

無人機對地攻擊之作戰效能探索

陳一葳¹ 楊嘉智² 洪兆宇³ 趙嘉琦⁴

¹ 空軍航空技術學院機械工程科

² 淡江大學國際事務與戰略研究所

³ 空軍軍官學校航空太空學系

⁴ 陸軍軍官學校機械系

摘要

近年來，本文作者群以個人或小組方式熱切參與軍用無人機之各項學術活動，響應互動及討論，再以軍事運籌學-作戰研究觀點記述內容。此些筆記範圍從令人激賞可供軍校生學習的短札，到詰屈聱牙足供主管軍用無人機之高司參謀作業用之長篇大論。初心緣起，皆因一場討論引起，當時國軍已前瞻軍用無人機之戰場前景，常有活動，但討論內容皆以坊間商用無人機型錄手冊為限，難謂其符合軍事作戰之要求，缺乏講授戰場中軍用無人機為何存在，如何作戰等重點。其欠缺者應係以作業(戰)研究角度診斷問題所在，倘有結論如何加以系統性運用，並成為決策依據。針對待加強之看法，德不孤必有鄰，有識者紛紛鼓勵以最直接有效的方法加以播種，即整理為文投稿黃埔學報。著手實行後，此一執念首先遭逢者為難以做到完美，恐有質疑是否適用於實戰(此處常難達成)；第二面臨者，縱不質疑經篩選檢視，但反向觀之，若內容龐雜將索然無味，無論在學者或自修者或其他有志者，皆將因佔據渠等頗多時間，事倍功半，半途而廢。故本文折衷兩者觀點，將實際野外教練操作與群組熱議事項揉合，消化綜整，取其有價值者。這些重點內容及示範演習將對讀者產生啟發作用，也使從事軍用無人機業務之同仁能專注作戰上之特定面相，不為眼花撩亂之專案任務所淹沒。本文討論無人機在無防空火力與電子干擾狀況下，對地作戰之效能，並分析過程中所涉及的主要問題及作戰效能指標的計算原理。另簡要介紹實用的無人機對地攻擊量化模型的主要功能。

關鍵詞：無人機，作戰效能，作戰效能指標

一、前言

近年戰爭型態之變化，讓人目不暇給。無人機在俄烏、以哈、印巴等戰場大放異彩，成為戰場新寵兒。轟炸敵方陸地目標，或者說空中對敵地面目標攻擊，空中火力密集支援、壓制、覆蓋等任務，已不再由雙方空軍派遣轟炸機或攻擊機執行。取而代之者為無人機、長程火箭、對地飛彈等，尤其是無人機擔負了吃重的角色。依國外

經驗，短航程陸域轟炸無人機專責部隊多為各國陸軍的建制單位，即使非屬陸軍管轄，亦受陸軍作戰管制。因應時代需求、任務革新，我陸軍無人機訓練中心正式編成，肩負戰術運用等重要任務，有效提升國軍不對稱戰力；期能接軌國際先進技術，強化防衛能量，象徵陸軍在不對稱戰力發展上的重大突破，以及對未來戰爭型態的深刻認知及前瞻佈局[1]。

國軍教戰總則第 17 條「研究發展」述明，「保持現狀便是落伍，故研究發展，乃軍隊進步之動力。近代國防科技發展快速，戰爭與戰法亦隨之不斷變化，國軍應依任務、敵情與未來趨勢，對建軍備戰與用兵藝術，發揮集體智慧，持續研究發展，以期日新又新，精益求精，建立現代化國軍」。所謂研究，是一項連續而科學的探討；而發展是應用已知的或已有的科學事實；針對戰略、戰術、戰法、戰技與戰具優先研發，程序則由單兵、伍、班、排、連、營發展。研發無人機戰術宜比照之，由簡馭繁逐步完成體系。

無人機的對地攻擊作戰效能定義為只考慮無人機的飛行狀態和基本戰術、機載對地武器的類型、數量、彈頭型式、瞄準精度(導引武器或精準彈藥則為導引精度)、目標之類型、目標之易損特性，而不考慮敵對抗行為(即不考慮敵防空系統和各種干擾行動的影響)情況下，無人機使用機載空對地武器(如炸彈、火箭、飛彈等)，且非神風機自殺行動，完成作戰任務的能力。無人機的對地作戰效能分析結果-單機單次攻擊對目標的平均殺傷和完成任務所需要之次數是機群作戰方案、對現有無人機性能提升及其子系統等作戰效益評估的基礎。研究單機的對地作戰效益對機群的整體效能研究具有重要意義，且為無人機作戰之電腦兵棋奠基[2]。

本文闡述無人機隊地作戰效益分析過程中所涉及的基本想定、運算公式及範例模擬。

二、原理介紹

對地攻擊作戰效益分析的基本概念，從軍事運籌學(作業研究)理論出發，建立數學模式為首要工作[3]，其效能指標可分為兩類:(1)目標所遭受損傷的數學期望值

$M(v)$; (2)目標所遭受損傷不小於 v^* 的機率 $P(v \geq v^*)$ 。根據不同的目標類型，可以是殺傷目標的相對面積或數量等。其運算方式包括:

- (a)直接運算:給定廣義射擊總數(或攜帶一定數量廣義彈藥對目標實施廣義射擊的無人機架數)。求解 $M(v)$ 或 $P(v \geq v^*)$ 效能指標。
- (b)逆向運算:給定 $M(v)$ 或 $P(v \geq v^*)$ 等效能指標，反求所需廣義射擊總數(或攜帶一定數量廣義彈藥對目標實施廣義射擊的無人機架數)。

顯然，直接運算是逆向運算的基礎。

1. 目標分類

如果對一個目標實施火力行為的結果只有兩種狀況:被擊毀和未被擊毀，則稱該類目標為元素目標。在作戰效益評估理論中，根據對目標所遭受損傷的量度型式不同，一般可把目標分為三類:單目標、面目標和群目標。

- (a)單目標:即元素目標，對該類目標的殺傷尺度為擊毀它的機率，典型的單目標有戰車、飛機、橋梁。
- (b)面目標:由一些不能確切知道它們的座標，而只知道他們的分佈區域的單目標群組成或從目標中不能分離出易損元素的目標。對這類目標的殺傷尺度有兩個:相對殺傷面積的數學期望值與相對殺傷面積不小於給定值的機率。典型的面目標有大型工廠、停機坪等。對於面目標，如果一個方向的尺寸遠小於另一個方向的尺寸，則稱該類面目標為線目標。類似者，對線目標的殺傷尺度有兩個:相對長度的數學期望值與相對殺傷長度不小於給定值的機率。典型的線目標有飛機跑道、鐵路軌道等。
- (c)群目標:有一定組織方式，相互聯繫的元素目標組成的目標群。在火力作用下，

群目標功能的下降，可認為與被擊毀元素目標的總數成正比。對群目標的殺傷尺度有兩個：擊毀元素目標相對數目的數學期望值與擊毀元素目標相對數目不小於給定值的機率。典型的群目標有戰車編隊、飛機編隊和飛彈陣地等。群目標又可分為兩類：疏散型和密集型。對於密集型群目標，一般可將其視為面目標來研究。

2. 對地彈藥殺傷效力之描述方式

廣義對地彈藥包括常規槍(砲)彈、機載炸彈、飛彈、火箭彈、精準彈藥(INS、GPS、GLONASS、北斗或雷射導引)等。為評價廣義射擊的效力，必須給定廣義彈藥對給定目標的殺傷規律，殺傷規律不僅與廣義彈藥終端彈道效應-殺傷因素(破片、爆震等)的強度有關，而且與目標抵抗破壞的能力(即目標的易損特性)有關[4]。根據殺傷目標的條件不同，廣義對地彈藥可分為兩類：

- (a) 直接作用型：設計為衝擊目標，該類彈藥只有直接擊中目標時，才能以一定機率擊毀目標，通常指彈頭酬載無高爆藥者。一般用擊毀目標的機率 G 與擊中目標的廣義彈藥數量 m 間的關係 $G=G(m)$ 來描述其殺傷效力， $G(m)$ 與廣義彈藥和目標的特性、廣義彈藥與目標的撞擊條件、廣義射擊的誤差分佈規律等有關，可通過大量的靶場實驗或統計數值模擬來確定 $G(m)$ ，在近似分析時也可採用以下之數學模型：

$$G(m) = 1 - (1 - \frac{1}{Q})^m \quad (1)$$

其中 Q 為擊毀目標平均所需擊中目標的廣義彈藥總數， Q 可由下式確定：

$$Q = \frac{S_A}{\sum_{i=1}^n S_{A_i}} = \frac{P_A}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (2)$$

式中 S_A 為目標總面積， n 為目標易損單元的個數， S_{A_i} 為第 i 個易損單元的面積， P_A 為廣義彈藥擊中目標的機率， P_i 為擊中第 i 個易損單元的機率。

- (b) 間接作用型：該類彈藥只要在離目標一定距離之內爆炸即能以一定機率擊毀目標，即彈頭含有高爆炸藥鏈設計者。一般用擊毀目標的機率 G 與廣義彈藥爆炸點座標 (x,y,z) 的關係 $G=G(x,y,z)$ 來描述其殺傷效力。設第 i 發廣義彈藥對殺傷規律為 $G_i(x_i,y_i,z_i)$ ，則 n 發廣義彈藥對目標的總座標殺傷規律可用 $G_n(x_1,y_1,z_1;x_2,y_2,z_2,\dots,x_n,y_n,z_n)$ 來表示。如果 n 發廣義彈藥對目標殺傷相互獨立，則有

$$G_n(x_1, y_1, z_1; x_2, y_2, z_2; \dots x_n, y_n, z_n) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - G_i(x_i, y_i, z_i)] \quad (3)$$

廣義彈藥對目標的座標殺傷規律 $G(x,y,z)$ 與條件殺傷規律 $G(m)$ 一樣，與目標特性、廣義彈藥的能量、爆炸點與目標相對應位置等有關，一般也通過大量的靶場實驗或統計數值模擬來確定。

3. 廣義彈藥散佈規律的描述

由於各種隨機因素(如目標參數測量誤差、對瞄準和導引控制系統的各種干擾、目標機動等)的影響，使得廣義射擊中廣義彈藥的實際彈著點(或爆炸點)相對於計算的理想彈著點(或爆炸點)有一定的隨機偏差，這種現象被稱為廣義彈藥的散佈。彈著點(或爆炸點)散佈律可用其座標的機率密度函數 $\Gamma(x,y)$ (對於平面散佈)或 $\Gamma(x,y,z)$ (對於空間散佈)

來描述。不失一般性，下面只討論平面散佈。如果座標軸 OX 和 OY 平行於主散佈軸，則 $\Gamma(x,y)$ 可表示為常態分佈的機率分佈密度函數[5-7]:

$$\Gamma(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} e^{-\frac{(\bar{x}-x)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(\bar{y}-y)^2}{2\sigma_y^2}} \quad (4)$$

式中 \bar{x} 、 \bar{y} 為彈著點(或爆炸點)散佈中心座標(又稱系統誤差); σ_x 、 σ_y 為彈著點(或爆炸點)座標 x 、 y 的標準差。這些參數與射擊條件(到目標的距離、目標的速度、飛行高度、射擊方向等)、武器的種類、瞄準系統、控制系統、導引系統的特性有關，一般需要通過大量的靶場實驗或統計數值模擬來確定。根據廣義射擊進行方式的不同，可把其分為兩類:單獨射擊與集體射擊。針對此二類及其更細部之說明如下:

- (a) 單獨射擊:每次射擊所有輸入數據的量測及瞄準與導引所需用的各種操作都各自獨立進行，顯然各次射擊之間是相互獨立的。
- (b) 集體射擊:進行射擊所需要全部(或部份)輸入數據的量測或操作集體射擊中的各次射擊是共同的，顯然集體射擊為相關射擊。典型的集體射擊有齊射、連射、連續轟炸等。
- (c) 設對目標實施 n 次廣義射擊，對於單獨射擊，第 i 枚廣義彈藥實際彈著點(或爆炸點)座標可表示為:

$$x_i = \bar{x}_i + u_i \text{ 及 } y_i = \bar{y}_i + v_i \quad (5)$$

式中 \bar{x}_i 、 \bar{y}_i 為第 i 枚廣義彈藥彈著點(或爆炸點)散佈中心的座標， u_i 、 v_i 為對應的隨機誤差(一般認為其平均值為零，標準差為 σ_{u_i} 、 σ_{v_i} 的聯合常態分佈)。彈

著點(或爆炸點)座標的聯合機率分佈密度函數為:

$$\begin{aligned} \Gamma_n(x_1, y_1, x_2, y_2, \dots, x_n, y_n) \\ = \prod_{i=1}^n \Gamma_i(x_i, y_i) \end{aligned} \quad (6)$$

式中 $\Gamma_i(x_i, y_i) =$

$$\frac{1}{2\pi\sigma_{u_i}\sigma_{v_i}} e^{-\frac{1}{2}\left[\left(\frac{\bar{x}_i-x_i}{\sigma_{u_i}}\right)^2 + \left(\frac{\bar{y}_i-y_i}{\sigma_{v_i}}\right)^2\right]}$$

為第 i 個廣義彈著點(或爆炸點)座標的機率分佈密度函數。

- (d) 設對目標實施 n 次廣義射擊，對於相關集體射擊，第 i 枚廣義彈藥實際彈著點(或爆炸點)座標可表示為:

$$x_i = \bar{x}_i + x_G + u_i \text{ 及 } y_i = \bar{y}_i + y_G + v_i \quad (7)$$

式中 \bar{x}_i 、 \bar{y}_i 為第 i 枚廣義彈藥彈著點(或爆炸點)散佈中心的座標， x_G 、 y_G 為隨機群體誤差(對於各次射擊相同)。 u_i 、 v_i 為各次的隨機誤差(一般認為其平均值為零，標準差為 σ_{u_i} 、 σ_{v_i} 的聯合常態分佈)。顯然對於固定的群體誤差 x_G 、 y_G ，群體相關射擊中的各次廣義射擊間是相互獨立的，彈著點(或爆炸點)座標的聯合機率分佈密度函數為:

$$\begin{aligned} \Gamma_n^C(x_1, y_1, x_2, y_2, \dots, x_n, y_n/x_G, y_G) \\ = \prod_{i=1}^n \Gamma_i(x_i, y_i/x_G, y_G) \end{aligned} \quad (8)$$

式中 $\Gamma_i(x_i, y_i/x_G, y_G) =$

$$\frac{1}{2\pi\sigma_{u_i}\sigma_{v_i}} e^{-\frac{1}{2}\left[\left(\frac{\bar{x}_i+x_G-x_i}{\sigma_{u_i}}\right)^2 + \left(\frac{\bar{y}_i+y_G-y_i}{\sigma_{v_i}}\right)^2\right]}$$

為第 i 個廣義彈著點(或爆炸點)座標的機率分佈密度函數。如果已知 (x_G, y_G) 的密度

函數 $\Gamma_G(x_G, y_G)$ ，則有

$$\Gamma_n(x_1, y_1, x_2, y_2 \dots x_n, y_n, x_G, y_G) = \Gamma_n^C(x_1, y_1, x_2, y_2 \dots x_n, y_n/x_G, y_G) * \Gamma_G(x_G, y_G) \quad (9)$$

廣義彈著點(或爆炸點)散佈律一班需要通過實驗、分析、仿真、模擬等方法來確定。

三、攻擊效益計算說明

一旦確定廣義彈藥對目標的殺傷規律及散佈規律，即可對無人機的對地攻擊效益進行分析。雖現今國造攻擊無人機未採直接作用型彈藥，惟其為效益計算之基本形式，有助於理論學習。本文將以直接作用型廣義彈藥對單目標實施相關集體射擊為例，討論此時無人機對地攻擊效益的計算原理。設集體射擊為齊射 n 發廣義彈藥，廣義彈藥對目標的殺傷規律為 $G(m)$ ，且 w 已知，目標在散佈平面上的投影面積為 S_A ，則對於固定的集體誤差 x_G, y_G ，第 i 個廣義彈藥擊中目標的機率為

$$P_i(x_G, y_G) = \iint_{S_A} \Gamma_i(x_i, y_i / x_G, y_G) dx_i dy_i \quad (10)$$

而對於固定的集體誤差 x_G, y_G ，集體射擊對目標殺傷效力(機率)為

$$Q_n(x_G, y_G) = 1 - \prod_{i=1}^n \left[1 - \frac{P_i(x_G, y_G)}{Q} \right] \quad (11)$$

集體射擊對地面目標作戰效能指標(機率)為

$$K_n =$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} Q_n(x_G, y_G) \Gamma_G(x_G, y_G) dx_G dy_G \quad (12)$$

如果假設騎射瞄準點座標為(0,0)，每枚彈著點座標隨機個體誤差的標準差相等為 σ_u, σ_v ，則由(10)式可知對於固定的集體誤差 x_G, y_G ，每枚廣義彈藥命中目標的機率相等，則(12)式可簡化為

$$K_n = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ 1 - \left[1 - \frac{P(x_G, y_G)}{Q} \right]^n \right\} \Gamma_G(x_G, y_G) dx_G dy_G \quad (13)$$

軍用攻擊型無人機，無論軍規或商規之目的仍在於摧毀或殺傷目標，目前設計皆採間接作用型彈藥。而要達到此擊殺目的，雖不必擊中目標，但是要求誤失距離(Miss distance)要在設計規範內，其後才能進一步依照其彈頭種類(爆震、破片、錐孔、燃燒…)估算其殺傷能力，故其：殺傷率=命中率×致死率。

然較複雜者，直接作用之彈藥散佈規律依照彈著分佈即可求出命中率，而無人機射擊間接作用彈藥由(4)式衍生出圓誤差機率(Circular Error Probable, CEP)，估測誤失距離。圓誤差機率，又稱圓公算偏差，是彈道學中用來衡量武器系統精確度的一個指標。CEP是以目標為圓心，繪製一個圓圈，如果彈藥命中該圓圈的機率至少有50%，則該圓的半徑就是CEP值。對集體射擊，指的是以目標為圓心，在相同條件下，向同一目標發射多枚武器，其中50%的彈著點會落在該圓的半徑範圍內。換句話說，CEP值越小，表示系統的命中精度越高。一般來說，如果CEP是 X m，50%的彈藥會落在 X m半徑內，43%的彈藥會落在 X m外 $2X$ m半徑內，而7%的彈藥

會落在 $2X$ m 外 $3X$ m 內。0.2% 以下的彈藥會落在 $3X$ m 以外。

有關致死率之計算，即殺傷規律之表述更為複雜。在殺傷效力 (Q_n) 評估計算時，直接作用型彈藥之計算依據是有效彈著發數 (擊毀目標平均所需擊中目標的廣義彈藥總數)，而間接作用型則為有效距離。爆震型彈頭產生峰壓與距爆炸點距離密切相關，震波之波幅隨距離增加而漸減；破片彈頭之威力與其有效範圍亦密切相關；錐孔裝藥則對間距 (Stand-off) 或炸具的要求更為嚴格。為了便於估測間接型彈藥之殺傷效力，避免繁瑣計算及不確定性，改以 CEP 估算對目標的損傷程度，以實際經驗判定全毀、半毀。

四、模擬演習

為探索本文作戰效能計算法對無人機對地攻擊適用性，本研究將其運用於實際案例。模擬課目計分為：(1) 攻擊兩棲登陸艇，(2) 轟炸火箭砲車，(3) 撞擊主戰車。模擬中以白紙戰術、模式演練方式進行仿真演習。

(a) 攻擊兩棲登陸艇:

設國造軍用軍規攻擊型無人機可發射 2.75in 火箭彈 1 發，其平日訓練測驗對地面圓形靶區之射擊彈著點散佈標準偏差為 $\sigma_y = \sigma_z = 1.5$ m，於反登陸作戰時賦予擊毀敵兩棲登陸艇之任務，而敵登陸艇正面輪廓依情報為 3.4×5.2 m²，裝甲防護能力中等，火力協調會議律定， $\Gamma_m > 0.8$ 時， $Q_m = 0.5$ 判定屬半毀， $\Gamma_m > 0.95$ 時， $Q_m = 1$ 屬全毀，則欲達成半、全毀戰果，無人機出動齊射之架數計算如后。

設定散佈中心與等效矩形中心重合，利用 (10) 式可求出動 1 架無人機的命中機率 Γ_1 。

$$\begin{aligned} \Gamma_1 &= \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{1.7}{1.5}}^{\frac{1.7}{1.5}} e^{-\frac{y^2}{2}} dy \int_{\frac{2.6}{1.5}}^{\frac{2.6}{1.5}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-1.1333}^{1.1333} e^{-\frac{y^2}{2}} dy \times \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-1.7333}^{1.7333} e^{-\frac{z^2}{2}} dz = \\ &= \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{1.1333} e^{-\frac{y^2}{2}} dy \times \\ &= \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{1.7333} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \end{aligned} \quad (14)$$

依一般數學手冊 [8]， $F(x)$ 是從 $-\infty$ 到 x 的常態分佈函數， $F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{x^2}{2}} dx$ ，因此從數學手冊中查出的 $F(x)$ 值應減去 0.5，故單架無人機之

$$\Gamma_1 = 2[F(1.1333) - 0.5] \times 2[F(1.7333) - 0.5] = 2(0.8708 - 0.5) \times 2(0.9582 - 0.5) = 0.6796。$$

再依 (11) 式，多架任務之

$$\Gamma_m = 1 - (1 - 0.6796)^m。攻擊每艘敵登陸艇，$$

若出動 2 架齊射， $\Gamma_2 = 0.8973$ ，

$K_2 = 0.8973 \times 0.5 = 0.4487$ 其近半毀；出動

3 架齊射， $\Gamma_3 = 0.9671$ ，

$K_3 = 0.9671 \times 1 = 0.9671$ ，敵將近全毀。

(b) 轟炸火箭砲車:

設有一國造軍用商規攻擊型無人機空投小型榴彈，轟炸敵軍多管火箭砲車，該小型榴彈對消滅半數敵操作手之半徑為 5 m，毀壞火箭車機動能力之半徑為 3 m，根據無人機投彈訓練彈著紀錄，分析圓誤差機率为 6 m，求該無人機對操作手與火箭車的毀損機率。

假定現有單架無人機攜帶小型榴彈 1 枚執行轟炸任務，毀傷機率由空投落點以目標中心為原點，以榴彈殺傷半徑為半徑的圓誤差機率求解如次：因圓誤差

機率偏差 $R_{0.5}=CEP=6\text{ m}$ ，由(4)式令 $1 -$

$$e^{-\frac{R_{0.5}^2}{2\sigma^2}} = 0.5, \text{ 可得 } R_{0.5} = \sqrt{2\ln 2} \sigma$$

$=1.1774\sigma$ ，由此得 $\sigma=6/1.1774=5.1\text{ m}$ ，並將人員殺傷半徑 $R_b=5\text{ m}$ 與裝具殺傷半徑 $R_f=3\text{ m}$ 取代 $R_{0.5}$ ，帶回原式，則針對殺傷敵操作手過半的機率

$$K_1 = \Gamma_1 = 1 - e^{-\frac{5^2}{2 \times 5.1^2}} = 0.3816, \text{ 損毀火箭砲車運動能力部份}$$

$$K_1 = \Gamma_1 = 1 - e^{-\frac{3^2}{2 \times 5.1^2}} = 0.1612。$$

(c) 撞擊主戰車:

設有一國造軍用商規自殺型無人機，綁掛 CL-20 HNIW 錐孔裝藥爆破包，自殺攻擊敵主戰戰車。該炸藥包的毀傷半徑是 50 cm ，穿甲作用等效半徑是 30 cm ，根據導引精度估計，自殺機撞擊的圓機率誤差 $R_{0.5}=CEP=20\text{ cm}$ 。戰法為攻擊敵最弱之處，規劃頂攻撞擊敵砲塔，砲塔艙門口部位的正方形外廓面積約等於穿甲作用等效半徑之圓形面積。任務由 1 架自殺機撞擊艙門口中心為原點，以炸藥包毀傷半徑為半徑的模式作戰。因為圓機率誤差 $R_{0.5}=CEP=20\text{ cm}$ ，仿前例， $\sigma=20/1.1774=17\text{ cm}$ ，並將殺傷半徑 $R=50\text{ cm}$ 代入，則得 $\Gamma_1 =$

$$1 - e^{-\frac{50^2}{2 \times 17^2}} = 0.9871, K_1 = 0.9871, \text{ 知敵}$$

戰車失去機動力之機率。再將穿甲作用等效半徑是 $R=30\text{ cm}$ 代入，則得 $\Gamma_1 =$

$$1 - e^{-\frac{30^2}{2 \times 17^2}} = 0.7892, K_1 = 0.7892, \text{ 知敵}$$

戰車失去火力之機率。當敵車艙門口外廓約為正方形，不考慮系統誤差影響的情況下，自殺機瞄準其中心撞擊，其命中機率根據(4)式，並命其中 $x=y, a=b$ 則

$$\Gamma_1 = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\frac{a}{\sigma}}^{\frac{a}{\sigma}} e^{-\frac{y^2}{2}} dy \right)^2 \quad (15)$$

艙門口正方形面積等於穿甲 CEP 面積，即 $\pi R^2 = (2a)^2, \pi 30^2 = 4a^2, a = 26.587\text{ cm}$ ，同依前例， $\sigma = 17\text{ cm}, a/\sigma = 1.5643$ ，代入(15)式可得機率

$$\Gamma_1 = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-1.5643}^{1.5643} e^{-\frac{y^2}{2}} dy \right)^2 = 2[F(1.5643) - 0.5]^2 = (2 \times 0.4406)^2 = 0.7766, K_1 = 0.7762, \text{ 推算知敵車失去防護力、車組人員陣亡之機率[9]。}$$

五、討論

在上節以直接作用衝擊型廣義彈藥對單目標實施相關射擊為例，模擬了無人機對地作戰效能的直接問題，即已知廣義射擊總數 n ，目標類型及其特性、廣義彈藥對給定目標的殺傷律及其散佈規律，確定對目標的平均殺傷。顯然由直接問題的求解可反向確定逆向問題的求解(即已知對目標的平均殺傷，計算所需要的廣義射擊總數 n)，確定 n 後，就可以根據無人機實施廣義射擊的組織方式(序列數、齊射總數、每次齊射數、每架攜彈數、攻擊次數等)，確定參數。這些參數是攻擊型無人機體系化作戰及其研發生產設計系統工程所必需的原始數據[10-11]。

1. 無人機用兵之管監部門應透過學術研究合作方式，結合產官學研資源成立實用專案計畫，設置資料庫，內容可以分析無人機攜帶的各類廣義彈藥的對地攻擊效能(包括直接和逆向問題)，並用作無人機戰術運用之論證、無人機瞄準點及合理序列、齊射間距的選取、各類彈頭比較與選擇、各型無人機比較與選擇等基

本問題與限制要項。

2. 資料庫應包括無人機與目標的座標距離、殺傷律、各機間隔距離、攻擊角度、彈頭種類等項目，從而確定瞄準、導引系統的特性、掛載佈置、允許的有效掛載、彈頭控制參數等次系統參數。往下延伸，務求周密，相互支援，形成網狀。
3. 無人機訓練單位對平日訓練射擊單環靶、矩形靶或類似靶區資料應詳予蒐集、彙整，尤其是射擊之標準偏差 σ_x 、 σ_y 至關重要，為戰技術皆須重視項目，必須確實可信。
4. 由計算矩形目標的機率知，實質上是 x 方向和 y 方向的常態分佈函數的乘積，需要查數學手冊電腦運算才能求得。通過比較命中正方形目標的機率與命中等面積圓形目標的機率，相差很小這一事實得知，可以把常態分佈函數描述的實際機率用指數函數來描述：

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-a}^a e^{-\frac{y^2}{2}} dy \leq \sqrt{1 - e^{-\frac{2a^2}{\pi}}} \quad (16)$$

或者說，用一個截尾常態積分

$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-a}^a e^{-\frac{y^2}{2}} dy$ 的近似值 $\sqrt{1 - e^{-\frac{2a^2}{\pi}}}$ 來描述。對於正方形目標，當其面積與圓形目標相等時， $\pi R^2 = 4a^2$ ， $a = \sqrt{\pi}R/2$ ，則

$$\Gamma_1 = 1 - e^{-\frac{2a^2}{\pi\sigma^2}} \quad (17)$$

對於矩形目標($2a \times 2b$)，則

$$\Gamma_1 = \sqrt{\left(1 - e^{-\frac{2a^2}{\pi\sigma^2}}\right)\left(1 - e^{-\frac{2b^2}{\pi\sigma^2}}\right)} \quad (18)$$

5. 依據美軍 AMCP 706-017 設計手冊第 6.7

節 擊 殺 率 (殺 傷 率) 公 式 [12]: $P(\text{kill}) = P(\text{hit}) \times P(\text{proper functioning of design})$ ，更細部者， $P(\text{kill}) = P(\text{proper mechanical function}) \times P(\text{proper crew performance}) \times P(\text{hit on the hypothesis of proper aim}) \times P(\text{kill on the hypothesis of a hit})$ 。簡言之，殺傷率=命中率×致死(傷)率，致死率由殺傷規律推算而得，須以單發致死率為基礎，但數據獲得非常困難。殺傷規律為殺傷因素與目標抵抗破壞的能力之間的抗衡，即矛與盾之較量，亦創傷彈道與防護技術之競爭。國際上對此研究皆採保密措施，秘而不宣，資料收集不易。況國造軍用無人機之應用仍多屬偵察、觀測型，攻擊型無人機尚於起步階段，軍用商規攻擊型無人機酬載為小口徑榴彈，抑或逕採炸藥包，仍無定論。遇此瓶頸，參照國內武器系統研究的作法，均將殺傷率略過不談，而以命中率為研究對象。本文雖仿效之，但公式推導時仍將殺傷規律列入，期能有朝一日能發揮之，實例演習時，以半數必中界理論，以攻擊無人機相類似之間接作用型彈藥帶入 CEP 算法，計算得命中機率，機率高者，誤失距離短，因此人員易傷亡、裝備易戰損。故命中機率高過定植時，即認定產生殺傷。

六、結論

本文探討了無人機對地作戰效能計算過程中所涉及的主要問題。簡要介紹了一些基本數學模式，並進行模式模擬演習與討論。須知者，解決無人機對地攻擊效能的關鍵在於確定廣義彈藥的殺傷律及其散佈規律。以學理而言，作戰效益指標為殺傷規律(機率)與散佈規律(命中率)之乘積。由於彈藥設計分為直接作用型與間接作用型，兩者之兩項規律的計算方法和細節不

同。直接作用型將其兩項規律構建在有效彈著之射擊發數；而間接作用型則以誤失距離來求取其兩項規律之機率。國造軍用無人攻擊機現均採間接作用型彈頭，故引入 CEP 算法，求出命中率及誤失距離，再依誤失距離推估殺傷規律(機率)。然在實例運用中，彈頭種類未定型，或仿國外逕採急造彈藥者(炸藥包)者等等限制因素使殺傷規律無法求出，雖然如此，仍推定其為距離之函數。變通之作法係將 CEP 求出命中率，CEP 合於要求者，設定殺傷機率，代入作戰效能指標計算，為可行且可信之作法。

參考文獻：

- [1] 黃迪明、郭曉蓓、孫建屏，"【國防焦點】陸軍無人機訓練中心編成 提升不對稱戰力" 青年日報，軍聞20250118，2025.
- [2] 趙嘉琦，"電腦兵棋之基礎-軍事運籌學" 國防雜誌，17(2)：pp. 60-70, 2001.
- [3] 趙嘉琦，"「模式模擬」要跟上「國機國造」與「國艦國造」的隊伍，"尖端科技軍事資料庫，尖端科技軍事雜誌社，2018.
- [4] 機械系主編，武器系統課程授課教材，第七章，陸軍軍官學校，pp. 270-271, 2021.
- [5] Barber, D. F., Bosinoff, I., Doshay, I., Flehinger, B. I., Haigler, W., Kennedy, H. J., Knight, C. R., Monros, A. J., Saunders, M. H., Tall, M. H., and Voegtlen, H. B., Prediction-Measurement, final report of task group II, weapon system effectiveness industry advisory committee (WSEIAC), AFSC-TR-65-2, U. S. Air Force, pp. 129-132, 1965.
- [6] 宋真堯(編授)，趙嘉琦(抄錄)，武器系統設計講義，中正理工學院兵器系統工程研究所，1996.
- [7] 宋真堯(編授)，趙嘉琦(抄錄)，武器系統分析講義，中正理工學院兵器系統工程研究所，1996.
- [8] 楊權輝，標準數學手冊，曉園出版社，pp. 638-645, 1986.
- [9] 趙嘉琦，"彈道學在槍擊自殺案判定上之應用" 刑事科學，86：pp. 33-57, 2022.
- [10] 樓文達，電腦兵棋模擬特論，兵器系統叢書 13，第四章，中正理工學院，1990.
- [11] Shephard, R. W., Hartley, D. A., Haysman, P. J., Thorpe, L., Bathe, M. R., Haysler, E. R., and Lakin, A., Applied Operations Research: Examples from Defense Assessment, Pienum Press, pp.145-158, 1988.
- [12] Billingsley, J. D., Rafert, W. E., Jank, A. W., Jaco, Jr., C. M., Cragin, J. M., Patterson, G. K., Ballistics, Engineering Design Handbook AMCP 706-107, Elements of Armament Engineering Part Two, McGraw-Hill, Sec. 6-7, p. 6-8, 1959.

Survey to Operation Effectiveness of Drone Attacker

Yi-Wei Chen¹, Chia-Chih Yang², Chao-Yu Hung³, Chia-Chi Chao⁴

¹Department of Mechanical Engineering, ROC Air Force Institute of Technology

² Graduate Institute of International Affairs and Strategic Studies, Tamkang University

³Department of Aeronautics and Astronautics, ROC Air Force Academy

⁴Department of Mechanics, ROC Military Academy

Abstract

Over the last years, the authors of this paper have, individually or together, been responsible for the conduct of serial notes on the drone of Military Operation Analysis/Operation Research (OR). These notes have ranged from short appreciation lessons for military students to longer courses amid primarily at officers who intend to practice military drones in a defense department. All have been linked by a conviction that merely teaching the commercial textbook techniques of drone cannot be said to make a fully rounded course on what military drone is and how it work in battle practice. Indeed, it is the ability to carry out the other phases of drone work-diagnosis of the system problem and implementation of results-that experience shows is generally more important in influencing decisions. We are not alone in observing this failing. A common response is to introduce descriptions of case studies and practical project work into the syllabus-WHAMPOA. The first of these approaches is not only difficult to do well but of dubious value if the cases are not presented by those who actually carried out the study (which is not easy to achieve). The second has undoubted value provided it is well supervised but, in retrospect, will often to found to have occupied considerable amounts of student time in administration, visits, and so on. While adopting both these approaches, we have discovered that there is considerable value in carrying out a number of practical drills in field or subgroup actives. These complement lectures and demonstrations by make the reader use this paper and think inductively, and yet allow the officer to concentrate on some special aspect of the practice of military drone that may not emerge in specific projects. The fundamental problems involved in operational effectiveness analysis of drone attacker in the absence of the air defense and electronic countermeasures are presented. The principle to compute effectiveness indexes are discussed. Then the main function of a practical model is introduced briefly.

Key words : operational effectiveness, drone attacker, effectiveness indexes