

相對重力儀 CG-5 儀器校正與評估

Calibration and evaluation of two Scintrex CG-5 instruments

彭森祥* 葉文凱** 李瓊武* 梁旭文*** 楊枝安***

本文分析兩台CG-5相對重力儀，進行多時段儀器校正與精度評估。施行重力測量時期，藉由定期儀器校正與評估，可以監測相對重力儀的儀器品質，此項工作對於相對重力測量成果品質，有重要貢獻。多時期儀器校正可以繪製出儀器管制圖，品管項目包括CG-5儀器漂移量(drift)監控、重力儀內的電子水平感測器偏移量(offset)監控、電子水平感測器的靈敏度監控、施行相對重力測量評估儀器精度。本文也同時討論CG-5儀器原理。關於精度評估，本文應用FG-5絕對重力儀數據，由工研院量測中心絕對重力點與18尖山國家重力基準站構成重力校正基線，用來比對相對重力測量成果。成果顯示，兩台CG-5儀器與絕對重力值比對的器差，差值最大在 $8\ \mu\text{Gal}$ 範圍，兩台CG-5儀器數據彼此比對，差值的平均值為 $3\ \mu\text{Gal}$ 。相對重力網施測2測回，2測回數據比對，差值最大 $4\ \mu\text{Gal}$ 。

* 工研院量測中心 e-mail: mhpeng@itri.org.tw

** 環宇測量工程顧問有限公司

*** 內政部土地測量局

一、前言

應用重力儀觀測數據，在地球物理探勘、工程調查、環境監測等應用是一項基礎性的數據(Budetta and Carbone, 1997)。近10年來，重力儀儀器在記錄自動化與儀器精度皆有所改進，分析的能力也進步到分析微小的重力變化($10 \mu\text{Gal}$)，儀器與分析技術的改進，將擴展重力測量的應用層面。本文的目的乃分析兩台 Scintrex CG-5相對重力儀，儀器序號#126，#121。進行多時段儀器校正與精度評估。

Scintrex CG-5相對重力儀，儀器解析度 $1 \mu\text{Gal}$ ，儀器參考精度 $5 \mu\text{Gal}$ ，儀器量測的數據範圍適用於全球觀測。內政部土地測量局持續推動國家基本控制測量工作，包括重力點定期實施檢測(內政部，2001)，據以維護控制點系統的完整性。於重力觀測期間，定期召回儀器在工研院量測中心國家標準實驗室內，進行重力儀校正與評估，除了在實驗室內進行校正項目，並施測相對重力基線與重力網，本文目的是說明校正過程與分析比對的成果。

二、Scintrex CG-5 儀器原理

首先比較說明L&R (LaCoste and Romberg, 2001)重力儀，L&R重力儀核心以機械原理設計重力量測，受測體支撐於垂臂、Zero-length 金屬彈簧機構，因重力變化，金屬彈簧長度改變引起垂臂位置改變，調整回復垂臂至零點位置，藉此讀取儀器相應的讀數(Torge, 1989)。此類型重力儀量測的精度，與金屬彈簧的敏感度、垂臂力矩設計特性有關聯，依據虎克定律，金屬彈簧伸長量與重力變化成正比，若要量測 $1 \mu\text{Gal}$ 重力值的精度，其實儀器設計關鍵技術是要量測 10^{-11}m 長度量測的精度，若應用精密機械的原理達到 10^{-11}m 長度量測精確度，是非常精密且困難度高的設計，可以理解L&R重力儀屬精密製造，但是機械量測原理，能改進儀器精度的空間很有限。

相對於L&R重力儀原理，CG-5捨棄機械垂臂，改以電容感測器與電子回饋系統，以電子回復力將受測體回復到零點位置。受測體平衡於石英彈簧，重力變化引起石英彈簧長度變化，採用電容感測器量測受測體位移變化，回饋系統施於電壓，藉由電容感測其位移量(精度 0.2nm)，使受測體回復到零點位置。量測回饋的電壓值，可關聯於重力的變化量(Scintrex Ltd, 2004)。CG-5感測系統，其實就是數位化的訊號分析處理器。採用石英彈簧不受觀測環境的磁場干擾。重力儀觀測換站運輸期間，受振動衝擊引起彈簧的漂移，因為石英彈簧的彈性特性，這項影響量也改進減小。石英彈簧的缺點是受溫度改變而長度變化的敏感性高，故

CG-5設計密封恆溫的真空腔，量測真空腔內溫度，依溫度係數進行改正。整體而言，Scintrex CG-5重力儀是結合電腦與感測器原件，隨著感測器元件進步，CG-5重力儀仍有改進的可能。

三、儀器 drift 改正

相對重力儀採用精密彈簧感測重力變化，由於彈簧材料特性，L&R重力儀的儀器漂移量(Drift)約30 μ Gal/day，CG-5重力儀的儀器漂移量約1000 μ Gal/day，值得注意，雖然1000 μ Gal/day 數值大，但是CG-5設計原理乃將率定已知的drift函數，自動補償改正，筆者進行數個月CG-5校正經驗，若觀測4小時內，CG-5儀器 drift量約數個 μ Gal。

儀器漂移量的率定，目的是評估重力儀零點變化改正量，係採用靜態觀測方式，持續同一點位靜態觀測16小時，數據經過固體潮改正，由時間序列的零點漂移曲線，計算零點變化改正量。

校正場所位於工研院量測中心，地下室實驗室B12，B12實驗室振動量小，相當安靜，適合重力儀靜態觀測，關於進行漂移量率定觀測時，有關CG-5的設定參數，每秒讀數重力值，每60筆(60秒)重力值計算一個平均觀測量，持續記錄16小時。

1. 整置相對重力儀於重力點，調整水準器至要求後，再進行後續的檢校作業。
2. 零點變化量計算如下：

$$\text{Drift}^{\text{new}} = \text{Drift}^{\text{old}} + \left[\frac{R2 - R1}{T2 - T1} \right]$$

式中：

$\text{Drift}^{\text{old}}$ ：目前儀器設定值，觀測數據的零點變化改正量，也就是施行校正前的零點變化改正量參數。

$\text{Drift}^{\text{new}}$ ：施行校正後的零點變化改正量參數的更新值。

$\left[\frac{R2 - R1}{T2 - T1} \right]$ ：重力數據經過固體潮改正後，時間序列的

重力數據變化量，回歸計算單位時間(每日)零點變化量。

表1 是歷時7個月，每個月做一次率定，#121、#126儀器漂移量率定值穩定沒有變化，定期召回儀器在實驗室評估，由時間序列的率定成果，達到監測儀器穩定，確認野外施測過程中，沒有因粗造的操作而造成重大的儀器變化。

表1 歷時7個月，#121、#126儀器漂移量率定的時間與率定值成果

儀器 # 121		儀器 # 126	
日期	drift (mGal/day)	日期	drift (mGal/day)
09/27/2006	0.707	09/07/2006	0.817
11/10/2006	0.707	11/10/2006	0.817
12/04/2006	0.707	12/04/2006	0.817
01/03/2007	0.707	01/04/2007	0.817
02/05/2007	0.707	02/07/2007	0.817
03/20/2007	0.707	03/20/2007	0.817
04/09/2007	0.707	04/04/2007	0.817

四、儀器水平軸率定

CG-5儀器提供二個垂直軸向的電子水平感測器，重力儀水平軸有變化，會造成重力值差異，重力儀水平軸角度誤差與重力值二者約呈現拋物線曲線關係，重力儀水平軸若在理想的條件下，其重力讀數在最大值。水平軸角度誤差(Tilt Sensor Offsets) 10” 重力值差異 1 μ Gal，水平軸角度誤差20” 重力值差異約 4 μ Gal。

施行水平軸檢查的前置步驟，需確認「儀器零點漂移」改正完善、數據固體潮改正完善，施測地點需安靜且如水泥地面等硬地板，不可在木質或膠面等軟質地地面。操作步驟如下：

1. 測試儀器 X 軸的水平軸檢查，調整定平旋鈕，在儀器 X 方向調整傾斜角度，使水平指示讀數值 X=150，Y 方向定平 Y=0；並記錄水平度數數值。
2. 同上步驟，在儀器 X 方向調整傾斜角度，使水平指示讀數值 X=-150，Y 方向定平 Y=0；記錄水平度數數值。
3. CG-5 儀器計算出 X-axis Tilt Sensor Offsets 數值。
4. 測試儀器 Y 軸的水平軸檢查，原理相同：調整定平旋鈕，在儀器 Y 方向調整傾斜角度，使水平指示讀數值 Y=150，X 方向定平 X=0；記錄水平度數數值。
- 5 同第 4 項步驟，在儀器 Y 方向調整傾斜角度，使水平指示讀數值 Y=-150，X 方向定平 X=0；記錄水平度數數值。CG-5 儀器計算出 Y-axis Tilt Sensor Offsets 數值。

在常態條件下，若儀器沒有長時間斷電、劇烈碰撞、搬運振動等干擾，儀器不同時間的Tilt Offset校正值，差異性在10—20 秒，也就是前一次的Tilt Offset值與校正後差值在10—20 秒。圖1是施行7個月率定實驗成果，多時期校正成果呈現水平軸誤差穩定，兩台儀器每次率定水平軸誤差與前一次校正值差異在20秒內。

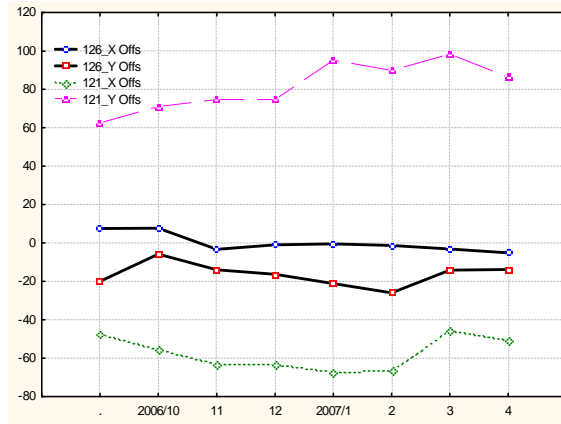


圖1 多時期校正成果，Tilt offset參數

關於水平感測器的靈敏度校正，校正步驟如下：

1. 調整定平旋鈕，使水平指示讀數 $X=0$ ，Y 方向定平 $Y=0$ ；(允許定平容忍值 ± 5)，記錄水平度數值。
2. 調整定平旋鈕，使水平指示讀數值 $X=150$ ，Y 方向定平 $Y=0$ ；(允許定平容忍值 ± 5)，記錄水平度數。
3. CG-5 儀器計算出 X Sensitivity 數值。
4. 測試儀器 Y 軸的靈敏度檢查，依序檢查 Y 軸方向，原理相同：調整定平旋鈕，使水平指示讀數值 $Y=0$ ，X 方向定平 $X=0$ ；(允許定平容忍值 ± 5)，記錄水平度數值。
5. 調整定平旋鈕，使水平指示讀數值 $Y=150$ ，X 方向定平 $X=0$ ；(允許定平容忍值 ± 5)，記錄水平度數值。
6. CG-5 儀器計算出 Y Sensitivity 數值。

圖2是施行7個月率定實驗成果，多時期校正成果呈現穩定，

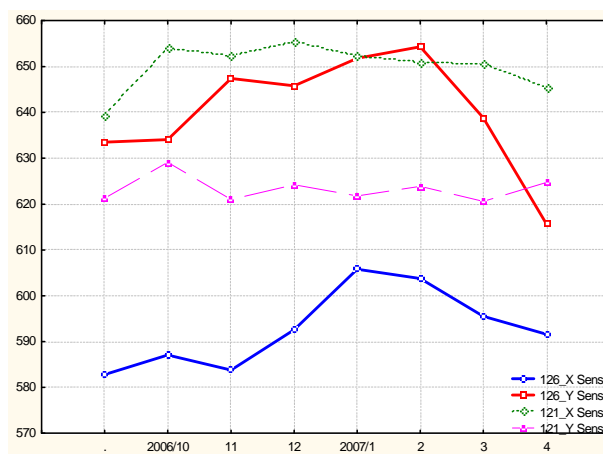


圖2 多時期校正成果，Tilt sensitivity參數

五、應用絕對重力儀評估 CG-5

CG-5重力觀測的評估分為二個實驗，第一個實驗進行多時期重力基線測量，成果與絕對重力儀FG-5成果進行比對。第二個實驗進行相對重力網，評估CG-5重力測量的精度。重力基線場重力點，包括量測中心實驗室CMS B12絕對重力點、國家重力基準站絕對重力點Tunnel B1，絕對重力值觀測時間為期2005年9月至2006年5月，由FG-5 #231施測。

重力觀測參數為一分鐘記錄60筆數據取平均值，同一點觀測4次。重力觀測修正包括固體潮改正、儀器傾斜改正、觀測量粗差別除、高頻振動過濾(Seismic filtering)。圖3為7次重力基線測量比對成果，#121相對重力測量與參考值比對，差值最大0.008 mGal，差值絕對值平均0.005 mGal，#126相對重力測量與參考值比對，差值最大0.007 mGal，差值絕對值平均0.006 mGal，2台CG-5重力測量成果比對，差值最大0.006 mGal，差值絕對值平均0.003 mGal。

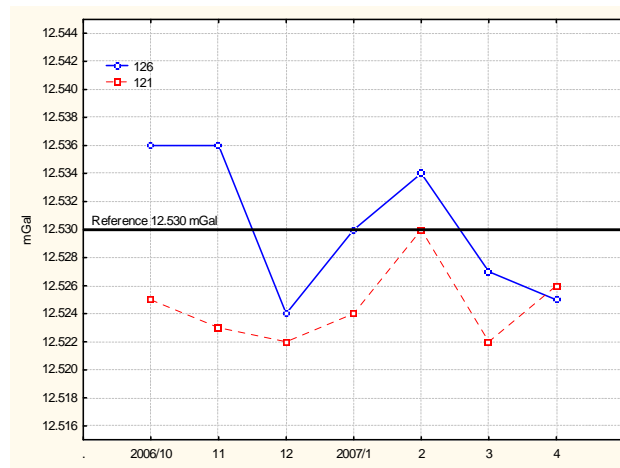


圖3 #126，#121重力測量值與參考值比較

第二個相對重力測量實驗，由量測中心實驗室CMS B12絕對重力點、國家重力基準站絕對重力點Tunnel A1，18尖山山頂C1重力點，構成簡單重力網。重力觀測參數為一分鐘記錄60筆數據取平均值，同一點觀測4次。施測順序：B12⇒A1⇒C1⇒B12，重複網形觀測二測回，重力化算包括固體潮改正、大氣壓影響改正、Drift改正、觀測量雜訊偵除。關於儀器高度化算方面，因為實驗室樓板平坦，不致因定平儀器而影響儀器高度變化，2點之間儀器高度的相對重力差值與2點之間重力點位高程的重力差值可接受為相同。表3為應用儀器#126，二測回成果，二測回差值最大0.004 mGal。

表3 相對重力網(單位：mGal)

(B12-1) - (A1)	(A1) - (C1)	(C1) - (B12-1)
12.089	8.738	-20.827

(B12-1) – (A1)	(A1) – (C1)	(C1) - (B12-1)
12.087	8.736	-20.823

結論

1. 本文研究，在實驗室控制條件下，安靜穩定的環境觀測重力，評估 CG-5 的儀器精度，以絕對重力儀 FG-5 #231 數據為參考，CG-5 (#121) 差值平均 0.005 mGal，CG-5 (#126) 差值平均 0.006 mGal，2 台 CG-5 彼此比較，差值平均 0.003 mGal。
2. 由多時期校正成果，各參數變化穩定(表 1、圖 1、圖 2)，確認野外施測期間，並沒有造成重大的儀器變化。觀測期間定期召回於實驗室，進行儀器的率定，的確能監控儀器品質，值得推廣。
3. 應用 CG-5(#121) 施測兩次相對重力網，兩次成果比對，差值最大 0.004 mGal。

致謝

本文量測工作承蒙工研院量測中心謝文祺先生協助，特此致謝。

參考文獻

- 內政部，91 年度一等水準點上實施重力測量，2001。
- Budetta, G., Carbone, D., 1997. Potential application of the Scintrex CG3-Mgravimeter for monitoring volcanic activity: results of filed trials on Mt. Etan, Sicily. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 76, 199–214.
- Debeglia, N., Dupont, F., 2002. Some critical factors for engineering and environmental microgravity investigations. *Journal of Applied Geophysics* 50, 435–454.
- Jousset, P., Ruymbeke, M.V., Bonvalot, S., Diament, M., 1995. Performance of two Scintrex CG3M instruments at the fourth International Comparison of Absolute Gravimeters. *Metrologia* 32,231–244.
- LaCoste and Romberg, 2001. Gravity meter manuals for models G and G.
- Scintrex Ltd, 2004. CG-5 Short form manual.
- Torge, W., 1989. Gravimetry. Walter de Gruyter, Berlin, New York, NY, 465 pp.