



商用無人機空中攻擊投彈效果模擬測試研究

筆者/吳耀文少校、張元斌中校

摘要

- 一、由 2022 年(以下,均為西元紀年)俄烏戰爭多場軍事行動中,均有發現雙方開始頻繁且大量運用商用無人機(Drone),並將其以戰場急造方式掛載彈藥實施攻擊運用。目前於網路上傳播著大量以無人機空中投彈作戰之資訊,抱著批判性思維,不禁質疑其真實性與否?
- 二、回顧俄烏戰爭中運用無人機空中投彈攻擊之戰史例證,對於攻擊敵方人員、車輛與碉堡工事等設施均有相關資訊,故本研究以網路影片及戰例為依據,藉由模擬實際戰場無人機空中投彈攻擊方式,規劃先對各類型目標實施測試,以求得參考數據。
- 三、藉實際模擬無人機空中投彈攻擊測試所得出之相關數據,分別就人為因素(第二人差異、操作手熟練度)、裝備參數(飛行高度、時速、重量)、環境因素(風速、能見度、音量)及目標因素(人員靜止及移動狀態)等因素實施分析,以求得作戰運用相關參考及注意事項。
- 四、本研究藉由俄烏戰爭等戰史例證,並模擬實際無人機空中投彈攻擊測試,驗證大量資訊之真實性,並於實驗中求得參考數據實施分析,並提供我國於爾後防衛作戰及發展無人機戰力相關策進建議,以作為建軍備戰之參考。

關鍵詞：俄烏戰爭、商用無人機、空中投彈攻擊。

壹、前言

近幾年國際爆發之大型軍事衝突中,例如俄羅斯(以下簡稱:俄國)與烏克蘭(以下簡稱:烏國)戰爭及以哈衝突等作戰中,均發現軍方開始運用民間商用無人機(Drone)作為輔助作戰之手段,¹尤其俄烏戰爭因久戰未歇,初期僅是因烏國於戰況危急在亟需軍援狀況下,便開始向民間徵用無人機作為偵察工具,²後續隨著戰況推移,無人機功能已從一般偵察情報演變至可掛載彈藥進行空中投彈攻擊使用,³因此俄烏雙方運用無人機作戰的頻次及數量持續增加,不僅在報章雜

¹ 商用無人機俗稱空拍機,目前國際上,市售空拍機以中共製的大疆創新(DJI)為最大宗。商用與軍用無人機(UAV、UAS)均為無人機之一種,為本文研究之主軸,後續文章均已以無人機代稱,檢索日期:2024 年 11 月 5 日。

² 楊智強,〈烏克蘭的啟示:民間「百萬架無人機保台」想像背後,要加速平戰轉換〉,

<https://www.twreporter.org/a/drone-warfare-taiwan-wartime-peacetime-conversion>, 檢索日期:2024 年 11 月 5 日。

³ Mykola Tymchenko,〈烏克蘭人組裝「燃燒彈無人機」空中投彈進攻〉,(自由時報),

<https://news.ltn.com.tw/news/world/Breakingnews/3857132>, 檢索日期:2024 年 11 月 5 日。

誌及新聞可見其蹤影，甚至在網路上均可搜尋到相關作戰運用影片。

目前網路上傳播著大量運用商用無人機對敵人掩體工事、車輛進行空中投彈的影片，⁴且在影片中的攻擊效果均為投彈命中目標，不禁令人產生質疑，事實上，運用商用無人機作為空中投彈攻擊的效果，是否真如影片中所顯示如此準確？因此本文期望藉由蒐羅近期相關作戰文獻探索有無相關研究發現，並以目前市售佔比較高之商用無人機規劃實機模擬測試，求得攻擊運用數據，並提供我國後續執行防衛作戰及發展或反制無人機方面之建議。

貳、俄烏戰爭運用例證

在俄烏戰爭中，烏國靈活運用改裝後之商用無人機攜帶微型炸彈或反裝甲彈頭對俄國軍隊及其重要軍事及經濟設施執行空中投彈攻擊，皆獲致有效戰果，而戰爭初始雙方地面部隊對於這種新型態「空襲」，霎時無法應對，多數戰甲車毀於垂直頂攻彈藥(含定、旋翼型及多軸飛行器偵攻一體無人機與徘徊式彈藥)，加上雙方都使用俄系戰車，自動裝彈機與發射藥與彈頭分離設計，使彈藥暴露於裝彈鏈上，當頂攻錐孔裝藥快速高溫聚能噴流燒穿頂部薄弱裝甲，噴流直接引爆裝彈機上發射藥，產生連鎖殉爆效應，其威力可將重達 10 餘噸的砲塔炸飛，甚至輕裝甲戰鬥車輛直接瓦解為廢鐵，這樣慘烈戰鬥景況，讓車內乘員幾乎無逃生機會，也因此部分人士提出未來戰爭，戰車已無用處，只是等挨打的跛鴨，此類論點於 1973 年贖罪日戰爭後，埃及使用俄國援助 AT-3 反裝甲飛彈於西奈半島擊毀以色列大量戰車，當時也有人認為戰車世紀已經結束，事實上，每一種新式戰具與戰法出現，總是會得到初期戰果，但接著反制方法開始出現，無人機在未來就無法悠哉從容翱翔於天際，因為軟、硬殺手段，讓其受干擾失控或擊殺摧毀，另無人機攻擊對象不只是戰車，戰場高價值目標，包含近接戰鬥步、戰部隊，隨伴掩護戰鬥支援部隊，縱深部署砲兵與飛彈陣地及油彈補給庫，都是無人機攻擊目標，以下爰用俄烏戰爭中，烏國改裝空投手榴彈裝於商用無人機，成功攻擊工事內及空曠位置俄軍實際案例，說明商用無人機於戰時多元運用方式。

⁴ DenesTorteli，〈俄烏戰爭/烏克蘭無人機空中遇襲 投彈進壕溝炸飛俄軍〉，
<https://www.youtube.com/watch?v=jWnwcCUTsBI>，檢索日期：2024 年 11 月 5 日。

一、改裝空投手榴彈：

烏克蘭某塑料玩具工廠替手榴彈設計一個炸彈外殼，將手榴彈變成空投炸彈，並掛載於無人機下端，使無人機在投放手榴彈時更穩定，且在彈尖設計一種簡易撞針，修改手榴彈引信以消除延遲爆炸，使其擊中目標時會瞬間爆炸。不過，商用無人機由於續航時間短、設備輕、只能進行短途飛行。跟俄軍的「溜蹄馬(俄文：Иноходец)」無人機等級根本無法相提並論，⁵烏克蘭僅簡易將手榴彈改裝，為其設計適合空中投彈包覆外殼，並掛載於商用無人機以對付俄軍，加(改)裝空投彈藥，(如圖 1)。⁶

圖 1-烏軍對無人機掛載彈藥進行改裝作業



資料來源：同註 7，檢索日期：2024 年 12 月 17 日

(一)攻擊工事內俄軍：

2023 年 3 月 5 日，俄軍入侵烏國北方頓內次克州，雙方爆發激烈戰鬥，俄軍某步兵營於戰況膠著下，遂構築塹壕工事，就地實施鞏固與整頓，烏克蘭第 30 獨立機械化旅則運用掛載手榴彈之無人機，對戰壕內俄軍士兵投擲手榴彈，此一運用為商用多軸飛行器，低酬載加裝改裝後引信手榴彈，於低空域投彈，此類無人機聲音小，易被戰場槍砲爆炸聲響掩蓋，位於工事內俄軍未即時察覺，無人機悄然臨空，投下致命彈藥，造成 3 名俄軍陣亡，(如圖 2)。

⁵ 騰訊網，該機型與美國「MQ-1 捕食者」屬同一級別，V 形尾翼安裝 Rotax914 型發動機，功率為 86 千瓦，配備渦輪壓縮機以增加升空高度。其採用俄「航空動力」公司 1.9 公尺直徑 AB-115 雙葉螺旋槳，採用收放式機身頭部和尾翹起落架，檢索日期：2024 年 12 月 17 日。

⁶ 自由時報電子報，〈烏設計「空投手榴彈」，搭配民用無人機對付俄〉，<https://www.youtube.com/watch?v=PA1DbmPdgCs>，檢索日期：2024 年 12 月 17 日。

圖 2-烏軍無人機對俄軍工事空投炸彈攻擊



資料來源：同註 5，檢索日期：2024 年 12 月 17 日

(二)攻擊空曠處俄軍散兵：

於 2022 年 11 月 21 日，俄軍士兵於烏國莫斯班境內，為了閃避烏軍無人機空投炸彈瘋狂逃竄。攜帶炸彈之烏軍無人機，從上空發現兩名俄軍士兵，並持續追蹤，兩名俄國士兵驚覺無人機臨空，則採取不規則來回奔跑，避免被當成目標攻擊，最後無人機仍沒投下炸彈，但整段過程相當緊張，這一次俄軍逃過無人機攻擊在於及時察覺無人機臨空，運用戰鬥教練技巧採取不規則運動迴避，躲過無人機空中攻擊，成功保住性命，(如圖 3)。

圖 3-俄軍迴避無人機攻擊



資料來源：同註 8，檢索日期：2024 年 12 月 17 日



二、小結：

綜合上述俄烏戰爭軍事行動例證所述，無人機掛載彈藥進行投擲時，無論針對靜態目標(如作戰工事和重要設施)或動態目標(如人員、車輛載具)，均能發揮效果，但攻擊成功比例不一，此戰為「混合戰」型態，雙方交替利用「認知作戰」，通常不對稱作戰成功案例，如有影像攝錄擷取，必將交由戰略溝通單位，透過網路即時發送，開戰初期俄軍戰車遭無人機攻擊慘況，M2 布萊德雷步兵戰鬥車以 25 公厘鏈砲擊毀俄軍 T-90 戰車，烏軍以宣傳戰將成功與特殊個案放大宣傳，未曾聞有失敗案例，且就實際運作之細節在雙方軍事資料上亦無從得知，故仍須藉由實際測試，方能求得具體作法及策進作為。

參、實機模擬測試

一、模擬測試目的：

模擬測試目的在於驗證無人機空中投彈攻擊之準確性，飛機於 1903 年發明到投入戰爭僅 11 年時間，第 1 次世界大戰飛機僅作有限度運用，雙方驅逐機(今之戰鬥機)相互以機槍射擊，遂行空中戰鬥，第二次世界大戰交戰雙方轟炸機群，仍然要面對投彈精準度問題，誤差在 1 公里內已算是有效命中，除非諜報航管員，於進入目標區前，給予轟炸機群正確方位及距離，否則投彈手瞄準鏡跟著飛機移動，空速、高度、空層氣流擾動及雲層都影響光學瞄準投彈精度，測試在於了解操作手於實際參與操縱下之各項數據。測試將涵蓋目標大小及動、靜態目標攻擊場景，以模擬真實作戰狀況並評估無人機在空中投彈過程中之準確性及測試室礙，藉由實驗執行靜態和動態目標模擬攻擊，驗證以下幾個主要問題。

- (一)操作手熟練度如何影響投彈精度和作戰效率。
- (二)無人機目標大小與投彈準確性之影響。
- (三)無人機對於靜態及動態目標命中率差異。
- (四)外部環境因素(如風速等)對投彈效果影響程度。

二、模擬測試規劃：

探討商用無人機後續於作戰運用中，對動、靜態目標實施空中投彈攻擊之效果，而基於在不同變(參)數影響下，產生不同結果，藉以比對與分析及歸納數值分析成為模擬測試成果。以下針對人員編組、場地規劃、輔助器材介紹及使用說明、目標設置規劃、評估標準及紀錄項目設定等逐目闡述測試規劃內容：

- (一)人員編組：

針對人因差異，操作手對商用無人機操控熟稔度程度，作為後續空中投彈命中率數據分析之參數，自 2024 年 10 月中旬起，操作手以兩員為一組，甲為第 1 操作手、乙為第 2 操作手，兩員協力完成器具檢整及飛行測試場地布置，職掌編組如表 1，並利用假日時間進行空中投彈攻擊模擬測試，如圖 4，且將每次飛行測試狀登載於測試紀錄表內，以利從每次數據內容進行歸納分析，產生之結果可建議後續納入我國無人機技術發展參據。

表 1-商用無人機空中投彈攻擊測試職掌編組表

商 用 無 人 機 空 中 投 彈 攻 擊 測 試 職 掌 編 組 表			
項次	成員	任務職掌	備考
1	操作手甲	擔任執行者，利用無人機執行空中投彈測試，並予以紀錄改進。	兩 員 測 試 10 次後互 換職務。
2	操作手乙	協助執行者，於無人機執行空中投彈測試過程，紀錄環境參數。	

資料來源：筆者自行製作整理

圖 4-商用無人機模擬掛載測試



資料來源：本研究整理、拍攝及製作

(二)場地規劃：

測試過程選擇南部某飛行場進行，且考量周邊盡可能避免人員、車輛聚集之處，並提供開闊且無遮蔽物之空域，確保無人機能夠保持在指定高

度下自由飛行，並進行多次投彈測試，其靜態目標場地範圍約 2,500 平方公尺(長、寬各 50 公尺)、動態目標則約 150 平方公尺(長 50 及寬 3 公尺)，且周邊林蔭涵蓋密度較低，適合多軸飛行無人機測試操控。基此，每次執行測試之結果須反應於無人機本身性能及操作手控制能力。須選擇環境影響最小之測試場，為無人機飛行穩定性、滯空高度和投彈精度提供理想條件，以減少變數影響測試精度。

針對商用無人機空中投彈靜態目標攻擊效果測試過程需要廣闊空域及平坦地面較適合，執行過程亦較為順利，故場地規劃遴選在草皮上，並依照空拍機操縱監控程式 app(DJI GO4)所內建的鏡頭顯像投射範圍形狀設定功能(Camera image projection range shape setting function)選擇方形或圓形來設置空中投彈靜態目標區，最終採用以同心圓方式使用交通封鎖線、竹籤及鐵絲分別完成直徑 1.6、3.2、6.4 公尺之圓型範圍，以利執行投彈試驗時透過空拍機鏡頭瞄準使用，其餘飛行高度、路線、攻擊距離、測試方式、車輛、人員及彈種等整備項目內容則參照圖例說明，測試場地規劃，(如圖 5)。

圖 5-靜態目標攻擊測試場地



資料來源：本研究整理、拍攝及製作

針對商用無人機空中投彈動態目標攻擊效果測試過程，亦同執行靜態目標攻擊效果試驗，場地條件須符合安全，故場地規劃遴選在公園草皮旁

人行步道上，一樣依照空拍機操縱監控程式 app(DJIGO4)所內建的鏡頭顯像投射範圍形狀設定功能(Camera image projection range shape setting function)選擇方形或圓形來設置空中投彈動態目標區，最終採用以方形對焦框及配合鏡頭目測，預判試驗員以模擬共軍單兵竄逃方式進入目標區前投彈至落地，且能否命中其週邊約 1-3 步距離之時間長短及驗證其效果，由於考量人員安全，原本所使用訓練用手榴彈更改為水球，以降低其測試風險，其餘飛行高度、攻擊距離、測試方式、車輛及人員等整備項目則參照圖例說明，測試場地規劃(如圖 6)。

圖 6-動態目標攻擊測試場地



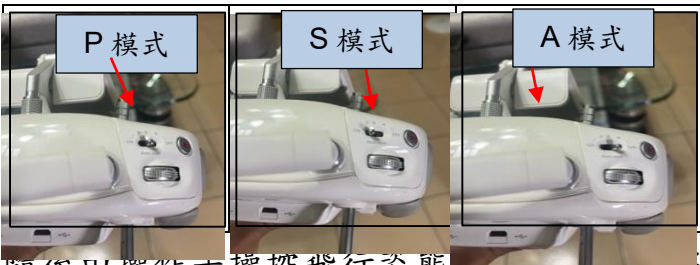
資料來源：本研究整理、拍攝及製作

(三)輔助器材介紹及使用說明：

為測試商用無人機掛載彈藥後之飛行穩定性、滯空高度及空中投彈攻擊精準度，將選用市售商用器材進行輔助實驗測試，因標準實驗所需高價監測與高速及同步攝錄裝備購置及租賃費用過高，筆者有限自籌經費及能滿足模擬測試器材為主，因此本次測試存在兩項無法避免影響因素，首先為測試機種單一化，無法比較多軸、定翼及旋翼無人機比對效應，其次為無法以儀測取得精準數據(如表 2)。

表 2-商用無人機空中投彈實驗輔助器材使用說明表



項次	器材名稱	使用說明
1	手持式風速計	風速測量範圍位於每秒 0.3-30 公尺，於測試前，由側錄員量測風速狀況，登載於測試紀錄表。
2	分貝計	噪音測量範圍位於 30-130 分貝，於各次測試時由側錄員量測發動及起飛後機件噪音值，記載於測試記錄表。
3	DJI phantom PT4 空拍機	為空中投彈攻擊測試機，發動後每次升高 10 公尺升至 50 公尺測試高度，同時由操作手監控飛行狀態，側錄員紀錄各次測試經過及缺失狀況。
4	DJI phantom PT4 遙控器	為測試機種操作介面，於飛行前裝設操作手機(先前須下載監控程式)呈準備態勢，隨後發動後則操縱搖桿控制其飛行高度及方向，同時可選擇以下 3 種操作模式。 (1)P 模式(定位)-使用 GPS 或視覺定位系統實現精確懸停。 (2)A 模式(姿態)-不使用 GPS 和視覺定位系統，不能精確懸停。 (3)S 模式(功能)-和 P 模式類似，可使用智能飛行模式。  隨後由操作手操控飛行姿態，側錄員紀錄各次測試經過及缺失狀況。
5	投彈器及控制器	(1)投彈器： 組成為本體及魔鬼氈束帶，內含電池提供電力，電源按鈕於投彈器側邊，長按 2 秒開啟電源，反之關閉，按 1 次開啟投擲物固定鎖，懸掛物件後，再按 1 次鎖定，測試前完成掛彈程序並確認無誤，始可執行

		模擬測試。  (2)控制器： 組成為本體，內含電池提供電力，電源按鈕於控制器中央，長按 2 秒開啟電源，上方為開啟按鈕，按 1 次開啟物件固定鎖投擲，懸掛物件時，按下方鎖定按鈕 1 次使其穿越懸掛繩索套孔完成鎖定，執行投彈測試前完成掛彈程序並確認無誤後，始可執行模擬測試。 
6	訓練用手榴彈	外觀為藍色，重量為 600 克，鐵質，考量操縱空中投彈流程安全性，僅使用在靜態目標攻擊測試時使用，並選擇在空曠植被地，避免直接在水泥地面及人員車輛密集地區實施，以免造成意外事件。



7	魔鬼氈束帶	顏色不拘，須使用 2 條平行纏繞於無人機起落架下方，並預留空隙將投彈器固定於上方，再以投彈器束帶與 2 條起落架束帶完成繫固，始可掛彈、起飛及投彈等程序。
8	細棉繩	尺寸約 1.5mm，須裁切適當長度用以吊掛訓練用手榴彈或其他掛載物體，並繫固於投彈器上，藉由控制器按鍵操控鎖定或投彈。
9	氣球(12 寸)	基於安全考量，於動態目標投彈攻擊測試時，採用市售 12 吋氣球裝水，直至重量達 600 克上下(以電子秤秤重，誤差為±20 公克)，超重或過輕將影響無人機穩定度。
10	斜口鉗	調整切割靜態目標區佈置用細鐵絲，並與尖嘴鉗相互搭配，測試完畢後實施場地撤收。
11	尖嘴鉗	
12	剪刀	裁切目標區封鎖線及繫固彈體之細棉繩。
13	細鐵絲	竹籤搭配圈定固定靜態目標區同心圓範圍，並與市售使用，並於測試結束後須撿拾完畢，恢復環境清潔並防止刺傷人員。
14	不銹鋼電子秤	測量投擲用彈種重量，量測範圍 500 至 3,000 克，於每次掛彈測試前先行實施秤重，靜態目標投彈所使用之訓練用手榴彈重量無異動，動態目標投彈所使用之水球須測量，以確認其重量是否超重或過輕，導致影響無人機飛行穩定度。
15	交通封鎖線	布置靜態目標區範圍使用，採大(直徑 6.4 公尺)、中(直徑 3.2 公尺)及小(直徑 1.6 公尺)三個同心圓配置，並搭配細鐵絲、竹籤使用，並於當日測試結束後須撤收完畢，恢復環境清潔並防止刺傷人員。
16	竹籤	與鐵絲配合固定靜態目標區同心圓範圍，並與細鐵絲搭配使用，並於當日測試結束後須撿拾完畢，恢復環境清潔並防止刺傷人員。

資料來源：本研究整理、拍攝及製作

(四)測試機型選用條件：

執行無人機空中投彈攻擊測試時，機型遴選為首要關鍵因素，其性能優劣將影響後續實驗結果，在此列舉選擇標準如下：

1.滯空續航力：

無人機滯空續航能力，取決於無人機電池蓄電量，一般選用為鋰電池，落地後使用快速充電器，將電力恢復至 80%，若蓄電量高，相對增加重量，影響無人機酬載量，通常多軸飛行器會因機型尺寸大小與旋槳數多寡選擇適用(型)電池，以利無人機於空中飛行正常運作，執行後續模擬作戰偵察、攻擊等任務。

2.載重負荷量：

依機型體積大小而定，無人機須能酬載至少 1-2 公斤模擬彈藥模組，本次模擬測試最大酬載為 600 公克，符合測試機酬載範圍，並能保有於空中飛行操作靈活裕度，執行測試時能爬升至指定高度，並透過機載 CCD 觀看目標位置，調整投彈位置。

3.操作靈活性：

無人機具備即時或第 1 人視角操控功能，多軸飛行器具貝類直升機優點可垂直起降、滯空旋停、偏角移動、直攻角爬升等特性，富以此類多軸飛行器操控相對於定旋、翼型無人機操控較為簡單，前述機型如為長程式遠距操控官，多以定旋、翼機飛行員擔任，而本次擔綱測試機型，僅需短期操作訓練，使操控員能快速熟稔飛行操控，據以模擬戰場環境實施空中投彈攻擊模擬測試。基於上述條件，且考量本研究測試執行無人機空中投彈攻擊所需器材成本及操作環境等因素下，故選擇市售商用無人機 DJI Phantom 4 進行實驗，性能規格，(如表 3)，⁷並於測試前進行改裝，使其能夠承載併投擲訓練用手榴彈(或水球)。

表 3-商用無人機空中投彈攻擊測試機型規格表

型號	大疆 DJI Phantom 4 (PT4)
重量(含電池及槳)	1,380 克
軸距	350 毫米
最大上升速度	每秒 6 公尺(運動模式)

⁷ DJI 大疆無人機官網 <https://www.dji.com/tw>，產品簡介。



最大下降速度	每秒 4 公尺(運動模式)
最大水平飛行速度	每秒 20 公尺(運動模式)
最大可承受風速	每秒 10 公尺
最長飛行時間	約 28 分鐘
衛星定位模組	GPS/GLONASS 雙模
影像感測器	1/2.3 英寸 CMOS 有效像素 1,240 萬
變焦能力	無
防碰撞系統	前向及下向障礙物感應
圖傳系統	HD 圖像傳輸最遠 5,000 公尺

資料來源同註 9，(檢索日期：年月日)

(五)機型比較：

本機型與俄烏戰爭中俄羅斯 orlan-10 及烏克蘭 R-18 所使用之投彈型無人機軸距、飛行距離、時間及特性比較對照如表 4。

表 4-商用無人機產品特性比較對照表

品名	大疆 DJI-PT4	俄羅斯海鷹 10	烏克蘭 R18
照片			
軸距 (公分)	35 公分	採固定翼設計，翼展 310 公分	150 公分
飛行距離 (公里)	7 公里	150 公里	4-10 公里

飛行時間 (分鐘)	28 分鐘	10-16 分鐘	40-60 分鐘
特性	1.多重飛行模式： 支援 GPS 定位、智能跟隨、自動返航、航線飛行等模式，適合不同用途 2.高解析度攝影： 搭載 4K 攝影機，支援圖像穩定功能，適合拍攝高精度圖像和影片。 3.自動避障系統： 配備前向、下向感測器，具備簡單障礙物感知與自動避讓能力，但在複雜環境(如密林、建築物間)中仍有侷限。 4.易於攜帶部署： 機身輕便，單人即可操作，適合快速部署與任務執行。	1.採用多功能模組化設計，可執行偵察、視及標定等任務。 2.載重有限可改裝攜帶小型炸彈或手榴彈進行空中投擲。 3.具備抗干擾能力，能在惡劣環境下作戰。	1.攜帶 2 枚 RKG-3 反坦克手榴彈或他輕型炸彈。 2.可適合執行小規、高精度打擊，特別針對敵方戰車、裝甲車或哨所。 3.具備夜視鏡頭與紅外線裝置，能在夜間或低能見度環境中作戰。 4.機動性高，易於部署與操控，操作手僅需短期訓練即可上手。

資料來源：維基百科，<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/R18>、Orlan10。

(五)目標設置規劃：

測試目標區分靜、動態兩種目標，藉此評估商用無人機在兩種戰場景況下，執行空中投彈模擬攻擊之效果，目標設置規劃內容如下：

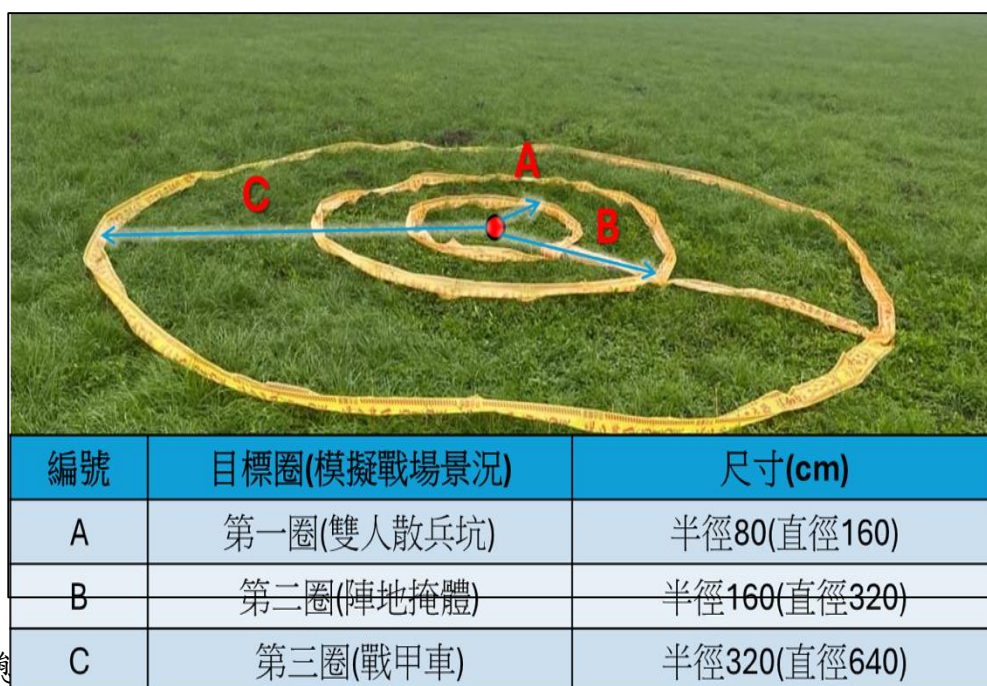
1.靜態目標：

以戰場常見目標如單人散兵坑、陣地掩體或靜止車輛為例，用以模擬戰場上固定設施或防禦工事，執行實驗前，先行由操作手採同心圓方式利用交通封鎖線、細鐵絲及市售竹籤等耗材，設置上述三類型目標：內層



直徑 160 公分(模擬散兵坑)⁸、中層直徑 320 公分(模擬陣地掩體)⁹、外層直徑 640 公分(模擬車輛)¹⁰ (如圖 7)。

圖 7-商用無人機空中投彈攻擊靜態目標區示意圖



2. 動態

針對動態目標實施投彈測試，規劃由側錄員由預先設定之起點往投擲目標區快速跑步移動，並在不同速率下進行，以測試無人機追蹤和準確攻擊命中之能力，測試路線及目標區位置請參閱圖 6，此實驗內容因考量訓練用手榴彈為鐵金屬組成，若進行高空投擲，受重力加速度影響下，恐肇生擊中人員產生傷亡危安事件，為消弭測試風險，將原本投擲訓練用手榴彈改為水球(比照訓練手榴彈 600 克重量)，側錄員穿著戰鬥個裝，以達防護效果，因兼具動態誘導引無人機追蹤，進入目標區投彈，行徑路線採取不規則及不等速方式，增加無人機控員跟隨追蹤困難度，因場地內民營業者經營之飛行場，草地經整平後為滑翔動力傘與輕航機起降場地，禁止車輛進入以免壓壞草坪，造成坑洞，影響起降安全，僅同意以人員進入測試，實為非計畫性科研之難處，無法獲得足夠之奧援，但測試組仍秉探索與實驗求真精神，全力投入，完成測試目標，(如圖 8)。

⁸ 《陸軍野戰工事構築作業手冊》，民國 98 年 9 月 15 日，第二章，頁 60。

⁹ 《陸軍野戰工事構築作業手冊》，民國 98 年 9 月 15 日，第二章，頁 69。

¹⁰ 王偉賢，〈中共第三代 ZTZ-99 式戰車戰力分析研究〉《陸軍學術雙月刊》，第 49 卷第 528 期，民國 102 年 4 月。

圖 8-側錄者著裝及協力測試圖



資料來源：本研究整理、拍攝及製作

三、測試步驟及評鑑要項：

本項次主要針對靜、動態目標，實施空中投彈攻擊測試之評估標準及紀錄項目設定內容說明。

(一)測試步驟：

除了上述靜態目標空中投彈攻擊測試評估標準要項表外，且設計標準流程說明及試驗流程，(如圖 9)，搭配參閱運用，靜態目標空中投彈攻擊測試流程區分五個步驟：

1.器材佈置：

先行以 2 支短木桿(後續修正成魔鬼氈束帶或鐵絲固定-圖 9，①)裝設於無人機起落架下方，並將投彈器及控制器安裝於中間，以利後續掛上訓練用手榴彈或等重水球實施測試。

2.飛行操控：

由操作手操縱無人機起飛至一定高度後，再移往目標區周邊，待機身穩定及鏡頭對準目標中央位置後，再行投彈(圖 9，②)。

3. 空中投彈：

完成步驟 2 後，由操作手以控制器進行投彈。(投擲物於圖 9，③紅圈處)

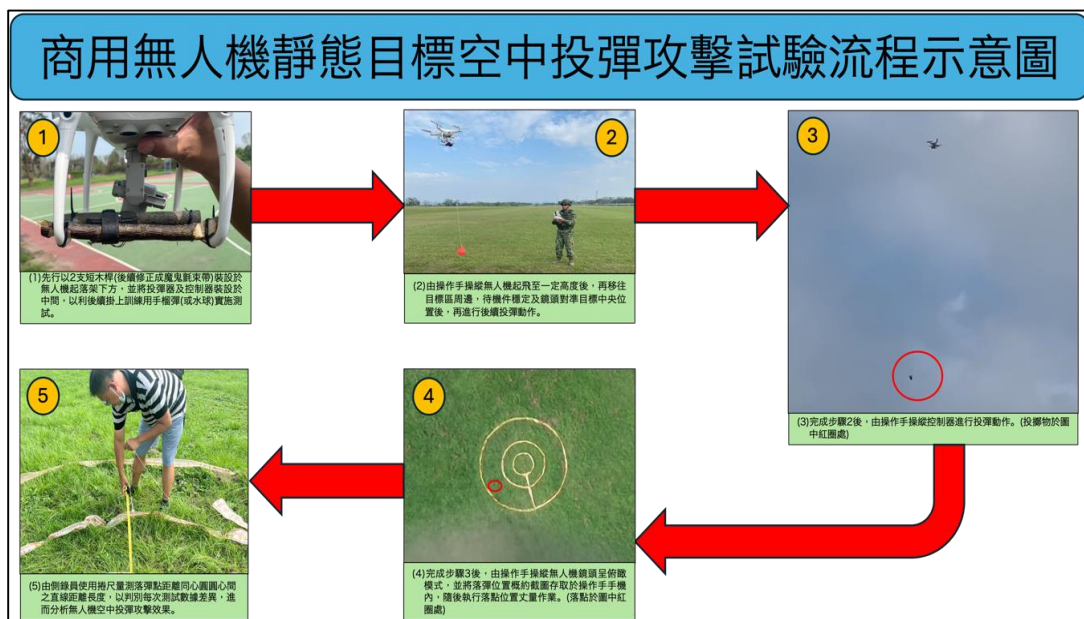
4. 落點截取：

完成步驟 3 後，由操作手操縱無人機鏡頭呈鳥瞰模式，並將落彈位置概約截圖存取於操作手手機內，隨後執行落點位置丈量作業。(落點於圖 9，④紅圈處)

5. 丈量距離：

由操作手使用捲尺量測落彈點距離同心圓圓心間之直線距離長度，以判別每次測試數據差異，進而分析無人機空中投彈攻擊效果(圖 9，⑤)。

圖 10-商用無人機靜態目標空中投彈攻擊試驗流程示意圖



資料來源：本研究整理、拍攝及製作

(二) 靜態目標測評要項：

靜態目標評估標準可從投彈精準度(Accuracy)、投彈穩定性(Stability during Release)、投彈時機控制(Timing Precision)、無人機續航時間影響(Flight Endurance Impact)、攻擊效率(Attack Efficiency)、環境影響評估(Environmental Impact Assessment)、操作手能力(Operator Performance)及載具損耗與可靠性(Vehicle Wear & Reliability)等 8 項實施探討，評估標準要項，(如表 5)。

表 5-商用無人機靜態目標空中投彈攻擊測試評估標準要項表

項次	項目	評估內容	測量方式	評估標準
1	投彈精準度	1.是否能準確命中預設靜態目標。 2.投擲物與目標中心偏差距離(圓周誤差半徑 CEP)。	使用捲尺作為輔助工具，測量多次投彈結果，計算誤差距離平均值。	1.CEP≤160 公分-優良。 2.CEP≤320 公分:合格。 3.CEP>640 公尺:需改善。
2	投彈穩定性	1.投彈過程中無人機是否維持穩定姿態(如水平狀態)。 2.投彈點重複性及彈藥釋放是否順利。	1.使用無人機慣性測量單元記錄姿態變化。 2.檢測多次投彈時彈著點聚集範圍。	1.姿態變化角度≤5 度:穩定性高。 2.5 度<變化角度≤10 度:穩定性中等。 3.變化角度>10 度:穩定性不足。
3	投彈時機控制	1.操作手能否在適當位置精確控制投彈時機。 2.是否出現提早或延遲投彈現象。	1.透過各次飛行數據對比實際投彈點和預定目標位置距離。 2.使用視覺或位置感測器判斷投彈時機誤差。	1.投彈位偏差≤0.5 秒或距離≤160 公分:時機控制良好。 2.偏差 0.5-1 秒或距離 320 公分:時機控制普通。 3.偏差>1 秒或距離>640 公分:時機控制不足。
4	無人機續航時間影響	1.投彈任務是否因續航時間不足而無法完成。 2.無人機飛行時	1.任務完成時間與電池剩餘電量之數據分析。	1.任務完成後電池剩餘電量>20%:續航良好。 2.剩餘電量 10-20% 續航中等。



		性能變化(如飛行速度、穩定性)	2. 模擬投彈任務並觀察飛行性能變化	3. 剩餘電量<10%：續航不足。
5	攻擊效率	1. 單次任務中投彈目標數量及命中率。 2. 完成多個目標所需時間。	1. 記錄任務執行時間及命中目標數量。 2. 對比不同任務中完成之目標量及準確度。	1. 每分鐘可精準命中 1-2 個目標：效率高。 2. 每分鐘命中 0.5-1 個目標：效率中等。 3. 每分鐘命中不足 0.5 個目標：效率低。
6	環境影響評估	1. 外部環境(風速、雨量、溫度)對投彈準確度影響。 2. 無人機在惡劣環境下之投彈能力。	1. 模擬不同環境條件(風速 5 公尺/秒、10 公尺/秒等)進行測試。 2. 記錄各條件下偏差距離及姿態變化。	1. 在風速 10 公尺/秒以下偏差距離 < 160 公分：環境適應性好。 2. 在風速 5 至 10 公尺/秒偏差距離 > 320 公分：環境適應性普通。 3. 風速 5 公尺/秒時即出現投彈失準：環境適應性不足。
7	操作手能力	1. 操作員對飛行路徑、投彈時機、緊急狀況處理之熟練度。 2. 手動控制模式下任務完成率。	1. 多次模擬任務，記錄操作反應時間及結果。 2. 進行意外情況(如 GPS 丟失)模擬測試。	1. 完成任務成功率 ≥90%：操作能力高。 2. 成功率 70%-90%：操作能力中等。 3. 成功率 <70%：操作能力不足。

8	載具損耗與可靠性	1.無人機在多次投彈任務後損耗情況(如電池效能、機體部件)。 2.投彈器釋放穩定性及故障率。	1.任務後檢查機體部件磨損或損壞情況。 2.記錄投彈機構故障次數及維修頻率。	1.任務後無重大損耗，投彈機構故障率 $\leq 1\%$ ：可靠性高。 2.任務後輕微損耗，故障率 1-5%：可靠性中等。 3.任務後出現多次損耗或故障率 $> 5\%$ ：可靠性不足。
---	----------	---	---	--

資料來源：本研究整理及製作

(三)動態目標評估要項：

動態目標評估標準可從投彈命中率(Hit Rate)、投彈時間反應(Time-to-Release Accuracy)、預判能力(Target Prediction Accuracy)、投彈角度與速度調整(Angle & Speed Adjustment)、飛行穩定性(Stability under Movement)、目標追蹤與鎖定能力(Target Lock-on Capability)及維修與損耗之評估(Maintenance & Wear Assessment) 等 7 項探討，評估標準要項，(如表 6)。

表 6-動態目標評估要項

項次	項目	評估內容	測量方式	評估標準
1	投彈命中率	1.無人機對移動目標攻擊準確性。 2.目標移動速、方向變化對命中率之影響。	1.實際命中次數/總投彈次數計算命中率。 2.透過高解析度攝影機分析彈著點與目標中心點之偏差距離。 3.在不同度、不同機動方式下測試(例如目標直線移動、迴避機動)。	1.命中 $\geq 80\%$ ：精準度高，系統可靠。 2.命中率 50%-80%：中等精度，可進一步優化。 3.命中率 $< 50\%$ ：精準率低，需改善導航、追蹤或投彈控制。



2	投彈時間 反應	1.無人機發現目標到完成投彈時間延遲。 2.操作員(手動模式)或自動系統之反應速度。	1.記錄目標進入射程時刻到投彈時間點之間的時間差(毫秒或秒為單位)。 2.進行多次測試,取平均值。	1.反應時間≤ 1秒:優秀,適應高速作戰。 2.反應時間 1-3秒:中等,適用於一般目標。 3.反應時間 > 3秒:反應過慢,可能錯失攻擊機會。
3	預判能力	1.無人機是否能根據目標運動軌跡預測未來位置。 2.自動系統是否能提前計算最佳投彈時機與落點。	1.使用 AI 或演算法進行預測,對比實際投彈點與目標移動後的預測誤差。 2.記錄成功預測目標軌跡並準確投彈比例。	1.預判準確度$\geq 85\%$:優秀,能應對快速移動目標。 2.預判準確度 60%-85%:中等,適用於較規動目標。 3.預判準確度 $< 60\%$:預測能不足,能導大量投彈失準。
4	投彈角度與 速度調整	1.根據目標高度、風速、無人機飛行狀態調整投彈角度與速度。 2.投彈時之飛行軌跡與穩定性。	1.記錄不同投彈角度(俯角、平投彈、仰角)對命中率之影響。 2.測量投彈瞬間之無人機速度與姿態,計算對投彈精度之影響。	1.投彈角度與速度自動修正偏差$\leq 5\%$:系統穩定,調整能力佳。 2.修正偏差 5%-15%:仍可接受,需進一步優化。 3.修正偏差 $> 15\%$:調整機制不佳,影響命中精度。

5	飛行穩定性	無人機在投彈過程中是否能保持穩定姿態，避免劇烈震動或偏移。	1.使用 IMU-慣性測量單元)記錄機身傾斜角度、俯仰角、震動度 2.監測飛行軌跡是否受風速、投彈衝擊影響。	1.投彈時姿態 偏差≤ 3度：極為穩定。 2.偏差 3-7 度：影響有限，可接受。 3.偏差> 7度：飛行不穩，可能影響準度。
6	目標追蹤與鎖定能力	無人機能否在目標高速運動時保持鎖定，並即時調整攻擊路徑。	使用視覺或雷達追蹤系統測量鎖定時間持續性與目標丟失率。	1.鎖定穩定率$\geq 90\%$：追蹤精準，可靠性高。 2.鎖定穩定率 70%-90%：中等，適應一般戰術應用。 3.鎖定穩定率$< 70\%$：追蹤能力不足，可能導致攻擊失敗。
7	維修與損耗評估	無人機在多次投彈任務後的機體與電子設備損耗程度。	1.記錄飛行小時數與機體結構疲勞度變化。 2.監測零部件故障率與更換頻率。	1.故障率$\leq 5\%$：耐用性高，維修需求低。 2.故障率 5-15%：可接受，但需定期護。 3.故障率$> 15\%$：可靠性低，長期運作成本高。

資料來源：本研究整理及製作

除了上述動態目標空中投彈攻擊測試評估標準要項表外，另使測試過程有標準流程可供依循，其差異之處為目標由側錄員實際跑步進無人機投彈範圍接受攻擊效果測試，試驗流程，(如圖 10)，兩者主要差異為(圖 10，④)，靜態目標投彈 3 環同心圓型靶實施測試，而動態如同前述限制因素，由側錄員任移動目

標，誘導無人機追蹤瞄準投彈，基於安全考量將彈藥換成等重水球。

圖 10-商用無人機動態目標空中投彈攻擊試驗流程示意圖



資料來源：本研究整理、拍攝及製作

參、測試紀錄及成果與誤失態樣分析

模擬測試區分靜、動態兩種目標，各階段隨人員對機件操作熟悉度、天氣、吊掛物件及無人機本身性能等條件影響下，過程中皆有出現部分誤失，其態樣區分可立即排除或須查閱操作使用手冊，始可排解之問題，另操作員技術將影響命中率與精度，天候因素影響則是為不可抗拒因素，僅記錄，惟不列為改進項目，以下分就兩階段測試紀錄、成果及錯誤態樣分析列述如後。

一、靜態目標測試：

此階段測試各由甲、乙兩操作手輪流操作 10 次，並檢附測試紀錄表(如表 7)及測試結果圖片(如圖 11、12)作為參據：

表 7-靜態目標測試紀錄

次數	操作手	飛行高度 (公尺)	飛行音量 (分貝)	目標距離 (公尺)	測試結果及使用時間
1	甲	26	62.3	43.6	偏彈 320 公分(半徑)，命中第 3 圈上方，使用時間 1 分 44 秒。
2		18	64.3	45.1	偏彈 80 公分(半徑)，命中第 1 圈上方，使用時間 2 分 12 秒。

3		23	63.4	46.2	偏彈 320 公分(半徑)，命中第 3 圈上方，使時間 1 分 6 秒。
4		23	62.5	45.4	偏彈 330 公分(半徑)，未命中，使用時間 59 秒。
5		24	62.7	43.2	偏彈，受側風影響，未命中，使用時間 2 分 26 秒。
6		25	63.5	43.5	偏彈，受電量不足響，未命中，使用時間 1 分 23 秒。
7		26	56.6	46.3	進彈，命中第 1 個同心圓，圓心右方 80 公分處，使用時間 1 分 59 秒。
8		25	54.3	42.6	進彈，命中第 2 個同心圓，圓心上方 130 公分處，使用時間 3 分 38 秒。
9		33	56	43.5	進彈，命中第 3 個同心圓，圓心上方 207 公分處，使用時間 3 分 25 秒。
10		20	56	44.4	進彈，命中第 2 個同心圓，圓心上方 150 公分處，使用時間 3 分 22 秒。
次數	操作手	飛行高度 (公尺)	飛行音量 (分貝)	目標距離 (公尺)	測試結果及使用時間
1	乙	32	54.2	46.3	偏彈未命中，距離圓心左方 390 公分處，使用時間 2 分 44 秒。
2		40	56.9	42.5	偏彈未命中，距離圓心右方 448 公分處，使用時間 1 分 24 秒。
3		37	55.0	44.6	偏彈未命中，距離圓心右方 320 公分處，使用時間 1 分 43 秒。



4		36	54.3	45.4	命中第 2 個同心圓，圓心左方 160 公分處，使用時間 1 分 14 秒。
5		38	51.5	43.2	偏彈未命中，距離圓心右方 460 公分處，使用時間 1 分 58 秒。
6		35	58.2	45.1	偏彈未命中，距離圓心左方 380 公分處，使用時間 2 分 16 秒。
7		31	52.5	46.3	偏彈未命中，距離目標區左上方 810 公處，使用時間 5 分鐘。
8		32	51.3	42.5	偏彈未命中，距離目標區右方 340 公分處，使用時間 3 分 20 秒。
9		31	56.4	44.6	進彈，命中距離圓心右下方 200 公分處，使用時間 2 分 40 秒。
10		30	54.7	45.4	偏彈未命中，距離目標區右下方 370 公分處，使用時間 2 分 20 秒。
測試要求		1.規劃飛行航線、飛行高度及速度實施測試空中投彈測試。 2.空投模型彈須命中目標區(誤差值 3%)視為進彈。 3.測試均需影片及照片紀錄。			
備考 (環境參數)		1.能見度：正常。 2.降雨：無。 2.風向/風速： (1)操作手(甲)：西南，0.9-1.5 公尺/秒。 (2)側錄手(乙)東北，0.9-1.5 公尺/秒。			

資料來源：本研究整理及製作

圖 11-商用無人機空中投彈對靜態目標攻擊測試結果紀實-1

商用無人機空中投彈對靜態目標攻擊測試結果示意圖(第一次測試)



資料來源：本研究整理、拍攝及製作

圖 12-商用無人機空中投彈對靜態目標攻擊測試結果紀實-2

商用無人機空中投彈對靜態目標攻擊測試結果示意圖(第四次測試)



資料來源：本研究整理、拍攝及製作

二、動態目標測試：

操作手甲在模擬奔跑士兵目標(由操作手乙擔任)下執行四次無人機對動態目標空中投彈測試，個別結果如下：

- (一)第 1 次測試偏移目標距離 360 公分，未命中，原因為未掌握目標 移動速度，影響距離判斷。
 - (二)第 2 次測試偏移 410 公分，原因為風速變化影響飛行穩定性，導致未命中。
 - (三)第 3 次測試操作穩定，命中目標距離 193 公分範圍內，為當日唯一命中測試，命中率 25%。
 - (四)第 4 次測試偏移 370 公分，因目標移動方向變化影響投擲判斷，未能命中。
- 整體測試中，目標移動速度、風速變化和投擲時機為主要影響命中率與精度因素，測試結果統計，(如表 8)。

表 8-商用無人機空中投彈攻擊動態目標測試成果統計

商用無人機空中投彈攻擊動態目標階段測試結果統計表							
項次	場次	測試者	執行次數	命中次數	命中率	精度	影響結果變因
1	第 1 場	甲	4	0	0%	偏移 360 公分	未掌握目標移動速度，影響距離判斷。
2				0	0%	偏移 410 公分	風速變化影響飛行穩定性。
3			4	1	25%	偏移 193 公分	操作穩定，命中目標範圍邊緣。
4				0	0%	偏移 370 公分	目標移動方向變化，影響投擲判斷。

資料來源：本研究整理及製作

(五)動態測試紀實：(如圖 13)。

圖 13-商用無人機空中投彈對動態目標攻擊測試紀實

商用無人機空中投彈對動態目標攻擊測試結果示意圖(第三次測試)



上圖取自無人機俯瞰攝錄畫面，藍圈處顯示空中投彈移動人員目標，紅圈處為細繩懸掛水球(重量約600克)，已呈現墜落姿態，對下方目標進行攻擊。



上圖取自操作手甲執行當日無人機空中投彈第三次測試，針對落點位置使用捲尺量測圓心至落彈點(紅圈處)長度，評定是否符合有效攻擊。



上圖取自操作手乙協助操作手甲量測第三次空中投彈落點位置，經測量操作手乙腳尖至落彈點長度為193公分，於手榴彈爆炸後破片殺傷半徑320公分範圍內，此次攻擊判定有效。

資料來源：本研究整理、拍攝及製作

三、測試成果：

藉由執行靜態目標及動態目標測試等二階段實驗後，產生不同之結果，後續則要針對各測試結論進行靜態及動態人員目標命中率分析，以下便針對各階段產製之測試結論闡述：

(一)靜態目標測試：

共進行 4 場次無人機對靜態目標空中投彈攻擊測試，測試次數合計 20 次，個別結果如下：

- 1.第 1 次操作手甲執行投彈 6 次，命中 2 次，命中率 33%，最大偏移 320 公分，受側風及電量不足影響穩定性。
- 2.第 2 次操作手甲調整繫繩長度後執行 4 次，命中 4 次，命中率 100%，最大偏移縮小至 207 公分。接續由操作手乙操作執行 3 次，受風速影響，命中率降至 17%，最大偏移 460 公分。
- 3.第 3 次操作手乙執行 3 次，因繫繩長度變動，命中 1 次，命中率 25%，最大偏移 810 公分。
- 4.第 4 次操作手乙執行 4 次，因距離誤判及電池電量不足，4 次測試均未命中。操作穩定性、繫繩長度、風速與電池狀況為主要影響因素。
- 5.測試成果統計，(如表 9)。

表 9-商用無人機空中投彈攻擊靜態目標階段結果統計表

項次	場次	測試者	執行次數	命中次數	命中率	精度	影響結果變因
1	第 1 次	甲	6	2	33%	偏移 320 公分	受側風影響、電量不足等因素，影響投彈穩定度。
2	第 2 次	甲	4	4	40%	偏移 207 公分	操作穩定性佳，繫繩長度改善晃動問題。
		乙	3	1	17%	偏移 460 公分	風速影響及操作誤差為主要原因。
3	第 3 次	乙	3	1	25%	偏移 810 公分	受繫固繩長度變動，導致穩定性下降



4	第 4 次	乙	4	0	0%	誤判距離 未命中	誤判距離與電池電量不足，造成偏差
---	-------	---	---	---	----	-------------	------------------

資料來源：本研究整理及製作

(二)動態目標測試：

操作手甲在模擬奔跑士兵目標(由操作手乙擔任)下執行 4 次無人機對動態目標空中投彈測試，個別結果如下：

- 1.第 1 次測試偏移目標距離 360 公分，未命中，原因為未掌握目標移動速度，影響距離判斷。
 - 2.第 2 次測試偏移 410 公分，原因為風速變化影響飛行穩定性，導致未命中。
 - 3.第 3 次測試操作穩定，命中目標距離 193 公分範圍內，為當日唯一命中測試，命中率 25%。
 - 4.第 4 次測試偏移 370 公分，因目標移動方向變化影響投擲判斷，未能命中。
- 整體測試中，目標移動速度、風速變化和投擲時機為主要影響命中率與精度因素。
- 5.測試成果統計，(如表 10)。

表 10-商用無人機空中投彈攻擊動態目標階段結果統計表

項次	場次	測試者	執行次數	命中次數	命中率	精度	影響結果變因
1	第 1 場	甲	4	0	0%	偏移 360 公分	未掌握目標移動速度，影響距離判斷
2				0	0%	偏移 410 公分	風速變化影響飛行穩定性。
3				1	25%	偏移 193 公分	操作穩定，命中目標範圍邊緣。
4				0	0%	偏移 370 公分	目標移動方向變化，影響投擲判斷。

資料來源：本研究整理及製作

四、誤失態樣分析：(以測試數據作為分析基礎)

本節次藉由闡述第三章第四節靜態目標及動態目標測試等兩階段實驗結論後，接續於本章節將針對各階段結論執行分析及提供改進作為：

(一)靜態目標：

1.命中率：

測試結果中顯示，命中率在不同日期與操作手之間產生差異變化。操作手甲在第 1 及第 2 次測試中，命中率分別為 33%與 100%，表現尚可。操作手乙則在第 2、3 及 4 次測試中，命中率分別為 17%、25%與 0%，顯示操作穩定性不足與誤判距離問題將影響命中率。繫繩長度調整、操作經驗與當日環境因素(如風速與電量狀況)皆對命中率產生影響。

2.精度分析：

精度有明顯變化，最大偏移範圍由 207 公分至 810 公分不等。操作手甲透過繫繩長度調整，在第 2 次測試中達到最大偏移 207 公分，相較第 1 次的 330 公分有顯著改善。而操作手乙於第 3 次偏移 810 公分與第 4 次中出現誤判距離情事，顯示繫固繩長度變動及投擲判斷偏差將使精度產生誤差。

3.影響因素：

主要變因包括側風、繫繩長度、操作誤差與電池電量。首要原因為側風影響導致偏移距離擴大，特別是在第 1 及第 2 次表現較明顯。接續為繫繩長度不當引發晃動，降低投擲穩定性。再者為操作誤差在操作手乙測試中導致偏移增加，特別是在移動目標距離判斷與時機掌握上。最後為電池電量不足則在部分測試中影響飛行高度與穩定度，使偏移距離增加並降低命中率。

4.改進作為：

針對此測試結果，操作手可加強飛行控制訓練，提升距離判斷與投擲時機掌握度。繫繩長度須依任務需求標準化，避免晃動影響穩定性。另裝備檢查應涵蓋電池電量與繫固裝置，減少飛行偏差

(二)動態目標：

1 命中率：

在此測試過程中，操作手甲執行 4 次投彈，命中率為 25%，其餘 3 次均未命中。乃受目標移動速度、方向變化及操作手距離判斷影響。首次測試未能掌握目標移動速度導致未命中，後續測試中風速變化及目標移動方向，亦影響命中表現。唯一命中測試發生於操作穩定，且投擲時機符合目標行進路徑時。命中率數值產生大幅度變化，顯示操作手須調整投擲時機與飛行軌道，以應對目標運動特性。



2. 精度分析：

偏移距離介於 320 至 410 公分，顯示針對動態目標投擲精度不穩定。最大偏移出現在風速變化與距離判斷不準時，操作穩定性較高時偏移距離減少至 193 公分。偏移原因大多與操作手無法即時修正飛行路徑，或投擲時未能預判目標位置有關。

3. 影響因素：

主要包括目標移動速度、風速變化、操作穩定性與投擲時機判斷。首要因素為目標高速移動，降低操作手投擲準確性，特別是在距離與時間掌握不精確時。接續為風速變化影響無人機飛行軌跡，使穩定性下降；另當目標移動方向突變時，投擲預判困難，導致偏移增加。

4. 改進作為：

可透過模擬訓練強化操作手距離判斷與投擲時機掌握能力。操作手須熟悉不同目標速度與方向下，修正投擲技巧。而針對風速影響，應增加側風修正參數及強化飛行軌跡穩定控制，且建議調整無人機速度與高度，使投擲與目標運動路徑更契合，降低偏移距離。

(三) 小結：

兩個階段測試結果顯示，命中率、精度與影響變因在不同操作條件和目標類型下有明顯差異。靜態目標階段命中率介於 0% 至 40%，受風速、繫固穩定性與距離判斷影響，偏移距離最大達 810 公分。動態目標階段命中率僅 25%，偏移距離普遍超過 300 公分，目標移動速度與方向變化為主要影響因素。結果顯示操作穩定性、環境條件及裝備調整，影響無人機投擲精度及命中率極大。

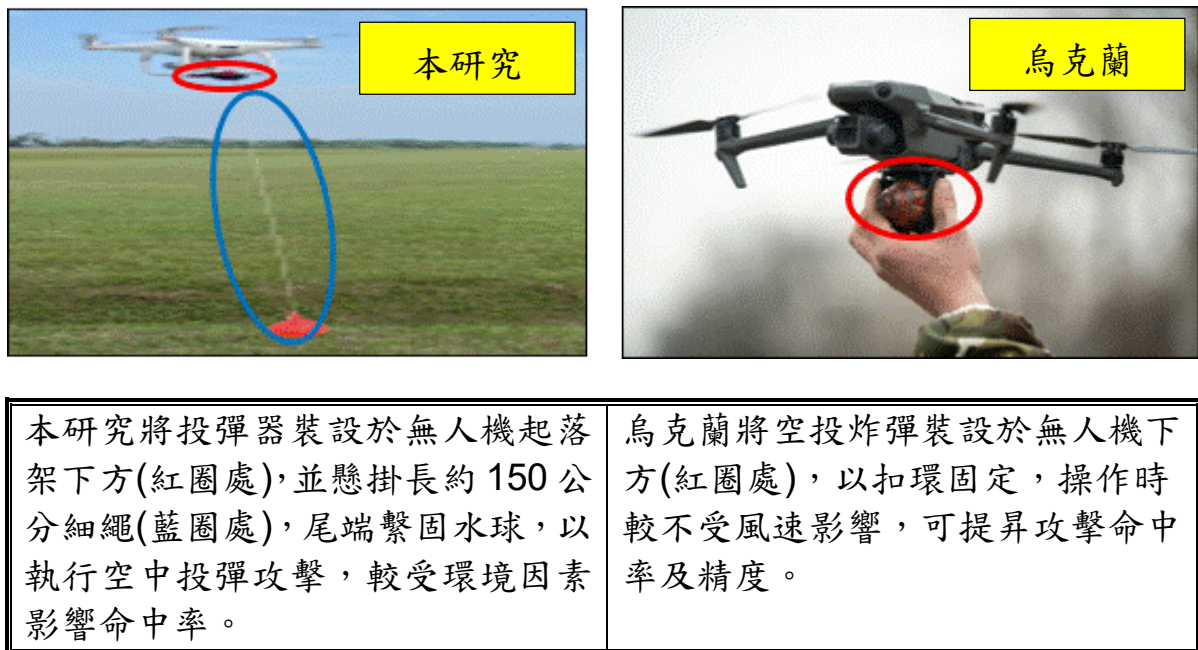
肆、對我防衛作戰省思

本測試運用商用無人機，替代執行軍事空中攻擊任務，成效採手動測量與目視觀察，其準確與可靠度自無法與專業測評相比擬，惟以簡易、可行及模擬實測，在有限測試資源下，完成前述分析與評估，研究數據僅供參考，俄烏戰爭讓無人機登上天空霸主，地面部隊及裝備成為俎上肉，隨時任其宰割，輕而易舉碾碎擊殺，無人機肆虐目標是全戰場內高價值目標，無一可倖免，也因為風頭過健，各國紛紛投入反制戰法與戰具研究，如美軍 M1A2E3(Abrams X) 已將 M230LF30 公厘鏈砲裝設遙控武器工作站，並以雷達導控自動接戰，對於低空無人機將不依靠隨伴掩護防砲部隊，可自立編成防空火網，直接擊落無人機，以下援以商用無人機空攻威脅等 4 點作維防衛作戰借鏡與省思。

一、商用無人機空攻威脅評估：

自本研究無人機於空中對靜態目標投彈攻擊測試結果顯示，針對靜態目標之命中率最高僅達 40%，主要受到風速及投彈時機掌握未恰當所致，偏移距離最大為 810 公分，對動態目標投彈攻擊測試中，命中率僅 25%，偏移距離平均超過 300 公分，顯示若採用無人機對軍事設施與後勤補給點執行打擊任務，其威脅程度較低。但視投擲彈藥殺傷半徑造成之威力而言，仍足以對機動部隊與重要交通節點造成威脅。主要取決於本研究無人機掛彈方式採繩線吊掛，彈藥掛載，(如圖 14)，受天候因素比率較大，若採直接掛載扣住無人機下端，將大幅降低風偏影響，可提升投彈精度及命中率。

圖 14-本研究與烏克蘭無人機彈藥掛載比較示意圖



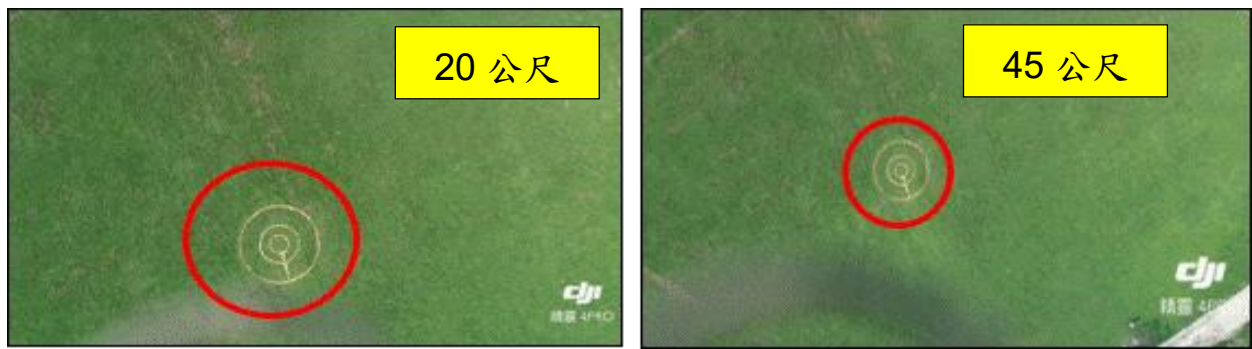
資料來源：本研究整理及製作

二、加強野戰防空及隱掩蔽作為：

針對無人機空中投彈攻擊與我國野戰防空及隱掩蔽作為而論，本研究測試過程中，靜態目標命中率最高僅達 40%，偏移距離最小 207 公分，雖然命中率未達 60% 以上，但仍反映無人機可對後勤基地及固定設施實施限度攻擊，而動態目標測試整體命中率僅 25%，偏移距離多介於 320 至 410 公分，仍可威脅移動部隊及行進路線。為應對此類威脅，我國可結合低空雷達與無源偵測系統提高早期預警能力，並搭配電子干擾設備阻擾無人機導航系統。而隱掩蔽方面，則可提高無人機飛行高度，(如圖 15)，降低噪音干擾、多頻譜偽裝網、煙幕彈及地形屏障，可減少敵方偵察與攻擊成功率，同時部署短程輕兵器(如步槍)以多角度及覆蓋面方式對其射擊，可提升攔截效能。



圖 15-商用無人機空中俯瞰攝影高度比較示意圖



上圖為無人機上升至 20 公尺俯瞰靜態同心圓目標區影像，此時目標區可見度仍算清晰，影響投彈命中率及精度程度較小。

上圖為無人機上升至 45 公尺俯瞰靜態同心圓目標區影像，此時目標區可見度與左圖相比已不明顯，影響投彈命中率及精度程度較大。

三、落實部隊疏散及分散指管：

現代各國要求部隊調整以無人機攻擊之作戰方式，以減少人員、車載武器暴露風險，且提高指管彈性。而根據本研究第三章測試結果顯示，無人機對靜態目標命中率可達 40%，動態目標則為 25%，顯示若未來各部隊為落實有效分散與掩蔽指管設施，將遭受敵軍無人機攻擊機率將大幅提高。¹¹俄烏戰爭中烏克蘭部隊透過小規模分隊作戰及分散指管，成功降低俄軍無人機精確打擊效果。故我國應強化機動指管模式，建立多層次、分散化戰術指揮節點，減少集中式指揮所風險。部隊疏散則應結合電子偽裝、掩體建置與煙幕干擾技術，降低無人機偵蒐效果。透過小規模、靈活機動部隊編組，配合短程防空與電子戰措施，可有效降低無人機空中投彈攻擊戰術風險。

四、強化我軍反制無人機之能力：

針對本研究無人機空中投彈攻擊靜態與動態目標測試結果所示，我國應積極發展無人機運用與反制準則，以確保戰場優勢。¹²現代戰場反無人機作戰須綜合運用雷達偵測、頻譜干擾、自動導引與精準攔截技術，始可抵制敵軍無人機對我環境侵擾。此外，藉由測試結果顯示，風速變化、目標移動速度判斷誤差以及操作穩定度影響無人機攻擊精度，因此，我軍反制無人機能力作法可從預警與偵蒐、電子戰與硬殺攔截及機動防禦等方面來發展執行。

¹¹ 黃文彥、陳則佑、吳龍政，《從俄烏戰爭探討無人機反制作為對我之啟示》，(台北市，空軍學術雙月刊，702 期，2024 年 10 月)，頁 151-153。

¹² 康曉嵐，《無人飛行載具在防衛作戰運用的探討》，《戰略與評估》，第 11 卷第 1 期，2021 年 6 月，頁 87。

伍、結語

本研究透過實驗驗證商用無人機空中投彈攻擊效果，分析不同投擲高度、風速、彈種等因素，對投彈精度及破壞力之影響。最終由實驗結果顯示，其具備一定水準程度之投彈能力，特別是在低空及低速條件下，能夠實現較高精準度。故風速與環境因素對投擲穩定度影響顯著，導致高空投擲時偏差較大。此外，商用無人機易受載重與續航力限制，使其無法承擔高強度作戰需求。而對於我防衛作戰而言，商用無人機可用於游擊戰、突襲與補給干擾，提升小型單位攻擊靈活性，就如同俄烏戰爭運用例證，烏軍於無人機下方搭載改裝手榴彈實施空投襲擾，干擾敵軍補給，打擊敵指揮節點或部隊士氣，藉以讓敵人產生恐懼心理及畏戰意念。然而，敵方亦利用類似技術進行非對稱作戰，因此仍須發展有效反制策略，例如運用電子干擾與精準防禦系統，以降低其作戰風險。因此綜上而述，本研究結果為未來無人機軍事應用提供實證基礎，並對我國未來無人機建軍發展具參考價值。



參考文獻

一、 中文部分

(一)專書

1. 邱緒詠。《淺談美國 M 1 系列艾布蘭主力戰車》。裝甲兵季刊。第 254 期 (2019 年 12 月)。
2. 毒島刀也。《地表最強戰車!M1 艾布蘭徹底追蹤》(瑞昇文化事業股份有限公司)。第 66 頁。
3. 林宏一。《戰車射擊教範(二)》。(桃園市，國防部陸軍司令部，2018 年 7 月 26 日)。
4. 李思平/黃峻民。《戰車部署 2020》。(台北市，尖端科技軍事雜誌社，2020 年 1 月)。

(二)網際網路

1. 維基百科。〈遙控武器系統〉，<https://zh.m.wikipedia.org>。
2. 羅添斌。〈多個國際買家洽詢中科院列清單提外銷申請〉。自由時報。
www.news.ltn.com.tw。
3. 夏天生。〈遙控槍塔發展對步兵戰鬥車之影響〉。(高雄市，步兵學術季刊第 231 期。陸軍步兵訓練指揮部，2009 年 05 月 19)。
https://tpl.ncl.edu.tw/Nclservice/pdfdownload?filepath=lv8oirTfsslWcCxlpLbUfmcCalP8r-hEvBrmDE13YsZMwb6*kyVfCwzok73-3wTa&imgType=Bn5sH4BGpJw=&key=inf13loql_vhTGIFt11XtDcBpnGyRm16iLhTI5RqMeVVu9OMeVVu9OyiINNO4qBZJhZJhLTxWd&XmIId=006873032。
4. 李思平。〈AH-64E 死亡旋翼特輯〉。(台北市，尖端科技，2018 年 07 月 01 日)。
<http://www.dtnadatabase.com/NEWS.aspx?id=1033>。
5. 王奕超。〈WIFI、藍牙、Zigbee-無線通訊三強，誰主沉浮?〉。(台北市，數位建築雜誌)，
http://www.ibtmag.com.tw/news_article_mobile.asp?mod=1&ar_id=24983。
6. Janine Sullivan Love。〈射頻干擾(Radio Frequency)〉。(台北市，百科知識)。干擾頻率範圍 300KHz-30GHz。
<https://www.easyatm.com.tw/wiki/RF%E5%B9%B2%E6%93%BE>。
7. 臺灣物聯科技。〈全系列系統開發板〉。(Arduino 官網，Arduino tutorial)。
<https://blog.gtwang.org/iot/arduino-uno-tutorial/>。
6. A1-16 智慧型伺服馬達，採用金屬齒輪，提高耐用度，擁有 25Kg-cm 扭力，必可提供位置、內部溫度、電源電壓及電流值、可做為高精密度需求系統馬達使用。
https://www.pololu.com/file/0J1212/A1-16_datasheet_20151229.pdf。

7. IMU(Inertial measurement unit)，大多應用於需要運動控制設備，如載具、機器人或人體姿態感測。
<https://howtomechatronics.com/tutorials/arduino/arduino-and-mpu6050-accelerometer-and-gyroscope-tutorial>。
8. 互補濾波器(Complementary Filter)。取高頻陀螺儀訊號積分值，同時也感測低頻加速度器訊號，將兩者分別計算數值取比例相加，用以取得更精準角度，<https://read01.com/M3O25M.html#.X2ogGWgzZPY>。
9. A1-16 馬達只需透過一組 MCU(微控制器)串接，達到各別控制之目的，可大幅降低機體設備數量及成本。https://www.pololu.com/file/0J1212/A1-16_datasheet_20151229.pdf，(2022 年 01 月 19 日)。
- 10.張霄亭，〈視覺暫留原理〉，(台北市，圖書館學與資訊科學大辭典，國家教育研究院，2006 年 12 月)，一般稱為正片視覺停留現象，當人眼作急速景象轉換觀看時，或使用穿戴式裝置時最易產生，後遺因人而異，<http://term.near.edu.tw/detial/16814731>。
- 11.最新訊息。〈線性馬達(Linear Resonant Actuator)〉。(桃園市，瑞澤電子有線公司，2021 年 11 月 02 日)。線性馬達為高精度直趨式馬達，主要由管狀永磁磁鐵(Shaft)與無鐵芯馬達(Forcer)組成。
<https://www.horustech.com.tw/news/31>。
- 12.教教我吧!馬姐(虛擬人物)。〈步進馬達與伺服馬達誰的停止精度比較好?〉。(日本，東京都，東方馬達股份有限公司，問答集第 33 回，2016 年 03 月)。伺服馬達與槍座之間須裝置感應器(Sensor)。接收伺服放大器信號時與計算機指令比對，以回櫃信號控制槍座移動。
http://www.orientalmotor.com.tw/teruyo_det/teruyo_331。
- 13.符薇兒。〈沉浸式頭戴顯示器〉，(台北市，HTC，2021 年 10 月 15 日)。<https://chinese.engadget.com/htc-view-flow-153022828.html>。(2022 年 03 月 13 日)。

二、外文部分：(網際網路)

(一)AH-64D Introduction。

<https://tomjordan35.pixnet.net/blog/post/158647316>。

(二)Arduino。Arduino tutorial。<https://blog.gtwang.org/iot/arduino-uno-tutorial/>。

(三)Overview and Characteristics of Servo A1-16。

https://www.pololu.com/file/0J1212/A1-16_datasheet_20151229.pdf。

(四) Davud Fredericks。〈Family of Weapon Sight-Crew Served〉。(US，BAE，Army-Technology)。<https://www.baesystems.com/en-us/product/fws-cs>。



筆者簡介-1



姓名：吳耀文少校

現職：少校學員

學歷：步訓部專業軍官班 100 年班、步訓部軍官正規班 109 年班

經歷：排長、副連長、連長、人事官、參謀主任，現就讀國防大學陸軍學院
114 年班

電子信箱：軍用：1140210121@ndu.edu.tw

民用：wuyaowen7@gmail.com

筆者簡介-2



姓名：張元斌

現職：中校教官

學歷：陸軍官校 94 年班、陸軍學院 105 年班、戰爭學院 111 年班

經歷：排長、連長、營長，現任國防大學陸軍學院中校教官

電子信箱：軍用：armyh11005@ndu.edu.tw

民用：benmy99979@gmail.com

