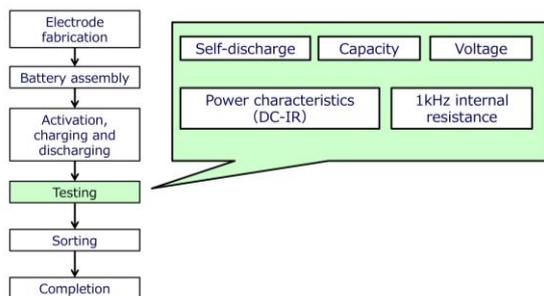


## 從 1 個小時縮短至僅需 10 秒: 使用低頻 AC-IR 法更快且更穩定, 取代測試鋰電池的 DC-IR 法

鋰電池正逐漸成為隨身電子設備的關鍵技術, 其製造商爭先恐後地提供自家產品, 並同時設法盡快改善提高品質, 以滿足市場上嚴格的應用需求。

此文章討論傳統測試鋰電池的 DC-IR 法的不足之處, 並提供另一替代方法, 可縮短測試時間至 10 秒, 卻仍能維持測量的精確度和穩定性。

最近鋰電池應用的發展已逐漸活躍起來, 也在各種應用中廣泛被使用。鋰電池的特性會隨著所使用的電池應用而變化, 範圍從小型電池像是在低容量的智慧型手機到高容量低內部電阻的大型電池。形成因素也會因不同的應用而有所變化, 從標準化的圓柱 18650 到層壓和廂型電池。



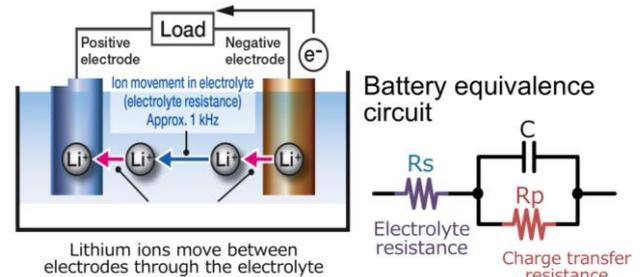
圖例 1: 電池的生產流程

圖例 1 描述電池的生產過程。一般來說, 鋰電池透過這裡所示的流程製造而成的。首先, 電極和其它部件被製造, 電池被組裝。之後, 透過電池的充放電來啟動。這時, 一顆有效的電池就這樣誕生了。

接下來, 電池會被測試並根據其特性被分類, 在此階段表示製造過程大功告成。然而, 製造商正面臨許多測試過程的問題。其中一個成問題的測試為輸出特性測試(也就是 DC-IR 測試)。而製造商首要面對的問題為週期時間和穩定性, 是傳統的測試方法一直沒有解決的。

整體來說, 要測量電池內阻有兩種方法: DC-IR 法和 AC-IR 法。更常見的電池測試方法是用

DC-IR 方法來測輸出特性, 而 1 kHz AC-IR 方法是用來測內阻。



圖例 2: 鋰電池原理  
在電極表面的電荷轉移阻力化學反應  
約 1Hz

### 電池內阻

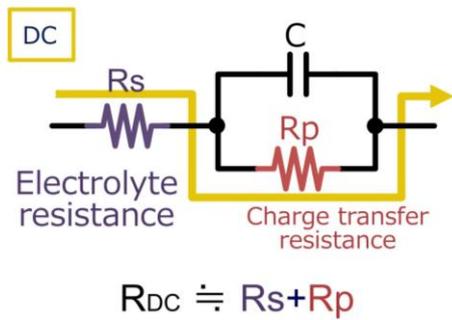
當電流通過電池時, 在電池內所產生的化學反應, 如圖例 2 所示。首先, 鋰離子從負電極內移動到電解質。隨後, 會通過電解質移動至正電極。最後, 再從電解液移動至正電極內。

這些反應可被認為是圖例 2 的右側所示的等效電路。對電池內阻的認識對辨別發生於電池內部的化學反應有所幫助。

### DC-IR 與 AC-IR 測量方法

在 DC-IR 測量方法中, 一個急劇的電流負載被置於零負載狀態的電池中, 產生的壓降可經測量過後計算出電阻值。

在等效電路中, 因為電容器未通過直流電流, 電流會與電解質電阻通過電路和電荷轉移電阻, 如圖例 3 所示。因此, 測量電阻值  $R_{DC}$  結合了電解質電阻和電荷轉移電阻。此測試是用在生產工廠, 衡量輸出特性。



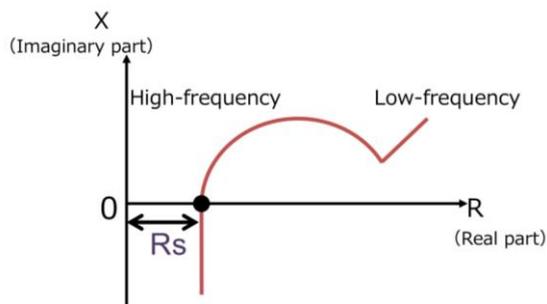
圖例 3: 電流等效電路的流動

廣泛被使用的 DC-IR 測量方法有很多的問題。首先，測量需要預先將電池充電。因為一個大的直流電流在測量期間通過，電池必須在測試前充電。此過程需要一個小時的時間。接下來，測量值呈現出不穩定性。該電壓值必須在施加負載後立即進行監測的時間點是較棘手的，且測量值阻擋了穩定性。最後，DC-IR 方法需要複雜的設備。測試用在汽車的大型電池可能要 100 A 或以上的電流。此任務也需要較大型的設備。

在 AC-IR 方法中，被施加在電池的 AC 訊號和電池內阻進行測量。這方法最著名的特點就是其測量的電阻類型是可以藉由改變頻率而變化的。

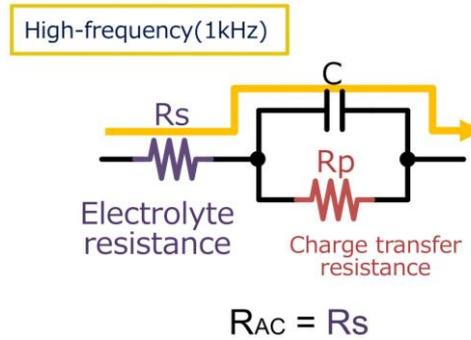
### COLE-COLE 圖

在研發部門，工程師使用圖形的方法，叫做 Cole-Cole 圖例，掃頻、頻率範圍以及繪製阻抗的實部和虛部。Cole-Cole 圖的設計可被用來估計內部電阻。



圖例 4: Cole-Cole 圖

例如，如果是要取得電池的電解質電阻，其阻抗在高頻率之下被量測。因為電容器表現出高頻率的低電阻，測量電流將路徑如在圖例 5 所示。電解質電阻與 R 值相應，其在 Cole-Cole 圖的 X 值達到零。

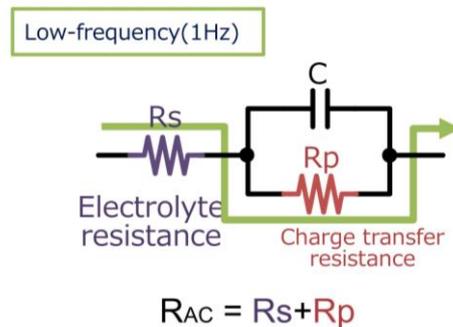


圖例 5: 高頻率中的電流流動

如果目標是要取得電荷轉移的阻抗，阻抗在低頻首先被測量。因為電容具有比低頻率更高的阻力，測量電流路徑如圖例 6 所示。如此一來，測量值是電解質阻抗和電荷轉移阻抗的總和。藉由減去先前於高頻下測得的電解質阻抗結果，可以去計算出電荷轉移電阻的值。

### 低頻 AC-IR 測試

目前，AC-IR 測量在生產設定為僅在頻率 1 kHz 執行，但低頻測量未使用。因為電荷轉移電阻的效果可通過進行低頻 AC-IR 測量，其被視為具有 DC-IR 測量的方法，低頻 AC-IR 測量可被視為一種可行替代 DC-IR 測量的方法。



圖例 6: 電流在低頻的流動

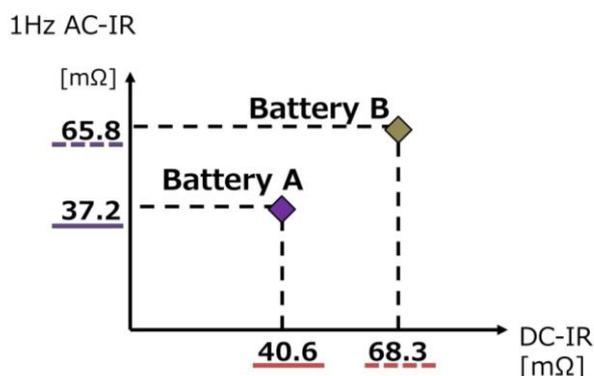
使用低頻 AC-IR 測量法替代 DC-IR 測量法有許多優點。首先，因為沒有預先充電的需要，它可大大減少週期時間。原本可能需要幾十分鐘的測量可以減少至僅僅 10 秒的時間。除此之外，低頻 AC-IR 測量法提供具有增加穩定性的測量值。最後，因為 AC-IR 法與 DC-IR 法相比，僅需要極小的電流來進行測量，不需要為了設備繪製大電流。要用 DC-IR 方法測量 100 A 的電流，可以只用 1.5 A 的電流，即可進行。

### 低頻 AC-IR 法與 DC-IR 法的比較

原則上，很明顯地，同樣的電池現象正被 DC-IR 和低頻 AC-IR 法測量。查看通過這兩種方法：DC-IR 測量值和 18650 型圓筒電池的 AC-IR 測量值進行比較，所得到的測量值是否實際相關。

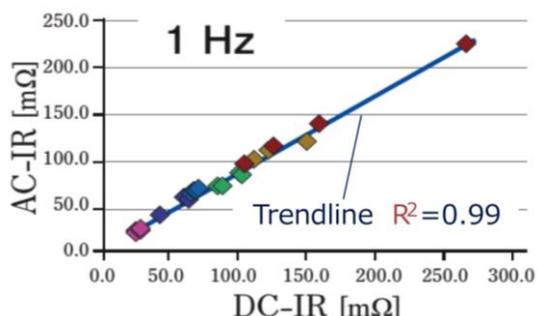
首先，測量的曲線圖繪製了水平軸為 DC-IR 測量值和在縱軸上 1 Hz 的 AC-IR 測量值，如圖例 7 所示。觀看電池 A 的結果，DC-IR 測量值 40.6 mΩ 和 1 Hz AC-IR 測量值 37.2 mΩ 可被繪製成圖表上的紫色點。

同樣地，電池 B 的 DC-IR 測量值 68.3 mΩ 和 1 Hz AC-IR 測量值 65.8 mΩ 可被繪製成圖表上的藍色點。



圖例 7: 使用 DC-IR 和 1Hz AC-IR 測量法測試的電池

在圖例 8 顯示進行同一測試的 24 鋰電池。24 點形成的趨勢線，可以很清楚看到兩種方法之間有高度的相關性，低頻 AC-IR 測量是有效的，可替代 DC-IR 測量。



圖例 8: 使用兩種方法測試的 24 鋰電池

### 低頻 AC-IR 測量儀器的發展

此項發現已促進電池測試的低頻 AC-IR 測量儀的發展。不需在測試之前進行電池充電，目標是發展出一台僅 10 秒即能測量鋰電池的儀器。另外，

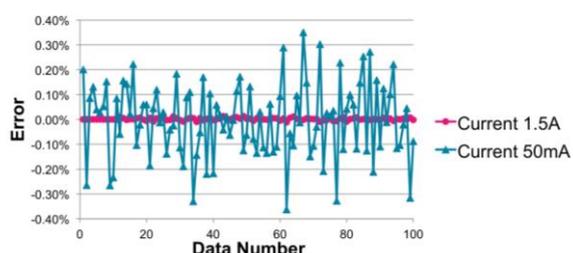
一項產品能提供 0.1 Hz 到 1050 Hz 的測量頻率以及測量低阻抗值的大型鋰電池，高精度度能提供須供給範圍廣泛產品的廠商一個理想的解決方法。

### 提供精確且穩定測量的挑戰

AC-IR 測量法的優點是清楚，包括大大加快週期時間與更輕巧的設置。然而，更大的挑戰是如何使一項儀器可以提供高精度且穩定的測量。要達到這點，有三件事是特別必須要解決的。

### 測量電流

首先，要改善儀器的信噪比。要做到這點，電池測試器被給予最大測量電流 1.5 A。圖例 9 說明了 100 項測量的變化性，每一項包括接觸，然後測量，電池具有約 0.65 mΩ 的電阻值。

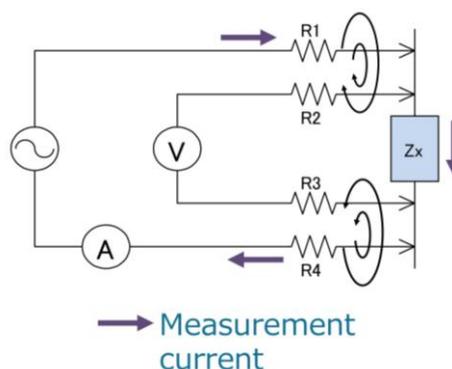


圖例 9: 重複性測試中使用 2 種不同的測量電流

藉由使用 1.5 A 的測量電流，變化率限制於約  $\pm 0.02\%$ ，使可能穩定測量電池阻力值低於 1 mΩ。

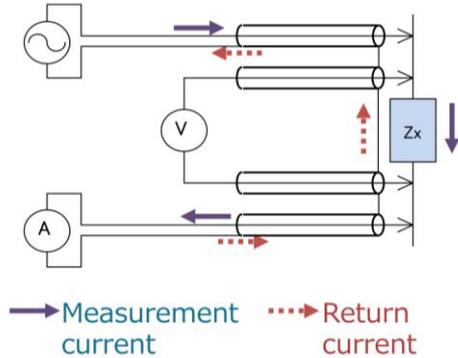
### 四端對測量法

第二個問題是測量方法本身。一般來說，當測量低電阻阻值時，會使用 4 端點測量法。在這個方法中，測量電流會追加在電流端，穿過測量目標的壓降會在電壓端被測量。此測量方法較不易受探針接觸電阻的影響。然而，因為它不維護針對由測量電流而產生感應場，感應場在當它進入顛壓端環時，成為測量誤差。



### 圖例 10: 四端點測量法

要解決此問題，一項更有效率的方法為四端對測量法，此方法也是一種更可行的解決方案。在此種測量法中，同軸線是用來消除藉由相反方向的測量電流流動所產生的感應場。



圖例 11: 四端點測量法

四端點測量法因而能夠進行小於 10 mΩ 的超低阻抗值與高精確度的測量。

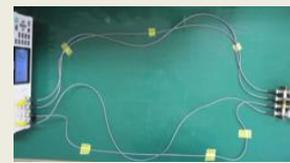
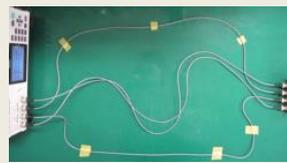
出於這個原因，考慮以下三個必要條件是重要的：分隔定位電壓端和電流端，使它們之間保持距離不變，並使用基於點的接觸。

全新設計的夾子和針型探針是圍繞這三個必要條件而設計的。圖例 13 表示夾式探針是與疊層電池使用，而圖例 14 顯示，針型探針是為與各種電池有良好接觸而設計的。



圖例 13: 新開發的夾式測量探針間距相隔甚遠，保持恆定的距離

圖例 12: 四端對法及四端點法的比較



	線路 1 (reference)		線路 2		線路 3	
	R	X	R	X	R	X
四端對測量法	0.0000 mΩ	0.0000 mΩ	-0.0002 mΩ	-0.0002 mΩ	-0.0004 mΩ	-0.0011 mΩ
四端點測量法	0.0001 mΩ	0.0001 mΩ	0.2636 mΩ	1.3292 mΩ	0.5806 mΩ	2.9014 mΩ

要調查四端對測量法的實際效果，對三根電線進行了測試，與作為參考的線路 (1)，或進行零調整的線路。如圖例 12 所示，在使用四端對測量法時，即使因電線不同而測量值變化小，在使用四端點測量法時卻變化顯著。四端對測量法的有效性在 AC 測量低電阻器件是顯而易見的。

### 測量探針

要達到測量的準確度和穩定度所面臨的第三個挑戰歸因於測量的探針。

當測量一個低阻元件，有必要謹慎注意測量端子的接觸。因為附近有電流端子陡峭電位梯度，測量值更容易波動，如果電流端子和電壓端子之間的距離而變化。



圖例 14: 針型測量探針與端子相隔恆定的距離

接觸方法對測量值影響的大小可經由比較圖例 15 傳統的鱷魚夾探針以及圖例 13 所示新開發的電線之間的再現性。傳統式探針夾作為電流和電壓端子，使測定對象夾在它們之間。夾子具有齒

邊，提供多點的接觸。



圖例 15: 傳統的電壓和電流測量端兩側皆被靠近間隔排列，並具有多點接觸

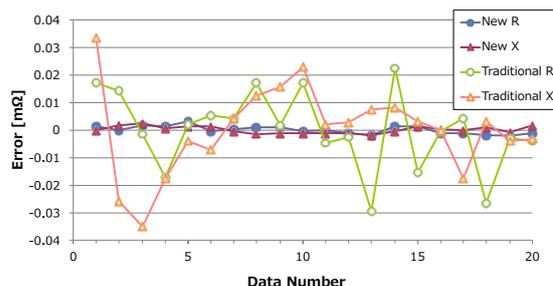
相反地，如同圖例 16 所示，新開發的夾式探針從夾子的底部延伸出一個電流端和一個電壓端，以便進行接觸，並同時保持端子之間的固定距離。夾子還包括一個止動件，以增加接觸位置的再現性。



圖例 16: 新開發的探測器提供基於接觸點和電壓和電流端子間的距離不變

接觸被重新建立為每 20 次的測量及結果的再現性，然後進行比較。測量對象是一個以電阻值為

1.4 mΩ 的疊層鋰電池。



圖例 17: 傳統夾式探針及新開發夾式探針的再現性比較

新開發探針獲得的結果顯示差平均值約 2 μΩ 的偏差，而傳統夾式探針顯示的差異值約為 40 μΩ。很顯然地，再現性的測量可藉由在接觸時觀察某些防範措施而獲得改善。事實上，這些注意事項對測量低阻抗電池以及有高精準確度是非常重要的。

低頻 AC-IR 法是一個有效替代 DC-IR 測量法的測量方法，在電池測試過程輸出特性。此方法可預期縮短生產設置週期時間，提高測量精度，以及縮小所需設備的尺寸。

Copyright © Akihiro Narusawa  
Hioki E.E. Corporation

[唐和股份有限公司](#)  
HIOKI 台灣獨家總代理