

# 揭露遠距離精準射擊奧秘——以統計與彈道學觀點探討槍口初速測量之重要性

作者/郭晉愷少校



陸軍官校正99年班，步訓部正規班356期、美國步兵軍官高級班17-2期，曾任排長、副連長、連長、中隊長。著有軍事內部專業書籍《狙擊彈道學》一書。現任職於陸軍步兵訓練指揮部狙擊組主任教官。

## 提要

- 一、槍口初速對遠距離彈道計算具有關鍵的影響，特別是當射程超過600公尺後，任何微小的初速變化，都可能導致彈著點產生明顯偏差，進而降低命中率。因此，狙擊手必須盡可能地掌握正確的初速數據，並透過彈道計算機（或應用程式）精確計算各距離下的彈道墜落值，據以決定欲命中目標，理論上需要調整的響數或者其他瞄準補償方式，以達到最佳射擊效果。
- 二、受限於發射藥量等裝填品質差異，並非每一發子彈的槍口初速都完全相同，而彈道計算機在操作時，卻又只能輸入一個「單一數值」作為基準。故如何獲得具代表性的槍口初速數據，就成為影響射擊精準度的關鍵因素之一。射手除了倚賴測速儀與測風儀等科技裝備外，若能具備正確的統計概念，將更能有效掌握初速變異，避免訓練誤區，達到事半功倍之效果。
- 三、本文源於筆者長期對國內各單位狙擊手在彈道計算機實務應用之觀察，結合國外文獻研究，經實際測試與教學驗證後，針對「槍口初速測量」與「統計學理論與機率」兩大主題進行系統性整理，並提出相關科技裝備具體的使用建議，期望能對已經起身投入彈道應用、卻曾經面臨初速測量與數據處理困境的射手有所幫助。唯有用科學的方法，解決因科學應用衍生而出的問題，方能使狙擊手將手上的彈道計算機（或應用程式）發揮最大效用，進而促進部隊「科學化練兵」思維的深化發展與進步。

關鍵詞：狙擊、槍口初速、彈道

## 壹、前言

槍口初速 (MV, Muzzle Velocity) 對大部分官兵 (射手) 來說, 可能只是準則裡的一個諸元數據, 除了學習過程中必要的背誦, 幾乎感受不到槍口初速對射擊帶來的幫助, 然而對有效射程可及 800 公尺, 甚至 1000 公尺以上的狙擊手來說, 槍口初速卻扮演了一個極其重要的角色, 畢竟狙擊槍係因應遠距離精準射擊目的而生的武器, 對精準度與命中率的要求, 以及在射程調整或表尺裝定的需求, 均與步槍截然不同, 尤其 600 公尺遠距離後<sup>1</sup>, 彈道軌跡本身的變化, 受彈道係數<sup>2</sup>、槍口初速以及外在環境因素的影響也就越大, 如果無法事先掌握並消除各種能使彈道產生偏差的因素, 在「差之毫釐、失之千里」的作用下, 即使射手射擊技巧再精湛, 也難以準確命中目標。因此, 如果狙擊手無法獲得正確的槍口初速, 那麼就沒辦法透過彈道計算機 (或應用程式) 準確計算出彈道的墜落值 (Bullet Drop), 也沒辦法知道欲使子彈命中遠距離目標, 需要如何調整狙擊鏡的高低調整螺響數, 或者應該以鏡內刻劃板 (Reticle) 抬高多少瞄準點方式, 方能達到最佳的射擊效果。此外, 槍口初速亦深刻影響彈頭的外彈道表現。特別是其數值高低, 會直接影響彈頭飛抵目標所需的飛行時間 (Time of Flight), 而飛行時間又是決定風偏修正量 (Wind Deflection) 與移動目標射擊前置量 (Moving Target Leads) 的關鍵參數。故對狙擊手而言, 若能精準預測每一發的槍口初速, 便能更有信心地掌握各項外在射擊變因, 從而實踐「將可控之常數確實掌握, 並將不可控之變數降至最低」的精準射擊原則。

筆者因教學研究需求, 自民國 109 年起開始著手規劃狙擊槍彈道測試相關工作, 初期為能獲得彈道計算時的必要參數「槍口初速」, 以傳統感光式的測速儀作為主要測量工具, 經常有儀器架設步驟繁瑣費時、數據易受光線影響無法讀取或不準確...等問題, 甚至射手必須精準地將子彈從光閘射穿出去, 避免誤擊造成裝備損壞, 導致測試效率與信度均受影響。然而, 近年來受益於國外遠距離/超遠距離射擊風氣盛行, 促進彈道計算機 (應用程式)、測風儀、測速儀等科技輔助工具神速發展, 如今, 原本在產品定位上屬於高階的「雷達偵測式」測速儀, 已經有越來越普及且價格越來越親民的趨勢, 憑藉即放即用、無複雜架設程序、也不用擔心誤擊光閘...等優點, 射手欲在歸零射擊或遠距離射擊訓練同時, 大量蒐集每一發子彈射擊出去的槍口初速, 將不再是夢寐以求的難事。因此, 筆者認為在資源發展相對到位的當下, 進行與槍口初速測量有關的統計觀點與彈道應用探討, 能促進部隊「科學化練兵」思維的深化與進步, 亦是本文撰寫的主要目的。

## 壹、槍口初速與標準差對射擊之意義

槍口初速, 即彈頭離開槍口時的瞬間速度, 一般用每秒公尺 (m/s) 或每秒英呎 (fps)

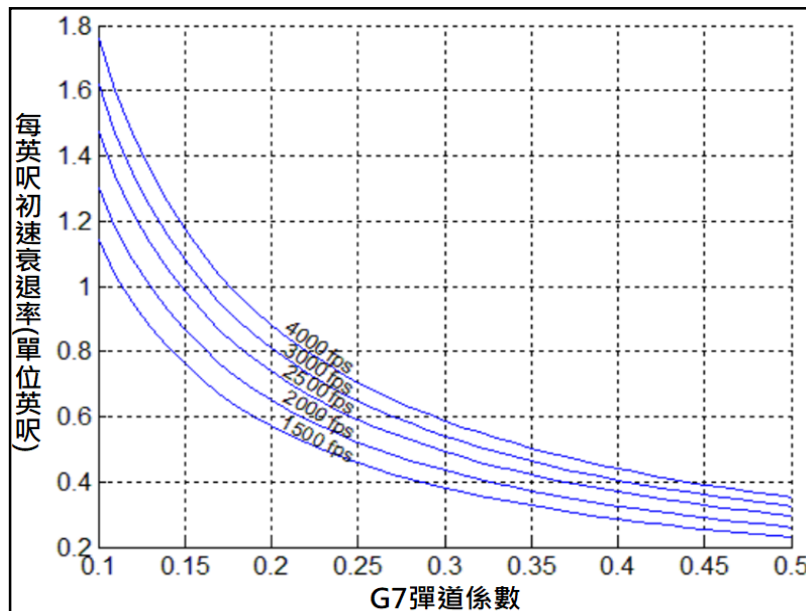
<sup>1</sup> 關於現代狙擊距離定義, 雖然目前無文獻精確定義, 然就經驗常數而言, 可區分: 0-300 公尺為近距離 (Close Range)、300-600 公尺為中距離 (Medium Range)、600-1000 公尺為遠距離 (LR, Long Range)、1000 公尺含以上為超遠距離 (ELR, Extreme Long Range)。

<sup>2</sup> 彈道係數 (BC, Ballistic Coefficient): 為衡量彈頭所受到空氣阻力大小的係數, 或指某特定彈頭其所能克服空氣阻力之能力, 由截面密度 (Sectional Density) 除以阻力係數 (Form Factor) 計算而來, 在計算阻力係數比值時, 因參照的彈頭模型不同, 又區分 G1BC 及 G7BC 兩種, 且最為常用。彈道係數高低不能全然代表彈藥之優劣, 彈道係數越高, 相較於較低之彈頭, 僅能說明其風阻係數較小, 較能維持初速, 以致初速與動能衰減較慢 (相同距離上能有較高之殘餘速度與動能), 最重要的是彈道墜落值與風偏量修正值較小 (即測距、測風誤差容許值較大), 適合進行遠距離精準射擊, 而與侵徹力或殺傷效能無關。

表示之，是判定武器系統戰鬥性能的重要因素，與彈道係數（**Ballistic Coefficient**）同為現代彈道計算機中，計算彈道時不可或缺的兩大輸入參數（**Input**）。彈頭重量相同時，提高槍口初速的實質意義為：

- 一、增加飛行距離。
- 二、彈道更為低伸（彈道補償值較小，測距誤差容許範圍大）。
- 三、減少外在環境因素影響（風偏補償值較小，測風誤差容許範圍大）。
- 四、增加侵徹力和殺傷力。

槍口初速可由測速儀（**Chronograph**）實測獲得，若無彈藥限制，建議應以測量 30 發為佳、20 發其次；若有彈藥限制，最低不應低於 10 發，以求客觀。惟須注意的是，傳統感光式測速儀（如 **Chrony**、**Oehler**、**CED**...等品牌）所測得之速度並非實際槍口初速，而是測速儀所在距離配合當下環境溫度所測得之彈速（**Bullet Speed**），故需考慮測速儀所在距離，並透過彈道計算軟體輸入正確的彈道係數逆向推算獲得真實槍口初速。或者，也可以參考美國彈道學家 **Bryan Litz** 於〈**Velocity Decay between Muzzle and Chronograph**〉一文中所提供的「槍口初速每英呎衰退曲線圖」實施換算（如圖一），使用時只需將使用彈藥之 **G7** 彈道係數對向槍口初速曲線，透過矩陣得知每英呎槍口初速衰退率，將其乘以槍口至測速儀之距離即為槍口初速衰退量，再加回去原先測得之彈速即可得到更接近之槍口初速。此補償值雖然很小，但若未能適時補償，遠距離射擊時可能因過多的修正量使得彈著點產生偏高問題。



圖一 Bryan Litz 槍口初速每英呎衰退曲線圖

資料來源：Applied Ballistics 官方網站教育資料〈**Velocity Decay between Muzzle and Chronograph**〉  
下載（2025 年 8 月 5 日）

另傳統感光式的測速儀雖然構造簡單、價格便宜，但也非常容易因人為或環境問題產生測速誤差。如兩道光閘裝置後距離與原廠設定不同、兩道光閘本身未完全平行、彈頭入射角未與兩光閘平行、彈著落點偏離光閘中心過遠、光源不足或兩光閘未均勻曝曬到陽光、又或測量期間有 2-4 哩以上微風使兩光閘在子彈通過瞬間產生輕微晃動...等都可能造成明顯的測速誤差或使標準差因而驟增。因此，就現實面而言，使用傳統測速儀，誤差能控制在每秒正負 3 公尺（10 英尺）內，已經是相當理想的情況；控制在每秒正負 4.5 公尺（15 英尺）內，則是使用者不得不妥協的事實。除非能獲得並改用「槍口電磁式」或「雷達偵測式」...等中、高階測速儀（如圖二），則可避免掉上述大部分問題又能測到較接近真實槍口初速之數據<sup>3</sup>。



圖二 槍口電磁式（Magneto Speed）與雷達偵測式（Labradar）中、高階測速儀  
資料來源：筆者自行調製（2025 年 8 月 5 日）

若完全無測速儀可以使用時，可先參考原廠提供之槍口初速，再利用彈道計算機，如 Kestrel 5700 測風儀內建槍口初速校正功能（Truing/Calculating Muzzle Velocity）實施逆向推算<sup>4</sup>，但前提是必須取得該彈藥真實的彈道係數，以免錯上加錯。如果在彈道係數不正確的前提下完成槍口初速校正，實際彈道只會在校正的距離上與預測結果相符，之前或更遠的射程仍會有明顯落差。以 Kestrel 5700 內建 Elite Ballistics 彈道計算功能模擬近似 TC94 狙擊彈為例，在 600 公尺射程上分別以 G7 彈道係數 0.243 及 0.219 兩組參數（約 10% 差異）進行彈道預測，將某一組參數固定、僅調整另一組彈道係數所搭配的槍口初速大小，使兩者在 600 公尺修正值（響數）均相同，則 800 公尺

<sup>3</sup> 筆者曾以 MagnetoSpeed、LabRadar Doppler、CED M2（X2）三款共四台測速儀，同步監測 15 發 TC94 狙擊彈槍口初速數據，發現 Magneto Speed 平均初速僅略低 LabRadar Doppler 數據 0.6m/s，CED M2 平均初速則高出前兩者 2-3m/s 不等。

<sup>4</sup> 如具備彈道計算功能之測風儀 Kestrel 5700 Elite 內建 Cal MV（Calibrate Muzzle Velocity）校正功能，即是在所有槍枝（特別是彈道係數）與環境參數均正確輸入的前提下，藉由回饋系統實際彈道與模擬數值之落差，逆向演算更符合實際之槍口初速。通常建議以彈速進入 1.2 馬赫（即進入超音速影響，約每秒 408 公尺）時所在距離之 90-100% 作為基準校正距離（以國造 T93K1 狙擊槍搭配 TC94 狙擊彈為例，約於 770 公尺進入 1.2 馬赫，故建議於 693-770 公尺間實施校正）。在完成基準校正距離的數據回饋後，系統即自動修正槍口初速，隨之建議再以 1/2 基準校正距離進行彈道驗證，若模擬數值高低符合實際所需，即完成 Cal MV 校正。

將產生約 15 公分 (0.6MOA)<sup>5</sup>、1000 公尺約 60 公分 (2MOA) 之彈道預測落差，進而影響遠距離命中率。這也是現代狙擊手使用彈道計算機作為輔助工具時應有的一個重要觀念：「彈道計算機固然實用且既快速又方便，但想要有精確的結果，也要先看你輸入的數據或操作要領正不正確 (Garbage in, garbage out.)。」故建議各單位狙擊組在積極從事訓練、提升裝備素質的同時，亦應設法配備一具精確可靠的測速儀，以實測方式獲得平均槍口初速並調製個人化射表，方能有效提升遠距離首發命中機率。

只是，讀者必須注意的是，根據 Applied Ballistics 彈道顧問公司官方網站教育資料：Doc Beech 所撰<Why you CANNOT rely on the MV on the Ammo Box!>一文指出，原廠所提供之槍口初速數值往往存在以下問題，故建議射手不應依賴原廠所提供之槍口初速，而必須實際上透過測速儀來測量：

- 一、無法得知該數據是真實的槍口初速或是某個特定距離上的彈速。
- 二、無法得知原廠測試槍枝參數（如槍管長度、纏距、保養方式、保養水準以及膛壁燒蝕與膛線磨耗程度...等）。
- 三、無法得知測試環境（如溫度）與彈藥批號。
- 四、廠商通常不會顯示槍口初速標準差。

此外，透過測速儀測量槍口初速，當蒐集足夠數據後，儀器也會自動產生出一組標準差，也就是槍口初速標準差 (MV SD, Muzzle Velocity Standard Deviation) 供使用者參考。所謂的標準差，是統計學中衡量一組數據平均離散程度的指標，其公式複雜鮮少手動計算，通常由測速儀自動計算或 Excel 函數、標準差計算網頁等方式獲得。射手得知槍口初速標準差大小，能有以下幾個實質意義：

- 一、標準差越小、槍口初速變化越小、外彈道表現越穩定。
- 二、可預測隨機射擊 1 發，其槍口初速落在「平均槍口初速」正負 1 倍標準差的機率約為 68%、落在正負 2 倍標準差的機率約為 95%、落在正負 3 倍標準差的機率約為 99.7%。一般取平均槍口初速的正負 2 倍標準差作為預測，便能涵蓋絕大多數可能產生的槍口初速。如某槍枝平均槍口初速為 810m/s，標準差為 5m/s，則可預測該槍隨機射擊 1 發，有 95%的機率槍口初速將落在 800-820m/s（正負 2 倍標準差）範圍內。

最後補充美國彈道學家 Bryan Litz 於其著作《Accuracy and Precision for Long Range Shooting》第 272 頁定義槍口初速標準差之控制規範：小於或等於每秒正負 10 英呎時（約每秒正負 3 公尺），為手工精密裝填之彈藥品質；小於或等於每秒正負 15 英呎時（約每秒正負 4.6 公尺），為工廠精密生產之彈藥品質；大於每秒正負 20 英呎

<sup>5</sup> MOA (Minute of Angle)：中文譯作角分，為角度單位，1 角分相當於 1/60 度（即 0.016666...度）。以英制單位計算，該角度放射狀延伸至 100 碼所形成之夾角差（弦長）為 1.047 英吋寬，換算為公制單位即 100 公尺所形成之夾角差（弦長）為 2.909 公分寬（通常省略記為 2.9 公分）。故當敘述某槍枝具 1 角分之精度時，通常指射擊 3 發（5 發）以上之彈著群，於 100 公尺處之散佈大小（最遠兩發之兩點中心連線距離）能小於 2.9 公分、2 角分則為 5.8 公分，以此類推。因其角度量極小，被軍事大量用於衡量槍枝精度或瞄準鏡內部刻劃與高低、風偏調整螺之單位。

時（約每秒正負 6.1 公尺），則為低劣之彈藥品質。另其亦歸納，對大部分遠距離射擊彈藥而言，槍口初速誤差若能控制在每秒正負 10 英呎內時，等同於 1000 碼處產生 0.5-1MOA 不可控制之垂直散佈（彈道高低落差，經換算約 13-27 公分），提供讀者參考。

## 貳、影響槍口初速之相關因素

槍口初速的實際高低，與發射藥的用量、類型、燃燒速率，環境與彈藥溫度、彈頭重量與裝填深度、槍管長度與纏距<sup>6</sup>、保養水準，乃至膛壁燒蝕等多項因素密切相關。就現階段國軍的實務狀況而言，除環境溫度、彈藥溫度、槍械保養水準及膛壁磨耗程度等因素可由射手加以控制、避免或改善其潛在不利影響外，其餘因素多屬射手無法主動掌握之定數或變數。因此，本段將以實務觀點出發，逐一說明上述各項影響因素：

就「發射藥量、形式、燃燒速率、彈頭重量與裝填深度」等因素而言，屬內彈道研究範疇，且均是當前國內射手無法直接掌握之定數或變數，其品質好壞，直接決定槍口初速的高低與射擊穩定性。目前國造 TC94 狙擊彈出廠標準為：槍口前 78 英呎（即 23.8 公尺）測得之平均彈速必須符合每秒 2550 英呎，正負 30 英呎規範（即每秒 778 公尺，標準差正負 9.1 公尺），若將上述「槍口前 78 英呎測得之彈速」按照上圖一「Bryan Litz 槍口初速每英呎衰退曲線圖」方法，回推成「槍口初速」，約為每秒 808 公尺（與筆者實際以 8 挺國造 T93K1 狙擊槍搭配 108 年生產之國造 TC94 狙擊彈（批號 C-108G-1-018）測得之平均槍口初速概同）。另透過 Kestrel 5700 內建 Elite Ballistics 彈道計算功能模擬近似國造 TC94 狙擊彈平均槍口初速每秒 808 公尺之彈道，其出廠之標準差為正負 9.1 公尺（不可控制變數）將導致彈著點於 600 公尺存在正負 0.5MOA 之變化（約高低各 8 公分），800 公尺存在正負 0.8MOA 之變化（約高低各 18 公分）。相較美造 M118LR 狙擊彈官方數據，其平均槍口初速為每秒 792 公尺，標準差正負 4.5 公尺（即每秒 2600 英呎，正負 15 英呎），槍口初速標準差僅為國造彈之 1/2，遠距離彈道較為穩定。

就「環境溫度與彈藥溫度」而言，筆者認為至少應具備以下兩個重要觀念：第一，外在環境溫度不僅影響空氣密度大小，也會影響子彈發射藥的燃燒效率，使射擊瞬間膛壓改變（TC94 狙擊彈平均膛壓為 56606 磅/每平方英吋，即 3962 公斤/每平方公分），進而影響槍口初速高低。依據美國 Applied Ballistics 公司官方資料指出，一般小口徑狙擊彈使用之發射藥燃燒效率致槍口初速隨外在環境溫度改變之增減率約為：攝氏每增加 1 度，平均槍口初速每秒增加 3.25 英呎（即約每秒 1 公尺），反之，則相反。與筆者實際

<sup>6</sup> 依據軍備局第 205 廠民國 113 年 1 月編印之《輕兵器設計技術參考手冊》指出：纏度（Twist Rate）的表達方式有三，其中較常用的有兩種，第一種為纏距（Travel Length）方式，可定義為：「彈頭在槍管內旋轉一周，所行之直線距離，常用單位為英吋」。另一種為纏距方式加上槍膛口徑（英吋），用口徑與纏距之比例來表示，可定義為：「彈頭在槍管內旋轉一周，所行之直線距離相當於口徑之倍數，無特定單位」。以口徑 0.308 英吋的國造 T93K1 狙擊槍為例，因彈頭在槍管內旋轉一周的直線距離為 11.22 英吋，故為其纏距；若用口徑與纏距之比例來表示纏度，則為 11.22/0.308=36.43。雖然兩者都是表述纏度的方式，然主要差異在於：「纏距未考量槍膛口徑，故不能很好解釋纏度相對起來是快還是慢；纏度則因用口徑與纏距之比例來表達，更能解釋不同口徑槍管之間，纏度之相對快慢。因此，纏度數值越大，轉速越低；反之，則轉速越高。」

以 4 挺狙擊槍（國造 T93K1 狙擊槍 1 挺、國造 T108 半自動與手栓式狙擊槍各 1 挺、英造 AXMC 狙擊槍 1 挺），在兩次測速環境溫度相差約攝氏 13 度的條件下（26-27 度與 13-14 度），各別射擊 10 發測量平均槍口初速，藉前後落差換算所得之增減率：「攝氏每增加 1 度，平均槍口初速每秒增加 0.9-1 公尺，反之，則相反。」大致相符。因此當射擊與槍口初速測量時之環境溫差超過攝氏 10 度（含）以上時，狙擊手便必須留意槍口初速變化可能對彈道造成的不利影響。當然，隨著彈道應用需求的提升與各類實用工具的發展，目前多數的彈道計算機（應用程式）皆具備「初速溫度表（MV Temperature Table）」功能。如美國 Applied Ballistics 公司所開發的 Quantum 彈道計算程式，便已內建此項功能。射手僅需在不同環境溫度下，進行多次槍口初速測量，並將每次測得的平均初速填入表單，系統即可自動計算該彈藥在不同溫度條件下的初速變化率（增減率）。接著，程式會依照使用者輸入的環境溫度，自動校正槍口初速，進行更準確的彈道推算，從而提升彈道預測的準確性。（如圖三）

槍彈配置



初速溫度表

可設定不同溫度下的初速，以校正溫度對子彈初速的影響。溫度變化可能會影響火藥燃燒效率(若使用低溫感火藥，建議可不用設定)，進而影響初速，特別是在不同環境條件下射擊時，此功能可提高計算的準確性。

MV-Temp Table

1

Use MV-Temp Table

Temperature

Velocity

27 °C

820.0 M/S

X

28 °C

810.0 M/S

X

30 °C

810.0 M/S

X

29 °C

800.0 M/S

X

31 °C

832.0 M/S

X

31 °C

833.0 M/S

X

| 功能      | 說明                                                                                                                                                    |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 使用初速溫度表 | 決定是否啟用初速溫度表功能，開啟時，點選+Add new temperature/velocity，最多可輸入5組不同溫度及初速的數值，輸入完畢後槍枝參數的初速欄位數值會反灰，會以所輸入初速溫度表進行計算。在射擊配置的初速後面會出現MV-Temp的標籤表示目前此槍彈配置的初速是由初速溫度表所控管。 |

Profiles

Active

T93K1-NF Mil

Bullet: Military AA11 - M118LR - 0.782 CM - 175.0 GR

BC: 0.243 G7

MV: 821.4 M/S

MV-Temp

See more

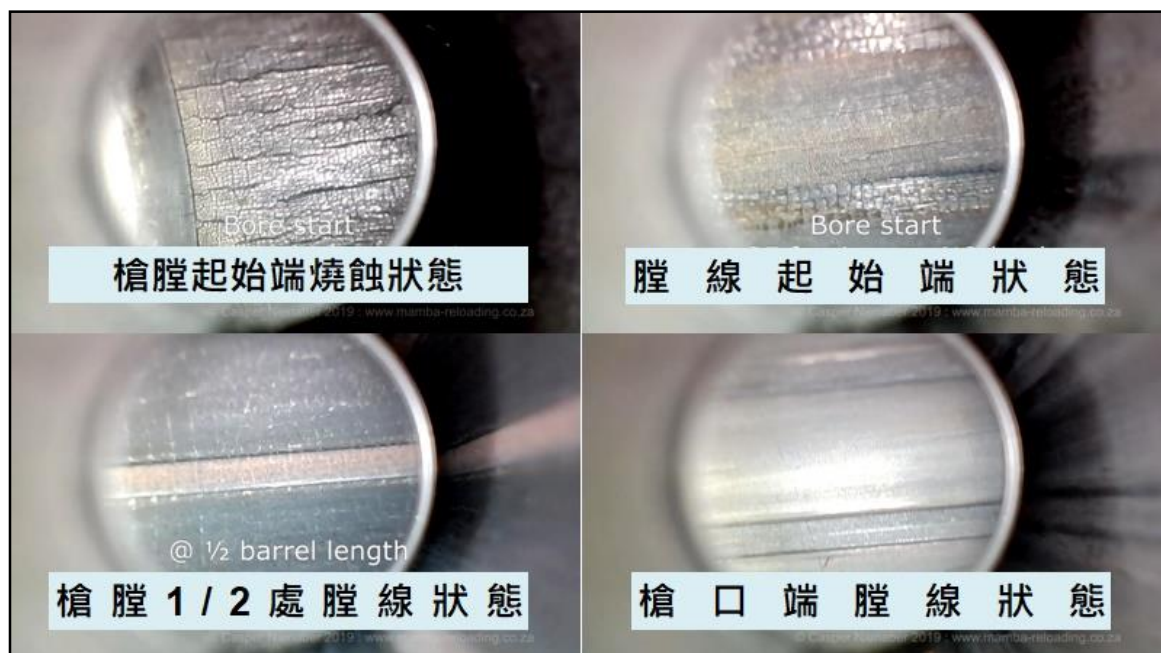
圖三 美國 Applied Ballistics 公司 Quantum 彈道計算程式「初速溫度表」功能說明  
資料來源：截圖自步訓部狙擊教官組薛名宏教官編譯「AB 量子彈道計算機中文操作手冊」（2025 年 8 月 5 日）

7

第二，依據美陸軍特種部隊備役少校 John L. Plaster 所著《The Ultimate Sniper》一書指出，狙擊手必須維持彈藥溫度與環境溫度一致性，如避免在寒冬時將彈藥貼身攜帶、槍膛過熱仍將子彈上膛待發、或將彈藥直接暴露於陽光下<sup>7</sup>。否則，若因上述原因使彈藥本身溫度與射擊環境溫度落差過大，一樣會造成槍口初速變化而影響彈道。

就「槍管長度」而言，依據 Berger Bullet 公司彈藥裝填手冊指出：「就多數.308 Win.彈藥，以 24 吋槍管作為標準，槍管長度每增加（或減短）1 英吋，平均槍口初速每秒提高（或降低）約 20 英呎」另美國 Rifleshooter.com 專欄作家 Bill Marr 測試 147、150、168 及 180 格令等四款常見北約 7.62 公厘彈藥，並分別從 28 吋槍管逐吋縮短至 16.5 吋射擊 5 發，獲得平均槍口初速後發現，其結果亦與 Berger Bullet 公司敘述一致。其中，以最接近國造 TC94 狙擊彈之聯邦金牌彈（168 格令）為例，槍管從 26 吋降至 24 吋，平均槍口初速約降低每秒 38 英呎、24 吋降至 20 吋槍管，平均槍口初速約降低每秒 70 英呎。

就「保養水準與膛壁燒蝕」而言，依據聯勤第 205 廠民國 76 年編製《輕兵器設計技術手冊》將膛壁燒蝕定義為：「槍管內壁因屢次發射而逐漸磨耗之現象，燒蝕嚴重者陽膛線扁平，膛徑擴大，管壁粗糙，甚或出現裂紋或凹痕（圖四）。其結果是由於洩氣而使彈速下降，膛線失去應有之功能而致使彈頭初速不足，因之射程減短，命中率低落，槍管之堪用壽命亦於此告終。」

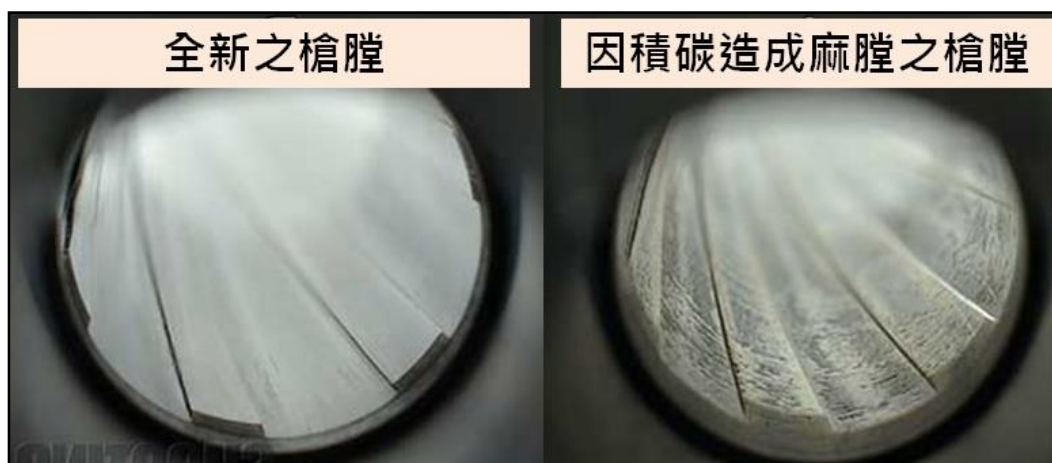


圖四 膛壁燒蝕示意圖

資料來源：截圖自 Cassie Nienaber Youtube 頻道，〈Throat and barrel erosion〉（2025 年 8 月 5 日）

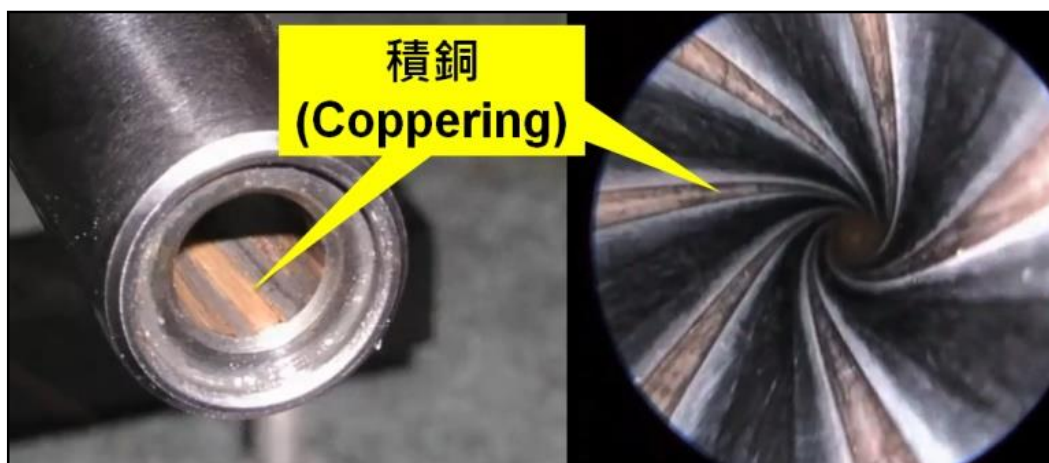
<sup>7</sup> 資料來源：Maj. John L. Plaster, 《The Ultimate Sniper》（U.S.A., Paladin Press, 1993），P549.

因此，不當的保養與射擊方式（射速），將使此現象惡化並可能使槍口初速衰退的問題提早發生，故狙擊手應當落實射擊後之裝備保養，尤其是射擊後所產生，足以影響槍管壽命的兩大污染物－「積碳」（Powder Fouling）與「積銅」（Copper Coating/Coppering）必須謹慎地保養予以清除。「積碳」係發射藥燃燒後殘存於膛壁表層之化學物質，若未能於射擊後即時清除，長時間積存將侵蝕膛壁表層造成麻膛現象（Pits in the Bore），危害精度與槍管壽命（如圖五）。「積銅」則來自於射擊時彈頭殼與膛線咬合旋轉殘留於膛壁上之薄層銅質，長時間積存將導致銅質滲入膛壁表層材料中形成銅污現象，嚴重時銅質殘渣碎塊可能固結於膛壁上形成阻礙，使射擊故障或槍管受損（如圖六），上述兩大污染物均是射擊後保養之重點。



圖五 射擊後殘留於膛壁上之積碳未清除造成麻膛現象

資料來源：筆者自行調製（2025 年 8 月 5 日）



圖六 射擊後殘留於膛壁上之薄層銅質（積銅現象）

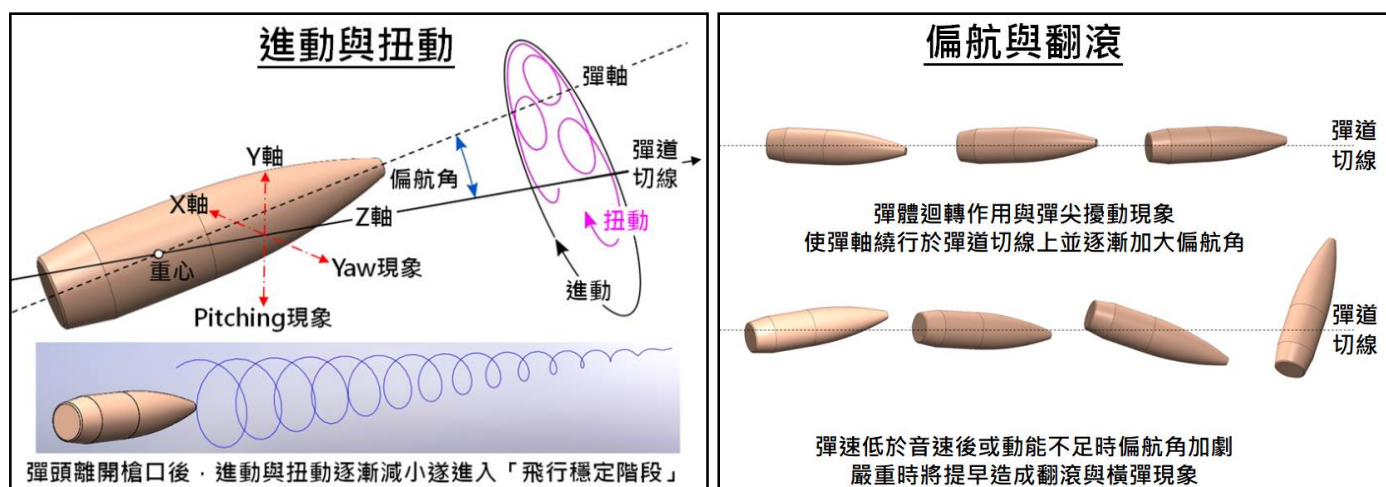
資料來源：筆者自行調製（2025 年 8 月 5 日）

此外，也應盡量避免於短時間內連續射擊超過 10 發以上加劇燒蝕現象，主要原因係目前國際使用的狙擊槍槍管多採 416 不銹鋼材質，射擊 6-10 發後一定要冷卻槍管，但一般標準步槍槍管材質則多採鉻鉬鈮合金鋼，耐腐蝕、耐磨係數較高，可承受射擊 20-30 發仍不會有燒蝕加劇問題。故建議狙擊手於駐地訓練時，一次射擊以 10 發為上限，讓槍管稍微冷卻後再實施第二次射擊較佳。

## 參、彈速進入穿音速與次音速飛行時之影響

受益於現代彈道技術的發展，狙擊手現已能透過彈道計算機（應用程式）預估彈頭離開槍口後，在不同環境條件下，各距離的飛行速度（Bullet Speed）。藉由此一功能，射手可掌握彈頭於何時進入次音速（Subsonic），以及在哪個距離上將進入穿音速影響（Transonic Effects）區間。此等資訊對遠距離射擊而言，具有高度的實用價值，並涉及彈頭迴旋穩定性與命中率的關鍵判斷依據，依序說明如下：

一般而言，彈頭於空氣中以超音速進入次音速飛行時，因壓力中心與馬格勒斯力改變且開始遠離重心，造成彈頭扭動（Twist）現象遽增，使彈軸無法穩定維持在彈道切線上，偏航角加大空氣阻力隨之加大，影響子彈飛行穩定度與命中率，嚴重時甚至造成翻滾與橫彈（圖七）。

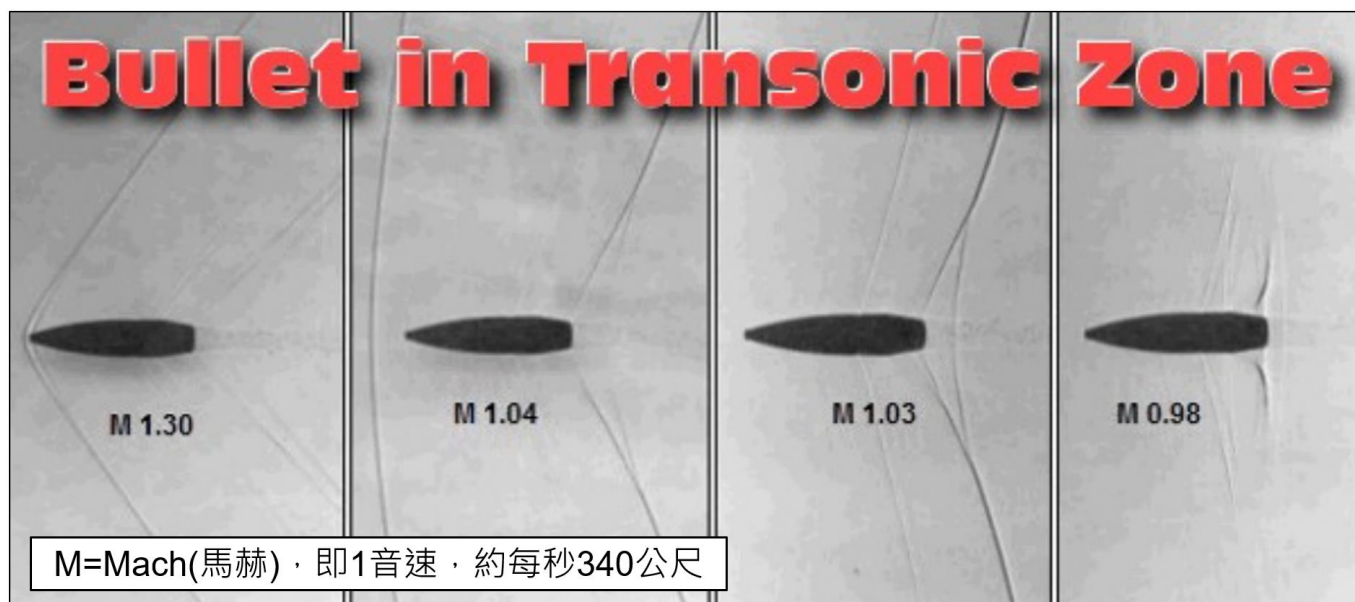


圖七 彈頭飛行之「進動與扭動」及「偏航與翻滾」現象示意圖

資料來源：筆者自行調製（2025 年 8 月 5 日）

故彈頭進入次音速飛行之距離（即 1 音速，約每秒 340 公尺），彈道預測恐開始失準，可作為軍用單兵武器「最大有效射程」訂定之參考，即該武器超出此射程後，即使殺傷動仍足夠，因命中率大幅降低，已沒有探討有效射程的實質必要。以 Kestrel 5700 內建 Elite Ballistics 彈道計算功能模擬近似國造 TC94 狙擊彈平均槍口初速每秒 808 公尺之彈道為例，其彈頭飛行約至 850 公尺時降為次音速。美軍 .300 Win Mag 彈藥約 1100 公尺、.338 Lapua Mag 彈藥約 1650 公尺、M33 與 MK211（A606）12.7x99 公厘彈藥約 1530-1550 公尺（參考附件：美軍 .223 至 .50 口徑狙擊槍彈道性能對照表）。

此外，美國彈道學家 Bryan Litz 經研究發現：一般彈頭進入次音速影響，通常會提前發生在彈速低於 1.2 馬赫（即 1.2 倍音速，約每秒 408 公尺）之射程時，又稱穿音速距離（Transonic Range），而 1.2 馬赫至 1 馬赫則稱穿音速影響（Transonic Effects Zone）區間，如圖八。彈頭進入該射程時，即便環境因素影響小，只要彈頭迴旋穩定係數（Gyroscopic Stability Factor）設計不當或彈頭加工精度與品質過差，彈頭飛行恐在這個距離之後開始失穩，故射手必須留意實質命中率問題（國造 TC94 狙擊彈約落在 700 公尺左右）。



圖八 彈頭進入次音速影響約提前發生在彈速低於 1.2 馬赫 (Mach) 時

資料來源：Applied Ballistics 官方網站，Bryan Litz，〈Transonic Effects on Bullet Stability & BC〉

(2025 年 8 月 5 日)

#### 肆、槍口初速測量與統計學應用

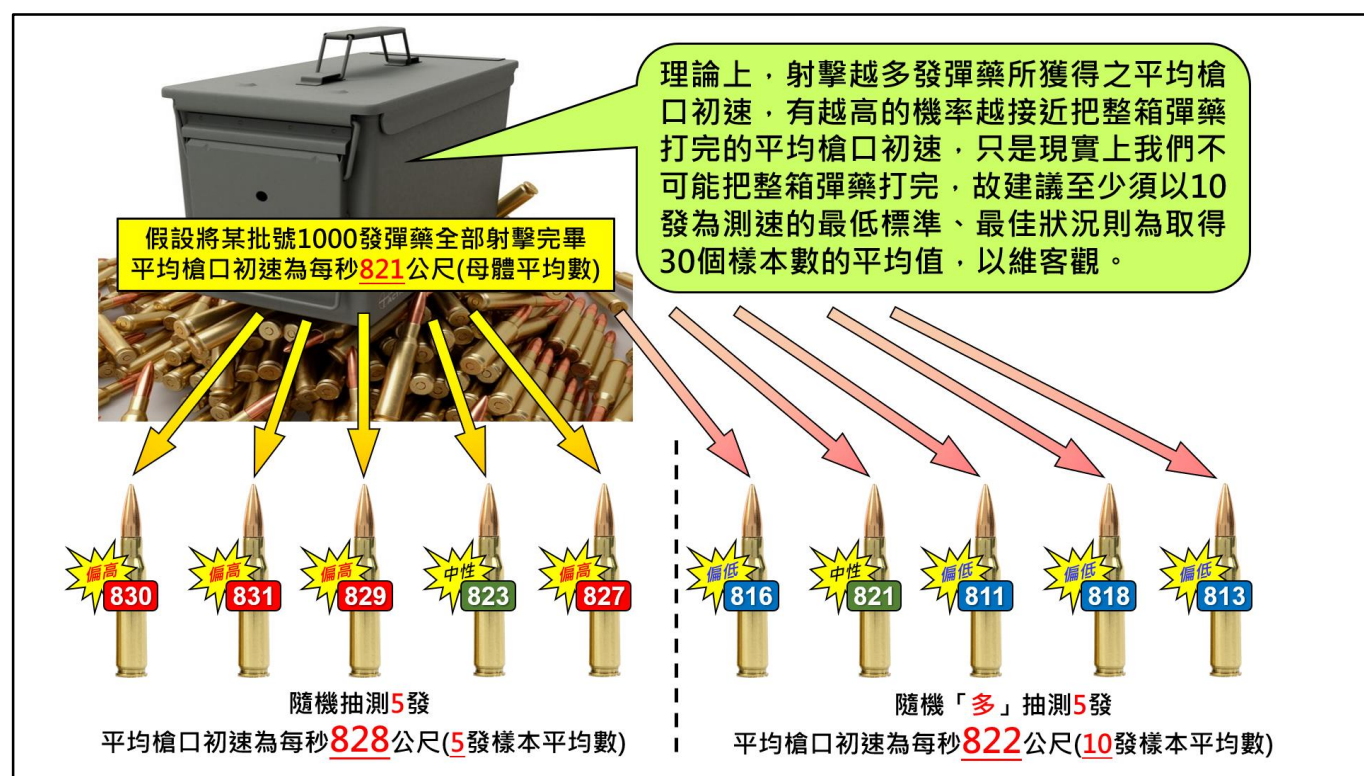
現代狙擊手想利用彈道計算機準確預測彈道，背後有許多必須非常講究的細節，其中兩個最重要也是讓大部分射手最感頭痛的參數，非「彈道係數 (BC)」與「槍口初速 (MV)」莫屬！除了因為這兩個數據本身就不太好獲得之外，最主要的問題在於這兩個參數，實際上都不是一個固定數值，如彈道係數，其本身並非一固定數值，會隨飛行距離、彈速與空氣阻力改變而有所變化。槍口初速也是如此，每一發子彈的槍口初速都有高有低，不可能完全一樣。然而，彈道計算機操作時，卻只能輸入一個「單一數值」作為計算彈道的基準。因此，當獲得參數的管道不正確或者測量的方法不夠客觀，輸入的彈道計算機的「單一數值」與「實際的平均值」落差過大，便會發生彈道計算機預測「失準」的情況。

假設某狙擊槍實際的平均槍口初速接近於每秒 808 公尺，射擊 800 公尺時理論上僅需裝定 30.4MOA，但因為某些因素（如測量發數不足、儀器精度不足或設置條件不正確...等）導致射手測得的槍口初速僅為每秒 798 公尺（少了 10 公尺），那麼彈道計算機回饋給你的數據將變成 31.4MOA，因無形中多裝定了 1MOA 的仰角，故平均彈著點於 800 公尺也將偏高 1MOA（約 23.3 公分），而這樣的彈著偏差量，基本上已經能夠透過狙擊鏡或觀測鏡明顯察覺到。也就是說，當輸入彈道計算機的值比實際的平均槍口初速低時，平均彈著點將偏高；反之，則相反。

輸入的數值有誤差其實不要緊，比較麻煩的是，部分射手為了解決彈著沒辦法打在預期高度的問題，還會盲目地玩起所謂「數字組合」的遊戲。比如實際彈道打偏低？射手可能會想說應該是測得的槍口初速有問題！說不定這把槍真正的槍口初速沒這麼高，然後便毫無根據地就將其槍口初速大膽調低，然後彈道計算機就會給比較多的響數，因

此就能打在比較良好的高度上；又或者，射手非常堅信自己測得的槍口初速是正確的！所以一定是彈道係數出了問題，然後便毫無根據地改變前人「透過精密儀器測量」或「使用精密實驗證明」的彈道係數。上述兩種行為，雖然在某些時機上並不能稱作是錯誤行為<sup>8</sup>，而且也都能夠讓彈道在第一時間回復良好的預測高度，只是若無法準確的「對症下藥」，射手還是會有很高的風險，在其他距離上持續遇到彈道無法匹配的問題。

所以，到底該如何減少上述的模糊空間？求得更趨近真實、且能滿足彈道應用所需的平均槍口初速呢？這時就必須端出「統計學」來支撐了！在統計學中，通常樣本數(Sample Size)越多，所求得平均值能越貼近「母體」真正的平均值，這裡所謂的母體可以定義成一個批號裡所有的彈藥（假設你有一批相同批號的彈藥 1000 發，當你把 1000 發打完的平均槍口初速，便是母體平均數），我們測速不過是從這 1000 發子彈中隨機挑出幾發來射擊，若樣本數不夠多，運氣又很不好地都挑到槍口初速比較高的子彈，那麼最後這幾發測出來的平均值就會偏高（參考圖九）。因此，相較於僅測量 5 發，測量 10 發的數據將能更具代表性與客觀性，而測量 20 發又優於 10 發，提高至 30、40 甚至 50 發，理論上當能提升結果的穩定性與準確度。然而，在實務操作中，仍須考量彈藥消耗、時間成本與訓練資源分配等因素，故此部分尚有深入探討的空間。

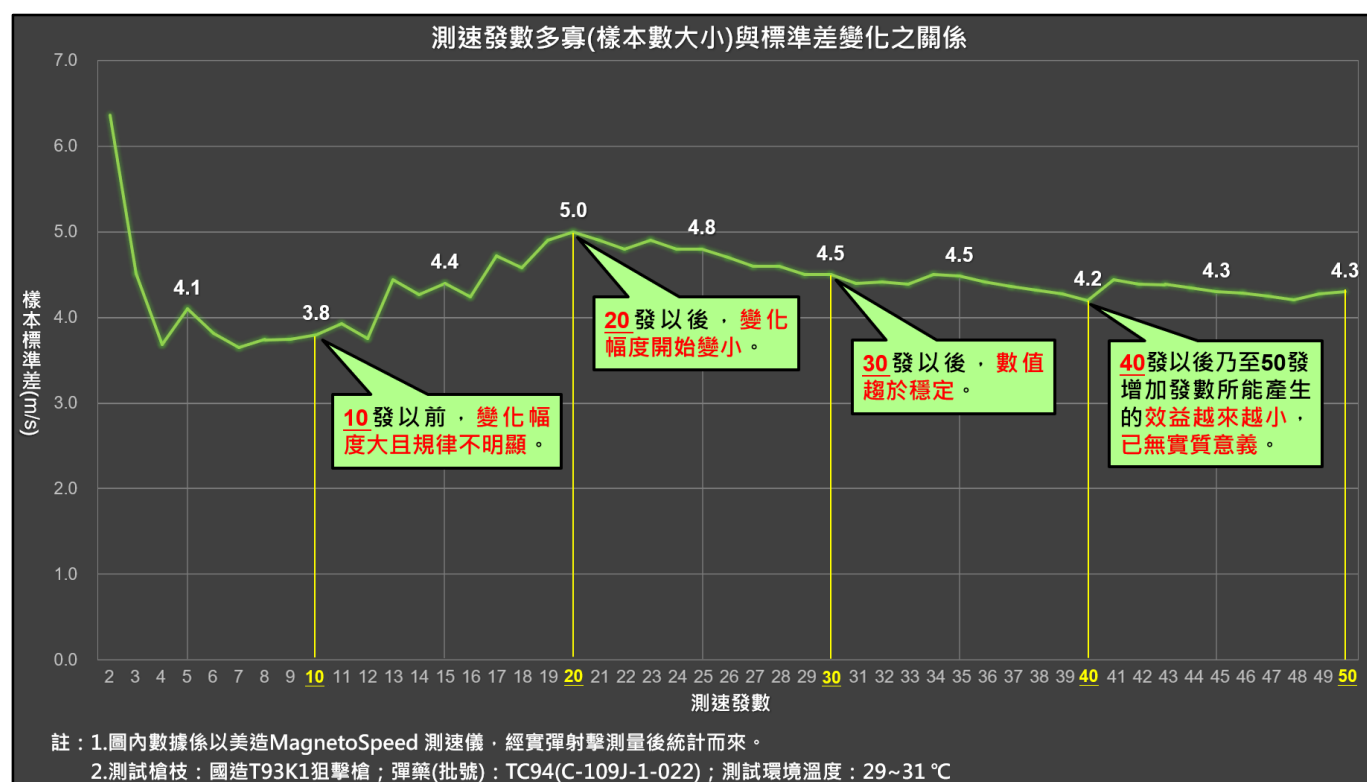


圖九 測速發數多寡與母體平均數之關係

資料來源：筆者自行調製（2025 年 8 月 5 日）

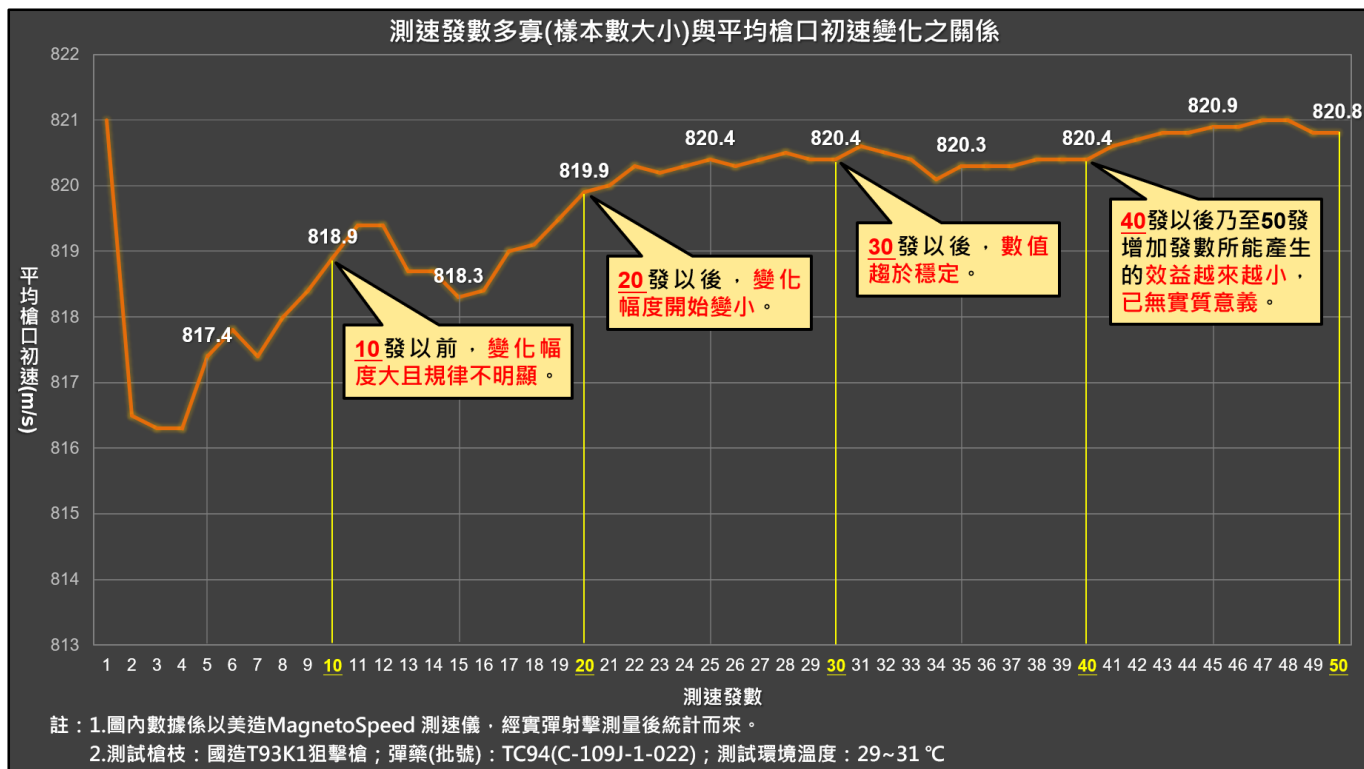
<sup>8</sup> 如 Kestrel 5700 Elite 測風儀即內建有「槍口初速校正 (Cal MV, Calibrate Muzzle Velocity)」與「阻力係數校正 (DSF, Drag Scale Factor)」功能，其中槍口初速校正必須是在射手本身「不知道」或者「不確信」槍口初速大小為何？且又「無測速儀可立即測量初速」的時機上才使用，其方法也是藉由觀察實際彈道與彈道計算機數值之落差，逆向推算更符合實際射擊所需之槍口初速，只是無論 Kestrel 原廠技術手冊或者美軍 2017 年狙擊手準則，對於該測試的距離與射手對彈著點判斷的誤差控制，都有相當嚴謹的規範，與筆者所述：「部分射手已藉由測速儀測量獲得槍口初速」，卻在「一發現彈著點無法吻合就貿然調整初速」是不一樣的概念。

為了徹底研究到底應該射擊幾發作為測量槍口初速的標準，筆者曾以 T93K1 狙擊槍連續進行 50 發測速（中途僅有適當休息與降溫，期間環境溫差在攝氏 2 度內），最後槍口測速儀顯示的平均值為每秒 820.8 公尺，標準差為每秒 4.3 公尺。接著筆者把這一串 50 發的數據，以 5 發為一個區間個別計算區間內數據的平均值與標準差，然後觀察其變化最後發現（參考圖十、圖十一）：「當測量的樣本數達到 20 發後，無論是平均值或標準差的變化幅度開始縮小，測量到 30 後，兩者幾乎就都不會再有明顯變化，基本上已趨於穩定。若繼續測量到 40 發乃至 50 發，因增加發數所能產生的效益越來越小，已無實質意義」。故建議測速時：「若無彈藥限制，應以測量 30 發為佳、20 發其次；若有彈藥限制，最低不得低於 10 發。」



圖十 測速發數多寡(樣本數大小)與平均槍口初速變化之關係

資料來源：筆者自行調製（2025 年 8 月 5 日）



圖十一 測速發數多寡(樣本數大小)與標準差變化之關係

資料來源：筆者自行調製（2025 年 8 月 5 日）

只是，大部分射手受限彈藥或時間等因素，可能會沒有像筆者這樣能大量蒐集槍口初速樣本的機會，假設某射手只能用 10 發彈藥來蒐集槍口初速，剛好這 10 發數據都是比較極端的，那麼測到的平均槍口初速可能就會與真正的母體平均數有很大的落差（當然，射手當下並不會知道），而這樣的落差，就會在後續遠距離射擊時發生彈道計算機的數據與實際彈道無法吻合的情況。通常遇到這種情況，射手必須重新檢視歸零品質或者彈道計算機的操作上有沒有任何誤失，唯有當所有可能的因素都檢視無誤後，才能合理去懷疑彈道無法吻合的問題，有沒有可能是因為平均槍口初速所致。雖然，任意地調整槍口初速只為求得一個距離的彈道媒合是彈道應用上的大忌！但如果所有可能導致彈道預測失準的因素都排除了，我們便不得不認真去檢視「槍口初速」到底有沒有測量上的問題。最好的方法當然是重新測速並且用更多的彈藥發數來確保能一次測得較客觀的平均數值，只是當現實環境沒有辦法讓我們這麼做，我們又該如何知道平均槍口初速還能向上或向下調整多少呢？有沒有比較科學的方法可以讓我們有所依循，不致於調整過大幅度？這時候，我們便可以再次端出「統計學」來支撐了！

統計學被廣泛應用至今，還有一個很重要的功能，就是能以樣本平均數（Sample Mean）來估計母體平均數（Population Mean）的信賴區間（Confidence Interval）。換成射手比較能聽得懂的說法就是，我們可以把隨機抽樣測得的平均槍口初速，藉統計學的方法，估計出如果一口氣把彈藥箱裡面的子彈全部打完，最後的平均值與標準差，有多少的機率，會坐落在什麼樣的範圍內。在過去，我們要求得這個區間，可能得花不少時間重新研究統計公式並手動計算；但現在，我們幾乎可以不用理解任何複雜的公式，

就能輕鬆駕馭統計學，推薦讀者使用這個網頁 <http://172.104.26.4:4321/>，這是由加拿大 FTR 射擊專家 Adam McDonald 所開發、非常好用的一個計算機( Stats Calculator )，只要把實測到的平均槍口初速、標準差及射擊發數輸入進去相對應的介面，然後再設定你希望獲得的「信賴水準 ( Confidence Level )」，它就會自動幫你計算出如果把彈藥箱的彈藥全部打完，最後平均值與標準差的信賴界線 ( Confidence Limit )，也就是信賴區間兩個端點的值，有了這個範圍，我們便能掌握還能在彈道計算機內合理調整「平均槍口初速」的上下界線 (圖十二)。

The screenshot shows a web-based calculator interface. At the top, 'Confidence Level' is set to '95%' with a dropdown arrow. Below this, 'Sample 1' is selected, and 'Statistics' is chosen over 'Numbers'. Input fields are: 'Sample size' (10), 'Average' (818.9), and 'SD' (3.8). The output section states: 'At the 95% confidence level... The population mean is between 816.2 and 821.6' and 'The population SD is between 2.61 and 6.94'. A QR code is present with the text '掃描打開網頁' (Scan to open website).

| Input                | Value          |
|----------------------|----------------|
| Confidence Level     | 95%            |
| Sample size          | 10             |
| Average              | 818.9          |
| SD                   | 3.8            |
| Population mean (CI) | 816.2 to 821.6 |
| Population SD (CI)   | 2.61 to 6.94   |

圖十二 「母體平均數與母體標準差」網頁計算介面

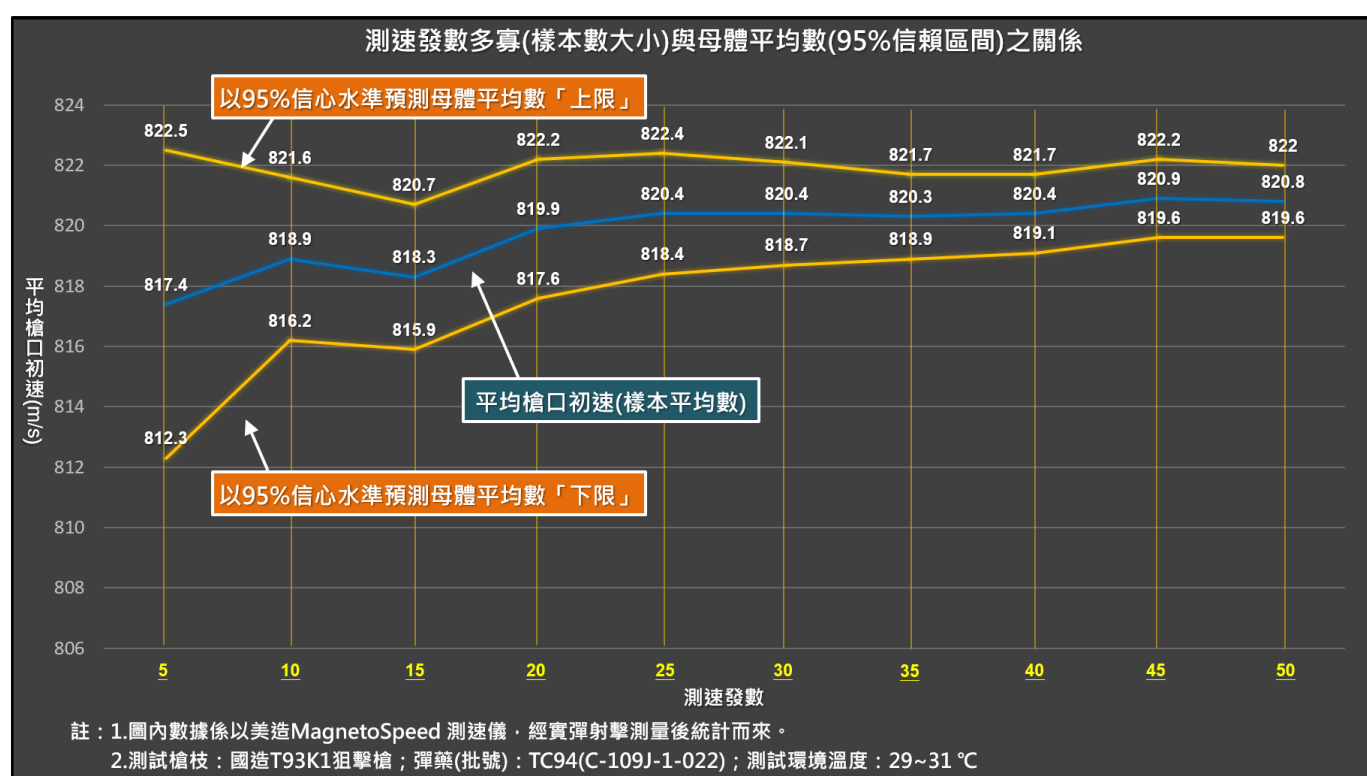
資料來源：筆者自行調製 (2025 年 8 月 5 日)

以筆者蒐集過的 50 發數據為例，我們把前 10 發的數據單獨抓出來計算，平均槍口初速為每秒 818.9 公尺，標準差為每秒 3.8 公尺，輸入上述網頁的介面中，再將信賴水準設定為 95%後<sup>9</sup>，便可以得知：有 95%的機率，最終的母體平均數將會落在每秒 816.2 至 821.6 公尺範圍內、母體標準差將會落在每秒 2.61 至 6.94 公尺範圍內，而上述「每秒 816.2 至 821.6 公尺」便是平均槍口初速的合理調整範圍 (圖十二)，接著我們再把 50 發最後獲得的平均值每秒 820.8 公尺與標準差每秒 4.3 公尺拿來比對，確實都落在僅用 10 發所估算出來的 95%信賴區間範圍內，也就是說這樣的估算方法是相當合理的。也因此，如果我們只用 10 發測量槍口初速，且原先輸入彈道計算機的槍口

<sup>9</sup> 依據鈴木香織、竹原一彰所著《圖解 機率·統計》一書第 104 頁指出：「統計上一般常用 95%或 99%的信賴係數，信賴係數設定的越高，信賴區間就會越大，要縮小信賴區間，信賴係數就會變低，兩者之間有取舍關係 (Trade-off)。」

初速為每秒 819 公尺，假設在 700 公尺射擊多發後，發現平均彈著點有偏高約 10 公分的情形，故最多僅能將槍口初速微調成每秒 821 公尺（不可高於 821.6 公尺），此時彈道計算機所給予的値理論上能減少約 3 公分，那麼仍偏高的 7 公分就不能再用調整槍口初速來彌補回來，可將其視為彈道應用尚可容忍的誤差，或者再嘗試從其他層面去尋求解決。相反的，如果射手不具備上述 95%信賴區間的概念，那麼，十個將有九個人會直接把槍口初速調整到每秒 826 公尺，讓彈道計算機預測的數值剛好能減少約 10 公分的修正量，理論上就不會有偏高的情形了。但重點是，每秒 826 公尺早已經超出 95%信賴區間範圍外，不太可能是我們把所有同批號的彈藥打完會看到的數值，即使有，會發生的機率也不到 5%。

必須特別留意的是，在相同的信賴水準下，當樣本數不夠多，所得到的母體平均數的範圍還是會過大。參考圖十三，筆者把每 5 發的數據分別估算出母體平均數的 95%信賴區間後再製成圖表，不難發現當發數不足 10 發時，95%信賴區間的範圍其實還是很大，只有超過 15 發甚至 20 發後，信賴區間才開始被限縮在一個較小的範圍內。因此，建議應盡可能用到 20 發甚或 30 發的彈藥來測量槍口初速，不僅可以獲得信度較高的平均槍口初速與標準差之外，藉此估計出來的母體平均數（95%信賴區間）範圍也相對較小，自然能減少後續彈道應用時預測失準的機率，倘若真的還存有誤差，誤差的程度自然也會相對較小，進而提升射手在使用彈道計算機上的信心。



圖十三 測速發數多寡(樣本數大小)與母體平均數(95%信賴區間)之關係

資料來源：筆者自行調製（2025 年 8 月 5 日）

最後，如同前言所述，隨著科技進步，原本在產品定位屬於高階的「雷達偵測式」

測速儀，現今已趨於普及且價格日益親民，因其具備即放即用、無複雜架設程序、也不用擔心誤擊光閘板...等優勢，射手得以在進行歸零射擊或遠距離訓練同時，監測並蒐集每一發子彈的槍口初速（如圖十四）。因此，前述「應盡可能用到 20 發甚或 30 發的彈藥來測量槍口初速」之建議，在目前技術條件下已非難事。基此，筆者必須再次呼籲：「各單位狙擊組在積極從事訓練、提升裝備素質的同時，亦應設法配備一具精確可靠的測速儀」，以實現理論與實務並進，落實「工欲善其事，必先利其器」之精神。

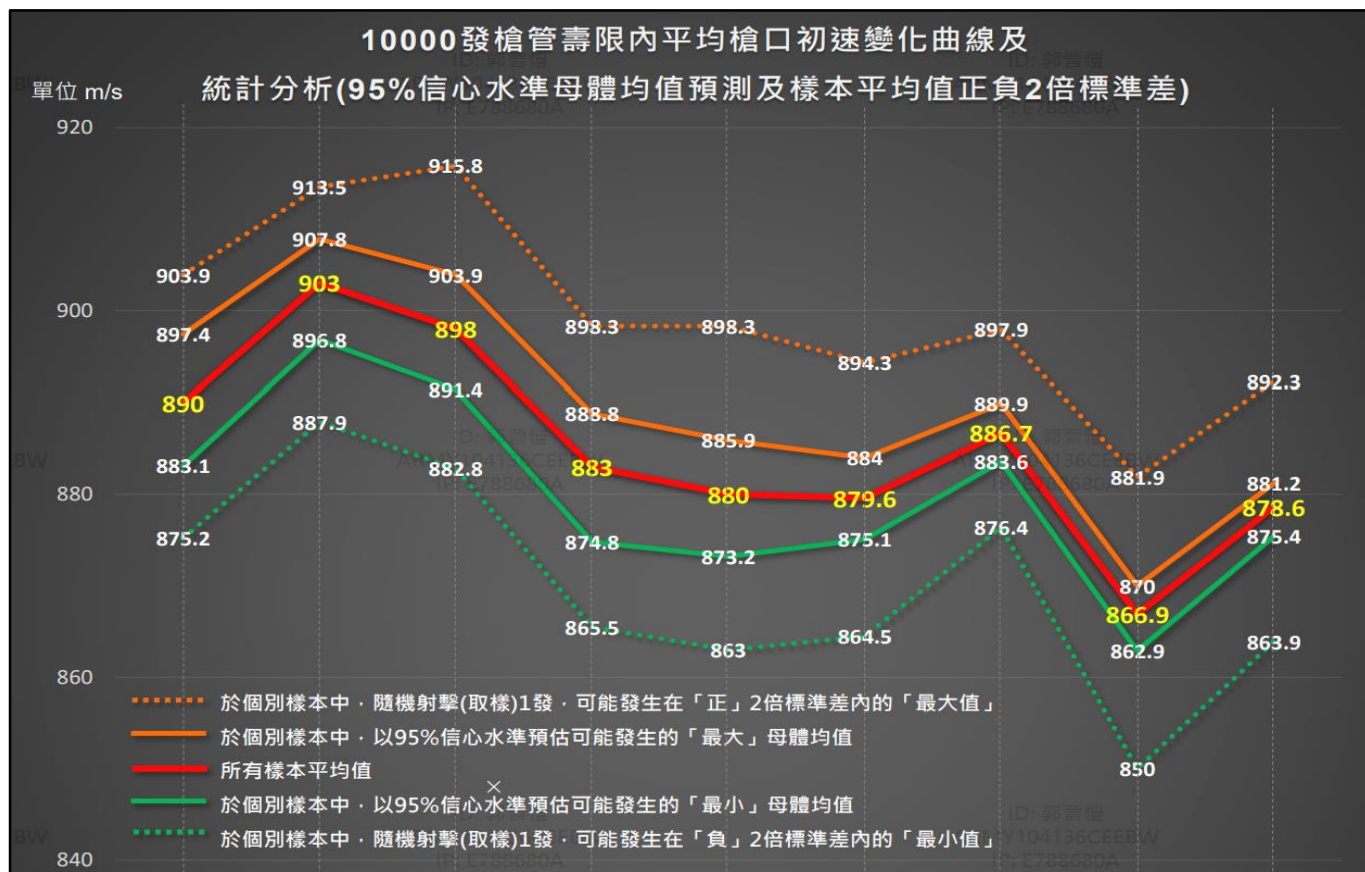


圖 1 十四 目前國際上幾款最新「雷達偵測式」測速儀

資料來源：筆者自行調製（2025 年 8 月 5 日）

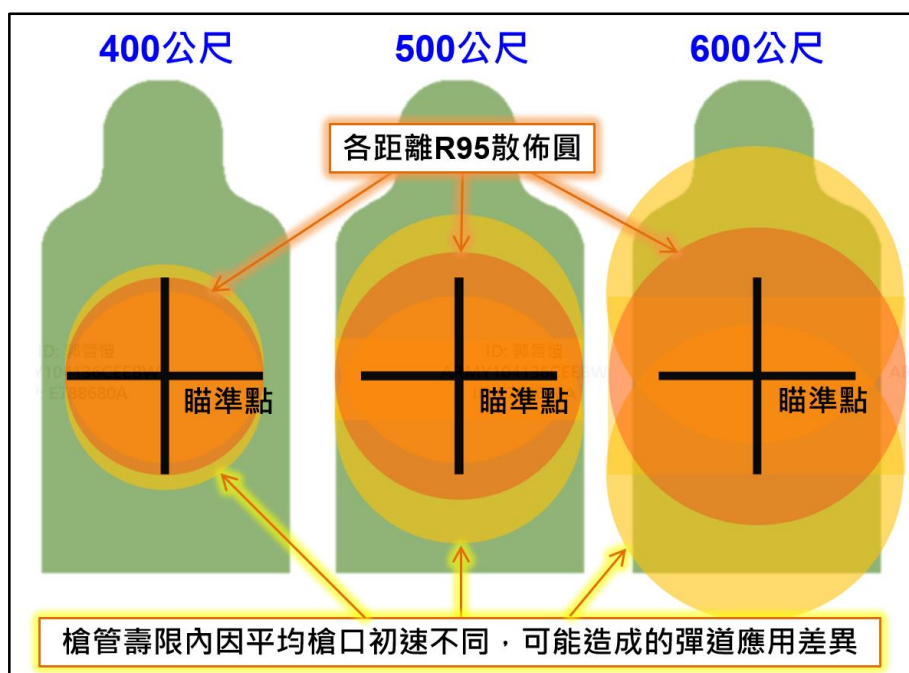
## 伍、 槍口初速其他方面應用

筆者曾於步兵季刊第 297 期投稿一篇文章：〈用對方法比努力重要—探討 T112 步槍加速形成單兵穩定戰鬥力之研究〉，其內容不僅完整地介紹了 T112 步槍全系統各種瞄準裝置各自的歸零彈道設定需求與理由、說明如何快速有效運用多功能靶紙進行歸零，也分享了不少 T112 步槍全系統研發測試階段的彈道應用作為，其中，為了減少後續部隊在彈道應用時可能存在的效果落差，筆者在透過彈道計算機調製各種瞄準裝置的歸零彈道之前，額外做了一件相當嚴謹的事情，那就是「大量」收集平均槍口初速，當時採集了 5 個樣本（5 枝槍），並特別協調廠製單位安排，針對每枝槍在每千發時實施階段性槍口初速測量，每次射擊 30 發，以獲得平均數值，此步驟直到一萬發時停止（為節省經費，六千發後，僅 3 枝槍繼續進行測試），最後經過統計分析，決定以平均槍口初數每秒 891 公尺，作為 T112 步槍最適合用來調製彈道圖的數值（圖十五）。此作法，將可大幅減少後續部隊在彈道使用上的差異（尤其是使用 TS112 近戰瞄準鏡內部的射程刻劃射擊 400-600 公尺目標），無論射手使用的步槍是全新獲撥的狀態，還是已經射擊了 3、4 千發，又或已經射擊 8、9 千發接近槍管最大壽限，彈道的理論誤差都不致過大，使得整體命中效果仍可控制在可接受的範圍內（圖十六），而後續相關準則條文，也將每秒 891 公尺作為 T112 步槍槍口初速的標準數據，可謂是筆者參與新型步槍測評期間，最感價值連城的舉動之一，將有助於官兵未來在彈道應用上建立實質的信心。



圖十五 T112 步槍 10000 發槍管壽限內平均槍口初速變化曲線圖

資料來源：筆者自行調製（2025 年 8 月 5 日）



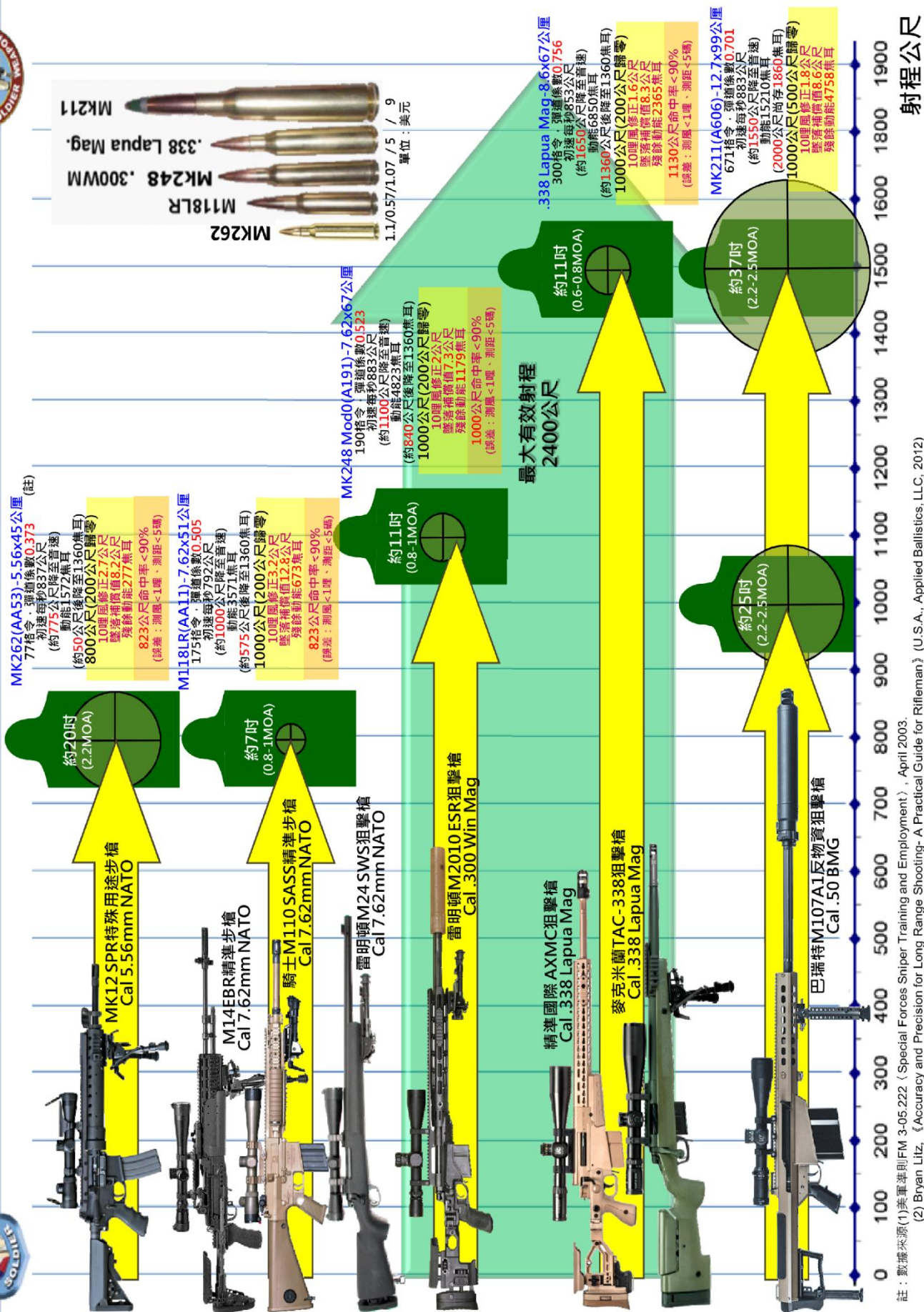
圖十六 T112 步槍搭配近戰瞄準鏡（四倍鏡）槍管壽限內彈道應用預期差異

資料來源：筆者自行調製（2025 年 8 月 5 日）

## 陸、 結語

本文源於筆者長期對國內各單位狙擊手在彈道計算機實務應用上的觀察與反思，並融合美國專業射手 Cal Zant 於 PrecisionRifleBlog 論壇發表的系列研究《How To Predict The Future - Statistics For Shooters Part 1–3》內容，經實際測試與教學驗證後，針對「槍口初速測量」與「統計學理論與機率」兩大主題進行系統性整理，並提出相關研究成果與建議，盼能對已經起身投入彈道應用、卻曾經面臨初速測量與數據處理困境的射手有所幫助。畢竟，當前與彈道應用相關的科技產品推陳出新，狙擊手在使用各項輔助裝備時，不應僅止於表層理解與一般操作，而應培養嚴謹的學習態度與正確的使用觀念，方能支撐起現代戰場上，狙擊手所需—「精準、穩定、可靠」之射擊品質。唯有用科學的方法，解決因科學應用衍生而出的問題，才能使狙擊手將手上的彈道計算機（或應用程式）發揮最大效用，進而促進部隊「科學化練兵」思維的深化與進步。

# Precision Weapon Portfolio Engagement Ranges & Dispersion



## 參考文獻

- 一、郭晉愷，《狙擊彈道學 第六版》(高雄市，陸軍步兵訓練指揮部，民國 114 年)。
- 二、《TC-94-7.62 公厘狙擊彈測試資料》，(高雄市，軍備局第 205 兵工廠，民國 100 年)。
- 三、郭正祥，《輕兵器設計技術手冊》(高雄市，聯勤第 205 廠，民國 75 年)。
- 四、徐聲亮，《輕兵器彈藥設計技術手冊》(高雄市，聯勤第 205 廠，民國 75 年)。
- 五、墨爾 (David S. Moore)，諾茨 (William I. Notz) 著，鄭惟厚、吳欣蓓《統計，讓數字說話》(臺北市，遠見天下文化出版股份有限公司，民國 112 年 1 月)。
- 六、鈴木香織、竹原一彰著，李貞慧譯，《圖解 機率·統計》(台北市，積木文化出版，民國 105 年)。
- 七、Cal Zant, 〈How To Predict The Future - Statistics For Shooters Part 1-3〉  
(PrecisionRifleBlog)
- 八、TC 3-22.10, 《Sniper》(U.S.A., Headquarters Department of the Army, 2017)
- 九、Bryan Litz, 《Accuracy and Precision for Long Range Shooting》(U.S.A., Applied Ballistics, LLC, 2012)
- 十、Bryan Litz, 《Applied Ballistics for Long Range Shooting》(U.S.A., Applied Ballistics, LLC, 2015)
- 十一、Bryan Litz, 《Modern Advancements in Long Range Shooting- Volume II》  
(U.S.A., Applied Ballistics, LLC, 2016)
- 十二、Bryan Litz, 《Ballistic Performance of Rifle Bullet- 3rd Edition》(U.S.A., Applied Ballistics, LLC, 2017)
- 十三、Bryan Litz, 《Modern Advancements in Long Range Shooting- Volume III》  
(U.S.A., Applied Ballistics, LLC, 2022)