



井下測量技術

探明地表下地層資訊之現況 — 以成大資源工程系教學井為例

黃鈺祐／國立成功大學資源工程學系 研究生

吳泓昱／國立成功大學資源工程學系 助理教授

井下電測（以下簡稱井測）技術最早出現在油氣產業的探勘應用上，井測的優勢在於能夠取得連續性的地層資料，因此在資源探勘上井測是一種非常重要的技術手段，其可以利用在油氣、地下水、金屬、非金屬的探勘上。井測是透過物理學的方法和原理，利用各類岩石間不同的物理特性例如導電性、聲波、放射性等物理性質，透過專門的儀器取得連續的地層資料後，由專業人員以取得的井測資料為基礎，進一步推估地層的狀況，並規劃適當的開發方案。

井測現有方法

電阻電測（Resistivity log）

電阻率為一種基本的材料特性，其用來表示材料抵抗電流的強度，大多數造岩礦物本質上是絕緣體，而它們封閉的流體是導體。所有的傳導都經由液相進行，因此電阻主要取決於孔隙流體及其鹽含量。碳氫化合物是一個例外，因其具有無限大的電阻。當地層是多孔的並且含有鹽水時，總電阻率會偏低。當地層中含有烴類亦或是孔隙度較低時，其電阻率會偏高。電阻率也是孔隙水相對於岩石體積的量（孔隙率）和岩石中孔隙分佈（滲透率）的函數^[1]。電阻井測必須在含有可導電的鑽井泥漿的作為導體的狀態下使用，每個電阻值取決於鑽井泥漿深入地層的程度，電阻井測原理為電極使電流流經地層，透過不同地層具有不同的材料特性，測出地層之電位差，再利用歐姆定律計算而得到該地層之電阻率，電阻率單位為 $\text{ohm}\cdot\text{m}^2/\text{m}$ 或 $\text{ohm}\cdot\text{m}$ (Ωm)。而地層的電阻率取決於地層水的電阻率、存在的水量以及孔隙的結構和幾何形狀，可表示為式 1。

$$R = \frac{r \times A}{L} \quad (1)$$

式 1 中的 R 為電阻率 ($\text{ohm}\cdot\text{m}$)， r 為電阻 (ohms)， A 為橫截面面積， L 為電流流經的長度 (m)^[2]。根據電流極與測定極的間距，電極間的距離越大能夠測得的地層範圍距離越大（與井口的水平距離越遠），其測得的垂直解析度越低。

聲波井測（Sonic log）

聲波測井工具是由一個聲波發射器及一個或多個聲波接受器組成，從聲波發射器每秒發出一個聲波，將聲波傳入井周圍的地層後，在距發射器幾英尺的接收器中接收到發出的聲波，並記錄地層中聲波的速度（圖 1）。聲音到達接收器間經過的時間差是所需的傳播時間，聲波在經歷發散（波能在時間和空間上的傳播）和衰減（通過地層吸收能量而損失能量），其速度取決於地層中岩石的孔隙分佈及膠結物的性質，正常情況下孔隙越大，聲波在岩石的間隔傳遞時間越長，依此可估算地層的孔隙率。而聲波井測並非直接測得

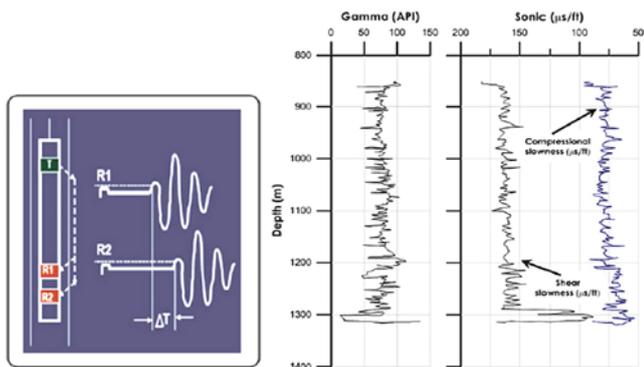


圖 1 針對砂岩－頁岩層序的聲波和伽馬井測資料及聲波井測工具示意圖 [2]

孔隙率，而是慢度（Slowness）常使用的單位為 μ/m 。由於水中的聲速（此處指孔隙水）遠低於礦物和岩石中的聲速，因此測得的聲波大多數與岩石孔隙率成反比。在砂岩中，少量的膠結物可能會產生具有高強度和速度的顆粒，儘管保留了相對較高的孔隙率。在泥岩和頁岩中，孔隙度和速度會隨粘土礦物和碳酸鹽或石英膠結物的存在而產生較大的變化 [2]。

伽馬井測（Natural Gamma Ray log）

伽馬射線（Gamma Ray, GR）測井為量測地層中自然伽馬輻射，伽馬井測之優勢在於可穿透鋼製或水泥套管，常用單位為 API [3]。伽馬輻射源自鉀（K40）和鈾－釷和釷系列的同位素，鉀是三種元素中含量最多的，相對於其重量，鉀對總放射性的貢獻佔比較低。三個元素皆會自然發射伽馬射線。它們發射能量很大但沒有質量和電荷的光子。伽馬射線的特徵之一是當它們穿過任何材料時，它們的能量會逐漸被吸收。這種效應被稱為康普頓散射，因伽馬射線和電子間的碰撞產生能量衰減。伽馬井測可被用來判別地層岩性、估算頁岩體積、沉積環境的分析。

伽馬井測的一個主要應用是區分不同的岩性（圖 2）。雖其不能單靠伽馬井測來定義地層岩性，但伽馬井測提供的訊息可與其他井測提供之訊息結合作判識。富含有機質的頁岩和火山灰顯示出最高的伽馬值，而岩鹽、硬石膏、煤、潔淨砂岩、石灰岩和白雲石的伽馬值最低。頁岩和砂岩、碳酸鹽岩之間的這種放射性差異使伽馬井測能夠區分頁岩和非頁岩。因大自然並非制式化的生產線其會產出各式各樣不同的岩石，例如乾淨的砂岩可能含有長石（長石砂岩）、雲母（雲母砂岩）或兩

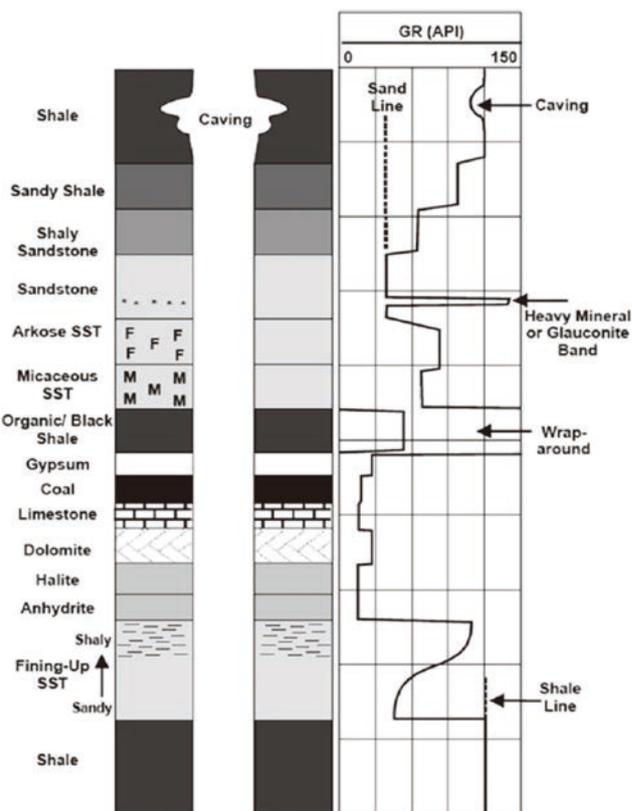


圖 2 常見岩性伽馬射線測井影響 [4]

者兼有（雜砂岩）、海綠石或重礦物，其中任何一種都會使砂岩具有比純石英岩預期更高的伽馬射線值砂岩。特別是黑色頁岩（例如煙源岩），由於其大量有機物含量，在伽馬射線測井中產生顯著影響，因為其通常比其他頁岩具有更高的鈾含量。以北海的 Kimmeridge（上侏羅紀）頁岩為例，其含有 2 ppm ~ 10 ppm 的鈾，通常被稱為「熱頁岩」（Hot shale）。通常頁岩含有 <1 ppm 的鈾，但含有 10 ppm ~ 12 ppm 的鈾，佔總放射性的約 50%。石灰石的 U、Th 和 K 濃度非常低，伽馬射線響應也非常低。然而，在蒸發岩序列中，伽馬測井是鉀鹽非常敏感的指標。

伽馬井測有助於識別地層薄層，因此廣泛用於不同測井作業之間的岩性對比和深度匹配。如前所述，伽馬井測通常用於測量地層的頁岩含量。實際上，頁岩含量往往不是突然變化的，而是隨著深度逐漸變化的。這種逐漸變化代表了岩石的岩相和沈積環境，且受相和沈積環境控制的粒度和分選的變化有關。圖 3 分析了各種沉積環境的伽馬井測影響的形狀。圓柱形代表均勻沉積，並被解釋為風成沙丘、潮汐沙、河流和濁積岩通道以及近端深海扇沉積。鐘形代表向上變

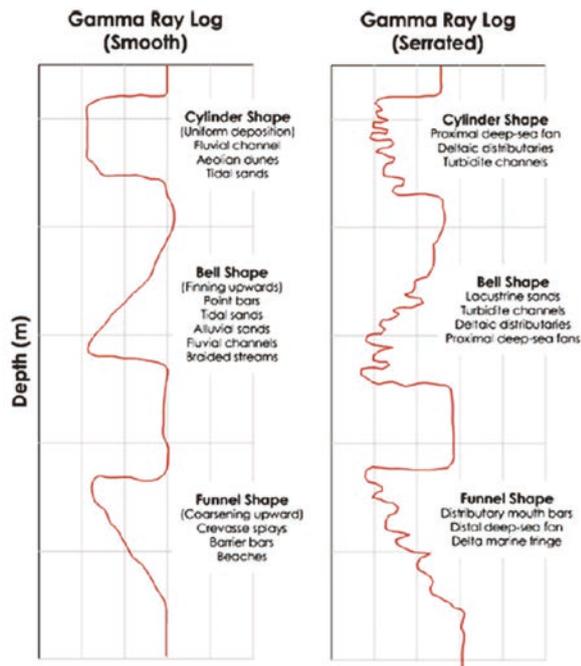


圖 3 伽馬井測影響及其在解釋沉積相和沈積環境中的應用 [2]

細的順序，並被解釋為潮汐砂、沖積砂、河流通道、河曲沙洲、湖泊、三角洲、濁度通道和近端深海扇沉積。漏斗形狀表示向上粗化序列 被解釋為堰洲、沙灘和決口扇、分流河口沙壩和遠端深海扇沉積 [2]。

高解析度超音波攝影 (High Resolution Acoustic Televier)

使用高解析度超音波攝影可生成連續且定向的 360 度井壁視圖，從中可以定義地層結構特徵、關係和方向 (圖 4)。

高解析度超音波攝影內有設置 0.5 MHz ~ 1.5 MHz 的訊號傳感器，紀錄聲波的傳輸時間及振幅，收回的聲波信號被記錄為依方位排列之時間-震幅集成的圖像，時差數據可用於生成高解析度之井下影像 (圖 5)。常用的 Acoustic Televier (ATV) 工具。

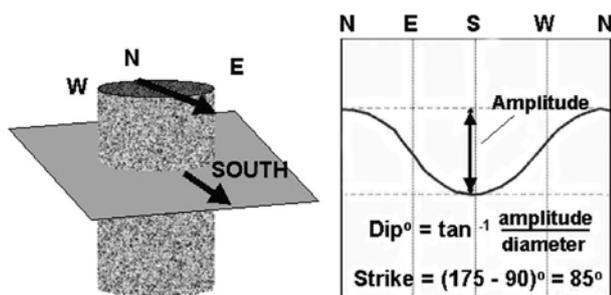


圖 4 井內定向 360 度圖像和方位角和傾角計算 [5]

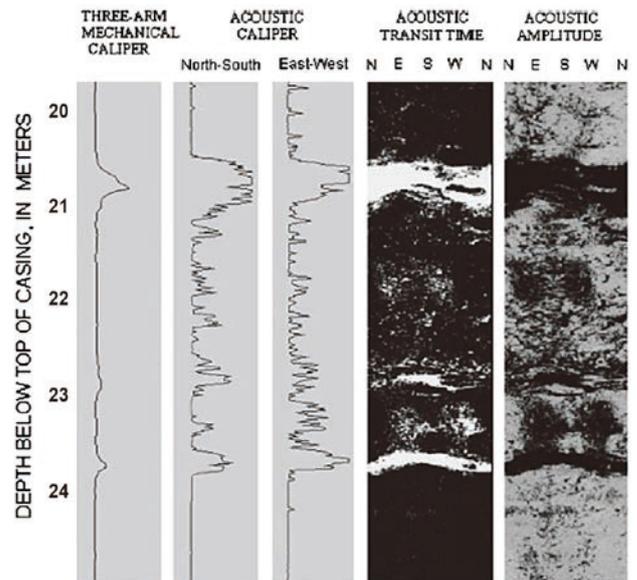


圖 5 150 毫米直徑鑽孔中的三臂機械和聲學測井儀測井以及聲波時差和振幅電視圖像 [5]

成功大學資源工程學系教學井

教學研究井設置目的

成功大學於資源工程學系系館周圍設置一口研究教學井其深度為 100 m (圖 6)，而其目的以教導學生對於地球物理調查及地層資料收集為主要教學目標，並配合相對應的實習課程如地球物理探勘、井測學、高等油井測估、水文學、岩石力學、大地工程學、觀測地震學等專業且跨領域的課程，藉由此教學井的設置，使學生充分的了解地球物理調查與及工程地質上實際的測量流程、資料處理及解析。教學研究井除了教學用途外，也進行了地層速度與地層透水性相關監測、地下水成分與組成、台南台地之沉積環境分析、成功大學地表抬升監測、教學井下地層抬升速率監測、台南台地近地表之岩石土壤力學參數設定、三維大地電磁與地電阻之測量等相關研究項目。

台南地區地質概述

台南地區地層主要為新第三紀碎屑狀沈積岩，多為淺海相至濱海相的沈積環境，該地質環境中所含的化學性或生物性沉積岩不多，僅有不規則之石灰岩體夾雜於不同層位中。台南地區的地面地質主要為現代沖積層 (如圖 7)，東側周緣之丘陵地則出露上新世至更新世之地層，有卓蘭層、古亭坑層、頭嵙山層及台地堆積層；丘陵以東之山區 (大尖山斷層及左鎮斷層

之東側) 則出露中新世至上新世之地層, 有南莊層、桂竹林層、卓蘭層及頭崙山層。

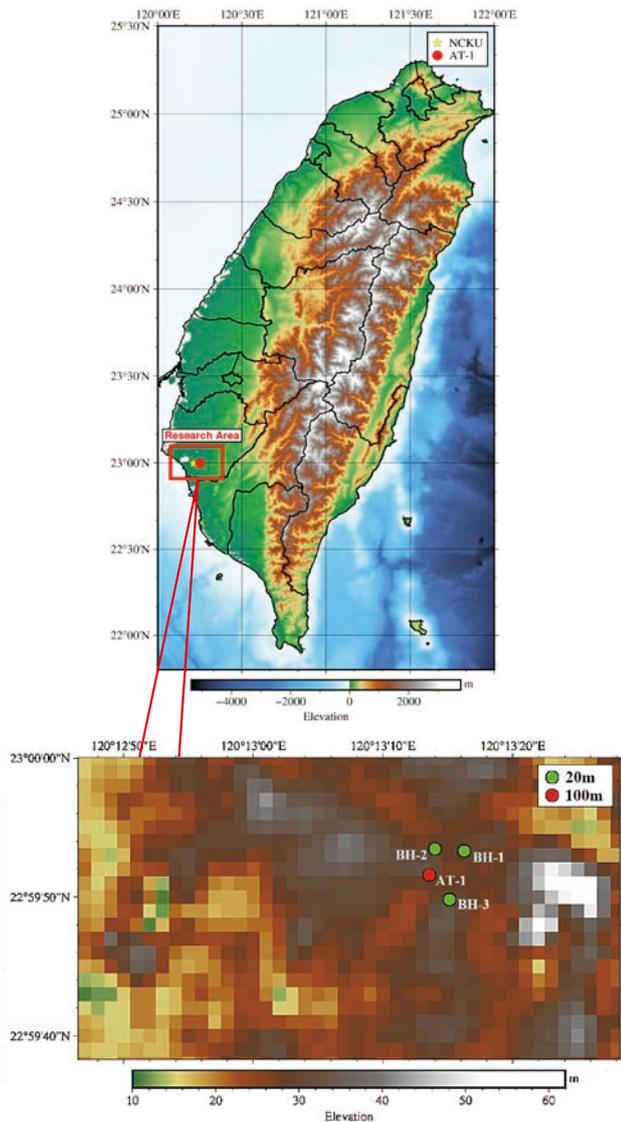


圖 6 成功大學資源工程學系教學井井位圖



圖 7 臺南地區區域地質圖 [6]

施作之井下測量項目

此次測量使用了三種不同的井測探測儀器, 分別是傳統式地球物理井測、聲波井測、井下超音波影像。

傳統式地球物理井測

探針長 3.1 公尺、直徑 44 毫米 (參見圖 8a), 由五個電極與一個自然伽馬感測器組成, 能夠在 0 ~ 70°C 及約 204 Atm 大氣壓之溫壓下進行作業, 量測的項目包含:

- (a) 自然伽馬 (Natural Gamma-ray, GR)
- (b) 電阻率 (Resistivity, RES)
- (c) 井下溫度 (Temperature, Temp)
- (d) 自然電位差 (Self Potential, SP)

聲波井測

探針長 2.8 公尺、直徑 45 毫米 (參見圖 8b), 由一個發射器與三個接收器組成, 能夠在 0 ~ 70°C 及 204 Atm 的溫壓下進行作業, 量測的項目包含:

- (a) 自然伽瑪 (Natural Gamma-ray, GR)
- (b) 聲波波形圖 (Waveform)
- (c) 聲波到時 (TX-RX1/2/3)

井下超音波影像

探針長 1.6 公尺、直徑 48 毫米 (參見圖 8c), 由一組超音波發射器及接收器組成, 能夠在 0 ~ 70°C 及約 204 Atm 的溫壓下進行作業。量測的項目包含:

- (a) 傳遞時間 (Travel time)
- (b) 振幅 (Amplitude)

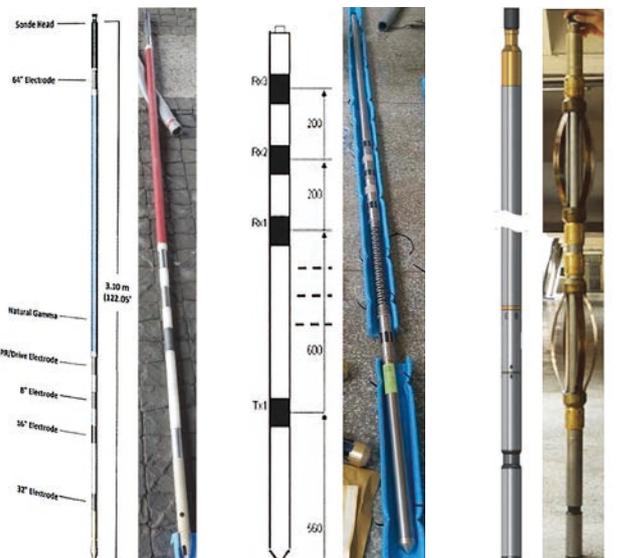


圖 8 三種井測儀器示意圖及實體照片

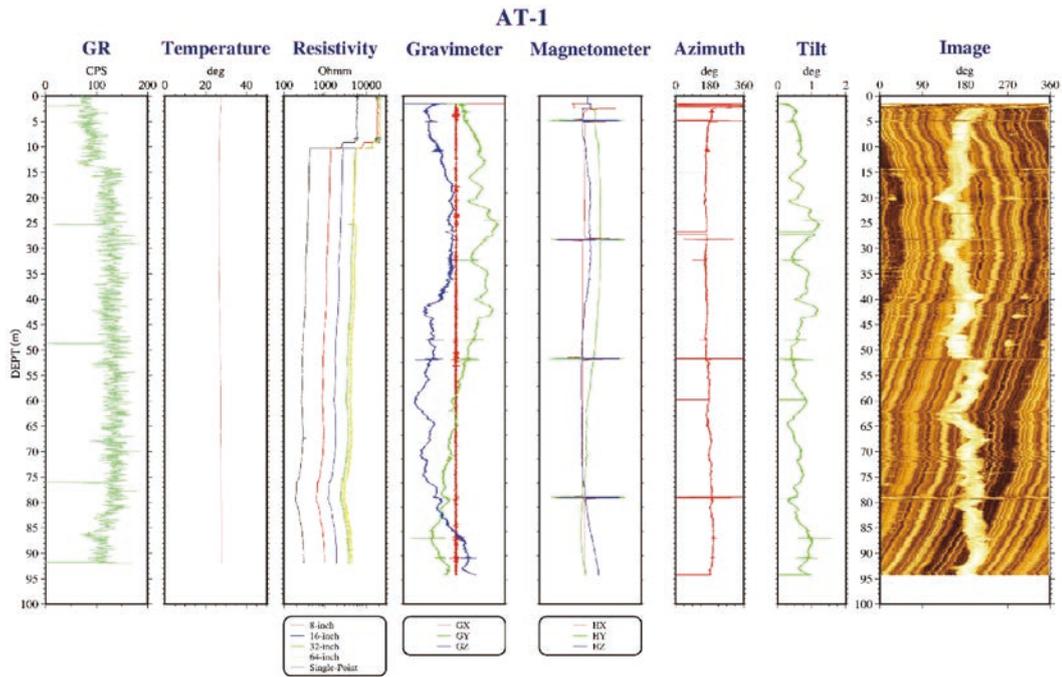


圖 9 教學研究井測資料

超聲波影像的方位需透過井孔當下的方位與傾角進行校正，而探針內設置三軸加速度計與磁力計，透過軟體計算可以得到井偏（Azimuth）與傾角（Tilt）。

井測資料處理及結果呈現

本團隊利用相關的商用井測資料處理軟體處理蒐集到的井測資料。井偏（Azimuth）及井斜（Tilt）是由探針內建的三軸磁力計及加速度計的資料計算得出，其結果呈現如圖 9。在 Natural Gamma Ray（GR）的讀值中我們可以發現在 GR 值在 13 m 處開始明顯上升，這代表 13 m 以上的地層其可能為透水性較佳的透水砂層，從 13 m 至 80 m 處 GR 值相對較高其可能為透水性較低之頁岩或泥岩。80 m 以下之深度 GR 值有逐漸降低之趨勢，判斷其可 80 m 至 92 m 以下之地層逐漸從透水性低的頁岩或泥岩轉變成透水性較佳之砂岩層。在設置有磁環的位置處，GR 及磁力計（Magnetometer）之讀數產生較大的變化，日後可藉由定期的量測得到地層的壓縮量以瞭解地層不同深度之沉陷變化。

結論

井下電測技術隨著科技的進步，讓我們逐步可以得到地表下高解析度的資料，從初步只能依靠單一井測資料去猜測地層的岩性，到可以運用高解析度超音

波攝影圖像去判別地層的裂隙、傾角走向等地層資訊。這項技術在現代的油氣探採上早已成為鑽探過程的必要工作之一，井下電測技術近年來也運用到地下水資源的調查及工程地質的研究中，近期台灣在地熱能源開發上遭遇到地熱可開發資源不明確的議題，井下電測技術可以針對這項議題提供相關的地層資訊建立相關的地質模型進行儲集層的分析及模擬。進行井下電測技術的測量如同醫生，此技術就是地質學家們的聽診器，透過測得的資料幫助了解地層的真实狀況，並給出最適合的診斷方式去開發、探採。

參考文獻

1. MONDOL, Nazmul Haque. (2015). Well logging: Principles, applications and uncertainties. *Petroleum Geoscience: From Sedimentary Environments to Rock Physics*, 385-425.
2. GLOVER, Paul WJ. (2000). *Petrophysics*. University of Aberdeen, UK, 270.
3. KEYS, W. Scott, et al., (1971). *Application of borehole geophysics to water-resources investigations*. Washington, DC: US Government Printing Office.
4. Rider, M.H. (2004). *The Geological Interpretation of Well Logs*. Blackie, Glasgow, 280 pp.
5. Williams, J.H. and Johnson, C.D. (2004). Acoustic and optical borehole-wall imaging for fractured-rock aquifer studies. *Journal of Applied Geophysics*, 55(1), 151-159. doi:https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2003.06.009
6. 經濟部中央地質調查所 (2000)，台灣地質圖，五十萬分之一。