



檢驗技術簡訊 70

INSPECTION TECHNIQUE

檢驗技術簡訊 第70期

2021年4月出刊

每季出刊1期



儀器介紹

應用科氏力式流量計於地熱兩相流量測

工業技術研究院 李伯亨、郭景宜、何宜霖

雲林科技大學 營建工程學系 劉松癸

一、前言：

地熱發電系統開發初期風險相當高，通常到了探勘井鑽鑿與資源評估確認後，開發風險才得以降低至可進一步開發之信心度。因此依據現行模式，投融資方願意投入資金之時間點為探勘井（甚至是生產井）鑽鑿完畢且完成產能確認，這也是臺灣業者進行地熱發電系統開發之主要模式。若能快速且準確地完成產能測試並完成地熱儲集層特徵定義之資訊，可協助投融資方評估地熱開發之風險，以利資金之投入。

國際上之取熱方式仍以地熱流體將儲集層熱能取出作為發電利用為主流，因此除了達到可開採之溫度外，地熱流體之取出/回注量體，為決定發電裝置容量之關鍵。

地熱流體在從地底儲集岩向上流至地熱井口的過程中會由於流體壓力和溫度的持續降低而導致流體出現相變化，此時地熱流體是呈現不凝結氣體／蒸汽／液體共存的流態，稱為兩相流。兩相流屬於多相流中較為簡單的形式，其遵循流體力學的所有基本定律，然而因為存在氣／液兩種不同密度與黏度等組成成分的流體同時流動，要考慮的方程式會比單相流更為複雜。液態和氣態的相互作用可以用不同的流動模式來描述，取決於兩相的輸送性質、管道粗糙度、雙相流體間的體積比及速度比(Slip ratio)，一般市售流量計除了已廣泛用於原油開採最上游端之原油計量之多相流流量計之外，其餘皆僅能用於單相流體之流量量測。但多相流流量計主要結構是使用差壓式流量計（通常為文氏管流量計，Venturi）做流體質量量測，再搭配Gamma-ray做流體成分的物理性量測。Gamma-ray通常是Ce-137（一個光譜，高能量，可量密度）或Ba（兩個光譜，低能量，多了空泡分率量測），由於加了Gamma-ray的功能，多相流流量計的價格相當昂貴，且使用上也需要輻射安全防護的考量。

目前國際認可之地熱井產能測試方法中，針對地熱流量量測技術有唇壓法(Lip Pressure Method)(Grant and Bixley, 2011)、分離器(Separator)(Fernando et al., 2015)與示蹤劑稀釋法(Tracer Dilution Method)(Hirtz et al., 1993)。唇壓法為目前國際常用且有充分文獻發表之方法，雖然量測成本較低，但量測誤差高(~10%以上)、較適用於地熱井主流體為蒸氣的條件、且設備空間需求大，移動性差；分離器可適用於各種兩相組成比例之地熱流體流量量測，但目前沒有設計標準，往往於製作完成後才能以實測方式驗證其針對各相流體之分離效果，而分離效果決定量測結果的準確性，且同樣有體積龐大而攜帶不易的問題；示蹤劑稀釋法係利用兩道打入地熱流體內的示蹤劑分別於蒸汽及水中稀釋的程度來推算雙相流體的質量流率與熱焓，但其量測準確度取決於化學示蹤劑分析儀器的靈敏度與準確度，目前少見於國內在示蹤劑稀釋法應用於地熱流量量測。

上述三種量測技術有一個共通問題，就是相關量測設備皆須於測井完畢後撤除，這個限制使得地熱生產井無法於後續地熱發電系統開發後持續執行線上流量即時監控來進行生產週期的評估，因此國際上已開始研究超音波式流量計、兩相流孔口板或科氏力式流量計藉由量測特性的修正後應用於多相流流量計量之可行性。

美國Emerson集團之Micro Motion公司為解決兩相流流量量測所面臨的困難，已開發一款低頻科氏力式流量計，具備強化的振動管核心處理器並搭配新的先進多相流量測(Advanced Phase Measurement, APM)訊號處理模組，於氣體空泡分率(Gas Void Fraction, GVF)為10%以下時，兩相流流量量測結果仍可具備(0至-6)%的量測準確度(Micro Motion®, 2018)，本研究建立兩相流體流量驗證設備，以評估此型科氏力式流量計應用於地熱兩相流體產能量測之可行性，

並實際應用於臺東縣金崙地熱區與新北市溫泉井之兩相流體流量量測案場測試。

二、科氏力式流量計量測原理

科氏力式流量計的量測原理為透過流體流過一組以自然頻率擺動的量測管時，因地球自轉所產生的科氏力會使管路的擺動頻率發生改變，因此可透過量測管路於流體進出口的擺動頻率的相位差或頻率變化量來推算管路內流體的質量流率或密度。圖1為科氏力式流量計的量測原理示意圖，圖1左圖為管路內沒有流體流動時的狀態，此時量測管以一個自然頻率擺動，於流體進出口管路上安裝的感測元件會分別輸出一組正弦波波形，兩組波型相位一致；當流體流過管路時，量測管會受到科氏力的影響而出現扭曲現象，此時為於進出口的兩個感測元件輸出的波形明顯出現相位差，如圖1右圖所示，兩波形間的相位差(即時間差)係與質量流率成正比，即可藉此計算流體的質量流率。圖2為典型Micro Motion科氏力式流量計密度量測原理示意圖。已知兩根量測管係以一自然頻率反向擺動，當相同體積流率的液體或空氣分別流進量測管時，因液體密度較空氣大，使得質量較大，量測管的擺動頻率就會降低，類似彈簧掛重物的概念，於相同的彈簧係數下，當吊掛物質量較大時，彈簧的角頻率越小，即振動較慢。

所有Micro Motion科氏力式流量計在出廠前，都會依據流量計須應用之兩相流體中的液體與氣體種類分別進行校正，以獲得完整應用範圍內量測管頻率與流體密度的關係式。Micro Motion科氏力式流量計對流體密度變化的反應相當敏感，可感測 $\pm 0.0002 \text{ g/cm}^3$ 的密度變化。

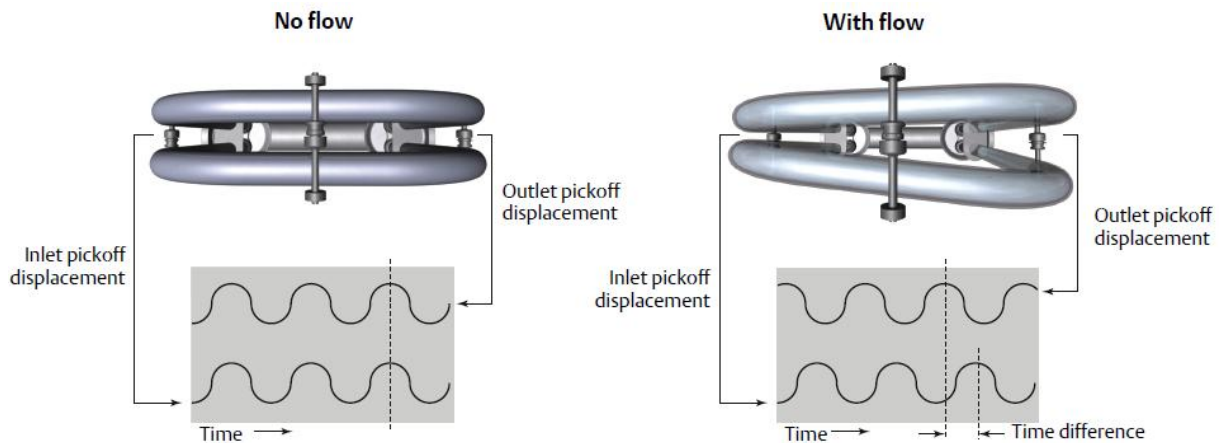


圖1、Micro Motion科氏力式流量計流量量測原理示意圖

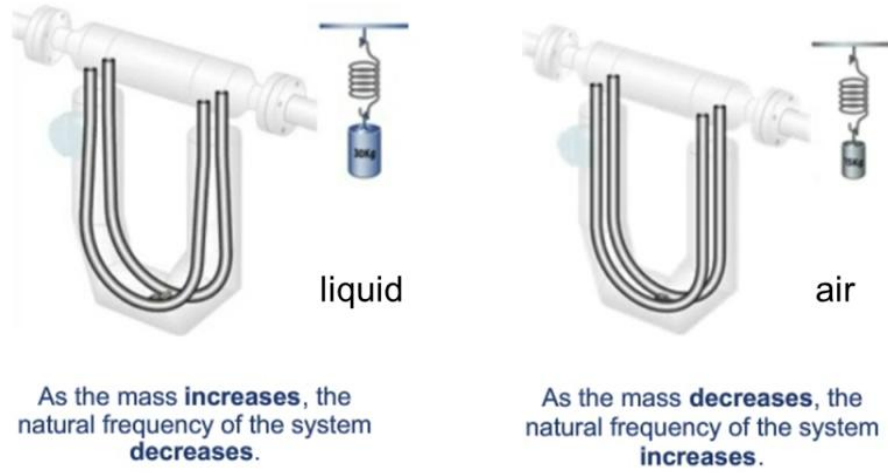


圖2、Micro Motion科氏力式流量計密度量測原理示意圖

三、兩相流流量量測驗證設備

為了解低頻科氏力式流量計對於地熱兩相流量測之適用範圍及量測能力，本研究建立一套兩相流流量量測驗證設備，以評估此型流量計後續應用於地熱兩相流體產能量測之可行性。兩相流流量量測驗證設備如圖5與圖6所示，包含氣源、氣體流量計、被動式流體均質器、低頻科氏力式流量計、水槽、水泵與水流量計，並構成一個封閉式環路。氣體流量計使用音速噴嘴，可透過調整音速噴嘴上游的氣源壓力來提供穩定的空氣流率；水流量則以電磁式流量計來進行量測；被動式流體均質器是透過結構上的特殊設計使流體通過時可作均質混合，不需要搭配額外動力裝置。使用均質器可將流體攪散成較均質的狀態，有利於低頻科氏力式流量計的量測性能；此外，本研究在低頻科氏力式流量計上游管路安裝一道透明視窗，藉以觀察兩相流體的流譜。實驗方法係以變頻器調整水泵輸出水量，並將給定流量的空氣注入管路中，透過已知的水流量 \dot{m}_{water} 與空氣流量 \dot{m}_{air} ，可計算管路中氣—液的組成比例，透過質量不減定律求出兩相流體流量 \dot{m}_{mixture} 與密度 ρ_{mixture} ，數學式如下：

$$\dot{m}_{\text{mixture}} = \dot{m}_{\text{water}} + \dot{m}_{\text{air}} \quad (1)$$

$$\rho_{\text{mixture}} = \varepsilon\rho_{\text{air}} + (1-\varepsilon)\rho_{\text{water}} \quad (2)$$

其中 ε 與 $(1-\varepsilon)$ 分別為空氣與水的空泡分率。最終要探討的兩相流體積流率可透過式(3)計算得到。

$$\dot{V}_{\text{mixture}} = \dot{m}_{\text{mixture}} / \rho_{\text{mixture}} \quad (3)$$

本研究在六組不同的空泡分率組成下，低頻科氏力式流量計所量測之兩相流體體積流率 $\dot{V}_{\text{Coriolis}}$ ，與理論值 \dot{V}_{mixture} 相對器差 ER 之數學式如下：

$$ER = (\dot{V}_{\text{Coriolis}} - \dot{V}_{\text{mixture}}) / \dot{V}_{\text{mixture}} \quad (4)$$

分別記錄低頻科氏力式流量計量測的空泡分率與體積流率，並透過音速噴嘴量測空氣質量流率，以及電磁式流量計量測之水體積流率，得以計算得空泡分率與體積流率的理論值，表 1 為兩相流實驗數據分析結果。

比較低頻科氏力式流量計量測之空泡分率與理論空泡分率，相對器差如表 1 中 ER 所示。實驗結果顯示，流量計量測之空泡分率與理論空泡分率相當接近；因此，可藉由實驗得到的量測器差，作為後續案場實測時的量測值修正。此外，低頻科氏力式流量計在空泡分率 5 % 以下的兩相流體，具備可接受的量測誤差，而臺灣目前探勘的地熱井主要以單相為主，並摻有 (3 至 10) % 左右的不凝結氣體，此型低頻科氏力式流量計應具有相當高的可適用性。

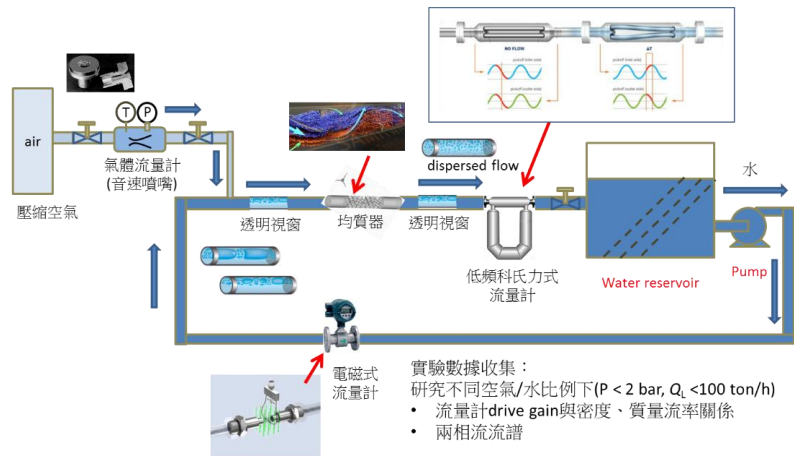


圖 5、兩相流流量量測驗證設備示意圖



圖 6、兩相流體流量驗證設備實體圖

表 1、兩相流實驗數據分析結果

序號	空氣流量 (kg/h)	水流量 (L/h)	空泡分率量測值(%)	體積流率量測值(L/h)	空泡分率理論值(%)	體積流率理論值(L/h)	E_R (%)
1	4.745	28330	5.8	27679	4.94	29804	0.86
2	3.996	28431	4.9	27945	4.18	29672	0.72
3	3.204	28515	4.4	28083	3.37	29510	1.03
4	3.150	28551	3.9	28224	3.31	29529	0.59
5	2.770	28701	3.2	28455	2.91	29561	0.29
6	2.448	29062	1.2	29012	2.64	29850	-1.44

四、實際案場測試

(一)臺東縣金崙地熱區溫泉井

本研究於 2019 年 6 月 19 日至 6 月 22 日期間，使用低頻科氏力式流量計量測臺東縣金崙地熱區溫泉井流量，相關量測照片如圖 8 所示，低頻科氏力流量計安裝於井口下游，並分別串聯兩只 2 吋與 3 吋球塞閥做流量控制。流體顯示為蒸氣態，推測可能是因為地熱井管內壁有結垢物堵塞，使井下壓力較大，當地熱流體由井底流至出口因壓力下降至一大氣壓，解壓過程使得流體氣化。案場量測結果如表 2 所示，當井頭閥全開條件時，此一地熱井的最大產量約為 2400 kg/h，流量計測得密度約 0.015 g/cm^3 ，依據井頭絕對壓力 2.6 bar、井頭流體溫度 $123 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

(二)新北市溫泉井

本研究使用低頻科氏力式流量計量測新北市溫泉井流量，於 2020 年 1 月 17 日修井後進行。流量計係安裝於溫泉井出口，現場管路安裝與量測照片如圖 9 所示，流體主要以蒸氣態，量測結果如表 3 所示。量測結果顯示，新北市溫泉井流體密度介於 $(0.00103 \text{ 至 } 0.00138) \text{ g/cm}^3$ ，在 2 吋噴流管全開的噴流條件下，流量約為 2580 kg/h，修井前後流量量測結果差異不大，但修井後之井口溫度由 $99.7 \text{ }^\circ\text{C}$ 大幅度提升至 $117 \text{ }^\circ\text{C}$ 。



圖8、使用低頻科氏力量測計於臺東縣金崙地熱區溫泉井之流量量測(2019/6/19至2019/6/22)

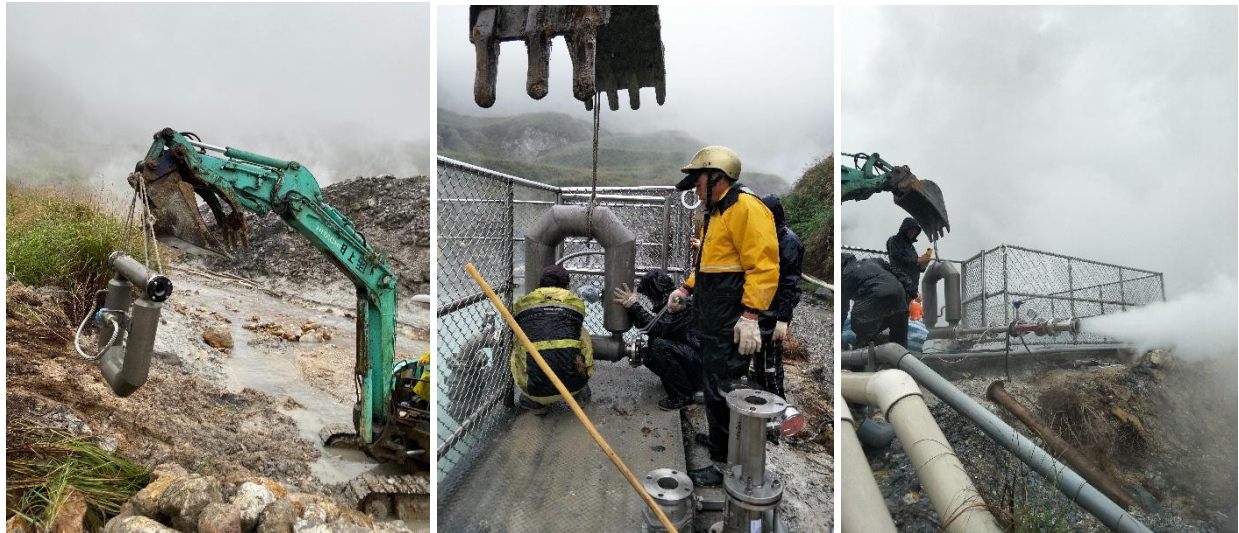


圖9、使用低頻科氏力式流量計於新北市溫泉井執行流量量測

表 2、臺東縣金崙地熱區溫泉井流量量測結果

日期	井頭閥開關	出口閥開關	井頭絕對壓力(bar)	總質量流率(kg/h)	密度(g/cm ³)	井頭溫度(°C)	熱水流率(kg/h)	蒸氣流率(kg/h)
2019/06/19~22	全開	全開	2.54~2.71	1400~2400	0.015	123	1835.2	164.8

表 3、新北市溫泉井流量量測結果

日期	井頭閥開關	出口閥開關	井頭絕對壓力(bar)	蒸氣質量流率(kg/h)	密度(g/cm ³)	井頭溫度(°C)
2020/01/17	全開	2(全開)	1.8	2580	0.00103	117
	全開	2(半開)	2.3	1270	0.0013	125
	全開	2(微開)	2.5	500	0.00138	126.7

五、結論

本研究建立兩相流體流量驗證設備，以評估科氏力式流量計應用於地熱兩相流體產能量測之可行性。實驗結果顯示，科氏力式流量計對於空泡分率 6 % 以下的氣-液兩相流體之體積流率量測誤差約為 (0 至 -6) %，因流量計量測之空泡分率與理論空泡分率相當接近，因此可藉由實驗得到的量測器差做後續案場實測時的量測值修正。此外，低頻科氏力式流量計在空泡分率 5 % 以下的兩相流體的體積流率量測上仍具備可接受的量測誤差。

本研究實際使用低頻科氏力式流量計量測新北市溫泉井時，當溫泉井幾乎為蒸氣態時，量測密度與質量流率之數據頗佳。於臺東縣金崙地熱區溫泉井量測結果顯示，當蒸汽中含少量水時，科氏力式流量計仍可獲得較佳的量測結果。

本研究另使用低頻科氏力式流量計量測新北市溫泉井流量，兩次量測結果皆相當接近，顯示流量計量測再現性佳。

使用科氏力式流量計做地熱產能測試，具備移動性佳、準確度高與空間限制性低之優勢，且於完成產能評估後可持續執行線上流量即時監控來進行地熱井生產週期的評估，為一相當具有潛力的量測工具之一。

六、參考文獻

- (一) Grant, Malcolm & Bixley, 2011, Geothermal reservoir engineering – 2nd Edition. Academic Press.
- (二) Fernando et al., 2015, Review of the State of Art in the Design and Evaluation of Geothermal Steam Separators, Proceedings World Geothermal Congress, Melbourne,

Australia, 19-25 April.

- (三) Ravazdezh, 2015, A study on operation and maintenance of flash steam geothermal power plants: Reykjanes power plant, UNU-GTP, Report 31.
- (四) Hirtz et al., 1993, Enthalpy and mass flowrate measurements for two-phase geothermal production by tracer dilution techniques, Proceedings of Eighteenth workshop on geothermal reservoir engineering, Stanford, California, January 26-28.
- (五) Micro Motion®, 2018, Emerson, Multiphase flow in Coriolis mass flow meters – identifying multiphase conditions and remediating errors, White Paper WP-002159.
- (六) Micro Motion®, 2017, Advanced Phase Measurement, Application Manual, MMI-20030076, Rev AB, February.

高精密度電力分析儀安規檢測設備介紹

電磁相容科 技士 張致瑄

一、前言：

隨著積體電路製程進步，於單位面積中所含的電晶體數也隨著時代增長。這意味著，在同樣的空間中，電子設備的功能會越來越豐富、處理速度越來越快，而功耗，卻越來越低！特別是這十幾二十年來，除個人行動通訊裝置有顯著進步外，智慧家電影音設備等，更導入許多互聯功能，正式宣告智慧家庭時代已經來臨。

本局現正執行「新世代能源科技標準計量檢測驗證計畫」，規劃智慧變流器安規檢測技術建置，針對智慧變流器產品之運轉安全方面進行檢測，確保產品符合檢驗標準需求，預計每年提供變流器及太陽光電驗證服務案達 125 案，於此計畫下增購高精密度電力分析儀 1 台，以提高測試效率。



圖 1 高精密度電力分析儀

二、儀器操作簡介：

本儀器具 7 檔以上量程，可量測電壓電流範圍分別為 1.5V~1000V 及 5mA~5A，不同檔位可量測不同區間之訊號，可使測試人員不需經常改變配線及配置，提高測試效率。



圖 2 具 7 檔以上量程及寬範圍電壓量測



圖 3 搭配比流器後可大幅提高量測直流/交流電流範圍

除量測直流/交流電壓及電流外，本設備最重要的規格便是精確度，如表 1 所示。量測精確度係讀數所產生之誤差加上量程誤差。一般而言，資訊影音設備及居家用電設備，使用最多的頻率即是 DC 直流(0Hz)以及 60Hz 兩個範圍，主要是因為我國電力系統為 60Hz，舉例來說，諸如吹風機、電腦、微波爐等皆為 110V、60Hz 用電，而手機、平板、行動電源等係將交流市電透過小型交流轉直流變壓器變壓後進行充電，因此在檢測上此二頻率使用率會高於其他頻率。不難發現，在此兩頻率下，儀器本身所設計之精確度會高於其它者。較高的精確度使檢驗人員在判讀上能更有信心，亦避免日後因精確度不高導致之數據爭議。

在理論上，雖我國使用 60Hz 之交流電力系統，但在實務上，考慮輸電線電阻、電容、負載、大地效應等諸多因素後，市電不會剛好落在精準的 60Hz，而較可能操作於一個區間(如 58.2-61.5Hz)，為考量市電對於用電設備之影響，儀器本身亦具有寬頻帶諧波分析功能，基波頻率範圍 0.1Hz~300kHz、分析頻率範圍 0.1Hz~1.5MHz。我們知道，任何訊號皆可拆解成直流、正弦及餘弦之級數疊加，除去理論值 60Hz 之訊號後，即為電路中的諧波成分，分析高/低階諧波對受測設備之影響，對於未來越趨於精密之電子零器件等，更是必不可少的。

表 1 儀器在不同頻率下之量測精確度

頻率(f)	量測精確度
DC(0Hz)	±(讀數的 0.02%+量程的 0.05%)
0.1Hz≤f<10Hz	±(讀數的 0.03%+量程的 0.05%)
10Hz≤f<45Hz	±(讀數的 0.03%+量程的 0.05%)
45Hz≤f≤66Hz	±(讀數的 0.01%+量程的 0.02%)
66Hz<f≤1kHz	±(讀數的 0.03%+量程的 0.04%)
1kHz<f≤10kHz	±(讀數的 0.1%+量程的 0.05%)

頻率(f)	量測精確度
10kHz<f≤50kHz	±(讀數的 0.3%+量程的 0.1%)
50kHz<f≤100kHz	±(讀數的 0.6%+量程的 0.2%)
100kHz<f≤500kHz	±(讀數的(0.006×f)%+量程的 0.5%)
500kHz<f≤1MHz	±(讀數的(0.022×f-8)%+量程的 1%)

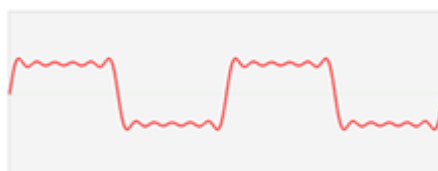


圖 4 帶有諧波之訊號

由於智慧變流器可連接應許多發電元件，因此其輸出之最大理論功率會與其連接之元件數量成正比，因此若要對變流器進行量測，則量測儀器之可輸入之最大功率必不能太小，否則試驗可能存有不完整之疑慮。如圖 5 所示，至少 5kW 的量測功率，可確保變流器在大功率輸出下的量測功能。更甚者，搭配比流器將受測元件之電流等比例縮小後，可使儀器本身可量測之最大功率大幅度地提升，並具有保護儀器本身不被大電流損壞之功效。



圖 5 功率量測

如圖 5 所示，儀器本身採用直覺易使用的彩色觸控螢幕，此外，量測功能採用模組化設計，在後續維修上，於故障發生之際無需添購全新機台，僅需將發生故障之模組送修或替換即可。再者，易添加、改變模組配置之設計，使其可透過模組變換而有不同量測功能，如量測單相雙線、單相三線、三相三線等不同配線，亦或是步進馬達、伺服馬達、溫度變化等，皆是可以做到的。

最後，分析儀本身可透過 USB、Ethernet、GP-IB 通信介面使用 PC 進行操作、擴充等，如此一來，即可在花費最少的情形下，完成功能擴充，而無採購新儀器之必要，使經費合理地最大化運用。



圖 6 模組化設計與 I/O 模組

三、結果與討論：

- (一) 高精密度電力分析儀可搭配原廠開發之軟體進行操作，並可直接將量測取得之大量數據儲存於數據採集模組，以供日後比對使用。
- (二) 傳統判定智慧變流器是否得通過性能檢測，係根據人眼判讀檢測設備之數值，然而若是數值恰位於臨界點，則易造成檢測人員判讀困難，因此，本局作為產品檢驗判定單位，自然需使用檢測精確度較高之儀器，本局所購置之分析儀，最高精確度可達 0.03%，如此一來即可減少因人為主觀因素造成的檢測結果判定誤差，檢測結果則更具有公信力。
- (三) 本局依「新世代能源科技標準計量檢測驗證計畫」，規劃智慧變流器安規檢測技術建置，依所建置之能量實施性能檢測項目，除維持及確保目前變流器標準技術，更能提供綠能產業正向的成長與使用者的用電安全。

四、參考文獻：

- (一) 經濟部標準檢驗局、106 年 10 月 5 日、研擬「推動太陽光電模組用變流器產品標準檢驗證方案」專案報告。
- (二) Yokogawa Taiwan、Home/Products/Power Analyzers and Power Meters/WT5000 - Precision Power Analyzer、110 年 2 月 18 日檢索、取自 <https://cdn.tmi.yokogawa.com/BUWT5000-02EN.pdf>。