

以彈道學理論研究超遠距離精準射擊之奧秘

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，曾榮獲 2015 年世界盃 CQB 極限射擊大賽總冠軍，並以 1 分 18 秒 99 刷新世界紀錄（原紀錄為 1 分 21 秒 46）。現任職於陸軍步兵訓練指揮部狙擊組教官。

提 要

- 一、就現代狙擊距離定義，超過 1000 公尺以上可稱為超遠距離，對大多數 7.62 公厘以上口徑彈藥而言，彈頭飛行超過 1000 公尺時，彈道本身對各種可控制或不可控制的內、外在影響因素，已經到了失之毫厘、差之千厘的程度，已非如同 300-600 公尺中距離上，射手心存僥倖、刻意省略彈道修正都還能幸運命中目標。因此射手是否將上述因素納入修正考量或設法降低其影響，為超遠距離射擊能否首發命中或獲得合理命中率之關鍵。
- 二、國軍狙擊手長期依賴原廠固定射表（或調整螺上預置射程刻劃）與大量實彈射擊驗證累積經驗參數，加上遠距離與超遠距離射擊機會不多，能觸發狙擊手願意深入專研科學彈道理論的動機不大，導致國軍狙擊手普遍對於彈道科學觀念薄弱，為我國目前彈道研究與應用上一個急待解決的問題。
- 三、經作者蒐整歐美先進國家有關超遠距離射擊之相關文獻與專業書籍後，將超遠距離射擊之奧秘區分「彈藥能力理論分析」與「科學彈道應用步驟」兩面向實施探討，主要目的在協助我國狙擊手能有系統地審視、檢查相關因素，確保在超遠距離上，仍能獲得首發命中或達到合理命中率之目的。
- 四、科學彈道之應用，是狙擊手欲求突破遠距離精準射擊瓶頸，必先精通的重要方法。期望此篇研究能促使國軍狙擊部隊重視科學彈道應用的實質效益，力圖將過往依賴經驗參數（精打細瞄）之作法，導正為依據彈道數據（精打細算）之作為，如此必能將手中之利器（重型狙擊槍），藉由神兵（具彈道科學應用思維與技術之狙擊手）發揮到淋漓盡致，創造 1000 公尺以上超遠距離之優勢。

關鍵詞：狙擊、彈道學、遠距離射擊、重型狙擊槍

壹、前言

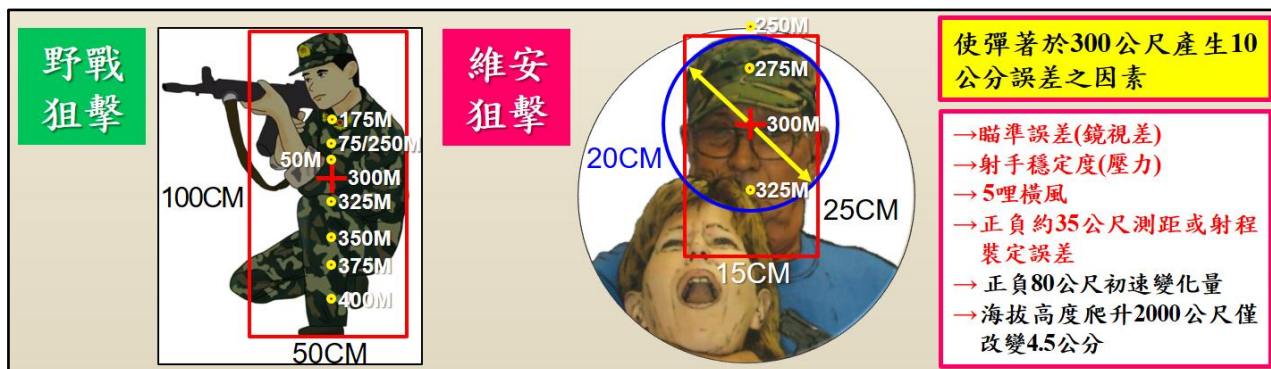
國軍狙擊手長期依賴原廠固定射表(或調整螺上預置之射程刻劃)且大量以實彈射擊驗證累積經驗參數，加上 600 公尺以上遠距離或 1000 公尺超遠距離射擊機會不多，能觸發狙擊手願意深入專研科學彈道理論的動機不大，導致國軍狙擊手普遍對於科學彈道應用觀念薄弱，落入學而不用、用而不知的困境。此現象侷限了各部隊超遠距離狙擊戰力之發展，為我國目前彈道研究與應用上一個急待解決的問題。

由於彈道是存在宇宙萬物中不變的物理定律，是一門錙銖必較的科學，即使狙擊手不瞭解而未考慮或刻意忽略計算外在環境對彈道的真實影響，這些因素仍將對狙擊手屏氣凝神扣下扳機後的每一顆子彈發揮不良作用。因此本文將聚焦在討論彈道學中與狙擊手實質相關，有助於提升超遠距離射擊能力與命中率的必要知識、觀念與方法，盼能藉此拋磚引玉，勉勵全軍狙擊手能共同努力研究、學習職務上應必備之智能與技能，進而解開羈絆多年之科學彈道應用困境。

貳、何謂超遠距離射擊

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，實可區分：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)。之所以如此劃分，著實有彈道上的意義，依序說明如下：

1. **近距離(0-300 公尺)**: 現代步槍或狙擊槍為能滿足中、遠距離射擊需求，使用之彈藥通常以高於音速 2.5-2.7 倍之超音速姿態飛行，因此 300 公尺內飛行時間極短 (通常介於 0.4-0.5 秒)，受外在環境因素影響甚小，即便是對彈道影響最甚的風，通常也需要大於 10 哩才有機會造成脫靶。加上此距離內，射擊散佈精度高且彈道高低變化小，故就實戰需求而言，可對任一目標以直接瞄準中心點之方式射擊，達到快速命中效果，為能發揮直射武器彈道低伸特性之有效射程，又被稱作直射距離 (PBR, Point Blank Range)，惟實際效果仍須視彈道能力或目標大小而定 (彈道越低伸或目標高度越高，則直射距離越遠)。以最常見的 .308 (175 格令) SMK 彈藥特性為例，野戰狙擊手典型接戰目標為平均 100 公分高，以跪姿或低姿態躍進之人形目標，則將表尺裝定於 300 公尺，可對 400 公尺內目標實施直射；然而，若以維安狙擊手角度，其典型目標為平均 20X25 公分大小的頭形目標，則無法實施直射，需針對個別目標測距並裝定表尺始可達到精準命中之目的。(如圖一)



圖一 因應不同任務與目標，近距離內直射效果將不盡相同

資料來源：作者自行調製（2021年10月27日）

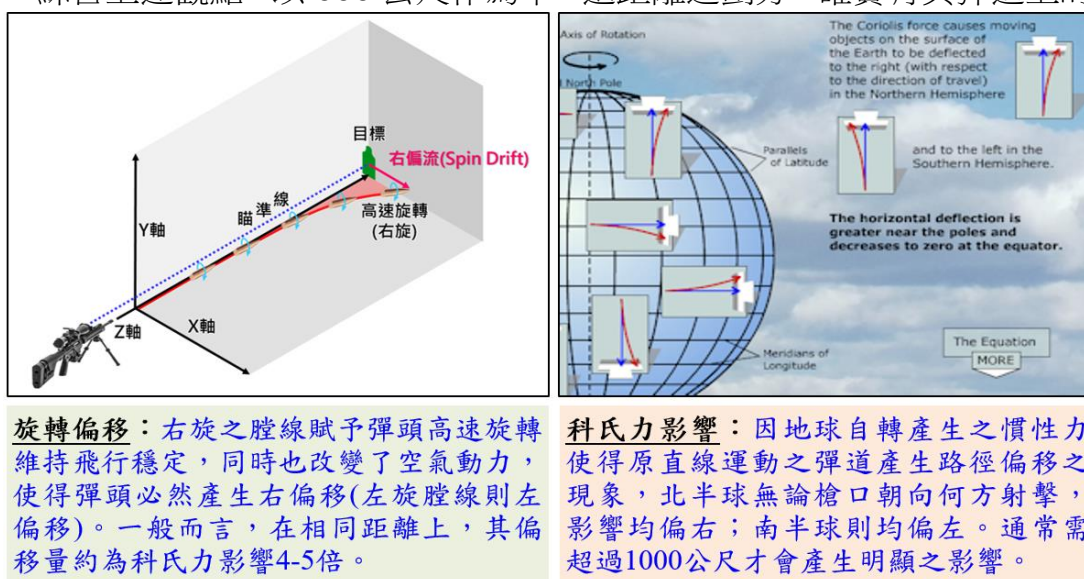
2. **中距離（300-600 公尺）**：對多數步槍、狙擊槍彈藥而言，此距離內彈道變化幅度開始增大，射手必須開始重視測距誤差控制與彈道裝定問題否則若無法給予槍管正確之射角，彈道將無法獲得適當之墜落補償值（BDC, Ballistic Drop Compensations），進而使脫靶機率加大（射程裝定錯誤彈道將明顯忽高忽低）。然而此距離內，彈頭受溫度、大氣壓力與相對溼度等外在環境因素之影響尚不明顯，只要表尺裝定正確，在無風的環境下，即便射手未即時修正上述環境因素問題，多數情況仍可有效命中目標，故 600 公尺通常也是狙擊手欲使用某標準環境下，具固定彈道參數之射表的最大臨界距離。最後，500-600 公尺通常也是各種仰賴精準彈道參數之應用射擊，如移動目標射擊、應急修正射擊、轉槍面射擊...等之有效射程上限。
3. **遠距離（600-1000 公尺）**：對多數步槍、狙擊槍彈藥而言，此距離內彈道受槍口初速變異量（MVV, Muzzle Velocity Variation，此變異量包含初速標準差¹與最大散佈²）、重力、風力、溫度、大氣壓力與相對溼度等內、外在因素影響，將變得較為明顯，如未能適時修正很可能造成脫靶。而且在此距離上，因射擊時槍面些許的傾斜角度控制與槍管因地形的俯仰角度影響、以及彈頭旋轉偏移（Spin Drift）與科氏力（Coriolis）等因素對彈道的影響程度也開始加大（如圖二）。以國造 T93K1 狙擊槍搭配 TC94 狙擊彈之模擬彈道（平均槍口初速每秒 808 公尺）為例：

¹ 依據 Bryan Litz 所著《Accuracy and Precision for Long Range Shooting》一書第 272 頁定義：關於初速標準差（SD, Standard Deviation）之控制，小於或等於每秒正負 10 英呎，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，為工廠精密生產之彈藥品質；大於每秒正負 20 英呎時，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，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）。

² 槍口初速最大散佈（ES, Extreme Spread），為衡量彈藥穩定性或極端表現之主要參考數值，以 110 年國軍狙擊手競賽第一類狙擊手使用的 M33 .50 口徑普通彈為例，經本部實測槍口初速最大散佈可達 21 公尺，此不可控制因素將於 1000 公尺上產生約 60 公分不可控制的彈道高低變化。故美國實用彈道學家 Bryan Litz 於《Applied Ballistics for Long Range Shooting》一書第 188 頁建議，就遠距離射擊目的而言，槍口初速最大散佈不宜超出每秒 30 英呎（即約 9 公尺）。可見我國目前使用之狙擊槍、彈素質與先進國家標準尚有精進空間。

- (1)就每秒正負 6 公尺之槍口初速變異量（即低劣彈藥品質界定上限）而言：於 600 公尺將產生約 11 公分之高低變化、800 公尺約 24 公分、1000 公尺約 47 公分。
- (2)就傾斜角度影響而言：600 公尺傾斜 1 度約偏移 7 公分、傾斜 2 度約偏移 14 公分、傾斜 3 度約偏移 21 公分將近脫靶；800 公尺傾斜 1 度約偏移 15 公分、傾斜 2 度約偏移 30 公分造成脫靶，距離越遠傾斜角影響越大。
- (3)就俯仰角度影響而言：600 公尺俯仰 10 度約使彈道偏高 5 公分、800 公尺俯仰 10 度約偏高 10 公分、1000 公尺偏高近 20 公分。
- (4)就彈頭旋轉偏移而言：600 公尺約偏右 8 公分、800 公尺約偏右 16 公分、1000 公尺約偏右 32 公分。
- (5)就科氏力影響而言：受科氏力影響之水平偏移量，無論槍口朝向何方，800 公尺約偏右 3.3 公分、1000 公尺約偏右 6 公分、垂直偏移，朝東（朝西）射擊，800 公尺約偏高（偏低）約 7.5 公分、1000 公尺約偏高（偏低）約 15 公分。

綜合上述觀點，以 600 公尺作為中、遠距離之劃分，確實有其彈道上的意義。



圖二 子彈右旋偏移與北半球科氏力影響示意圖與附加說明

資料來源：作者自行調製（2021年9月16日）

4. **超遠距離（1000 公尺含以上）：**對大多數狙擊彈藥而言，彈頭飛行超過 1000 公尺時，彈道本身對各種可控制或不可控制的內、外在影響因素，如射擊時槍面的傾斜角度與槍管的俯仰角度、射手本身的射擊能力（瞄準誤差與射擊穩定度）、測距與射程裝定誤差、測風與風偏修正誤差；槍枝彈藥本身的精度散佈、槍口初速變異量；彈頭因高速旋轉產生的右偏移量（又稱右偏流）；受到不同空氣密度與飛行阻力（包含海拔高度、大氣壓力、溫度與相對濕度）產生的彈道變化、變化莫測的風速風向，甚至因地

球自轉產生的科氏力影響等因素，都已經到了失之毫厘、差之千厘的程度，已非如同 300-600 公尺中距離上，射手心存僥倖、刻意忽略彈道修正都還能幸運命中目標。因此，超遠距離射擊前彈道考量因素相當眾多，射手若未能將上述因素納入修正考量或設法降低其影響，將對超遠距離之精準度產生極不利之結果。另外，對當前各國常見軍用狙擊彈藥而言（.308 Win、.300 Win Mag、.338 Lapua Mag 以及 .50 BMG 等），彈頭於 1000 公尺前後，殘餘速度將低於每秒 408 公尺（穿音速影響）或每秒 340 公尺（次音速影響），使得彈道模擬輸出之參數準確度與彈頭本身之飛行穩定性均大幅度下降，欲實施精準射擊愈加困難。而彈頭飛行之殘餘速度低於每秒 408 公尺開始進入穿音速影響之距離，也是美國彈道學家 Bryan Litz 欲重新定義現代狙擊超遠距離之標準，因此不同彈藥能力將產生不同之超遠距離界定。

參、當前超遠距離射擊紀錄與說明

隨著科技、彈藥與武器裝備發展進步，現代遠距離射擊已經完全超出傳統上的定義，美國南北戰爭時期的神射手絕對無法想像，他們曾經創下傲人的 600 碼「遠距離」紀錄，對現代狙擊手來說，卻成為人人都可百發百中的「中短距離」。同上節所述，現代狙擊距離定義，600-1000 公尺可稱遠距離、1000 公尺以上才能稱作超遠距離。且唯有超出 2000 碼以上的狙擊紀錄，才可能擠進世界十大超遠距離射擊紀錄排名。（如圖三）

世界前十大「超遠距離」狙擊紀錄排名						
使用槍型	使用彈藥	射擊發數	狙擊手國籍	時間(月,年)	發生地(國家)	狙擊距離(排名與人名)
McMillan Tac-50	Hornady A-MAX .50	查無	加拿大	May. 17	伊拉克	3,450m 1 匿名
Barrett M82A1	NM140F2 Grade A.	查無	澳洲	Apr. 12	阿富汗	2,815m 2 匿名
AI L115A3	.338 Lapua Magnum	Tgt1: 3 rds Tgt2: 1 rd	英國	Nov. 09	阿富汗	2,475 m 3 Craig Harrison
McMillan Tac-50	Hornady A-MAX .50	3	加拿大	Mar. 02	阿富汗	2,430 m 4 Rob furlong
McMillan Tac-50	Hornady A-MAX .50	查無	加拿大	Mar. 02	阿富汗	2,310 m 5 Arron Perry
Barrett M82A1	Raufoss NM140 MP	查無	美國	Oct. 04	伊拉克	2,300 m 6 Brian Kremer
Browning M2 MG	.50 BMG	2	美國	Feb. 67	越南	2,286 m 7 Carlos Hathcock
Denel NTW-14.5	14.5X114m	查無	南非	Aug. 13	剛果民族共和國	2,125 m 8 匿名
Barrett M82A1	.50 BMG	查無	美國	Jan. 08	阿富汗	2,092 m 9 Nicholas Ranstad
McMillan Tac-338	.338 Lapua Magnum	1	美國	Aug. 08	伊拉克	1,920 m 10 Chris Kyle
AI L115A3	.338 Lapua Magnum	查無	英國	Aug. 09	阿富汗	1,853 m 11 Christopher Reynolds

資料更新時間：2021年9月

圖三 世界前十大「超遠距離」狙擊紀錄排名

資料來源：作者自行調製，參考 The Longest Sniper Kills in History/Statista/Defense spending and arms trade/2017。（調製日期 2021 年 9 月 16 日）

從上述作者整理的資料可以發現幾個特別的現象：

- 一、前十大排名中，由手栓式狙擊槍與半自動狙擊槍所創下之紀錄比例為 6 比 4，³可見在超遠距離射擊上，半自動狙擊槍能以較快的射擊速率減少兩發射擊間環境因素之影響（如風的變化），確實可彌補設計上精度不足的問題，達到超遠距離射擊之目的。
- 二、前十大排名中，有 7 個紀錄均是由 100 年前白朗寧所設計的.50 英吋機槍彈（.50 Cal BMG）12.7X99 公厘規格之彈藥所創下，可見該口徑彈藥在外彈道表現之優越性與持續發展潛力。其中 3 個紀錄均由 Hornady 公司所生產的 A-MAX 精密彈藥所創下，且囊括第 1、4、5 名。該彈頭採極低阻力設計（VLD, Very-Low-Drag），與 G7 標準彈頭之阻力係數比值為（i7）為 0.811，⁴彈道係數極高（原廠聲稱 G1 彈道係數為 1.050；Applied Ballistics 彈道公司實測為 0.991）。此現象說明彈道係數高低雖然無法直接代表精度的好壞，但卻能保證彈頭有更慢的初速衰退率，使飛行速度降低至音速、彈頭進入不穩定飛行之臨界距離增遠，有效延長了射手接戰距離。且彈道係數高也代表該彈頭風阻較小，飛行到達相同距離上，能保有較高的彈速與動能，彈道墜落值與風偏修正值較小，命中率較高，故適合作為超遠距離射擊之彈藥。
- 三、前十大排名中，有 2 個紀錄係由.338 Lapua Mag 彈藥（規格 8.6X70 公厘）所創下，其為當前超遠距離射擊彈藥新起之秀（觀察第十一名亦為.338 Lapua Mag 彈藥）。雖然.338 Lapua Mag 彈藥由芬蘭 Lapua 彈藥製造商開發推廣迄今已逾 30 年，然因其彈道低伸、精度高、1000 公尺以上超遠距離後殘餘動能高等優異特性，近年廣獲歐美軍警特勤單位及遠距離精準射擊競賽射手使用，成為先進國家在追求狙擊槍輕便靈活與遠距精準，平衡兩種互相矛盾需求之新選擇。
- 四、前十大排名中，有 9 個紀錄都是由先進狙擊槍或精準步槍所創下，僅有唯一例外，即是由美軍越戰時期陸戰隊知名狙擊手卡洛斯·海斯卡克（Carlos Hathcock）使用白朗寧 M2 重機槍搭配自行改造的狙擊鏡，採半自動射擊模式所創下的 2286 公尺最遠狙擊紀錄，（如圖四）且該紀錄一直保持到 2002 年才被加拿大狙擊手 Arron Perry 以 2310 公尺的狙殺距離超越。至目前為止，在經歷超過半個世紀各國狙擊手的爭奪後，該紀錄仍然保持在前十名內，足以可見當時卡洛斯·海斯卡克想法之新穎及遠超出常人的彈道演算能力與射擊技術，為狙擊手「膽大心細」特質之最佳典範。

³ McMillan Tac-50 或 Tac-338 均係屬手栓式狙擊槍、Barrett M82A1 則為半自動狙擊槍。另第 7 名紀錄由南非狙擊手以 Denel 防衛企業生產的 NTW14.5 反物資狙擊槍創下，該槍屬於手栓式設計，依官方資料指出 1000 公尺精度約可達 2MOA 之標準。

⁴ 極低阻力係數（VLD,Very-Low-Drag）彈藥，通常係指實驗彈頭與 G7 標準彈頭空氣阻力比值小於 0.88 之彈藥，其能力足以滿足大多數遠距離射擊需求也能有較好的超遠距離彈道表現，如國內特勤單位使用之 Falconeye.50 精準彈藥其阻力係數為 0.859 亦屬之。



圖四 卡洛斯·海斯卡克以白朗寧 M2 重機槍搭配狙擊鏡實施超遠距離狙擊
資料來源：Bryan, 〈In Memoriam : Legendary USMC Sniper Carlos Hathcock II〉 <http://guide.sportsmansguide.com>. (2016 年 5 月 20 日) (檢索日期 2021 年 9 月 16 日)

此外，還有兩個從簡圖上不容易看出來的現象，第一個是大部分的超遠距離狙擊紀錄都發生在高海拔地區，主要原因是海拔高相對的空氣密度較小，有助於延伸有效射程。第二個是大多數超遠距離狙擊紀錄都不是首發命中，而是用 2-3 發才成功命中目標，因此不需用造神化的方式過度解讀這些世界紀錄。⁵以美國步槍協會 (NRA) 每年舉辦的 2 英哩超遠程射擊競賽 (KO2M, King of 2 Miles) 標準為例，其規定參賽者在不同距離上各有不同的限定發數，但均必須至少命中 1 發才能射擊下一個目標或晉級下一個階段。以 2017 年度競賽標準為例，第一階段，從 1416 公尺距離開始 (目標 94X58 公分)，給予 5 發機會、但接續的 1567 公尺 (94X58 公分)、1727 公尺 (94X76 公分)、1819 公尺 (94X76 公分) 等三個目標則僅給予 3 發機會。第二階段，第一個目標距離 2438 公尺 (104X84 公分)、第二個目標距離 2768 公尺 (137X107 公分)、最後目標距離 3078 公尺 (152X122 公分)，則均給予 5 發機會。以該年度成功邁進並射擊到第一階段最遠距離 1819 公尺目標的 14 位射手為例，即便所有參賽者均使用具有極高精度的槍枝 (通常具 0.5MOA 精度)⁶以及手動精密裝填之極低阻力設計之彈藥 (口徑多以 .338、.375、.408、.416、.50 英吋為主，(如圖五)再輔以專業團隊於一旁協助彈道觀測與風偏修正，(如圖六)然而對於遠在 1819 公尺的

⁵ 經查證，排名第十的紀錄係由美國狙擊手克里斯·凱爾 (Chris Kyle) 於伊拉克所創下，亦是其個人軍旅生涯最遠之狙擊紀錄 (2100 碼，即 1920 公尺)，依其自傳《美國狙擊手》一書第 326-327 頁敘述：「或許是因為我將扳機向右扣，修正了風造成的偏移；或許是因為地心引力造成子彈位移準確命中目標；或許純粹因為我是伊拉克最幸運的混蛋…2100 碼。至今那一槍仍令我驚奇，那一槍純屬幸運，不然不可能一槍就打中他」。為少數以首發命中的超遠距離狙擊紀錄。

⁶ MOA (Minute of Angle)，中文稱角分，為角度單位，1 角分相當於 1/60 度 (即 0.0166 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 (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 (弦長) 為 2.9 公分寬，故當敘述某槍枝具 1 角分精度，即代表該槍枝於 100 公尺平均散佈面大小能小於 2.9 公分直徑圓。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調整瞄準鏡修正風偏與射角之單位。

目標而言，平均命中率約 48%，能首發命中者僅 6 人。另成功晉級第二階段的 10 位射手中，對更遠的 2667 公尺目標平均命中率則僅為 10%，且無人首發命中)。由此可見，超遠距離射擊絕非想像中容易，且上述任何競賽所律定之距離，對當前各國常見軍用狙擊彈藥而言，多以超出最大有效射程範圍(即子彈速度進入穿音速影響範圍或已低於次音速，將於後文詳細說明)。故在彈藥能力、精準度與環境掌握、資源不足的情況下，欲想在戰場上以狙擊小組兩人獨立完成超遠距離上「人形」目標之狙殺，並奢望擠身進入世界前十大排名，可謂難如登天。



圖五 美國 KO2M 競賽常用彈種

資料來源：Applied Ballistics 公司 Youtube 專業頻道〈Derek Rodgers KO2M Final Run 2017-2 Mile Hit〉(檢索日期 2021 年 10 月 1 日)



圖六 由美國 AB 彈道顧問公司領軍的團隊獲得 2017 年 KO2M 競賽冠軍

資料來源：Applied Ballistics 公司 Youtube 專業頻道〈Derek Rodgers KO2M Final Run 2017-2 Mile Hit〉(檢索日期 2021 年 9 月 23 日)

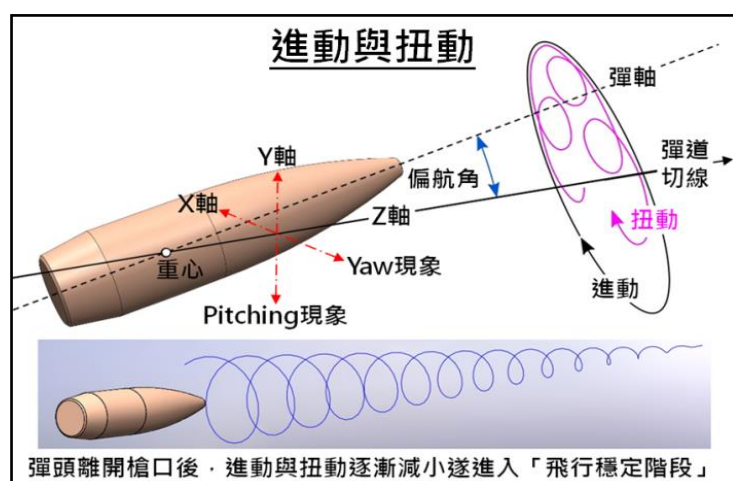
肆、超遠距離射擊之奧秘

經作者蒐整歐美先進國家有關超遠距離射擊之相關文獻與專業書籍後，將超遠距離射擊之奧秘區分「彈藥能力理論分析」與「科學彈道應用步驟」兩方向實施探討，目的在協助我國狙擊手能有系統地審視、檢查相關因素，確保在超遠距離上，仍能獲得首發命中或達到合理命中率之目的。逐一說明如下：

一、就彈藥能力理論分析而言

(一) 既有的槍械精度（或射手射擊能力）、槍口初速標準差與最大散佈、測距與射程裝定誤差、測風與風偏修正誤差等各種內、外在條件，是否能滿足該武器系統在超遠距離上射擊某特定大小目標並獲得預期之命中效果？以美軍 WEZ（Weapon Employment Zone）分析方法為例，經該系統模擬後可得知，當使用 7.62 公厘 M110 半自動精準步槍於 1000 公尺射程上射擊 E-Type 標準人形目標（50X101 公分）時，在 1MOA 精度、槍口初速標準差每秒正負 15 英尺（即 4.5 公尺）、測距誤差正負 5 公尺及風偏修正誤差正負 1 哩風之內、外在條件、因素影響下，理論命中率可達 41%；相同條件下，改使用精度同為 1MOA 的 M2010 手栓式狙擊槍並搭配 .300 Win Mag 麥格農增程彈，理論命中率可提高為 63%。若改使用 M107 半自動狙擊槍，並搭配 MK211 MOD 0 狙擊彈，雖槍管短後座原理使精度降低成 1.5MOA，但因彈道係數高且彈道飛行動能充足，理論命中率卻能達到 90%。⁷因此，實施超遠距離射擊時，狙擊手能否以「人、槍、鏡、彈、環」遠距精準射擊五大因素客觀分析理論命中率之大小，為狙擊手首要考量事項。

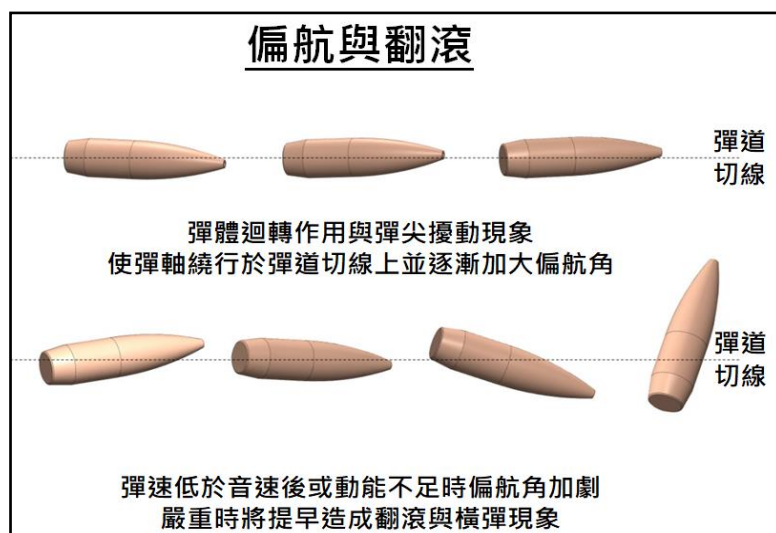
(二) 欲射擊之距離，其彈頭飛行速度是否已經低於平均音速每秒 340 公尺？因為當彈頭於空氣中飛行從超音速飛行進入次音速時，壓力中心與馬格勒斯力均改變且遠離重心，使彈頭進動與扭動（Nutation and Twist）現象加劇，（如圖七）彈軸無法穩定維持在彈道切線上，偏航角加大的結果空氣阻力隨之加大，進而影響子彈飛行穩定度與命中率，嚴重時甚至造成翻滾與橫彈現象。（如圖八）



圖七 彈頭飛行之「進動與扭動」現象示意圖（作者自行調製）

資料來源：郭晉愷，《狙擊彈道學 第三版》（高雄市，陸軍步兵訓練指揮部，民國 110 年），第 14 頁。（檢索日期 2021 年 9 月 16 日）

⁷ TC 3-22.10, 《Sniper》(U.S.A., Headquarters Department of the Army, 2017), P2-20~2-23&K-2~K-3.



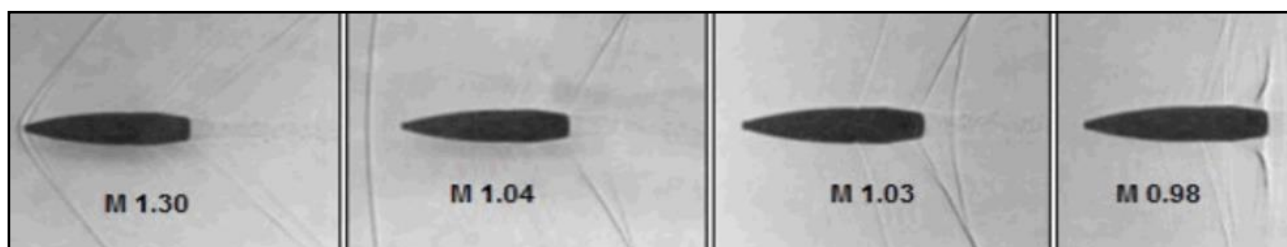
圖八 彈頭飛行「偏航與翻滾」現象示意圖（作者自行調製）

資料來源：郭晉愷，《狙擊彈道學 第三版》（高雄市，陸軍步兵訓練指揮部，民國 110 年），第 14 頁。（檢索日期 2021 年 9 月 16 日）

故彈頭進入次音速飛行之距離，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，即使殺傷動能足夠，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 彈道計算功能模擬國軍各種常用彈藥，在較適我國射表調製之平均標準大氣環境下（即密度高度 750 公尺）⁸之相關參數如下：國造 TC74 半鋼芯彈（彈重 62 格令，平均槍口初速每秒 880 公尺）約於 675 公尺低於次音速、國造 TC94 狙擊彈（彈重 175 格令，平均槍口初速每秒 808 公尺）約落於 950 公尺、美造 M33 普通彈（彈重 661 格令，平均槍口初速每秒 860 公尺）約落於 1350 公尺、美造 Falconeye 精密彈（彈重 762 格令，平均槍口初速每秒 860 公尺）約落於 2080 公尺。另補充美軍常用遠距離射擊彈藥，在較適美軍射表調製之平均標準大氣環境下（密度高度約 50 公尺）之相關參數如下：.300 Win Mag 規格之 MK481 彈藥（250 格令，平均槍口初速每秒 869 公尺）約於 1290 公尺低於次音速、.338 Lapua Mag 規格之 SMK/Scenar 彈藥（250 格令，平均槍口初速每秒 899 公尺）約可至 1350 公尺、12.7x99 公厘規格之 MK211（A606）彈藥（彈重 671 格令，平均槍口初速每秒 883 公尺）約可至 1550 公尺。故狙擊手能否有效實施 1000 公尺以上超遠距離射擊？掌握欲射擊之距離其彈速是否已經低於次音速，為射擊前極其重要的評估要項之一。

⁸ 密度高度（DA, Density Altitude）：指所在位置之空氣密度大小，等同於在標準大氣環境下多少海拔高度上相對之空氣密度。可由溫度、大氣壓與濕度三者計算得來或者由 Kestrel 4000 以上等級之測風儀直接讀取。密度高度越高、空氣密度越小，彈道較高。得知密度高度可縮短將環境參數輸入彈道計算軟體的時間或簡化傳統人工計算程序，為環境因素影響彈道之重要參考指標。

(三) 欲射擊之超遠距離，其彈頭飛行速度是否已經低於 1.2 馬赫 (Mach) 即每秒 408 公尺？理由係美國應用彈道學家 Bryan Litz 經實驗發現，一般彈頭進入次音速影響通常開始發生在彈速低於 1.2 馬赫 (Mach) 即每秒 408 公尺之射程時，此又稱穿音速距離 (Transonic Range)，如圖九。以國軍現行常用彈藥，在較適我國射表調製之平均標準大氣環境下 (即密度高度 750 公尺)，國造 TC74 半鋼芯彈 (彈重 62 格令，平均槍口初速每秒 880 公尺) 穿音速距離約落約於 565 公尺、國造 TC94 狙擊彈 (彈重 175 格令，平均槍口初速每秒 808 公尺) 約落於 770 公尺、美造 M33 普通彈 (彈重 661 格令，平均槍口初速每秒 860 公尺) 約落於 1120 公尺、美造 Falconeye 精密彈 (彈重 762 格令，平均槍口初速每秒 860 公尺) 約落於 1720 公尺。故上述彈藥在進入穿音速影響範圍之距離後，即使環境因素影響條件小，狙擊手也須留意實質命中率問題。



圖九 彈頭進入次音速影響約發生在彈速低於 1.2 馬赫 (每秒 408 公尺)

資料來源：<http://www.bulletin.accurateshooter.com/2014/09/practical-thoughts-about-transsonic-bullet-stability-and-accuracy/> (檢索日期 2021 年 9 月 16 日)

二、就科學彈道應用步驟而言

(一) 彈道係數測量 (獲得) 方法：

彈道係數 (BC, Ballistic coefficient) 是狙擊手欲獲得準確之射擊參數，輸入彈道計算機的重要數據之一，其數值的大小也直接決定了該彈頭於外彈道表現。其意義在於，為衡量彈頭飛行過程中所實際受到空氣阻力大小的係數，或者指某特定彈頭所能克服空氣阻力之能力，其數值越高、能力越好。主要由截面密度 (Sectional Density) 除以阻力係數 (Form Factor) 計算而來，其單位為磅/平方英吋 (lbf/in²)，但通常予以省略。(如圖十)

彈道係數計算公式

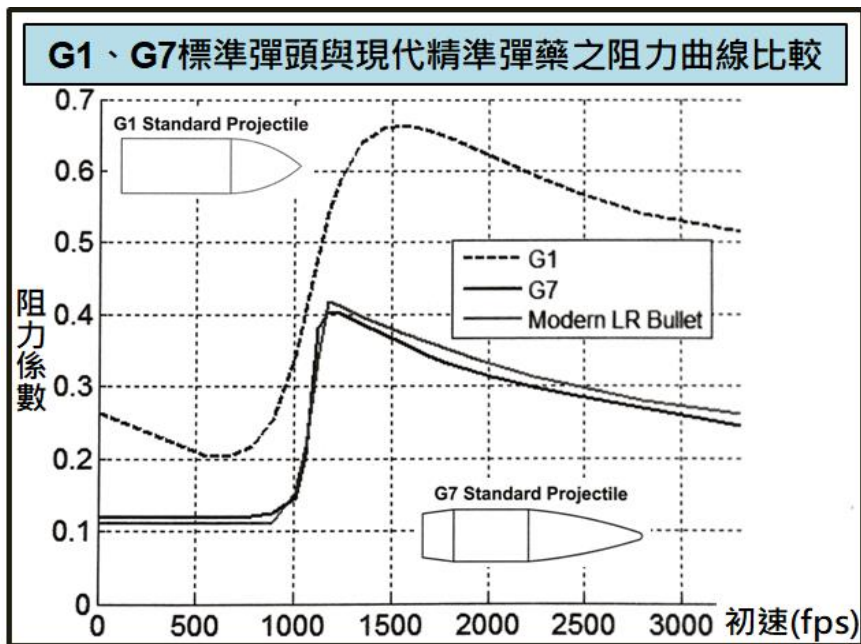
$$\text{彈道係數(lbf/in}^2\text{)} = \frac{\text{截面密度(lbf/in}^2\text{)}}{\text{阻力係數}} = \frac{\text{彈頭重(格令)/7000}}{(\text{彈徑-英吋})^2 \times \text{阻力係數}}$$

資料來源：Bryan Litz, 《Applied Ballistics for Long Range Shooting》, P16.

圖十 彈道係數計算公式（作者自行調製）

資料來源：郭晉愷，《狙擊彈道學 第三版》（高雄市，陸軍步兵訓練指揮部，民國 110 年），第 6 頁。（檢索日期 2021 年 9 月 16 日）

然而，因上述公式中的分母—阻力係數，其又來自於「彈頭實際於空氣中飛行的空氣阻力除以 G1 或 G7 標準彈頭的空氣阻力」。加上彈頭於空氣中飛行之空氣阻力會隨彈速變化而不斷改變，且當海拔高度、大氣壓力、溫度、相對溼度等環境因素不同而影響彈速之變化時，彈道係數之結果亦立即產生變化，故彈道係數在不同射程上均會有些許差異，並非為一固定值。（如圖十一）



圖十一 G1、G7 標準彈頭與現代精準彈藥之阻力曲線比較

資料來源：Bryan Litz, 《Applied Ballistics for Long Range Shooting》, P23.（檢索日期 2021 年 9 月 16 日）

以美國應用彈道學家 Bryan Litz 所著《Ballistic Performance of Rifle Bullet- 3rd Edition》一書中最近似國造 TC94 狙擊彈彈道特性之 Sierra .308 MatchKing（彈頭重 175 格令）為例，其經實彈量測該彈頭在不同彈速（每秒 3000 英尺降至每秒 1500 英尺）下實際受到空氣阻力之大小再計算出彈道係數結果後發現，當與 G1 標準彈頭比較時，

變化量高達 13.3%、與 G7 標準彈頭比較時，變化量小於 3.3%。⁹故建議當欲實施超遠距離射擊時，應以 G7 彈道係數進行彈道模擬運算，所獲得之修正值將較 G1 彈道係數輸入準確。此外，一般彈藥製造商所能提供之彈道係數，很少是透過大量實彈測試獲得，而且通常只能代表單一距離上之彈道係數(如槍口處、彈速降至 2.2 馬赫即每秒 748 公尺時之距離、或 200 碼處)，其值與上述美國彈道學家 Bryan Litz 以至少 200 發實彈，透過雷達波測速儀 (Labradar) 追蹤彈頭全程飛行速度，再計算出最適合輸入彈道計算機之平均數值相比，誤差最多可高達正負 10%。且部分彈藥製造商為了行銷目的，還會誇大數值，刻意顯示彈道係數變化中數值最高的數據 (A Peak BC)，故在使用上務必特別注意。¹⁰

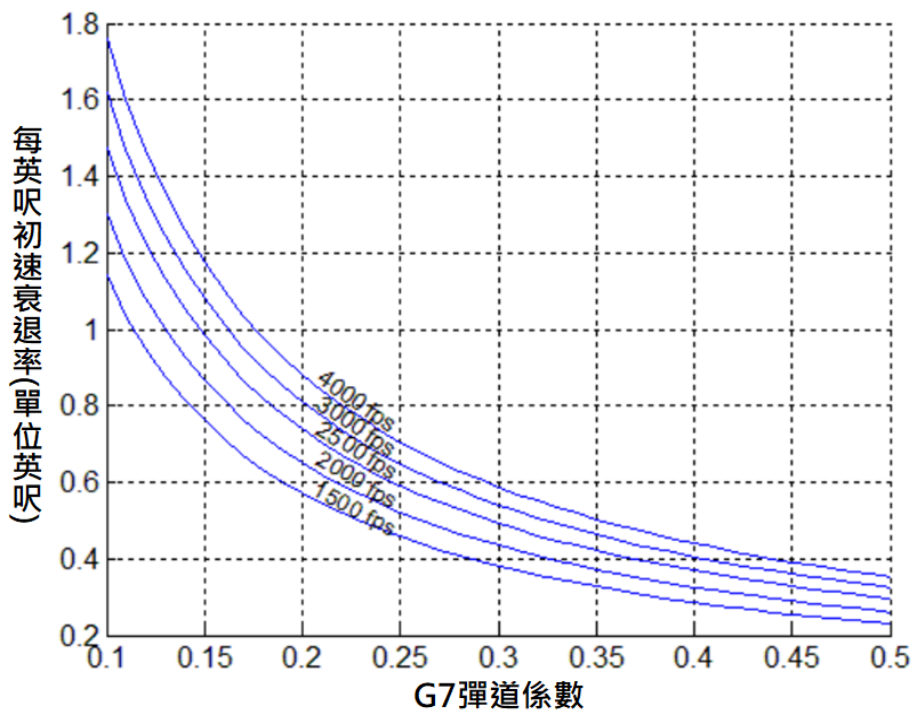
(二) 槍口初速測量 (獲得) 方法：

槍口初速 (MV, Muzzle Velocity) 與彈道係數同等重要，不僅是輸入彈道計算機的重要數據之一，其數值的大小也直接決定了該彈頭於外彈道表現。然而，槍口初速與發射藥量、形式、燃燒速率、環境溫度、彈藥溫度、彈頭重量與裝填深度、槍管長度與纏度、保養水準乃至膛壁磨耗程度...等眾多因素息息相關。就當前國情而言，除環境溫度、彈藥溫度、保養水準與膛壁磨耗程度可由射手避免或控制外，餘均非射手能直接掌握。

一般為獲得槍口初速，可以測速儀 (Chronograph) 測量獲得，惟須注意的是，具光感式三角屏幕的傳統測速儀 (如 Chrony、Oehler、CED 等廠牌) 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 (機) 輸入正確之彈道係數逆向推算獲得或者，也可以參考美國應用彈道學家 Bryan Litz 〈Velocity Decay between Muzzle and Chronograph〉一文中所提供之「槍口初速每英尺衰退曲線圖」實施換算，(如圖十二) 使用時只需將使用彈藥之 G7 彈道係數對向槍口初速曲線，透過矩陣得知每英尺初速衰退率，將其乘以槍口至測速儀之距離即為初速衰退量，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。

⁹ 該書內所提供之彈道係數均以實彈測試求取該彈藥彈速從每秒 3000 英尺至每秒 1500 英尺範圍之平均值，且大量收錄各種常見彈藥之彈頭尺寸、規格、G1/G7 彈道係數變化曲線與最適值、以及建議之槍管纏度，實用價值極高。

¹⁰ 資料來源：美國知名風偏專家 Emil Praslick III 受訪口述內容：Gavintoobe Youtube 頻道，《In-Depth ELR Discussion with Emil Praslick》



圖十二 Bryan Litz 槍口初速每英尺衰退曲線圖

資料來源：Bryan Litz, 〈Velocity Decay between Muzzle and Chronograph〉(U.S.A., Applied Ballistics, LLC, 2021), P1. (檢索日期 2021 年 9 月 16 日)

另使用時須留意槍枝與儀器必須完全垂直或測速儀本身的兩道光閘必須互為平行...等架設問題，避免入射角錯誤或光閘間距離改變造成測速誤差（一般而言，兩光閘間距越大，誤差越小，採購時可特別注意）。然而，若能改以槍口電磁式或雷達波偵測式等高階測速儀，則可直接測得較接近之槍口初速。(圖十三)若完全無測速儀可以使用時，可先參考原廠提供之初速，再利用部分彈道計算軟體(機)，如 Kestrel 5700 測風儀內建之槍口初速校正功能 (Truing Muzzle Velocity/Calculating Muzzle Velocity)¹¹實施逆向推算，但前提是必須取得該彈藥真實之彈道係數，以免錯上加錯。如美國陸軍 2017 年狙擊手訓練教範 (TC 3-22.10) 附件第 B-3 頁亦提到：「輸入彈道計算機之槍口初速若與實際槍口初速有每秒 5 英尺 (5 fps) 之誤差，則計算出之彈道如同輸入 1%彈道係數誤差時之結果。」故建議各單位狙擊組在積極發展、提升狙擊手裝備素質同時，也應設法同步獲得一台精確可靠之測速儀，以實測獲得平均槍口初速作為彈道演算之依據，提升超遠距離射擊命中率。

¹¹ 為 Kestrel 5700 Elite 測風儀內建功能，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 714 公尺進入 1.2 馬赫，故建議於 640-714 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。



圖十三 槍口電磁式 (MagnetoSpeed) 與雷達波偵測式 (LabRadar) 測速儀
 資料來源：<http://www.3gsports.de>〈MagnetoSpeed V3 Chronograph〉及 <http://www.ocabj.net>〈LabRadar Chronograph Review〉(檢索日期 2021 年 9 月 16 日)

(三) 瞄準鏡能力與安裝檢查：

「人、槍、鏡、彈、環」為狙擊手實施遠距離精準射擊之核心要素，五者能否整合攸關狙擊任務成敗。扣除「外在環境因素」，其中又以「人與鏡」兩者產生之瞄準因素，對精準度影響最甚。因此狙擊手若無法理解並消除光學瞄準鏡先天設計上對射擊精準度造成的不良影響，勢將無法有效實施彈道修正、參數驗證與蒐集，大幅降低遠距離射擊時彈道應用之成效。茲將瞄準鏡因素及其對超遠距離射擊之影響依序說明如下：

1. 倍率 (Magnification/Scope Power)：

即影像經光學鏡之放大倍數，如 100 公尺上 10 公分的物體 (1 米位)¹²，透過 10 倍鏡觀看時，相當於用肉眼於 10 公尺外觀看該物體的效果 (放大成 10 米位)。倍率越高，愈有利目標觀測與獲得並強化建構正確瞄準圖之能力。一般為能滿足狙擊手遠距離、超遠距離射擊需求，建議使用最大倍率至少可達 25~30 倍之狙擊鏡，且以可變倍者為佳。如 5-25X56 或 5-30X56 等規格。惟倍率放大後，將直接或間接產生不少負面影響，因此在使用時必須特別注意。整理歸納如下：

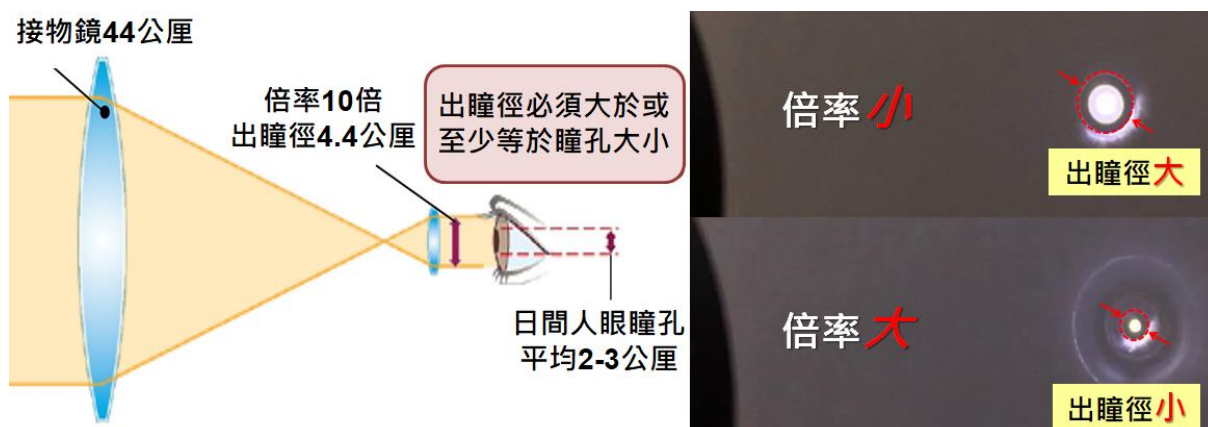
- (1) 視界 (Field of View) 窄化，降低射手對戰場環境監控能力。
- (2) 容易使射手瞄準時過於專注在目標特徵或動作上，而非聚焦在十字絲與瞄準圖關係維持上，造成瞄準誤差。

¹² 米位，又稱毫弧度角 (milli-radians)，因一個圓周為 360 度等於 6283 米位，1 米位相當於 0.05729 度，亦等於 3.438MOA (因一個圓周為 360 度，1 度等於 60MOA)。米位和 MOA 的應用一樣，在某個距離下可以用來表示特定的高度或寬度。1 米位在 100 公尺處相當於 0.1 公尺高度 (寬) 度，1000 公尺處相當於 1 公尺。由於換算方便，因此軍用瞄準鏡或望遠鏡之鏡內刻劃常以米位為單位，便於射手估算目標距離。

- (3) 當射手呼吸與心跳急促時，十字絲晃動與顫動程度更明顯，易增加射擊壓力，產生猶豫不決或急扣現象。
- (4) 進光量減少，使整體明亮度降低，若於低光度環境下使用，將使影像更為朦朧。
- (5) 適眼距（**Eye Relief**）縮短，使貼腮位置尋找與瞄準不易。
- (6) 適眼距過近，加上據槍不夠穩定，眼睛容易因後座力遭目鏡撞擊（**Scope Bite**）。
- (7) 產生較大的鏡視差（**Optical Parallax**）影響，射手若未能即時調整消除或貼腮一致性不夠，將增加瞄準誤差。
- (8) 熱擾流影響更加明顯，對射手瞄準干擾加大。

2.出瞳徑（Exit Pupil）：

即光線透過光學鏡後傳達至射手眼睛的光束大小，以接物鏡直徑大小除以倍率即可獲得。因此，若接物鏡大小相同，倍率越大，出瞳徑越小；反之，則相反。理論上，其大小必須大於或至少等於人眼瞳孔，能確保接物鏡的光線能完全進入瞳孔，獲得明亮清晰之影像，並可避免產生暈影或瞄準偏差。（如圖十四）因生理學上，人眼瞳孔大小會隨著環境明暗度自然調整，在烈日強光下，通常會縮小至 2-3 公厘、夜間昏暗中，則自動放大至 5.5-7 公厘左右（視年齡，通常 20 歲年輕人可放大到約 7 公厘、65 歲之老年人則僅約 5.5 公厘）。故選用原廠出瞳鏡大小被刻意控制在 2-7 公厘間的可變倍狙擊鏡，能滿足日夜間瞄準鏡最基本使用需求，固定倍率則以 4-5 公厘為佳，如國造 TS95 式 10 倍狙擊鏡出瞳徑即為 4.25 公厘。通常，狙擊手為了使超遠距離射擊時能清楚觀瞄目標，往往會將倍率調整到最高，同時使出瞳徑縮小，大幅增加建構清晰瞄準圖之難度。

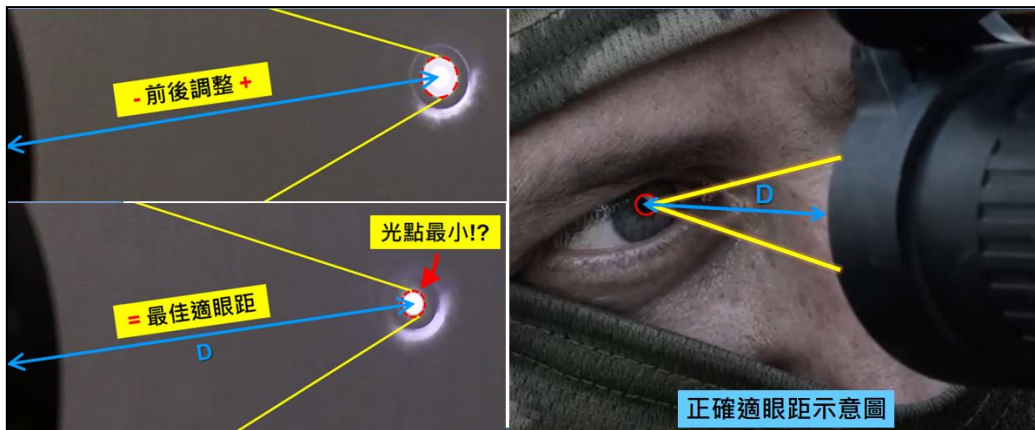


圖十四 10 倍狙擊鏡出瞳徑大小與人眼瞳孔關係示意圖（作者自行調製）

資料來源：郭晉愷，《狙擊彈道學 第三版》（高雄市，陸軍步兵訓練指揮部，民國 110 年），第 70 頁。（檢索日期 2021 年 9 月 16 日）

3. 適眼距 (Eye Relief) :

又稱明視距離或接目距離，指為獲得最清晰明亮的影像，接目鏡至眼睛所必須維持的特定距離。該距離主要由倍率主宰，通常倍率越大，適眼距越短。大部分可變倍狙擊鏡設計，其值通常介於 8-10 公分，該實際參數可查詢原廠資料獲得，如國造 TS95 式 10 倍狙擊鏡，適眼距為 86 公厘。然若無原廠資料可查，可將狙擊鏡之接物鏡對向日光，像以放大鏡聚熱燒穿紙張的方式，當發現折射出之光束能最為集中時接目鏡與紙張之距離，即為該瞄準鏡在該倍率上之適眼距。(圖十五)



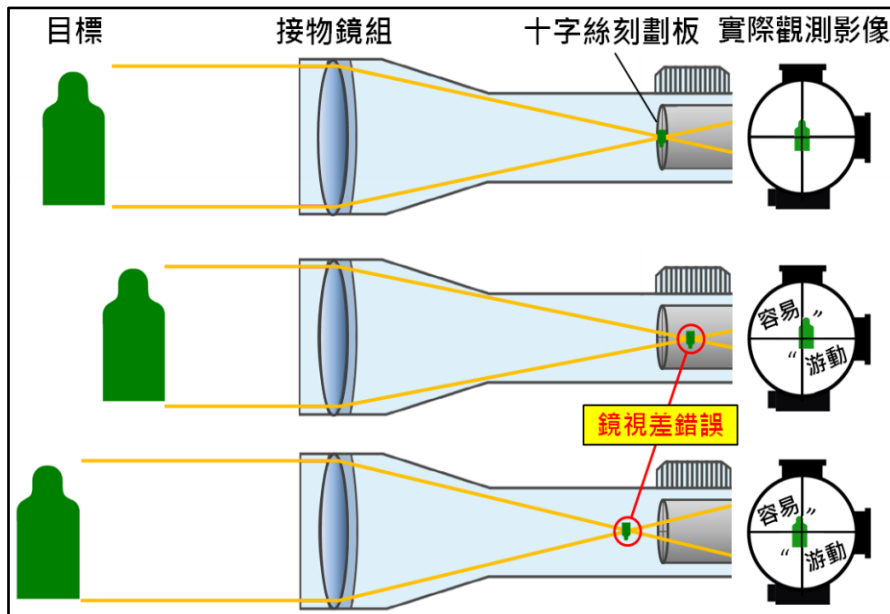
圖十五 適眼距示意圖

資料來源：郭晉愷，《狙擊彈道學 第三版》(高雄市，陸軍步兵訓練指揮部，民國 110 年)，第 72 頁。(檢索日期 2021 年 9 月 16 日)

當出瞳徑與適眼距均確定後，即可決定狙擊鏡安裝位置或配合槍托長度調整，使能在最符個人自然、舒適據槍的前提下，每次貼腮時都能一次到達適眼距的最佳位置，獲得明亮清晰之瞄準圖。接著，再配合貼腮板微調高低，使出瞳徑能輕易映入或覆蓋人眼瞳孔，最終獲得清晰、明亮、正圓、無暈影 (No Shadow Effects) 的影像。使人、槍、鏡三者合一，縮短射擊準備時間並降低光學瞄準鏡對射擊精準度的影響。

4. 鏡視差 (Optical Parallax) :

鏡視差產生的原因在於目鏡的成像平面沒有落在十字絲的相同平面上，導致射手貼腮有些許晃動或位置改變時，目標會在十字絲附近游動，使瞄準圖無法一致，影響精準度甚鉅。(圖十六) 用簡單的方式解釋，如同傳統汽車實際以每小時 120 公里時速高速行駛時，因指針與儀表板平面存在些許高度差，導致駕駛從儀表板指針上看到的時速僅為 115 公里，造成超速問題。



圖十六 鏡視差產生原因示意圖

資料來源：作者自行調製，參考 <http://www.sportingshooter.com.au/news/riflescope-parallax-problem>. (調製日期 2021 年 12 月 3 日)

透過調整視差調整螺使成像平面與十字絲完全落在相同平面後，目標於十字絲上游動的情形則不復存在。不同的射程會有不同的視差定位，雖然部分狙擊鏡之視差調整螺會標示距離刻劃，但很少能完全消除鏡視差問題，(圖十七) 射手仍須於射擊前輕輕搖晃頭部，在不致於產生暈影 (Shadow) 的情況下，檢查十字絲是否存在游動情形並設法將其游動程度調整至最小或完全消除 (Parallax Free)，另建議在完成特定距離鏡視差之確認後 (通常為每百公尺)，可用白色細字油漆筆於視差調整螺上直接記錄以利後續射擊參考。另當使用可調倍率之狙擊鏡，其鏡筒內部兩焦距平面距離落差相同時，倍率調整越高，射手實際觀測之視差則越大，需特別留意。

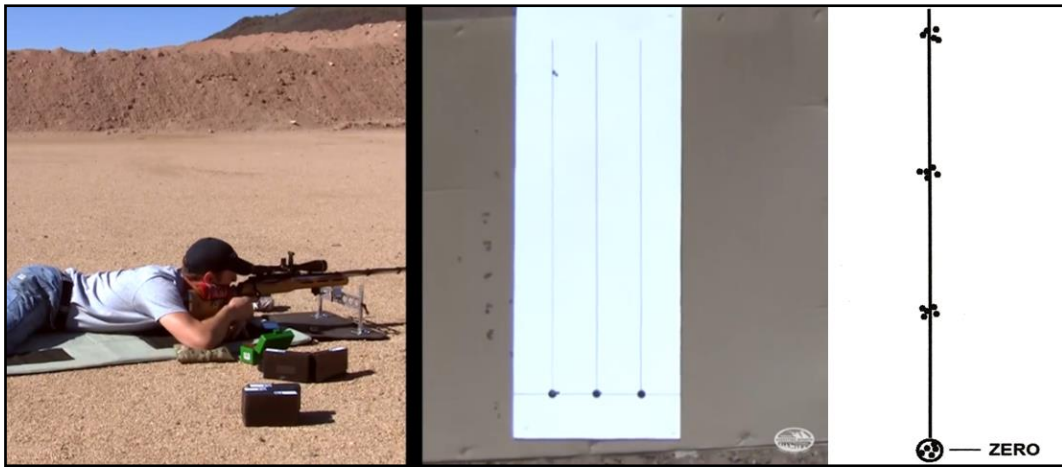


圖十七 視差調整螺與距離刻劃

資料來源：作者攝製 (2021 年 9 月 28 日)

5. 傾斜角 (Cant Errors) :

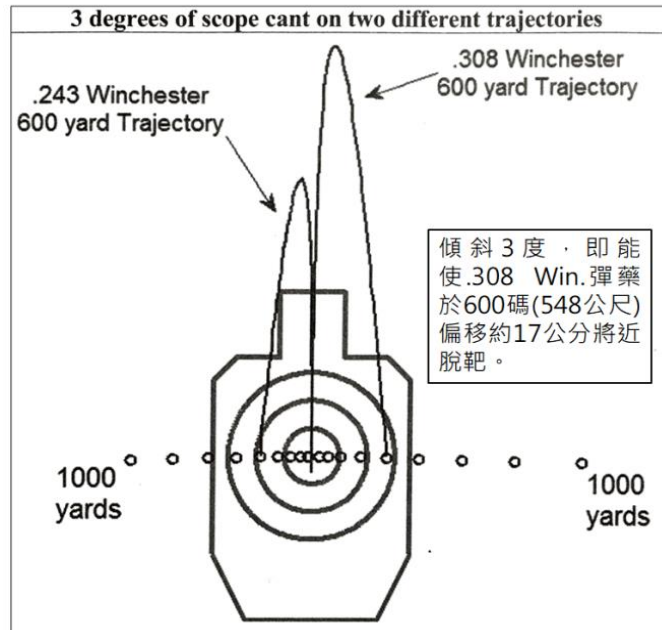
在理解真正的槍面傾斜角問題前，狙擊鏡安裝時若產生傾斜角，即高低調整螺轉動向量無法完全坐落於錘線 (Plumb Line) 平面上，則在不同射程上，彈著點將產生額外且不可預期的水平偏差量 (傾斜角度過大亦將造成垂直偏差量)。欲了解狙擊鏡安裝是否存在傾斜角問題，可實施 100 公尺垂直目標測試 (Tall Target Test)，靶紙規格如圖十八，張貼時務必以水平氣泡尺或錘線輔助確保靶紙無歪斜。隨後以每次調整高低調整螺 10MOA 方式射擊 3-5 發，進行共 30MOA 調整之檢測，藉由檢視每一群平均彈著點是否精準坐落於垂直線上來判別。



圖十八 彈道學家 Bryan Litz 進行垂直目標測試 (Tall Target Test)

資料來源：Bryan Litz《Applied Ballistics for Long Range Shooting》原文書籍附贈教學影片截圖 (檢索日期 2021 年 9 月 16 日)

而真正的槍面傾斜角問題，則是指射擊前，因人為問題，使狙擊鏡與槍管軸線所構成之垂直平面向右或向左側傾斜，即便傾斜角度甚小 (一般人類肉眼的判斷誤差約為正負 3 度)，槍管軸線指向仍將偏離原垂直平面，產生彈道水平偏差，以 .308 Win. 彈藥傾斜 3 度角射擊 IPSC 標準靶為例，於 600 碼處即能使彈著點水平偏移約 17 公分將近脫靶。(圖十九) 然而，傾斜角問題雖影響彈著甚鉅，卻也是影響彈著點各種因素中，狙擊手最容易克服的一項，一般只需於鏡上安裝槍用水平氣泡儀 (Anti-Cant Bubble Level/Scope Level)，於射擊前以眼角餘光確認水平氣泡是否居中 (或射擊時間緊湊時至少確認為概略居中)，即可控制傾斜角於 1 度角內。



圖十九 3 度傾斜角射擊彈道偏移示意圖

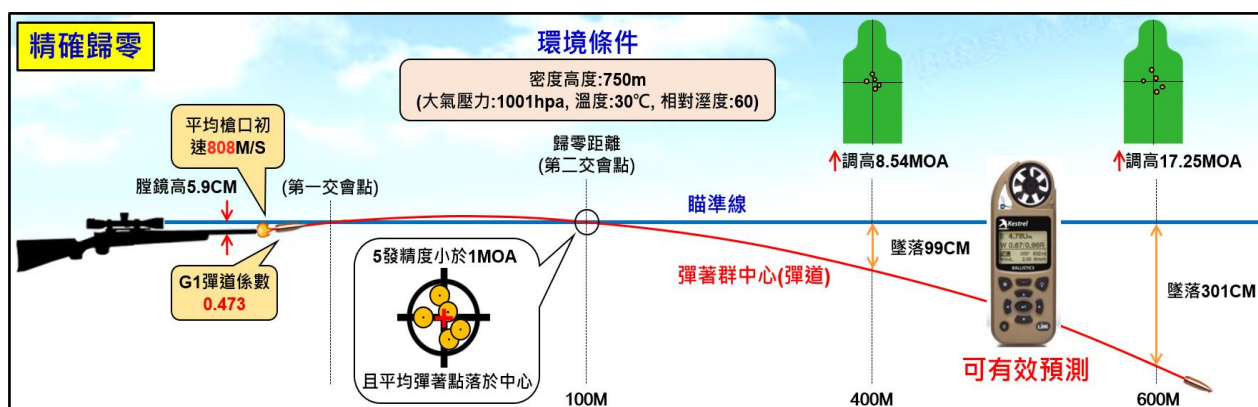
資料來源：Bryan Litz, 《Accuracy and Precision for Long Range Shooting》(U.S.A., Applied Ballistics, LLC, 2012), P95. (檢索日期 2021 年 9 月 16 日)

6. 修正量係數 (SCF, Scope Correction Factor)：

修正量係數是指欲補償瞄準鏡高低 (或風偏) 調整螺轉動一響後應使平均彈著點產生之移動量與實際移動量兩者誤差的一個係數。可透過上述垂直目標測試，觀察調整之響數與平均彈著點移動之關係，換算出該瞄準鏡每響實際修正量，求得修正量係數 (MOA 與米位鏡均適用)。以國造 T93K1 狙擊槍搭配 TS95 狙擊鏡射擊 100 公尺垂直目標測試為例，假設調整 10MOA 理論上彈著應該升高 29 公分，然而實際射擊後發現，雖彈著群符合精度要求，然平均彈著點卻僅升高 28 公分，則可換算每 2 響 (1MOA) 真實修正量僅 0.966MOA (28/29)，得知該瞄準鏡修正量係數為 0.966。故當欲射擊 800 公尺目標時，理論上其墜落值所需補償之仰角 (響數) 為 32MOA (64 響)，然因每響修正量係數為 0.966，故轉動 64 響實際上僅能提供約 30.9MOA 之彈道補償，尚不足以滿足 800 公尺所需。而必須轉動 33MOA (66 響) 才能使彈道能獲得完整 32MOA 之補償值。此修正量係數影響，在中短距離上影響雖然不大，但當射程一增遠，尤其是本文欲探討之 1000 公尺以上超遠距離射擊時，所需補償之響數勢將越多，狙擊手若完全無此觀念或刻意忽視不計，將導致修正量嚴重不足，使彈著點過低。

(四) 是否完成精確歸零：

射程與射角之關係，係經過內、外彈道計算得來，應準確無誤。只要目標距離估計正確並給予槍管一特定射角，在不考量精度的情況下，射彈理該命中目標上之瞄準點。然而，上述說法是單純就理論而言，實際上射彈能否準確命中目標上之瞄準點，還與射手如何歸零密切相關。所謂歸零（Zero/Zeroing）是指藉調整瞄準具（高低與風偏調整螺），賦予槍管特定仰角與方向角，使彈道方向正確，同時讓彈著群中心（即彈道）與瞄準線之第二交會點於歸零距離（Zero Range）上產生，達到人槍合一、準確命中之目的。由於 600 公尺遠距離以上射擊參數之獲得，高度仰賴科技裝備彈道機算機之輔助，而彈道計算機之所以能計算出欲射擊距離上所需之射角（補償角），除了實際衡量彈藥能力（如彈道係數與槍口初速）及環境因素（如風與空氣密度）外，也是因為我們告知了彈道計算機兩個重要基準參數，即歸零距離與膛鏡高（Bore Height，即瞄準鏡中心軸線與槍管軸線兩者之高低差）。彈道計算機以此為基準點，遂能夠計算出欲使彈道第二交會點於新的距離上產生，所需額外增加的射角（響數）。因此若狙擊手在歸零初期，即因射擊穩定度、彈著群散佈控制或射彈修正等人為問題，導致歸零結果不夠準確、或者因膛鏡高量取方法錯誤，導致輸入彈道計算機之高度與實際槍上之膛鏡高誤差超過 1/4 英吋（約 0.65 公分），便很可能出現基準點錯誤，使彈道計算機預測之數值與實際所需修正響數產生落差。（如圖二十）



圖二十 精確歸零為彈道計算機能否準確預測彈道之關鍵

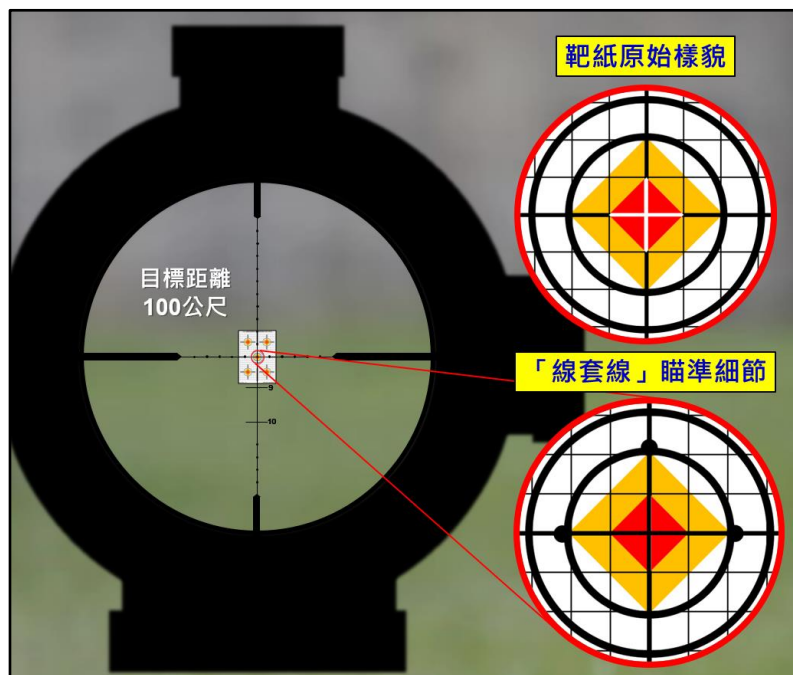
資料來源：作者調製（2021 年 11 月 8 日）

因此，狙擊手是否能完成精確歸零？為彈道計算機能否準確預測彈道之關鍵。而為能完成精確歸零，作者經蒐整國外專業書籍與專家之做法，整理出以下幾個重要觀念或應用方法提供讀者參考：

第一，歸零之距離務必謹慎測量，建議使用兩具以上之雷射測距

儀或一具雷射測距儀搭配捲尺 100 公尺複式驗證（使用捲尺時務必將兩端拉緊並懸空測量，不可沿著地面起伏，避免量測到的結果與實際誤差過大）。且除非是親自測量過，否則不應相信靶場既有射擊線所標示之距離。

第二，使用之歸零靶紙必須有與狙擊鏡調整螺單位相同之網格（如 100 公尺 1 格 0.5MOA 或 1 格 0.1 米位），以利測量偏差量並換算所需之修正量。另靶心之圖案若還能與狙擊鏡內十字刻劃設計相互搭配，如能「圓套圓」、「線疊線」，或者便於將更小的目標切割等分，則為更佳之靶紙。（如圖二十一）如此便能貫徹狙擊的一句至理名言：「瞄精；則誤少（Aim Small; Miss Small.）」。射手越專注或越有能力將瞄準圖與目標之關係控制的越正確，越能減少因射手瞄準誤差產生之彈著點偏差，彈著群將更為密集。當然為了避免額外瞄準或彈著偏差，射擊前鏡視差之消除、槍面傾斜狀態之確認、射擊姿勢之調整（以確保全身肌肉放鬆時槍口仍能達到自然指向為首要原則）、甚至維持歸零全程射擊狀態的一致性（如不可中途調整腳架高度、改變沙球捏握程度、改變槍托與肩窩接觸位置、改變貼腮前後或高低位置…等），都是歸零全程必須嚴密控制的細節。

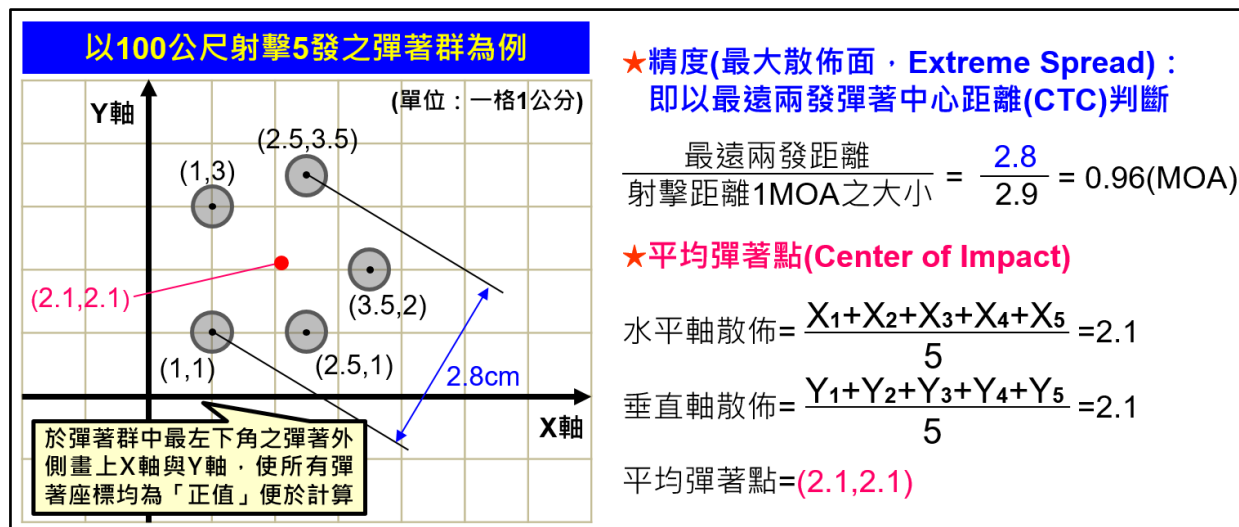


圖二十一 「瞄精；誤少」概念示意圖

資料來源：作者調製（2021 年 11 月 12 日）

第三，至少以 5 發為 1 彈著群進行修正。因 5 發彈著群所求得之平均彈著點與 3 發相比更具代表性且通常較接近真實的彈道中心，以此為據進行射彈修正將能更加準確。然因以人工計算 5 發彈著群之平

均彈著點較複雜且費時(如圖二十二),建議可下載 SubMOA·Ballistics X 等精度測量軟體協助計算,以增進歸零效率。除非彈著群非常密集幾乎完全重疊一致,否則切不可直接以目視判斷平均彈著點。



圖二十二 精度與平均彈著點人工計算方法

資料來源：作者調製 (2021 年 11 月 12 日)

另因射擊 5 發仍要維持與 3 發相同之精度較為困難，故建議可參考美國彈道學家 Bryan Litz 所著《Modern Advancements in Long Range Shooting》一書第 8 頁「不同射擊發數與彈著群散佈大小換算理論」，作者經蒐集大數據後發現：通常 5 發散佈面約為 3 發散佈面大小之 1.28 倍。是故，如果原本射手採 3 發 1 群實施歸零，最佳精度可達 0.8MOA，則欲改採 5 發 1 群實施歸零，精度能維持在 1MOA 內即為合格(0.8MOA X 1.28 倍)，可以此計算平均彈著點並實施調整。

第四，參考美國陸軍特種狙擊野戰教範(FM3-05.222)第 3-51 頁，歸零距離建議宜採：「以 200 公尺距離歸零修正高低 (Elevation)，以 100 公尺歸零修正風偏 (Windage)，如果風偏也於 200 公尺歸零，則必須確保在無風條件下進行，避免產生風偏誤差。」

至於為何選擇 200 公尺作為精確歸零之距離？理由其實與彈道密切相關。以近似 TC94 狙擊彈模擬彈道為例，選擇 100 公尺歸零時，其第一交會點約落於 67-70 公尺處，隨後僅上升約 0.2 公分即降落至 100 公尺產生第二交會點。從數據可以發現，狙擊槍歸零彈道非一般典型步槍，兩彈道交會點間具有明顯拋物線，而是極貼近瞄準基線且近似直線之彈道，在 100 公尺射程內，一般手栓式狙擊槍在最佳狀況下約可達到 0.5MOA 精度，但 100 公尺歸零彈道高低落差約在 50 公尺至 130 公尺這段區間內均小於 0.5MOA (約 1.5 公分，難以察覺彈道真實高度)，故豈能確保已經透由實彈射擊，將槍口賦予一特定仰角，

使彈道第二交會點完美落於 100 公尺上？而若能改以 200 公尺實施歸零，第一交會點約於 33 公尺，且在 190 公尺至 210 公尺極短距離內，彈道高低已產生 0.3MOA（約 2 公分）足以察覺彈著點之落差。故採用傳統 100 公尺作為歸零校正高低射角之距離，將可能導致於遠距離 800 公尺射程上產生近 1MOA 之誤差（約 20 公分）。更遑論 1000 公尺以上超遠距離射擊，彈道影響勢將更大。然若靶場環境條件不許可（如風的干擾較大），還是必須以傳統 100 公尺歸零為佳。

第五，關於最終歸零品質之控制，建議以追求最後一群彈著群（至少 5 發）之平均彈著點與歸零瞄準點兩者距離小於 1/2 個響數修正量之距離為目標。以國造 TS95 式狙擊鏡為例，因其每響為 0.5MOA，則上述兩者之距離必須控制小於 0.25MOA 為佳。然而，實際能否達到如此高之品質，還需視槍、鏡、彈之實際整合程度以及射手能否於歸零過程維持射擊一致與穩定而定。

（五）環境天候因素掌握：

如同前文有關超遠距離（1000 公尺含以上）定義時所述，對大多數狙擊彈藥而言，彈頭飛行超過 1000 公尺時，彈道本身對各種可控制或不可控制的內、外在影響因素，已經到了失之毫厘、差之千厘的程度。尤其是對環境天候因素的掌握。就超遠距離射擊實用觀點，可區分「溫度與槍口初速之掌握、空氣密度之掌握與熱擾流影響」等三個面向探討，依序說明如下：

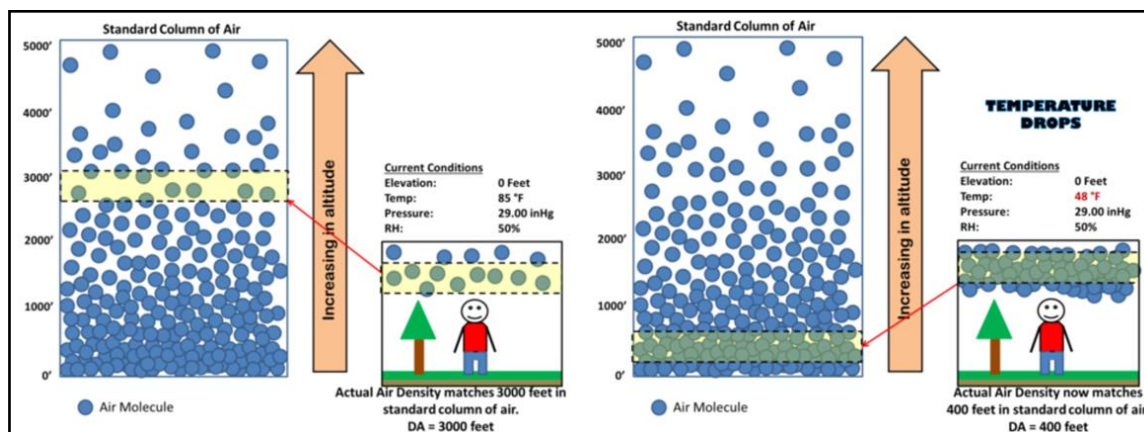
1. 溫度與槍口初速之掌握：

主要探討「環境溫度與火藥燃燒速率之關係」。依據美國 Applied Ballistics 彈道顧問公司官方資料指出，一般小口徑狙擊彈使用之發射藥燃燒效率致初速隨外在環境溫度改變之增減率約為：每增減攝氏 1 度，初速增減每秒 3.25 英呎。是故，當溫度改變約 10 度時，初速將產生一定程度變化進而影響彈道。而若係因彈藥曝曬導致火藥燃燒速率改變而提升初速每秒 10 公尺時，對彈道影響亦相同。如同美陸軍特種部隊備役少校 John L. Plaster 於其著作《The Ultimate Sniper》內之觀點：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...等，均是狙擊手於超遠距離射擊時須特別留意的地方。

2. 空氣密度之掌握：

主要探討「空氣密度與空氣阻力之關係」。彈頭於空氣中飛行時，如果環境中空氣密度的大小不同，則彈頭實際所受到的空氣阻力大小

也會截然不同，將使彈道產生一定程度之變化。一般而言，影響空氣密度大小的環境因素計有海拔高度、大氣壓力、溫度、相對濕度...等，故狙擊手於射擊前必須量測環境參數，以做出適當的彈道修正。然而，傳統狙擊手在空氣密度的修正上，必須針對「海拔高度、大氣壓力、溫度與相對濕度」逐一檢視對彈道的影響，進而計算出對彈道的實際影響。由於計算過於複雜且不符合射擊時效性以致實用價值不高。在作者參考先進國家有關超遠距離射擊之相關文獻與專業書籍後，發現大部分超遠距離射擊之射手，會以「密度高度」作為衡量空氣密度大小的一個指標。所謂密度高度 (DA, Density Altitude)，指所在位置之空氣密度大小，等同於在標準大氣環境下多少海拔高度上相對之空氣密度 (如圖二十三)。可由溫度、大氣壓與濕度計算得來或由 **Kestrel 4000** 以上等級之測風儀直接讀取。密度高度越高、空氣密度越小，彈道較高。得知密度高度可縮短將環境參數輸入彈道計算軟體的時間或簡化傳統人工計算程序，為環境因素影響彈道之重要參考指標。畢竟就彈頭本身而言，它不會分辨飛行時溫度與濕度或大氣壓力，其只在乎整體產生之空氣密度對它造成多大的空氣阻力進而影響飛行。因此，就超遠距離射擊而言，為求能更精準掌握環境因素並做出適當之彈道修正，「密度高度」成為一個較具效率與可行辦法。



圖二十三 密度高度示意圖

資料來源：kestrel 官方網站 (kestrelmeter.com)。(檢索日期 2021 年 9 月 16 日)

3. 熱擾流影響：

是指因地表上升之熱氣流或空氣層中存在不同密度與溫度變化而導致光線產生折射、使所觀看之景象如海市蜃樓般 (即 **Mirage** 單字原意) 的一種現象。通常天氣越炎熱地表溫差越大、濕氣越高或狙擊鏡倍率越高，熱擾流影響越明顯，影響瞄準與精準度越大，為超遠距離射擊時影響精準度的主要環境因素之一。(如圖二十四)



圖二十四 1000 公尺熱擾流影響觀瞄效果示意圖
資料來源：作者拍攝（2021 年 8 月 23 日）

（六）彈道計算機操作：

實施超遠距離射擊時，射程裝定與風偏修正能否準確？端賴於狙擊手以何種方式獲得彈道參數。目前最實用且科學的方法為透過彈道計算機（軟體）演算獲得。然而，彈道計算機之操作具有高度專業性，且所有輸入之參數都必須準確無誤（尤其上述彈道係數與槍口初速兩大決定外彈道表現之關鍵參數），否則將無法獲得準確之數值。這也是現代狙擊手在使用彈道計算機時一個很重要的觀念：「想要有精確的輸出參數，端看你有沒有精確的輸入參數（Garbage in, garbage out.）」。切不可因彈道計算機輸出之數值與實際所需響數不同而全盤否定甚至棄而不用；更不可任意調整彈道係數或槍口初速，只為了求得輸出值能與實際值相互媒合，如此將可能造成其他距離輸出參數之誤差更大。因此，如何「正確」的操作彈道計算機，進而以科學方法提升超遠距離射擊之效益？成為現代狙擊手必須深入研究的課題之一。

目前各種先進彈道計算軟體，其背後演算的邏輯基本上大同小異，¹³惟部分免費軟體有參數輸入項目不足的問題（設計得過於簡化），以致於獲得之結果較不準確，依作者實彈驗證之經驗，建議可使用內建彈道計算功能的 **Kestrel 5700 Elite** 測風儀或 **Trasol** 等演算精度較高之彈道計算軟體（機），以確保獲得較佳之彈道參數。通常，在所有輸入參數與設定均正確的條件下，在彈速低於 1.3 馬赫（約每秒 442 公尺）前射程內（TC94 狙擊彈約 700 公尺前、M33 普通彈約 1000 公

¹³ 當前彈道計算方法依據美國實用彈道學家 Bryan Litz 〈How External Ballistics Programs Work〉一文所述，至少可分類為 Siacci、Pejsa's、Point Mass 及 6-DOF Simulations 等四種方法。雖然各種方法所需輸入的參數或所需建立的模型各異且產出模擬彈道的方法也不盡相同，但其作者認為與其探討何種方法所輸出之彈道較為準確？更重要的是，不如設法確保所有輸入的參數都能盡可能地準確無誤，期能獲得準確之彈道參數。

尺前)，誤差可控制在 0.5-1MOA 內。若發現落差過大，可先依本文之內容，逐一檢視有無參數輸入錯誤或設定錯誤的問題，常見問題為「G1/G7 彈道係數模型設定錯誤、未設定所在地點之緯度或射擊之射向（此將改變柯氏力影響程度）、未開啟右偏流與柯氏力計算（在此設定下，彈道計算機將僅單純輸出風偏修正參數）、輸出參數之單位選擇錯誤（MOA/米位/公分/英吋）」。而若所有參數與設定均正確無誤，則考慮該射程上彈速是否已經進入次音速範圍？此時，如果原始設定為 G1 彈道係數，則建議改使用 G7 彈道係數。如果原始設定為 G7 彈道係數且該距離上彈速已低於音速，則可透過 Kestrel 5700 內建 DSF 校正功能，修正因初速降低對應改變之阻力係數數值，進而使彈道恢復準確。¹⁴惟在以實彈進行 DSF 校正時，美國實用彈道學家 Bryan Litz 建議射擊精度至少以 5 發 1 群散佈面小於 0.5MOA 為底線（亦即無法達到此要求不建議修正 DSF，可見欲實施 DSF 有著極高的操作難度）。

基於 G1/G7 彈道係數存有上述不可避免的誤差問題，美國彈道學家 Bryan Litz 最建議的方法為使用客製化阻力模型（CDM, Custom Drag Model），其是透過至少 200 發實彈射擊，以雷達波測速儀實際蒐集各距離上平均之彈道變化，進而建立完整且完全符合該彈藥彈道表現之模型。然因我國目前無此類型彈道實驗室與設備，故無法取得客製化阻力模型參數。因此，就目前實際考量，狙擊手至少須選擇使用 G7 彈道係數，以滿足超遠距離射擊之基本需求。

（七）測距誤差控制與射程裝定：

實施超遠距離射擊時，距離判定是否準確？各種測距方法均存在對應之理論誤差，而測距誤差容許範圍端視射手使用之彈藥特性而定（如 7.62 公厘狙擊彈，於 600 公尺誤差容許範圍可介於正負 8%，代表若能控制在此範圍，射程也能按科學方法裝定，則彈道墜落幅度將小於正負 50 公分，就射擊 50X101 公分標準人形目標時將不致脫靶；12.7 公厘狙擊彈於相同距離上，因彈道較為低伸，測距誤差容許範圍則可加大約正負 10%），通常以瞄準鏡內之米位或 MOA 刻劃實施測距即可達上述該誤差控制。然而，當實施超遠距離射擊時，則完全是另外一回事，即使擁有雷射測距儀（LRF, Laser Rangefinder）科技裝備

¹⁴ 如具備彈道計算功能之測風儀 Kestrel 5700 Elite 內建 DSF（Drag Scale Factor/Drop Scale Factor）校正功能，即是修正彈道末端之阻力係數數值，通常建議以彈速進入 0.9 馬赫（即約每秒 306 公尺）時所在距離之 80-90% 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 1080 公尺進入 0.9 馬赫，故建議於 864-972 公尺間實施校正）。因彈頭飛行至該距離後，初速降低，阻力係數改變，彈道係數亦隨之變化，若仍以原彈道係數計算將無法符合實際彈道高低。故須經其所建議之校正距離實施彈道高低驗證，輸入實際與原調整量之落差，軟體隨即演算一符合該距離上（及以後）之彈道係數修正係數，即完成 DSF 校正。

輔助也不一定能達成滿足彈道修正之目的。以目前市售軍規雷射測距儀，測距誤差小於正負 1% 常態標準為例。透過 Kestrel 5700 內建 Elite Ballistics 彈道計算功能模擬 .50 英吋之 M33 普通彈（平均初速每秒 880 公尺）彈道，可發現當實施 1000 公尺射擊時，此正負 1% 之誤差將產生最大 10 公尺之距離誤判，使得實際裝定之射程高出或低於彈道實際所需約 0.5MOA（15 公分）導致命中率降低，故射擊距離越遠，距離判定與測距誤差控制越為重要。

- (八) **風況判讀與風偏修正**：風為超遠距離射擊時影響彈著點之最大不確定因素，然而若能準確判讀與修正也將是提升超遠距離命中率最有效的方法。故試問射擊前，狙擊手對於風速與風向之判讀及風偏修正依據、考量重點為何？風速與風向是否透過測風儀實際量測獲得？或者只是憑藉目視與經驗概略猜測？（經觀察目前國軍狙擊手對於測風儀之使用尚未能普及）如果無法取得測風儀，又有什麼方法可以提高風速與風向判讀之精度？而當地形地貌有明顯起伏時，是否將風速梯度與風層高度等進階觀念納入考量？是否掌握到近、中、遠端處不同風況？最重要的是，是否能依據科學之風向修正係數實施風偏計算？而不應再以傳統的鐘錶法概略修正（如 1-2、4-5、7-8、10-11 點鐘皆可視為半值風，故將風偏值乘以 1/2），畢竟鐘錶法之常數係經簡化以便於狙擊手實施野戰計算之經驗數值，在距離近與風速小之條件下確實可行，但一當射程增遠（尤其本文探討之超遠距離射擊）或風速升高超過 10 哩風時，將無法支撐狙擊手實施精準射擊。原因在於鐘錶法之常數與學理上不同風向對風偏之真實影響存有落差，而此差異便是美國知名風偏專家 Emil Praslick III 口中超遠程射擊之奧秘。又或者當射手近端處（100 公尺內）有風速大於 10 哩之均質橫風產生時，是否將橫風跳動影響納入修正考量？（欲了解詳細內容，可參閱步兵季刊第 282 期〈風力對狙擊槍遠距離精準射擊影響之研究〉一文）
- (九) **右偏流與科氏力考量**：是否將子彈右旋產生的旋轉偏移量（俗稱右偏流）與北半球科氏力影響合併納入修正考量？雖然就大多數彈藥特性而言，科氏力在各距離的影響僅約彈頭旋轉偏移的四分之一或五分之一，因此遭大部分射手選擇忽視不予考量與修正。然而，超遠距離精準射擊的精隨在於：「將可控制因素完全掌握、將不可控制因素的影響最小化」。彈頭飛行過程中，因彈頭本身高速旋轉與科氏力影響下所產生的右偏移量，是必然存在也必然發生的現象，與其忽略不予修正，不如直接將彈頭右旋產生之右偏流與科氏力之右偏移兩者合併成「合

併右偏值」，預先修正予以消除（即發揮將可控制因素完全掌握之精神）。以 Kestrel 5700 內建 Elite Ballistics 彈道計算功能模擬近似美造 M33 普通彈（661 格令），在北緯 23 度、密度高度 1000 公尺、平均初速每秒 880 公尺之射擊條件下，合併右偏值約為：1000 公尺 0.9MOA、1100 公尺 1.1MOA、1200 公尺 1.25MOA、1300 公尺 1.5MOA、1400 公尺 1.7MOA、1500 公尺 1.9MOA，提供參考運用。

伍、結語

1000 公尺以上超遠距離射擊，為國軍狙擊手訓練中經常被忽視的一環，且礙於現階段大部分狙擊手對科學彈道應用觀念仍相當薄弱，以致於即使有過多次超遠距離射擊驗證機會，射擊成效也不盡理想。本文作者因擔任步訓部狙擊教官並實際從事教學訓練工作多年，有感當前國內狙擊手訓練資源所面臨之困境，因此挹注大量心力專研科學彈道學理，蒐整國外先進科學彈道知識與技術並彙整相關教材，本文即是此研究之部分成果。

科學彈道應用，雖未必能達「立竿見影」之效，卻有「潛移默化」之功，是狙擊手欲求突破遠距離射擊瓶頸，必先精通的重要方法。期望此篇研究能促使國軍狙擊部隊重視科學彈道應用的實質效益，力圖將過往依賴經驗參數（精打細瞄）之作法，導正為依據彈道數據（精打細算）之作為，如此必能將手中之利器（重型狙擊槍），藉由神兵（具彈道科學應用思維與技術之狙擊手）發揮到淋漓盡致，創造 1000 公尺以上超遠距離之優勢。

參考文獻

1. 郭晉愷,《狙擊彈道學 第三版》(高雄市,陸軍步兵訓練指揮部,民國 110 年)。
2. 余奎麟,《海軍陸戰隊狙擊手訓練手冊》(桃園縣,國防部海軍司令部,民國 100 年)。
3. 陸軍步兵訓練指揮部 譯,《102 年狙擊手機動協訓課程講義》(高雄市,陸軍步兵訓練指揮部,民國 102 年)。
4. 陸軍特指部狙擊連主編,《狙擊手冊》(桃園縣,陸軍特指部狙擊連,民國 106 年)。
5. 《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)。
6. 陸軍官校機械系主編,《武器系統》(高雄市,陸軍官校機械系,民國 92 年)。
7. 郭正祥,《輕兵器設計技術手冊》(高雄市,聯勤第 205 廠,民國 75 年)。
8. 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)。
9. TC 23-14, 《US Army Sniper Training Manual》(U.S.A., Headquarters Department of the Army, 1988)
10. FM 23-10, 《Sniper Training》(U.S.A., Headquarters Department of the Army, 1994)
11. FM 3-05.222, 《Special Forces Sniper Training and Equipment》(U.S.A., Headquarters Department of the Army, 2003)
12. FM 3-22.10, 《Sniper Training and Operations》(U.S.A., Headquarters Department of the Army, 2009)
13. TC 3-22.10, 《Sniper》(U.S.A., Headquarters Department of the Army, 2017)
14. Maj. John L. Plaster, 《The Ultimate Sniper》(U.S.A., Paladin Press, 1993)
15. Mike R. Lau, 《The Military and Police Sniper》(U.S.A., Precision Shooting Inc, 2000)
16. Michael Haugen, 《Modular Sniper Data Book》(U.S. Tactical Supply, Inc. , 2004)
17. Linda K. Miller& Keith A. Cunningham, 《The Wind Book for Rifle Shooter》(U.S.A., Paladin Press, 2006)
18. Fredrik C. Jonsson, 《Maritime Sniper Manual》(Paladin Press , 2010)