

美軍砲兵導線測量之研究

壹、作者：耿國慶 雇員老師

貳、單位：陸軍飛彈砲兵學校目標組

參、審查委員：（依審查順序）

王東祿上校

王道順上校

彭德任中校

王述敏上校

肆、審查紀錄：

收件：98 年 07 月 28 日

初審：98 年 08 月 03 日

複審：98 年 08 月 13 日

綜審：98 年 08 月 14 日

伍、內容提要：

- 一、美陸軍與陸戰隊砲兵將「導線測量」列為「傳統測量」，目前與「自動化」（定位定向系統、全球定位系統）測地裝備合併編組運用，俾充分發揮效能並增大作業彈性。國軍砲兵「導線測量」技術雖源自美軍，惟歷經編裝變革與長久發展後，兩者已有極大差異。
- 二、美軍「導線測量」精度規範、閉塞檢查與誤差判斷等技術，已進入科學化與標準化之階段。當導線完成閉塞後，須檢查閉塞「徑誤差」、「標高誤差」、「方位誤差」與「精度比」等四項，以確定誤差是否符合導線等級之相關規範。惟檢查並無法消除誤差，應依據分析誤差來源、確定誤差型式與分離誤差程序，再檢查紀錄與計算資料，必要時須重行某段或全部導線測量，以修訂成果。
- 三、國軍砲兵將「導線測量」與「交會測量」，併列為砲兵基本測量。自民國 86 年納編「定位定向系統」（ULISS-30）後，改採「定位定向系統組」為主、「測量組」為輔之測地方式，故測量組所使用之相關技術不宜偏廢。仍須參考測量學術與先進國家砲兵準則發展，持續檢討精進，俾增進測地作業能力，確保測地任務之達成。

美軍砲兵導線測量之研究

作者：耿國慶

提 要

- 一、美陸軍與陸戰隊砲兵將「導線測量」列為「傳統測量」，目前與「自動化」（定位定向系統、全球定位系統）測地裝備合併編組運用，俾充分發揮效能並增大作業彈性。國軍砲兵「導線測量」技術雖源自美軍，惟歷經編裝變革與長久發展後，兩者已有極大差異。
- 二、美軍「導線測量」精度規範、閉塞檢查與誤差判斷等技術，已進入科學化與標準化之階段。當導線完成閉塞後，須檢查閉塞「徑誤差」、「標高誤差」、「方位誤差」與「精度比」等四項，以確定誤差是否符合導線等級之相關規範。惟檢查並無法消除誤差，應依據分析誤差來源、確定誤差型式與分離誤差程序，再檢查紀錄與計算資料，必要時須重行某段或全部導線測量，以修訂成果。
- 三、國軍砲兵將「導線測量」與「交會測量」，併列為砲兵基本測量。自民國 86 年納編「定位定向系統」（ULISS-30）後，改採「定位定向系統組」為主、「測量組」為輔之測地方式，故測量組所使用之相關技術不宜偏廢。仍須參考測量學術與先進國家砲兵準則發展，持續檢討精進，俾增進測地作業能力，確保測地任務之達成。

壹、前言

「導線測量」(Traverse)屬「傳統測量」(Conventional survey)，為砲兵常用之測量方法，與「交會測量」(Intersection)併列為砲兵基本測量。即使在當前「自動化」(如定位定向系統、全球定位系統 GPS 等)測地裝備廣泛運用之際，仍須將自動化與傳統兩者合併編組運用，俾充分發揮「長短相輔、密切配合」之效能，並增大作業彈性。

美國陸軍與陸戰隊野戰砲兵，基於軍種任務、編裝與特性不同，各自頒布專屬之測地教範，提供部隊作戰與訓練參考。國軍砲兵測地技術與教範雖源自美軍，惟歷經編裝變革與長久發展後，兩者已有極大差異。特研究美軍「導線測量」之作業規範、閉塞檢查與誤差判斷要領等內容，提供國軍砲兵未來測地裝備、技術研發與準則編修之參考。

貳、導線測量評述

「導線測量」係沿欲測路線，設置若干測站，將其連結成一系列之折線或閉合多邊形，並測定各測站間之水平角、距離、高低(天頂)角，並計算各測站之位置。「導線測量」可區分為「非閉塞導線」(Open Traverse)、「閉塞導線」(Closed Traverse)與「角導線」(Directional Traverse)等三種形式，「閉塞導線」因具備諸多優點，即使當前「自動化」測地裝備已納編砲兵部隊，仍為砲兵常用之測量方法，與「交會測量」併列為砲兵基本測量。

一、優點：

(一) 作業簡單，限制較小：

因其作業簡單、偵察選點容易且受地形限制較小，只要通視良好，在地形複雜且無道路可用之狀況下，仍可實施。

(二) 投資較低，效益提高：

實施導線測量所需之編組簡單，裝備價格(與定位定向系統比較)較低，作業方式多元且運用彈性大，可依據不同作業規範，獲得不同等級精度之成果。

(三) 檢查誤差，計算精度：

「閉塞導線」又區分為「已知點閉塞」(Close on second station)、「迴歸閉塞」(Close on starting station)兩種，均可提供閉塞檢查與計算精度，俾確保符合相關之作業規範。

(四) 長短相輔，密切配合：

導線測量可支援定位定向系統測定無法到達之測點、建立定位定向系統所需之「初始校準點」或「位置更新點」，

以及分擔定位定向系統之作業量，充分發揮「長短相輔，密切配合」之效能。

二、缺點：

（一）易生累積誤差：

導線測量容易產生「累積誤差」，除須加大邊長、減少邊數，以減少誤差累積，亦需實施閉塞修正，俾提升測地成果精度。

（二）易受天候影響：

當強風、酷暑、天雨等惡劣天候或能見度較差時，將影響導線測量通視、標定與測角、測距之精度，且延誤作業速度。

參、美軍砲兵導線測量裝備與規範

砲兵測地係利用各種測量器材，運用各種測量方法，建立測地統制，進而測定各射擊單位與目標間之水平與高低關係，提供射擊所需之測地成果。因此砲兵測地之精度規範首重射擊需求，其次則考慮器材性能與時間限制。

美軍砲兵將測地裝備區分為「定位定向系統」（Position and Azimuth Determining System, PADS）、「全球定位系統」（Global Positioning System, GPS）與「傳統裝備」（Conventional Equipment）三大類¹，「導線測量」即為使用傳統裝備遂行之測地作業。

一、砲兵傳統測量裝備：

（一）陸軍砲兵：

1. 輕型方位陀螺儀（Survey instrument, azimuth gyro, lightweight, SIGAL）：

包括陀螺儀參考器、電子控制器、交直流電轉換器與三角架等，利用陀螺儀尋北，提供導線起始方位與方位檢查之用。定向時間約 2 分鐘，定向精度小於 0.3 密位，電力可供應 20 分鐘之作業²（如圖一）。

¹ Marine Artillery Survey (MCWP3-1.6.15, Draft), United States Marine Corps, 2000, chapter8。

² Tactics, Techniques, and Procedures for FIELD ARTILLERY SURVEY (FM6-2), Headquarters, Department of the army, 23/9/1993, P8-1。

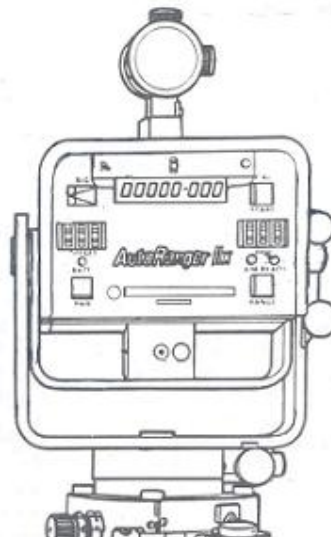


圖一：美軍砲兵「輕型方位陀螺儀」(SIGAL)

資料來源：The LSI-astronics automatic lightweight inertial northfinding Equipment (ALINE)，Lear Siegler,INC.Astronics Division。

2. 中距離測距儀 (Survey equipment,distance- measuring, electronic-medium range，SEDME-MR)

包括測距儀組與反射稜鏡組，為快速測距裝備，具備精緻、輕量、節約與操作簡單等特性，特別適合短、中距離測地操作，測距能力 30 公尺至 7,000 公尺，時間僅需 18 秒³（如圖二）。



圖二：美軍砲兵「中距離測距儀」(SEDME-MR)

資料來源：Tactics,Techniques,and Procedures for FIELD ARTILLERY SURVEY (FM6-2)，Headquarers,Department of the army，23/9/1993，p2-14。

³ Tactics,Techniques,and Procedures for FIELD ARTILLERY SURVEY (FM6-2)，Headquarers,Department of the army，23/9/1993，P2-12—2-18。

3.T16 (T16-84) 經緯儀：

具備精緻、輕量、防塵、光學讀角與定向之典型器材（如圖三），可測取水平角與高低角，倍率 28 倍，分劃以密位為單位，最小可看讀至 0.1 密位，配發於砲兵營測量班，適用於砲兵第五等級精度（1/1,000）之測地作業⁴。



圖三：美軍砲兵「T16 經緯儀」

資料來源：Wild T16 Scale Reading Theodolite with Automatic Vertical Index Instructions for Use，Wild Heerbrugg Ltd，p13。

4.T2 經緯儀：

為測取水平角與高低角之定向典型器材（如圖四），倍率 30 倍，分劃以密位為單位，最小可看讀至 0.001 密位，配發於目標獲得連、師砲兵測量排，適用於砲兵第四等級精度（1/3,000）之測地作業⁵。



⁴ Tactics, Techniques, and Procedures for FIELD ARTILLERY SURVEY (FM6-2)，Headquarters, Department of the Army，23/9/1993，P3-1—3-16。

⁵ Tactics, Techniques, and Procedures for FIELD ARTILLERY SURVEY (FM6-2)，Headquarters, Department of the Army，23/9/1993，P3-17—3-25。

圖四：美軍砲兵「T2 經緯儀」

資料來源：Universal Theodolite WILD T2，Wild Heerbrugg Ltd。

5.測地計算系統（Backup computer system，BUCS）：

包括 HP71B 手持電腦、HP2225B 印表機、介面模組、電池盒等，內建 13 種測地計算程式，可提供測地成果計算、列印與傳輸⁶（如圖五）。



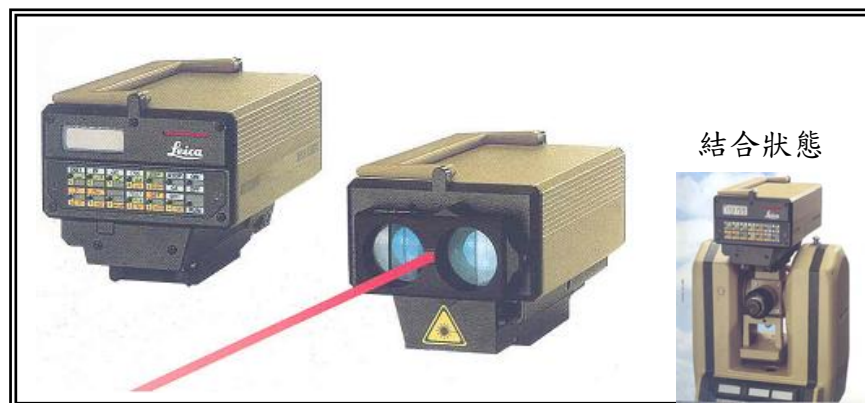
圖五：美軍砲兵「測地計算系統」（BUCS）

資料來源：Tactics, Techniques, and Procedures for FIELD ARTILLERY SURVEY (FM6-2)，Headquarters, Department of the army，23/9/1993，p12-1。

（二）陸戰隊砲兵：

1.長距離測距儀（DI-3000 D）

結合於 T2E 經緯儀望遠鏡上，使用 1 個反射稜鏡，測距能力 9 公里，使用 11 個稜鏡時最大測距能力達 13 公里，時間僅需 3.5 秒⁷（如圖六）。



⁶ Tactics, Techniques, and Procedures for FIELD ARTILLERY SURVEY (FM6-2)，Headquarters, Department of the army，23/9/1993，P12-1—12-13。

⁷ Marine Artillery Survey (MCWP3-1.6.15, Draft)，United States Marine Corps，2000，chapter 8 section I。

圖六：美軍陸戰隊砲兵「DI-3000 D 測距儀」

資料來源：Wild DI3000S series Measures distance intelligently，Leica AG。

2. T2E 經緯儀：

T2E 與陸軍 T2 之區別在 T2E 所覘視之物體為正像，T2 則為倒像，目前配發於砲兵團、砲兵營測量班，實施傳統測量⁸。

3. 測地計算系統（Backup computer system，BUCS）：
（同陸軍砲兵）

二、導線測量規範：

美國陸軍與陸戰隊野戰砲兵，即使兩軍種任務、特性與編裝不同，且測地教範內容迥異，惟其導線測量作業規範（如表一）則無二致。

⁸ Marine Artillery Survey（MCWP3-1.6.15，Draft），United States Marine Corps，2000，chapter8 section II。

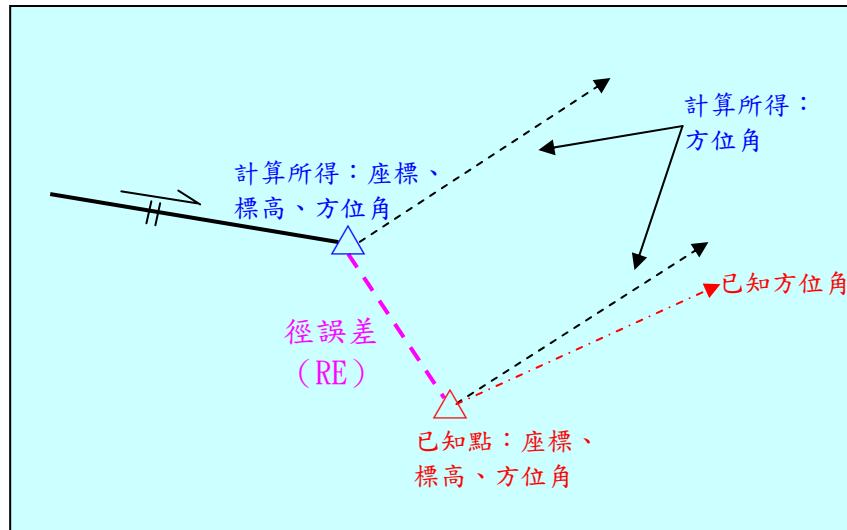
表一

美軍砲兵導線測量規範表				
規 範		等級區分	第 四 等 級	第 五 等 級
必要條件				
導線修正			需要	不需要
座 標	全部導線長度小於 9 公里		1/3,000	1/1,000
閉 塞	全部導線長度大於 9 公里		$\sqrt{K}$	1/1,000
標 高	全部導線長度小於 4 公里		$\sqrt{K}$	±2 公尺
	全部導線長度大於 4 公里		$\sqrt{K}$	$1.2 \times \sqrt{K}$
方 位 (與天體觀測、陀 螺儀或預設方位角 比較時)	6 或 小於 6 個測站		$0.04 \times N$	$0.1 \times N$
	7 或 大於 7 個測站		$0.1 \times \sqrt{N}$	$0.1 \times N$
方位角位數			0.001 密位	0.1 密位
應實施方位檢查測站數目			25	20
水平角	測量方式		一對回	一對回
	紀錄至		0.001 密位	0.1 密位
高低、 天頂角	測量方式		正、倒鏡	正、倒鏡
	紀錄(計算)至		0.001 密位	0.1 密位
距 離	捲尺(比較精度)		1/5,000	單次(須配合步測檢查)
	測距儀		至少測三次(看讀至 0.01 公尺)	至少測三次(看讀至 0.01 公尺)
座標計算至			0.01 公尺	0.1 公尺
標高計算至			0.1 公尺	0.1 公尺
附 記	K 為距離千除數。 N 為測站數。			

資料來源：Tactics, Techniques, and Procedures for FIELD ARTILLERY SURVEY (FM6-2)，Headquarters, Department of the Army，23/9/1993，Table B-1。

肆、美軍砲兵導線閉塞檢查

導線完成閉塞後，須將計算所得成果與閉塞測站之已知成果相互比較（如圖七），以確定產生之誤差是否符合導線等級之相關規範。導線閉塞檢查包括閉塞「徑誤差」（Radial Error, DR）、「標高誤差」（Elevation Error）、「方位誤差」（Azimuth Error）與「精度比」（Accuracy Ratio）等四項⁹。



圖七：閉塞導線誤差示意

資料來源：Marine Artillery Survey (MCWP3-1.6.15, Draft), United States Marine Corps, 2000, p10-11。

一、徑誤差：

(一) 計算徑誤差：

1. 「徑誤差」為閉塞測站其已知與計算所得座標之比較結果，即已知座標與計算所得座標之距離。
2. 閉塞「徑誤差」可經由解算正確三角形之「畢達哥拉斯數學定理」（Pythagorean Theorem，簡稱畢氏定理）予以確定，此定理視「徑誤差」為「橫座標差」（eE）與「縱座標差」（eN）所構成直角三角形之斜邊（如圖八）。
3. 「畢達哥拉斯數學定理」敘述在一個正確三角形中，A、B 為三角形之邊，C 則為直角三角形之斜邊，其直角三角形斜邊之平方等於邊長平方和。公式：

$$C^2 = A^2 + B^2$$

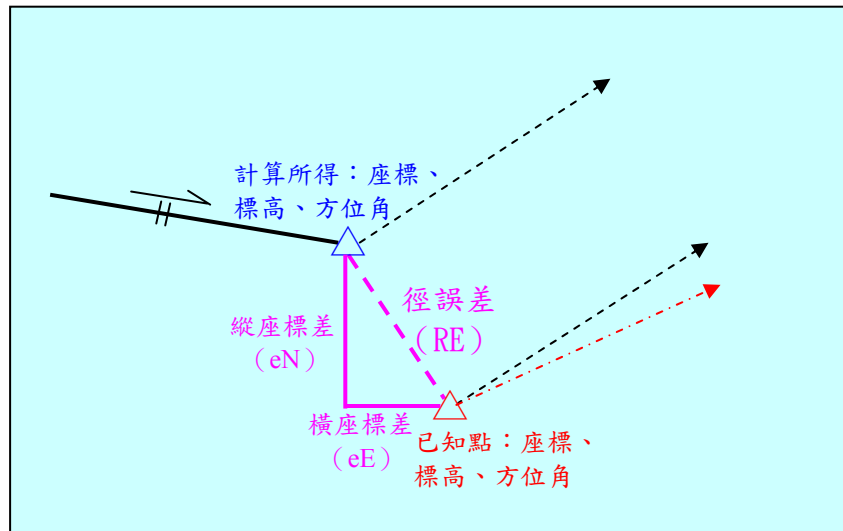
⁹ Marine Artillery Survey (MCWP3-1.6.15, Draft), United States Marine Corps, 2000, Chapter10 section III。

$$C = \sqrt{A^2 + B^2}$$

「橫座標差」(eE)、「縱座標差」(eN) 代入公式：

$$RE = \sqrt{eE^2 + eN^2}$$

4. 如已知橫(縱)座標值較計算所得橫(縱)座標值大時，「橫座標差」(eE)、「縱座標差」(eN) 為「負」；反之，則為「正」。



圖八：閉塞導線徑誤差示意

資料來源：Marine Artillery Survey (MCWP3-1.6.15, Draft), United States Marine Corps, 2000, p10-11。

5. 運用「畢達哥拉斯數學定理」，計算「徑誤差」(RE) 範例如下：

已知座標 E：5 17265.98 N：38 27648.32

計算所得座標 E：5 17265.54 N：38 27649.02

誤差(公尺) $\frac{-0.44}{+0.70}$ (1)

徑誤差 (RE) = $\sqrt{0.44^2 + 0.70^2}$ (2)

(二) 容許徑誤差：

導線之容許位置閉塞(徑誤差)，係依據測地等級與「全部導線長度」(Total traverse length, TTL) 而定。

1. 第四等級精度：

- (1) 「全部導線長度」小於 9 公里：

當「全部導線長度」(TTL) 小於 9,000 公尺時，第四等級導線之「容許徑誤差」(Allocable RE) 為 1/3,000 或導線每 3,000 公尺徑誤差 1 公尺，容許徑誤差之決定係將「全部導線長度」除 3,000 公尺。例：第四等級測地之導線長度為 3,469.919 公尺，其容許徑誤差為 1.16 公尺。

$$3,469.919 \div 3,000 = 1.16 \text{ 公尺}$$

(2) 「全部導線長度」大於 9 公里：

當「全部導線長度」(TTL)大於 9,000 公尺，精度必須大於 $1/3,000$ 時，「徑誤差」勢必更大。因此容許徑誤差決定公式：

$$\text{容許徑誤差} = \sqrt{K}$$

K 為「全部導線長度」(TTL)之千除數。

換言之，如「全部導線長度」(TTL)為 10,983.760 公尺，K 等於 10.983760，容許徑誤差為 3.314175613935 或 3.31 公尺。如「全部導線長度」(TTL)除 3,000 公尺，容許徑誤差為 3.66 公尺，超過 K 的均方根達 0.35 公尺。

2. 第五等級精度：

第五等導線 ($1/1,000$) 或導線每 1,000 公尺之徑誤差為 1 公尺，其閉塞容許徑誤差以「全部導線長度」(TTL)除 3,000 公尺。

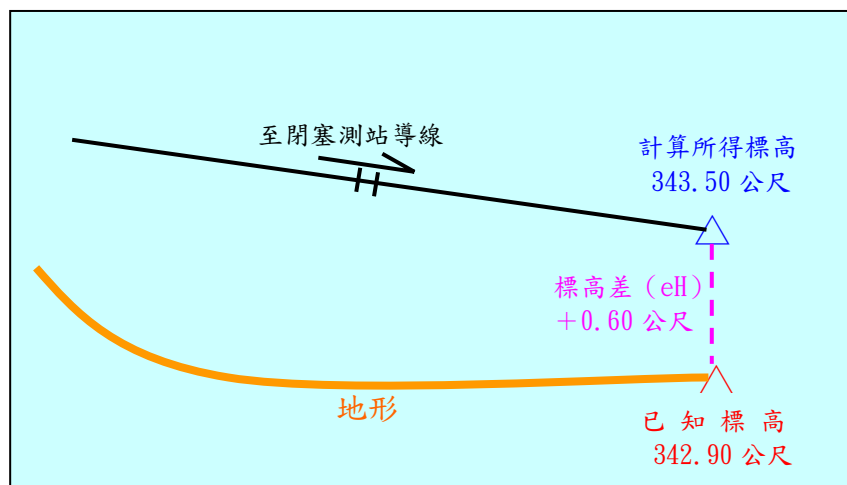
例：第五等精度測地之導線長為 2,986.321 公尺，其容許徑誤差為 2.99 公尺。 $(2,986.321/1,000 = 2.986321 \div 2.99)$ 容許徑誤差在第五等精度導線等於 K，即「全部導線長度」(TTL)之千除數。

(三) 過大之徑誤差：

如導線徑誤差超過規範表之容許徑誤差時，應視為失敗之導線，其導線位置誤差必須判定且實施修正。

二、標高誤差：

「標高誤差」(Elevation Error, eH) 為閉塞測站其已知與計算所得標高之比較結果，即已知標高與計算所得標高之垂直距離 (如圖九)。



圖九：標高誤差示意

資料來源：Marine Artillery Survey (MCWP3-1.6.15, Draft), United States Marine Corps, 2000, p10-12。

(一) 計算標高誤差：

閉塞測站已知標高與計算所得標高之差異，為「標高誤差」(Elevation Error, eH)。如已知標高較計算所得標高為大，「標高誤差」為負值；反之，則為正值。如圖九所示，測站已知標高為 342.90 公尺，計算所得標高則為 343.50 公尺，標高差為 0.6 公尺。因為計算所得標高較已知標高為大，故「標高誤差」(eH) 為正值，註記為 +0.6 公尺。

(二) 容許標高誤差：

導線「容許標高誤差」(Allowable eH) 係依據測地等級與「全部導線長度」(TTL) 而定。

1. 第四等級精度：

第四等級導線之「容許標高誤差」等於 $\sqrt{K}$ ；K 為「全部導線長度」(TTL) 之千除數。例：第四等級之「全部導線長度」為 7,643.765 公尺，K 等於 7.643765，「容許標高誤差」($\sqrt{K}$) 為 2.764735972928 公尺或 2.8 公尺。

2. 第五等級精度：

(1) 導線長度小於 4 公里：

當「全部導線長度」(TTL) 小於 4,000 公尺時，第五等級導線之「容許標高誤差」為 ± 2 公尺。即計算所得標高與已知標高相差在 2 公尺範圍內，則標高視同閉塞。

(2) 導線長度大於 4 公里：

當第五等級導線等於或大於 4,000 公尺時，利用下列公式決定「容許標高誤差」： $\text{容許標高誤差} = 1.2 \times \sqrt{K}$

K 為「全部導線長度」(TTL) 之千除數。

例：設「全部導線長度」(TTL) 為 6843.874 公尺，K 為 6.843874。「容許標高誤差」($1.2 \times \sqrt{K}$) = 1.2×2.616079891 (或 2.6 公尺) = $3.13929587 \div 3.14$ 公尺。

(三) 過大之標高誤差：

如導線標高誤差大於規範表之容許標高誤差時，應視為失敗導線，其導線標高誤差必須判定且實施修正。

三、方位誤差：

「方位誤差」(Azimuth error, eAz) 為閉塞測站其已知方位與計算所得方位之比較結果，即閉塞測站其已知方位與計算

所得方位之角度誤差（如圖十）。

（一）第四等級精度：

1. 主體系角（測站數）為 6 或小於 6：

四等導線與主體系角 6 或小於 6 之「容許方位誤差」決定公

式：容許方位誤差 = $0.04 \text{ 密位} \times N$

N 為主體系角（測站數）之數目，包括閉塞角。

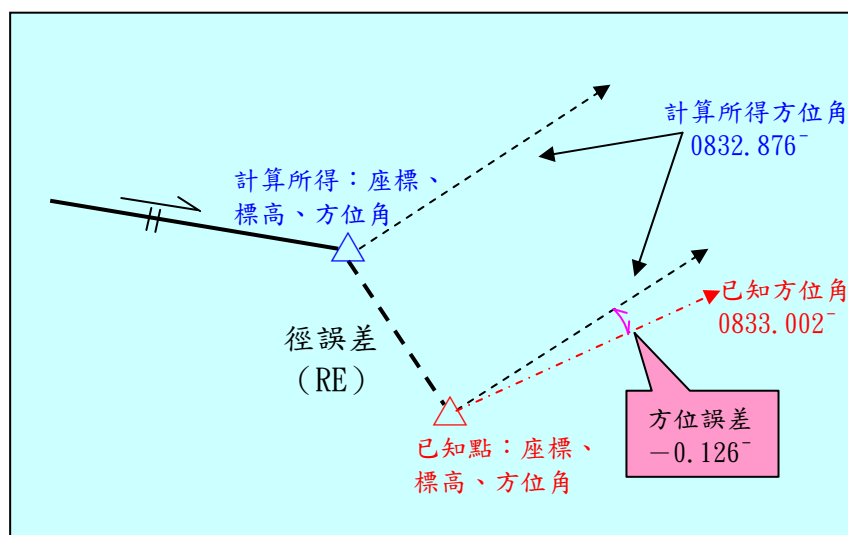
例：某四等精度導線包括 5 個主體系角，其容許方位誤差
= $0.04 \text{ 密位} \times 5 = 0.200 \text{ 密位}$ 。

2. 主體系角（測站數）為 7 或大於 7：

四等導線與主體系角 7 或大 7 於之「容許方位誤差」決定公
式：容許方位誤差 = $0.1 \text{ 密位} \times \sqrt{N}$

N 為主體系角（測站數）之數目，包括閉塞角。

例：某四等精度導線包括 8 個主體系角，其容許方位誤差
= $0.1 \text{ 密位} \times \sqrt{8} = 0.283 \text{ 密位}$ 。



圖十：方位誤差示意

資料來源：Marine Artillery Survey (MCWP3-1.6.15, Draft), United States Marine Corps, 2000, p10-13。

（二）第五等級精度：

第五等級導線之「容許方位誤差」決定公式：

容許方位誤差 = $0.1 \text{ 密位} \times N$

N 為主體系角之數目，包括閉塞角。

例：某四等精度導線包括 12 個主體系角，其容許方位誤差 =
 $0.1 \text{ 密位} \times 12 = 1.2 \text{ 密位}$ 。

（三）過大之方位誤差：

如導線方位誤差大於規範表之容許方位誤差時，應視為失敗導線，其導線方位誤差必須判定且實施修正。

四、精度比：

測地之現地作業與計算，必須規定可信賴之最小限位置精度，俾確定座標是否滿足閉塞導線與「精度比」(Accuracy Ratio, AR)之要求。

(一)「全部導線長度」(TTL)：

全部導線長度為導線主體系方格距離之總和。

(二)計算精度比：

精度比為位置誤差與「全部導線長度」(TTL)之比。

1. 精度比為「全部導線長度」(TTL)除「徑誤差」(RE)，公式為 $AR = TTL/RE$ 。例：導線測量之「全部導線長度」(TTL)為 9843.785 公尺，「徑誤差」(RE)為 2.01 公尺，「精度比」(AR) $= 9843.785/2.01 = 4897.405472637 \approx 4800$
2. 精度比可採分子為 1 之分數表示（如 1/3000、1/1000）或比例方式表示（1：3000、1：1000），讀法為三千分之一、一千分之一。
3. 精度比計算之後，其分數之分母百位數以下必須捨去。如 1/4897，應註記為 1/4800。

伍、美軍砲兵導線誤差判斷

良好的測地計畫可指導訓練有素的測地人員，在現地作業與成果整理階段進行檢查。惟檢查並無法消除誤差，因誤差通常係於現地作業與計算中造成，測地完成後始能發現。野戰砲兵測地人員務須具備分析誤差與判斷誤差來源之能力，以避免浪費測地資源¹⁰。

一、誤差來源：

通常失敗之測地，潛存諸多誤差來源。執行導線誤差判定程序，係假定測地僅存在一種誤差，且誤差發生於現地作業或成果計算階段。惟下列情況，誤差仍可能存在。

(一)上級「三角點成果」(Trig date)：

上級或鄰接測量單位可能頒布包含誤差之「三角點成果」，即使此種狀況機率甚低，仍有發生可能。通常此種誤差出自三角點成果印刷錯誤，應儘速通報原發行機構。

1.座標誤差：

¹⁰ Marine Artillery Survey (MCWP3-1.6.15, Draft)，United States Marine Corps，2000，chapter8 sectionIV。

當上級三角點成果點位座標印刷錯誤時，誤差通常出現於橫座標或縱座標，甚至兩者皆錯，且誤差之座標經由不同的測地機構作業或頒布後，點位差異擴散。各級「測地資料中心」（Survey Information Center, SIC）須將成果彙整並校正，俾確保正確。

- (1) 如導線行「迴歸閉塞」時，上級三角點之座標誤差將傳遞至全部導線，易誤判為導線閉塞，致導線各測站皆存在未知誤差。
- (2) 如導線行「已知點閉塞」時，上級三角點之座標誤差，將被誤認為測地之距離誤差。

2. 標高誤差：

當上級三角點成果表之點位印刷發生錯誤時，錯誤通常不僅出現於座標，標高亦可能發生錯誤。各級「測地資料中心」（SIC）必須注意校正，俾確保成果正確。

- (1) 當標高誤差來自上級頒布之三角點成果，導線如行「迴歸閉塞」時，易誤判為導線閉塞。惟實際上導線各測站均存在未知的標高誤差。
- (2) 當標高誤差來自上級頒布之三角點成果，導線如行「已知點閉塞」時，導線座標與方位角均可閉塞，惟標高失敗，極易誤判導線存在高低角誤差。

3. 方位誤差：

上級頒布之三角點成果表內之方位角印刷錯誤時，可使用兩點座標計算或天文定向之方式檢查更正。惟當三角點成果表內之方位角為精確時，應使用正確之方位角實施計算。

- (1) 當方位角誤差來自上級頒布之三角點成果時，如導線行「迴歸閉塞」，導線將產生較大之座標與方位角雙重誤差。
- (2) 當方位角誤差來自上級頒布之三角點成果時，如導線行「已知點閉塞」，易誤判為導線存在角度誤差。

(二) 現地作業誤差：

現地作業誤差，包括距離、水平角、高低角與計算等四種類型。較大誤差來自計算與記錄，惟絕大部分正確程序之現地作業，不致產生大到足以導致測地失敗之誤差。尤其當前編制器材尚屬精確，最大誤差通常出在部分測量人員作業不夠精密。缺乏精密作業所發生誤差之案例如下：

1. 看讀誤差：

看讀誤差通常來自於程序不夠精密，測手（Instrument

operator，IO）應清晰看讀分劃後，再轉告紀錄手。不當之器材分劃看讀，將造成距離、水平角與高低角誤差。

2.紀錄誤差：

紀錄誤差通常在記錄資料完成平均後發現，故測手或班（組）長須查證紀錄平均前之操作程序。紀錄誤差亦可能來自不正確之步驟，須經指導（如氣泡水平）看讀後再完整紀錄。如步驟不適當，將產生距離、水平角與高低角誤差。

3.計算誤差：

通常計算誤差來自未使用正確計算與檢查程序。計算與計算檢查須分別實施，計算應個別使用兩部計算機共同完成，其他測量班成員則檢查三角點成果與記錄手簿內之資料。

4.標定誤差：

標定誤差通常出現在每一測站正鏡、倒鏡對回測量之讀數中。特別是透過長距離或「熱浪」（Heat wave，即地面因太陽曝曬所產生之高溫氣體）標定較困難時，水平角或高低角易發生標定誤差，進而造成閉塞時之方位角與（或）標高誤差。另高低角可用於將「斜距」（Slope distance，SD）轉換為「平距」（Horizontal distance，HD），故許多小的距離誤差通常由高低角與斜距造成。

5.定心/定平誤差：

定心/定平誤差可造成小量之距離與水平角誤差。

- (1) 如某部經緯儀整置時未精確定心與定平，致與控制點實際位置不符時，其所計算與實際之方位地線並非同一條，易造成方位與角度誤差。
- (2) 導線測量區分為前測站、測站與後測站，不論整置測距經緯儀三角架、反射稜鏡與覘標時，均須精確定心與定平。通常經過適切校正之器材，僅需實施微量調整即可完成。反之，如實施大幅度之定心與定平調整，則易導致較小的角度與距離誤差。

(四) 消除誤差：

精良的訓練、計畫、編組與現地作業程序，將可消除導線測量之多數誤差。如所有的現地作業與計算完全正確，僅因測地統制原因，致導線閉塞之座標、標高與方位誤差，不符合相關等級規範。就多數案例之經驗，並不列為測地失敗。

二、導線誤差判斷：

導線誤差判定之程序，係先行分離出可疑測站（水平角或高低角）或導線邊（距離），須假定目前僅有一種誤差存在，其閉塞誤差必須大到足夠找出來源，且誤差並非在控制之中，再藉由誤差判定指出可疑測站或導線邊，甚至包含複合誤差在內。導線誤差判定程序，區分下列四項：

- （一）導線閉塞後，決定方位誤差、徑誤差與標高誤差。
- （二）確定誤差所顯示之型式。
- （三）分離可疑之測站或導線邊。
- （四）檢查測地作業紀錄手簿之數學計算誤差。如記錄資料與計算均未發現誤差，須返回現地重測必要之導線線段。

三、導線誤差顯示：

導線誤差可顯示導線型式、方位、座標錯誤閉塞之狀況（如表二），區分下列四種：

- （一）方位良好，座標良好：
如方位與座標均閉塞，為良好導線，標高亦可能閉塞。
- （二）方位良好，座標失敗：
不論迴歸閉塞或已知點閉塞，如方位接近精度規範表，座標則否，顯示為距離誤差；當角度測量不佳時，方位亦失敗。
- （三）方位失敗，座標良好：
 - 1. 當迴歸閉塞時，如方位失敗，座標則良好，誤差應為起始或閉塞角。如起始或閉塞角之外，仍存在其他方位或距離誤差，則座標無法閉塞。
 - 2. 當已知點閉塞時，如方位失敗，座標則良好，誤差必定出現在閉塞角。如角度或距離誤差出現在其他位置，將導致閉塞導線座標錯誤。
- （四）方位失敗，座標失敗：
 - 1. 當迴歸閉塞時，如方位、座標皆失敗，誤差角必定出現在起始或閉塞角之外。因距離無誤差顯示，方位則良好。
 - 2. 當已知點閉塞時，如方位、座標皆失敗，誤差並非出自閉塞角，而是在開始點或測站內。因閉塞角並無誤差顯示，故座標可閉塞。

表二

導線誤差顯示分析表			
狀 況		誤 差 判 斷	
方 位	座 標	迴 歸 閉 塞	已 知 點 閉 塞
良好	良好	良好導線	良好導線
良好	失敗	距離誤差	距離誤差
失敗	良好	起始或閉塞角	閉塞角
失敗	失敗	角度誤差	起始或各測站

資料來源：Marine Artillery Survey (MCWP3-1.6.15, Draft)，United States Marine Corps，2000，p10-20。

四、誤差分離：

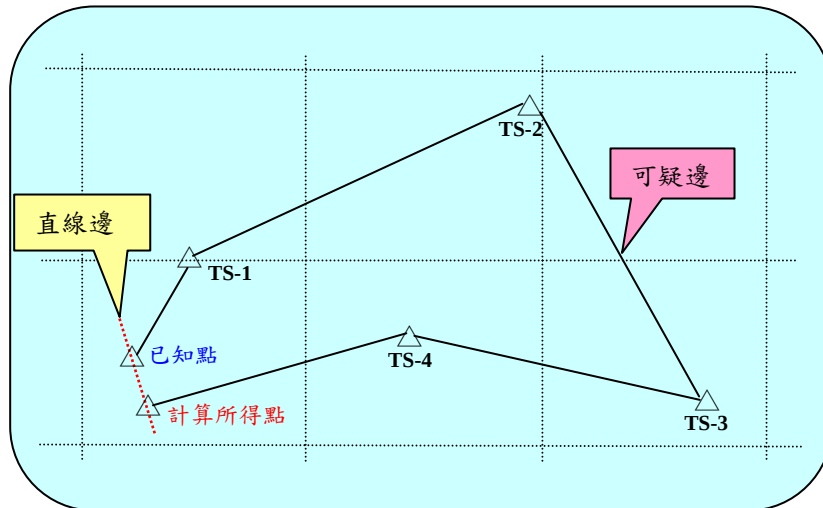
(一) 距離誤差分離：

當導線閉塞之方位未超過容許範圍，惟座標閉塞（徑誤差）超過精度規範時，顯示存在距離誤差。假定距離誤差無論長或短，其徑誤差之方位、距離誤差與導線之方位相同時，可使用「平行線法」（Parallel line method）與「徑誤差方位計算法」分離距離誤差。

1. 平行線法：

測量人員藉由一條與誤差方位相同或平行之線，確定包含距離誤差之導線。作業步驟如下：

- (1) 圖解導線於 1/25,000 方格紙上（比例尺越大更能顯示較小之誤差框），並標示導線各測站，包括已知點與計算所得之閉塞測站。
- (2) 在已知與閉塞測站間劃一直線邊，必要時此線可超過標繪點（如圖十一）。
- (3) 確認包含誤差之邊，其邊之方向約與步驟 2 之直線邊成平行線。如圖六所示之 TS-2 與 TS-3 測站間之導線邊，包含距離誤差。



圖十一：平行線法示意

資料來源：Marine Artillery Survey (MCWP3-1.6.15, Draft)，United States Marine Corps，2000，p10-20。

2. 徑誤差方位計算法：

- (1) 計算已知點閉塞座標至計算所得座標之「徑誤差」(RE) 之方位。
- (2) 在導線之圖形或表格上，找尋一個與「徑誤差」概略成反方位之導線邊，其方位可能相差 3200 密位，錯誤距離不論長或短，即為可疑之邊。

3. 誤差解析：

誤差解析係依據某些容許與判斷誤差之特性，確認誤差之導線邊。就角度與距離測量而言，較小之誤差對導線整體精度影響甚微，亦與大到足夠產生錯誤之分析方式不同。某些導線邊之方位幾乎平行於徑誤差，即顯示包含誤差。每一可疑邊均須檢查紀錄資料與計算，如誤差並非出自計算或紀錄，則須對每一個可疑邊實施重測，直至找到包含誤差的導線邊為止。

(二) 角度誤差分離：

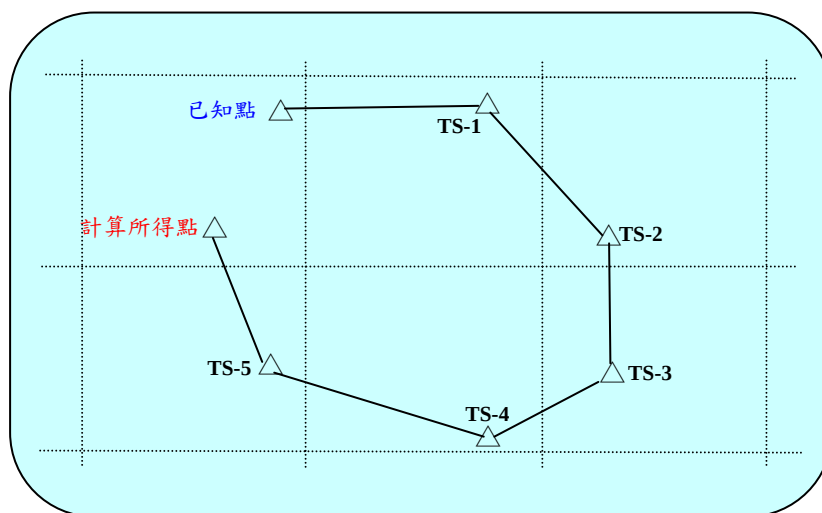
角度誤差表示導線閉塞方位不符合容許誤差規範。有時就角度誤差判定而言，成果之座標誤差超過容許徑誤差，可使用「垂直平分線法」(Perpendicular bisector method) 與「密位關係公式」(Mil relation formula, WoRM rule) 分離角度誤差。

1. 垂直平分線法：

垂直平分線法其目的在藉由垂直平分線通過最接近之測

站，確認包含角度誤差之測站。

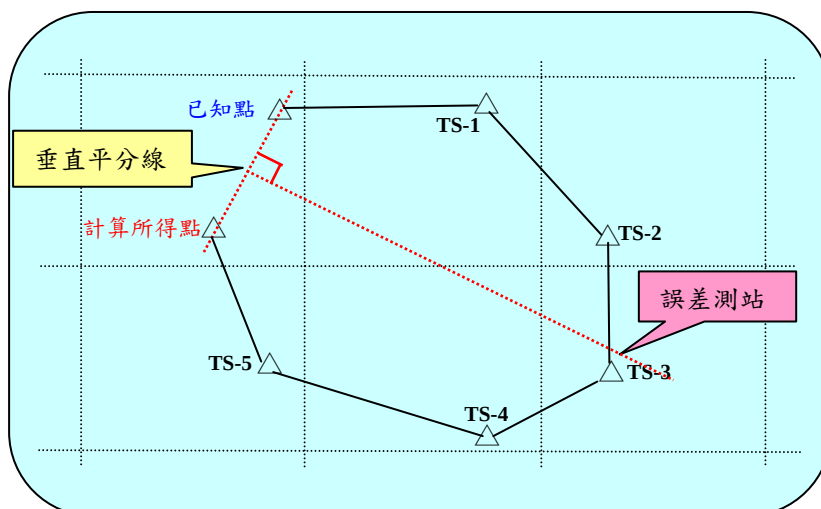
- (1) 圖解導線於 1/25,000 方格紙上（比例尺越大更能顯示較小之誤差），包含已知與計算所得之閉塞測站（如圖十二）。



圖十二：圖解導線於 1/25,000 方格紙上

資料來源：Marine Artillery Survey (MCWP3-1.6.15, Draft)，United States Marine Corps，2000，p10-21。

- (2) 以直線標繪已知與計算所得測站，此線可由標繪點向前或向後延伸，並定出此線之中央點。如徑誤差夠大，則可測量其距離，以確定中央位置。
- (3) 使用「量角器」（如半圓儀，protractor）描繪徑誤差之垂直線，並延伸至測量區域。
- (4) 前項標繪之線所通過或接近之測站（TS-3），即為包含誤差之測站（如圖十三）。



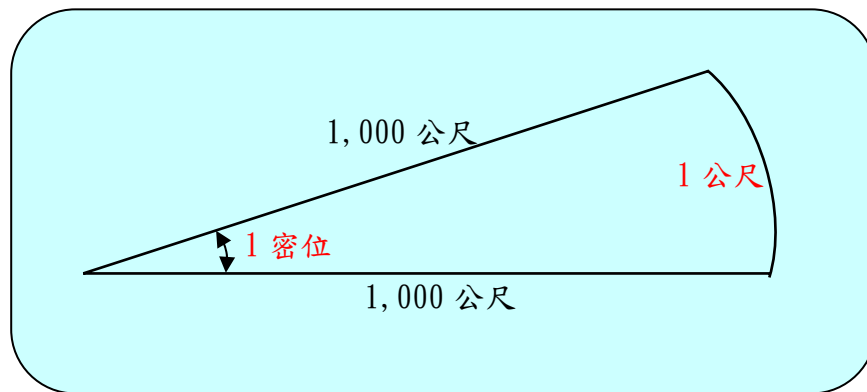
圖十三：以垂直平分線確認 TS-3 測站包含誤差

資料來源：Marine Artillery Survey (MCWP3-1.6.15, Draft), United States Marine Corps, 2000, p10-21。

2. 密位關係公式：

某些導線，特別是導線行已知點閉塞或成直線路徑，出現一個以上之可疑測站時，無法使用垂直平分線法確認實際誤差測站。在此種狀況下，密位關係公式即為分析誤差測站之適當工具。

- (1) 密位關係公式說明：1 密位角度在 1 公里距離外之另一端，將造成 1 公尺之移動（如圖十四）。



圖十四：密位關係公式示意

資料來源：Marine Artillery Survey (MCWP3-1.6.15, Draft), United States Marine Corps, 2000, p10-22。

- (2) 密位關係公式係利用角度與距離之關係，藉由徑誤差對應之距離確定某一包含角度誤差之測站。包含角度誤差之測站其距離計算以公里為單位，以「徑誤差」除「方位誤差」而得。公式： $R = W/m$

R = 公里距離

W = 閉塞徑誤差

m = 方位誤差

- (3) 計算範例：

某一失敗導線，為沿者大道之直線路徑，測量班長確定角度存在誤差，使用垂直平分線法分析出三個包含誤差之可疑測站。已知閉塞徑誤差 66.32 公尺，方位誤差 10.178 密位，如何使用密位關係公式，計算最可疑測站之距離？

解： $R=66.32$ 公尺/ 10.178 密位
 $R=6.516$ 公里（ $6,516$ 公尺）

（三）複合誤差分離：

複合誤差係方位與距離兩者或超過一個的方位或距離誤差。當導線出現複合誤差時，同樣將顯示方位誤差，應儘可能依據程序確定方位角誤差，確認存在此誤差之可疑測站。惟經由現地作業與計算分析後，如未發現誤差，此時應對全部導線重行誤差位置確定。

（四）標高誤差分離：

標高誤差源自高低角誤差。當導線標高不符合容許誤差規範時，可利用計算與地圖定點比對標高之方式分離可疑測站。某些測站計算之標高比對後不同於地圖定點，其標高顯示某一前測站出現高低角誤差，可藉檢查紀錄資料與計算過程找出誤差測站。如誤差並非出自記錄資料或計算時，則須返回現地重行高低角測量。

陸、對國軍砲兵之啟示

美國陸軍與陸戰隊於 1981 年將「定位定向系統」（PADS）納編砲兵測地後，即邁入「測地自動化」時代，使原本勞力密集之砲兵測地，轉變為裝備與技術密集之型態。2000 年陸戰隊基於偏遠地區建立測地統制之需要，另增編 Trimble 4000「軍用測地級 GPS 接收機」（Military Survey Grade Receiver, MSGR）¹¹。惟美軍並未因此淘汰「傳統測地」，反而將兩者合併編組，以增進其作業能力與彈性。基於「傳統測地」之重要性，「美軍砲兵測地」（FM6-2）之砲兵導線測量作業規範、閉塞檢查與誤差判斷等內容，皆配合準則編修持續更新與修訂，實可提供國軍未來準則編修、測地專業教育與部隊訓練之參考。

一、重視閉塞導線檢查：

「閉塞導線」可提供閉塞檢查與計算精度，為導線諸法中最有利者，目前本校「基本測量」課程，皆採此法教學。惟「砲兵營、連測地」時，基於速度考量，連接與陣地測地多採無法檢查成果之「非閉塞導線」，一旦發現誤差（實際上多由教官、裁判官告知），即使重測亦為時已晚。誠宜參考美軍作法，重視閉塞導線測量與閉塞檢查，及早發現誤差，速採誤差判斷與修訂作為，以避免浪費測地資源。

¹¹ Marine Artillery Survey (MCWP3-1.6.15, Draft)，United States Marine Corps，2000，Chapter5。

二、適切修訂導線規範：

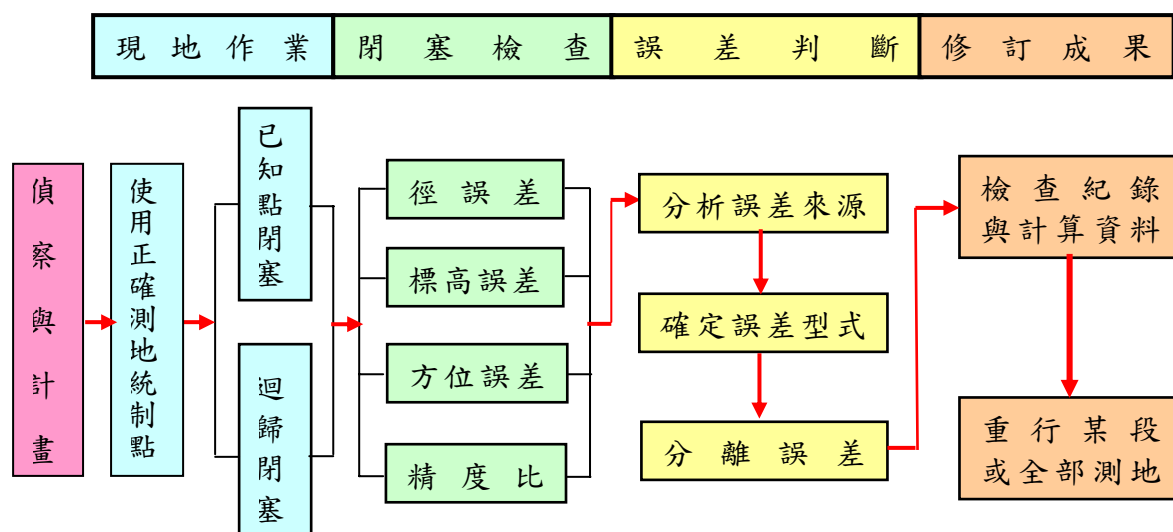
觀察美國陸軍 1954 年「砲兵測地」(TM6-200) 至 2000 年「陸戰隊砲兵測地」(MCWP3-1.6.15 草案)，其導線測量作業規範，皆配合當時測量裝備更新、技術演進、武器系統需求改變與作戰經驗等，進行多次修訂。國軍砲兵測地準則與技術雖源自美軍，惟測量作業規範多採沿用，誠宜針對裝備、技術與射擊等實際需求，適切修訂導線測量作業規範，供砲兵部隊作戰、訓練與測考參考。

三、恪遵測地作業程序：

恪遵測地作業程序，為達成測地任務之不二法門。美軍準則詳述導線測量之現地作業通常包括距離、水平角、高低角與計算等四種誤差，其中較大之誤差來自計算與紀錄，惟有依據正常程序實施現地作業（如圖十五），始可避免產生足以導致測地失敗之誤差。基此，砲兵部隊為避免測地產生誤差，應先行建立測地「標準作業程序」(SOP)，並恪遵執行，俾確保測地任務達成。

四、落實導線誤差判斷：

測地作業通常因自然、器材與人為等因素¹²，而產生微小之差異，稱之「誤差」(Error)；超過「容許誤差」者，則稱之為「錯誤」(Mistake)。如缺乏判斷能力，無法判斷誤差所在，即須重行測地作業，不僅曠日費時，亦延誤測地時效。目前國軍「野戰砲兵測地訓練教範」之導線誤差判斷相關內容實屬有限，宜參考美軍導線誤差判斷作法，迅速判斷導線誤差所在，適切分離誤差並修訂測地成果之能力，避免重測。



¹² 尹鍾奇著，實用平面測量學，（台北市，國彰出版社，民國 68 年 9 月五版），頁 7。

圖十五：導線測量作業程序示意

資料來源：作者自製

五、加強控制點成果檢查：

美軍強調失敗之測地，潛存諸多誤差來源，其中包括三角點成果之座標、標高與方位誤差。國軍砲兵目前以運用「國家控制點」（衛星控制點、水準點、三角點、精導點等）為建立測地統制之主要手段，惟就防區測地檢查所見，仍有極少數控制點發生點位移動後，尚未公告修訂成果之情事。如使用錯誤，將造成重大影響。各級測地資料中心平時蒐集控制點成果後，須加強鑑定與檢查，如有錯誤除應儘速修訂外，亦須通報發行機構更正。

柒、結語

美軍鑒於「導線測量」在砲兵測地之重要性，對其技術與運用之研究始終不遺餘力，歷經數十年之努力，目前導線測量精度規範、閉塞檢查與誤差判斷等技術持續精進，已達到科學化與標準化之階段，其準則研發之作為與成就，值得吾人學習與參考。

國軍砲兵於民國 86 年納編「定位定向系統」（ULISS-30）後，改採「定位定向系統組」為主、「測量組」為輔之測地方式，故測量組所使用之相關技術無法偏廢，仍須參考測量學術與先進國家砲兵準則發展，持續檢討精進，俾增進測地作業能力，確保測地任務之達成。