《中央廣播電臺》，〈<https://web01.rti.org.tw/news/view/id/2179224>〉（檢索日期：民國113年1月27日）。
- 6 江飛宇（民國108年9月15日），〈美軍設想未來6層防空網對付無人機威脅〉，《中時新聞網》，〈<https://www.chinatimes.com/realtimenews/20190915002713-260417?chdtv>〉（檢索日期：民國112年10月31日）。



圖一 美軍規劃未來6層防空網

資料來源：中時新聞網

第二層多任務高能雷射 (Multi-Mission High Energy Laser, MMHEL)、第三層和第四層機動防空技術 (Maneuver Air Defense Technology, MADT)、第五層高能雷射戰術載具驗證 (High Energy Laser Tactical Vehicle Demonstrator, HEL-TVD) 及第六層低成本遠程防空系統 (Low-Cost Extended Range Air Defense, LOWER-AD)。⁷ 由於無人機成本相對防空飛彈較為低廉，因此如何以客觀的分析方法評估反制無人機之方

式，遂成為本文的研究動機。

貳、本文

本文運用擊殺鏈，依據美國空軍參謀長羅納德·R·福格曼 (Ronald R. Fogleman) 將軍在空軍協會論壇提出偵蒐 (Find)、定位 (Fix)、追蹤 (Track)、目標標定 (Target)、交戰 (Engage) 與評估 (Assess) 地表上任何移動物體，此種行動將在21世紀達成，即所謂擊殺鏈。⁸

7 Maj. Gen. Cedric T. Wins, (10 September 2019), "CCDC'S road map to modernizing the Army: air and missile defense", 《U. S. ARMY》, <https://www.army.mil/article/226920/ccdc_s_road_map_to_modernizing_the_army_air_and_missile_defense> (檢索日期：民國112年10月31日)。

8 John A. Tirpak, (1 July 2000), "Find, Fix, Track, Target, Engage, Assess", 《AIR & SPACE FORCES MAGAZINE》, <https://www.airandspaceforces-com.translate.goog/article/0700find/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=zh-TW&_x_tr_hl=zh-TW&_x_tr_pto=sc> (檢索日期：民國112年10月31日)。

因此藉由資料蒐整，可知偵蒐與辨識系統在反制無人機中，可分為雷達、光電偵蒐（可見光/紅外線）、無限射頻與聲波等四種（如表一）。⁹ 接續威脅評估及交戰過程，對低、小、慢無人機之反制方式採以軟殺模式；而對偵打一體大型的無人機則採用硬殺模式。軟殺與硬殺之差異在於是否對無人機造成實體破壞，前者一般不會造成無人機機體損傷，而是

針對其功能進行干擾，如干擾其遙控信號；後者則不論是火砲或是雷射，均將射穿或燒熔無人機的機體或其他裝備（如圖二）。接續釐清接戰無人機之種類及彙整五種不同的反制方式，包含系統價格、單枚價格、接戰距離、接戰速度及攔截成功率等五種特性，其中攔截成功率部分參考網路數據，另透過CPE模擬工具進行分析獲得。¹⁰此模擬工具受到世界多

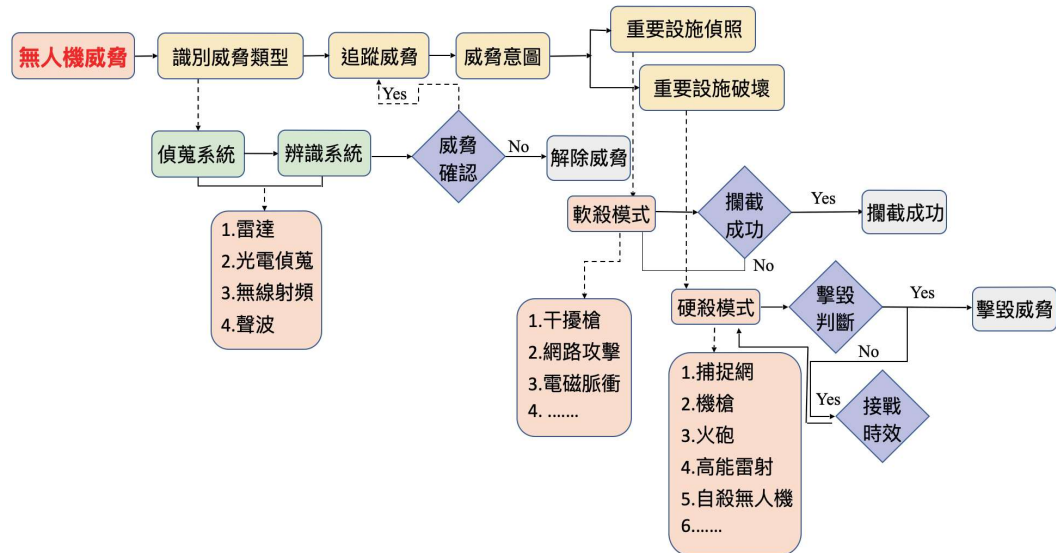
表一 無人機偵測技術

區分	雷達	光電偵蒐	無限射頻	聲波
操作模式	發射雷達波並接收由目標反射回來的雷達波	攝影機拍攝	攔截無人機與飛手的遙控及圖傳射頻信號	以高敏感度麥克風接收無人機馬達聲音
主動/被動	主動	被動	被動	被動
視角	120度	有限	360度	360度
目標	所有	所有	具有射頻信號	所有
距離	遠	中	最遠	近 (易受環境噪音干擾)
追蹤	高	高	一般	無
氣候影響	無	易受影響	無	易受影響
夜間能力	無差別	開啟紅外線	無差別	無差別

資料來源：現代無人機偵測與反制

9 鞠志遠，〈現代無人機偵測與反制〉，《維波科技有限公司產品介紹簡報，民國111年9月》。

10 Command Professional Edition, CPE，係由英商Slitherine Inc，旗下品牌Matrix Pro. Sims公司所發展，其電腦兵棋系統，用以執行海、空作戰、作戰計畫、行動方案分析、武器系統效益分析及兵棋推演輔助等多項工作。該系統計有美國陸、海、空三軍與陸戰隊、約翰霍普金斯大學（Johns Hopkins University）、波音（Boeing）、洛克希德馬汀（Lockheed Martin）、英國皇家國防科學與科技實驗室（Defense Science and Technology Laboratory, DSTL）及英國航太等世界多國之軍事、航太、科學及學術單位使用。



圖二 結合擊殺鏈作為反制無人機的步驟

資料來源：本研究繪製

國之軍事、航太、科學及學術單位青睞，因此執行成果具有信效度。最後，運用理想解類似度偏好順序評估法，分析不同條件下各個方案的成本效益。

參考美國國防部按重量、飛行高度和速度，將無人機劃分為5個等級。第一級重量0至9公斤，飛行高度不超過370公尺，速度低於每小時185公里；第二級重量9.5至25公斤，飛行高度不超過1,100公尺，速度低於每小時463公里；第三級重量低於600公斤，飛行高度低於5,500

公尺，速度低於每小時463公里；第四級重量大於600公斤，飛行高度低於5,500公尺，任意速度；第五級重量大於600公斤，飛行高度高於5,500公尺，任意速度。本文探討接戰的無人機係以第二級為目標（如表二）。¹¹

參、反制無人機方法

本文透過蒐整系統價格、單枚價格、接戰距離、接戰速度及攔截成功率

11 Tommaso Francesco Villa, Luis Felipe Gonzalez, Branka Miljevic, Zoran D. Ristovski, and Lidia Morawska(2016), "An Overview of Small Unmanned Aerial Vehicles for Air Quality Measurements: Present Applications and Future Prospectives", Sensors, 12 July 2016.

表二 無人機分類

性能諸元	第一級	第二級	第三級	第四級	第五級
重量 (kg)	0至9	9.5至25	小於600	大於600	大於600
飛行高度 (m)	低於370	低於1,100	低於5,500	低於5,500	高於5,500
速度 (km/hr)	低於185	低於463	低於463	任意速度	任意速度

資料來源：Sensors

等五種特性，分別介紹五種不同的反制方式，臚列如下：

一、無人機攜帶捕捉網

參照擊殺鏈反制無人機的說明，雷達偵蒐範圍將因雷達散射截面積（Radar cross-section, RCS）而異。當所遇無人機之雷達散射截面積越大，雷達可偵測距離則越遠，以R30地面雷達為例，如來襲無人機之雷達散射截面積為0.06至0.1時，其偵測距離為3.5公里；當來襲無人機之雷達散射截面積為1時，

其偵測距離則增加至8公里。此款無人機（獵手）具有2具捕捉網，並配有R20雷達，當來襲無人機之雷達散射截面積為0.06至0.1，其偵測距離為1.3公里；另具有AI功能可自行捕捉無人機，對低、小、慢旋翼型無人機，可發射捕捉網模式將其獵回；對定翼型無人機，則以守門員模式，預測其飛行軌跡，拋射捕捉網將其捕捉（如圖三）。¹²綜整廠商與網站提供的資料，獲得該產品五項的評估指標（如表三）。¹³



圖三 反制無人機裝備與過程

資料來源：FORTEM TECHNOLOGIES

12 《FORTEM TECHNOLOGIES》，〈<https://fortemtech.com/>〉（檢索日期：民國113年1月19日）。

13 同註12。

表三 反制無人機評估指標

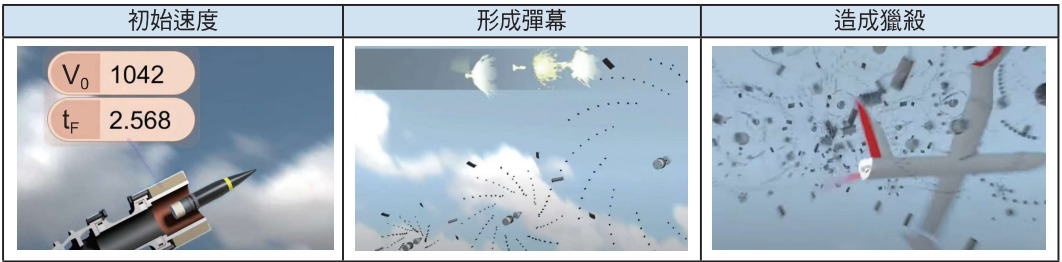
系統名稱	系統價格 (億元)	單枚捕捉網	單枚價格 (萬)	接戰距離 (公里)	接戰速度 (公尺/秒)	攔截成功率
無人機捕捉網	0.18	3x3米網	1	2	25	0.85

資料來源：FORTEM TECHNOLOGIES

二、可程式化定時引信高爆彈

此一裝置係利用預先偵測來襲無人機之軌跡，利用可程式化定時引信高爆彈，於來襲之軌跡上形成彈幕，以摧毀無人機（如圖四）。¹⁴在圖四左側初始速度中兩個數字，分為初始速度 $V_0=1042\text{m/s}$ 及定時 $t_F=2.568$ 秒之後即將爆炸；圖四中間代表三枚高報彈爆炸所形成之彈幕；另

圖四右側為無人機因撞擊彈幕，遭到摧毀。另採用CPE模擬工具執行分析以獲得攔截無人機之成功率，惟軟體中並無可程式化定時引信高爆彈的選項，故僅以一般的高爆彈執行。綜整分析結果及廠商與網站提供之資料，獲得該產品五項的評估指標（如表四）。¹⁵



圖四 可程式化定時引信高爆彈

資料來源：Rheinmetall Defense

表四 可程式化定時引信高爆彈評估指標

系統名稱	系統價格 (億元)	單發彈	單枚價格 (萬)	接戰距離 (公里)	接戰速度 (公尺/秒)	攔截成功率
MK44砲塔	1	MK310	3	3	970	0.5

資料來源：Rheinmetall Defense

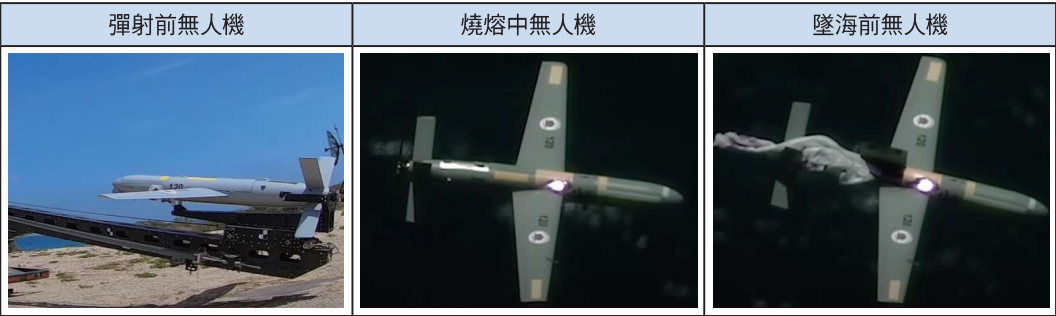
14 Rheinmetall Defense, 〈Rheinmetall Air Defence: Ahead—Highly effective, programmable ammunition〉, 《YouTube》, 〈<https://www.youtube.com/watch?v=bdwjcyPuag>〉 (檢索日期：民國113年1月19日)。

15 同註14。

三、高能雷射 (High Energy Laser)

作為國軍已逐漸瞭解並期望能建立反制無人機方式之一，¹⁶其部分規格係參考廠商網頁，並透過以色列網站獲得高能雷射燒熔無人機的經過（如圖五）。¹⁷然其成效究竟如何？又該如何驗證？仍缺乏實驗數據，故本文利用CPE模擬工具進行分析，以探討其攔截成功率。¹⁸然軟體當中，擊中（hit）未必造成目標立即被摧毀（destroyed），如高能雷射可能因為

功率密度及大氣環境，影響雷射光束在目標所形成的光斑，導致無法一次命中即擊毀無人機，須擊中多次方能摧毀。而擊毀（kill）則係擊中一次，即造成無人機功能喪失與損壞，由於此情形機率非常低，故本文採用摧毀（destroyed）數據進行分析，即不論擊中次數多寡，最終導致無人機喪失功能。綜整分析結果及廠商與網站提供之資料，獲得該產品五項的評估指標（如表五）。^{19、20}



圖五 高能雷射燒熔無人機的經過

資料來源：Elbit Systems

16 朱明（民國112年3月5日），〈憲指部赴美觀摩最先進雷射砲 作為中樞防衛自殺無人機群的利器〉，《上報》，〈https://www.upmedia.mg/news_info.php?Type=1&SerialNo=167267〉（檢索日期：民國113年1月19日）。

17 Elbit Systems,〈High-Power Laser Interception Tests〉,《YouTube》,〈<https://www.youtube.com/watch?v=aKFkA6Twpbcc>〉（檢索日期：民國113年1月19日）。

18 賀增原、林傳凱、謝沛學，〈模擬不同天候下雷射武器任務效能〉，第三十五屆中國造船暨輪機工程研討會暨國科會成果發表會（發表地：國防大學理工學院，發表日期：民國112年6月18日）。

19 《RTX》，〈<https://www.rtx.com/>〉（檢索日期：民國113年1月19日）。

20 《LOCKHEED MARTIN》，〈<https://www.lockheedmartin.com/>〉（檢索日期：民國113年1月19日）。

表五 高能雷射評估指標

系統名稱	系統價格 (億元)	單發雷射	單次價格 (萬)	接戰距離 (公里)	接戰速度 (公尺/秒)	攔截成功率
高能雷射系統	15	雷射	0.01	7	2.99x10 ⁸	0.007 (擊毀) 0.617 (摧毀)

資料來源：本研究整理

四、12.7公厘遙控槍塔 (Remote Controlled Weapon Station, RCWS)

整合不同的模組，包括光電偵蒐系統與武器系統於不同的載臺上，如本文中介紹擊殺鏈反制無人機的系統，整合在機動的載臺上，以發揮良好的偵搜、定

位、追蹤、攻擊與評估的能力。透過蒐集網路資訊，以彙整12.7公厘遙控槍塔反制無人機的方式（如圖六）。²¹本文利用CPE模擬工具進行執行，以探討其攔截成功率，以下綜整相關數據作為其評估指標（如表六）。²²



圖六 12.7公厘遙控槍塔反制無人機

資料來源：EOS Defense Systems

表六 12.7公厘遙控槍塔評估指標

系統名稱	系統價格 (億元)	單發彈	單枚價格 (萬)	接戰距離 (公里)	接戰速度 (公尺/秒)	攔截成功率
12.7公厘遙控槍塔	0.2	12.7mm子彈	0.0015	5	810	0.02

資料來源：本研究整理

21 EOS Defense Systems,〈Electro Optic Systems〉,《YouTube》,〈<https://www.youtube.com/watch?v=i-zTWCfI3LY>〉（檢索日期：民國112年7月31日）。

22 同註21。

五、復仇者防空飛彈系統

國軍執行某演習任務時，以復仇者防空飛彈車與雙聯裝刺針飛彈進行實彈射擊，該訓練要求係於7至12秒中，完成追瞄、鎖定及發射動作，惟其命中率相關數據眾說紛紜（如圖七）；²³此以某報導

指出：「今天上午的操演，在發射13發刺針飛彈當中，總共命中9枚，估算命中率近7成。」²⁴較為精準，故以7成作為後續計算衡量標準，以下綜整相關數據作為其評估指標（如表七）。²⁵



圖七 刺針飛彈反制無人機過程

資料來源：中時新聞網

表七 復仇者防空飛彈系統評估指標

系統名稱	系統價格 (億元)	單發刺針	單枚價格 (萬)	接戰距離 (公里)	接戰速度 (公尺/秒)	攔截成功率
復仇者 防空飛彈系統	2.8	刺針飛彈	300	4.8	750	0.7

資料來源：本研究整理

23 李奇叡(民國112年7月5日)，〈國軍神弓操演 刺針7秒擊中靶機〉，《中時新聞網》，〈<https://www.chinatimes.com/newspapers/20230705000434-260118?chdtv>〉(檢索日期：民國112年7月31日)。

24 郭宏章(民國112年7月4日)，〈神弓操演訓練收效！雙聯裝刺針飛彈復仇者實彈射擊 命中率近7成〉，《太報》，〈<https://today.line.me/tw/v2/article/LXDoyKI>〉(檢索日期：民國112年7月31日)。

25 〈FIM-92刺針人員攜行式防空飛彈〉，《維基百科》，〈<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/FIM-92%E5%88%BA%E9%87%9D%E4%BE%BF%E6%94%9C%E5%BC%8F%E9%98%B2%E7%A9%BA%E9%A3%9B%E5%BD%88>〉(檢索日期：民國112年7月31日)。

肆、研究方法

本文採用理想解類似度偏好順序評估法 (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, TOPSIS)²⁶以評估多準則方式。假設 n 項計畫(方案)(反制無人機的方法)， $A = \{A_i | i = 1, 2, \dots, n\}$ 在 m 個評估指標 $C = \{C_j | j = 1, 2, \dots, m\}$ 進行評估，以找出最佳方案的決策問題。本文提及反制無人機的方法共有無人機攜帶捕捉網、可程式化定時引信高爆彈、高能雷射、12.7公厘遙控槍塔、復仇者防空飛彈系統等五項，因此 $n=5$ 。而本文使用之評估指標計有系統價格、單枚價格、接戰距離、接戰速度及攔截成功率等五項，其中系統價格與單枚價格屬於望小特性，期望價格愈低廉愈好；而接戰距離、接戰速度及攔截成功率則屬於望大特性，期望各項數據愈大愈好。因此利用 A_i 計畫在 C_j 準則下藉由量化客觀方式加以評估，並以 $X_{ij}(i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$ 表示，即所謂的評估矩陣。 $D = [X_{ij}]_{n \times m}$ 。²⁷以下說明執行步驟：

一、正規化評估矩陣

由於不同評估指標單位不同，因此必須進行正規化去除單位影響，使各項評估指標可在相同範圍內進行評估。取 $g_j(A_i)$ 表示 A_i 計畫在 C_j 指標的正規化數值：

$$g_j(A_i) = \frac{X_{ij}}{\sum_i X_{ij}}, \forall i, j \quad (3.1)$$

藉由正規化數值，可獲得正規化評估矩陣 G ：

$$G = [g_j(A_i)]_{n \times m} \quad (3.2)$$

m 個評估指標重要程度不同，一般會有不同權重，此處權重 $w = \{w_j | j = 1, 2, \dots, m\}$ 滿足以下兩個條件：

$$\sum_j w_j = 1 \quad (3.3)$$

$$0 < w_j < 1 \quad (3.4)$$

權重愈大代表評估指標重要程度愈大，將權重乘上正規化評估矩陣，則可獲得加權正規化矩陣：

26 Ching-Lai Hwang, Kwangsun Yoon, "Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications: a State-of-the-art Survey" (New York: Springer-Verlag, 1981).

27 鄧振源，《計畫評估—方法與應用》，(基隆市：國立臺灣海洋大學運籌規劃與管理研究中心，西元2005年)，頁451-459。

$$v_{ij} = w_j g_j(A_i), \forall i, j \quad (3.5)$$

$$V = \begin{bmatrix} v_{ij} \end{bmatrix}_{n \times m} \quad (3.6)$$

二、正負理想解的距離

接著進入第二階段，考慮理想解 (A^*) m 個評估指標最佳績效值所構成，即最大化準則的最大值與最小化準則的最小值所構成：

$$A^* = \left\{ \left(\max_i v_{ij} \mid j \in C_b \right), \left(\min_i v_{ij} \mid j \in C_c \right) \right\} \\ = \left\{ \left(v_j^* \mid j = 1, 2, \dots, m \right) \right\} \quad (3.7)$$

$$\text{其中 } C_b = \left\{ C_j \mid j = 1, 2, \dots, m_1 \right\} \quad (3.8)$$

$$C_c = \left\{ C_j \mid j = 1, 2, \dots, m_2 \right\} \quad (3.9)$$

公式(3.8)與公式(3.9)中， C_b 為 m_1 項最大化準則所構成的集合， C_c 為 m_2 項最小化準則所構成的集合，並須滿足：

$$m_1 + m_2 = m \quad (3.10)$$

負理想解 (A^-) m 個評估指標最差績效值所構成，即最大化準則的最小值與最小化準則的最大值所構成：

$$A^- = \left\{ \left(\min_i v_{ij} \mid j \in C_b \right), \left(\max_i v_{ij} \mid j \in C_c \right) \right\} \\ = \left\{ \left(v_j^- \mid j = 1, 2, \dots, m \right) \right\} \quad (3.11)$$

接續利用 m 維歐幾里得距離，以算出計畫 A_i 距理想解 A^* 的距離，以分離度 S_i^* 表示：

$$S_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - v_j^*)^2}, \forall i \quad (3.12)$$

計畫 A_i 距負理想解 A^- 的距離，以分離度 S_i^- 表示：

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - v_j^-)^2}, \forall i \quad (3.13)$$

三、相對接近度指標

藉由分離度大小，可知 A_i 距理想解 A^* 的距離愈近，表示該計畫愈佳；然而，計畫 A_i 距負理想解 A^- 的距離愈遠，也表示該計畫愈佳；故綜整理想解 A^* 與負理想解 A^- ，利用相對接近度(relative closeness)的指標 RC_i^* 來衡量：

$$RC_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^* + S_i^-}, \forall i \quad (3.14)$$

RC_i^* 值愈大表示距離負理想解愈遠，該計畫愈佳；換言之，當距離理想解愈近，亦是如此。

伍、結論與建議

綜整本文五種不同反制無人機的方式及五項評估指標（如表八），並將數據代入TOPSIS公式（3.1）至公式（3.14）中，可獲得反制無人機的優序為高能雷射系統最優；其次依序為復仇者防空飛彈系統、無人機捕捉網、MK44砲塔，並以12.7公厘遙控槍塔最次。

若進一步將各項評估指標代入不

同的權重，同時滿足公式（3.3）與公式（3.4），參考國防院駐研學官的意見，整理設計的權重（如表九）。另將權重重新代入TOPSIS公式（3.1）至公式（3.14）中，可獲得反制無人機的優序為高能雷射系統最優；其次依序為無人機捕捉網、MK44砲塔、復仇者防空飛彈系統，並以12.7公厘遙控槍塔最次。

可知將不同的權重代入研究方法計算，所獲得之優序亦不盡相同，分析成因

表八 反制無人機的評估指標

系統名稱	系統價格 (億元)	單發名稱	單枚價格 (萬)	接戰距離 (公里)	接戰速度 (公尺/秒)	攔截 成功率
無人機捕捉網	0.18	3x3米網	1	2	25	0.85
MK44砲塔	1	MK310	3	3	970	0.5
高能雷射系統	15	雷射	0.01	7	2.9x10^8	0.617
12.7公厘 遙控槍塔	0.2	12.7mm子彈	0.0015	5	810	0.02
復仇者 防空飛彈系統	2.8	刺針飛彈	300	4.8	750	0.7

資料來源：本研究整理

表九 所有反制無人機評估指標的權重

評估指標	系統價格 (億元)	單枚價格 (萬)	接戰距離 (公里)	接戰速度 (公尺/秒)	攔截成功率
權重	0.13	0.07	0.27	0.20	0.33

資料來源：本研究整理

如下：

- 一、表八內的數據，特別是關於系統價格，雖本文查詢美國國防合作安全局 (Defense Security Cooperation Agency, DSCA) 以探求更精準的數據，然其相關裝備 (軍用產品) 均以包裹式出售，而非單系統，除包含後勤外，甚至囊括訓練與彈藥，故系統價格將依顧客需求而有所差異。未來國軍如需分析成本效益，須提供更精確之數值，方能更為客觀。
- 二、文中各項評估指標係依據使用者進行權重值調整，同時必須滿足公式 (3.3) 與公式 (3.4)，本文先後以各項評估指標均等與相異進行計算，所獲得反制無人機方式之排序，可得出僅有三項順序的差異。
- 三、由於各系統接戰距離與接戰速度差異很大，其實可參考美軍規劃未來6層防空網部署，然此需考慮另外一層問題，即是來襲的無人機是不同類型，其成本價錢也不同，須更進一步分析。
- 四、從表八當中，由於高能雷射接戰速度是光速，因此其餘各系統的速度均會被比下去，同時變成差異很小。
- 五、本文僅考慮獲得成本，並未考慮操作便利性，或後勤維持成本，甚至系統

備便的時間、準備接戰的時間間距，及系統攜帶武器數量等眾多因素。

在實戰化場景下，如何面對無人機蜂群、導彈，或是有人機與無人機的協同作戰，甚至是改裝殲六攻擊機或殲七攻擊機等多元威脅？是以，如缺少量化分析，誰能保證所有的作戰場景將依照想定依序發生？儘管各家產品皆自稱攔截效率良好，甚至國內操演任務，對射擊命中率均有不同報導，為準確評估反制無人機之方式，本文擺脫描述性的方法，採用客觀的評估方式，蒐整各項資料，並結合模擬工具之分析，利用研究方法找出不同反制方法的優序，以供國軍需求者參據。

作者簡介

賀增原博士，國防大學中正理工學院國科所兵器系統組博士畢業。曾任國防大學理工學院動力及系統工程學系副教授、國防大學管理學院運籌管理學系副教授、國家中山科學研究院材料暨光電研究所工程師，現為國防安全研究院網路安全與決策推演研究所研究員。