

大幅提升 DC 量測效能的實用指南

目錄

SMU 基本原理

SMU 運作原理

準確度

準確度與速度

脈衝

DC 量測最佳做法

使用遠端感測抵銷導線電阻的影響

補償偏移電壓

將外部雜訊降至最低

防範漏電流

了解校準的重要性

結論

在許多應用中，獲得準確的 DC 量測結果是常見的需求；但若只是購入高準確度的敏感儀器，尚不足以滿足此需求。各種不同的錯誤來源皆可能影響讀數的準確度。此外，即便只是對儀器設定進行微小調整，也可能會產生大相逕庭的結果。為了達到最高準確度，在利用各種方式克服錯誤來源時，您必須透徹了解儀器。

本指南說明了如何利用電源量測單元 (SMU) 執行 DC 量測作業。首先，從檢視儀器基本原理開始，接著讓您了解使用 SMU 的方式，並探討有助設定儀器的功能。隨後會說明關鍵的最佳做法，您可將其應用在測試設定上，進而減少進行 DC 量測時會發生的各種錯誤。本指南探討了在常見量測情境下的最佳做法，讓您了解應在何時、何處運用本文概念，藉此大幅提升效益。

SMU 基本原理

SMU 為精確的電源供應儀器，能進行電壓供應與量測作業，以及電流供應與量測作業。如此一來即可控制電壓與電流，靈活地根據歐姆法則計算電阻與功率。這些儀器提供 4 個象限的輸出，可整合雙極性電壓，且能汲極電力。由於具備前述眾多功能，可能較難以了解如何使用 SMU 進行所需的測量作業。

SMU 運作原理

SMU 的主要特點之一，是 4 個象限輸出所具備的靈活性 (圖 1)。其輸出可提供正電壓與正電流、負電壓與正電流、負電壓與負電流，或正電壓與負電流。在象限 1 與 3 中，SMU 為供應電力，而在象限 2 與 4 中，SMU 則汲極電力。供應電力指電路的激源，而汲極電力則是外部主動元件造成的電力溢散，例如穩壓器的輸出。圖 1 中所示的 IV 範圍，是實際儀器 IV 範圍的簡化版本。實際的 SMU 會延伸脈衝模式的 IV 範圍 (請參閱「脈衝」一節)。

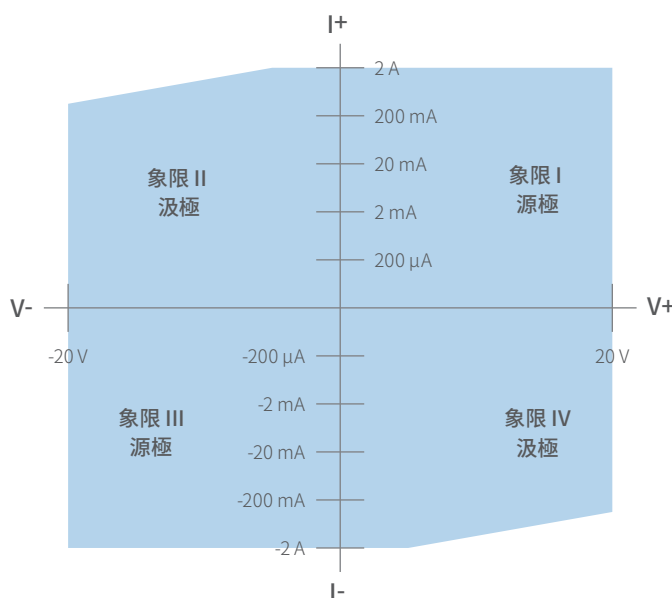


圖 1. 簡化的 SMU IV 運作範圍

大部分 SMU 皆能在恆定電壓模式或恆定電流模式下運作。在恆定電壓模式下，SMU 為電壓來源，並在電流輸出變化時維持輸出端點的電壓恆定。在此模式中，您可設定電流限制，確保 SMU 未驅入過多電流至受測裝置 (DUT)。例如，如果 SMU 連接至 20 k Ω 負載，而電流限制設定為 1.5 mA，您即可在電流限制範圍內從 0 V 至 20 V 掃頻電壓，如圖 2 所示。

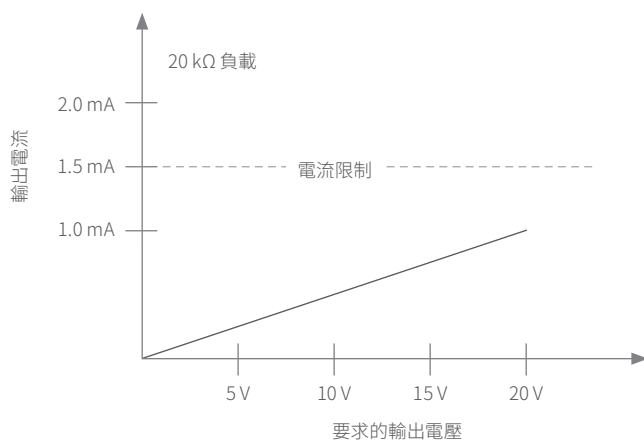


圖 2. 在恆定電壓模式下運作時，將 20 kΩ 負載之電流限制設定為 1.5 mA 時的 SMU 輸出

但是，如果負載為 10 kΩ，您將無法在不超過電流限制的情況下，從 0 V 至 20 V 掃頻電壓。您可利用歐姆法則，計算 SMU 何時會達到 1.5 mA 的電流限制。

$$V = IR$$

$$V = 1.5 \text{ mA} * 10 \text{ k}\Omega$$

$$V = 15 \text{ V}$$

根據上方的計算結果，在電壓輸出達 15 V 時，SMU 即會達到 1.5 mA 的電流限制。而在達到電流限制時，該通道就已符合限制值。當通道因已達到設定限制，而無法實現要求的輸出準位時，即會在符合限制值下運作。SMU 在符合限制值下運作時，即使要求的輸出電壓大於 15 V，實際輸出電壓也不會超過 15 V；圖 3 即說明了此概念。當 SMU 輸出達到 1.5 mA 的電流限制時，就已符合限制值，此時即便要求電壓大於 15 V，實際電壓也不會超過 15 V。此功能非常實用，適合用來確保 SMU 不會因供應過高電力而使 DUT 損壞。

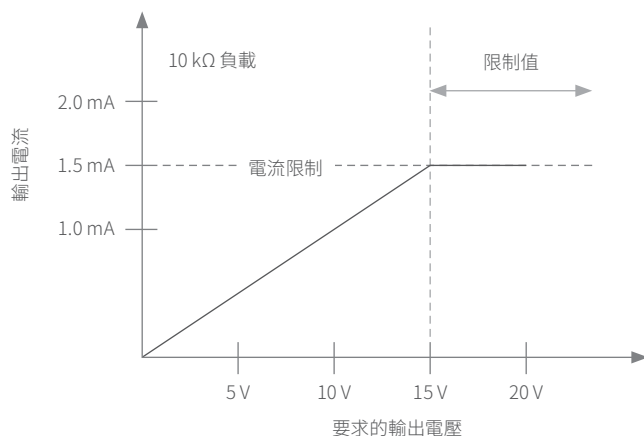


圖 3. 在恆定電壓下運作時的 SMU 輸出，此處 10 kΩ 負載在符合限制值的情況下運作

當 SMU 在恆定電流模式時，亦適用類似原則。SMU 為電流來源，並在電壓變化時維持輸出端點的電流恆定。在此情況下，您可設定電壓限制，而當通道達到該限制時，即已符合限制值。

您對 SMU 在恆定電壓與恆定電流模式中作業方式的了解，也可應用到一般量測情境上。例如，如果您想使用 SMU 量測電壓，可將裝置設為電流模式並將電流準位設為零，同時採最低的電流範圍。如此 SMU 就會感測端點處的電壓，並讓最少量的電流流過模組；此時 SMU 可有效扮演高阻抗負載的角色。同樣地，如果您想使用 SMU 量測電流，則應將裝置設為電壓模式且供電為零伏特，同時採最低的電壓範圍；此時 SMU 可有效扮演短路的角色。如此一來，您即可將 SMU 做為電壓計或電流計使用。

將 SMU 做為電壓計：

- DC 電流模式下的 SMU
- 設為最低電流範圍
- 電源 0 A

將 SMU 做為電流計：

- DC 電壓模式的 SMU
- 設為最低電壓範圍
- 電源 0 V

準確度

SMU 與電源供應器之間的關鍵差異，在於這兩者分別可達到的準確度層級。為了讓 SMU 發揮最大效益，您必須充分了解準確度規格與其意義。大部分 SMU 的準確度結合了偏移錯誤與增益錯誤。偏移錯誤是單點實際輸出與理想輸出之間的差異，而增益錯誤則是實際轉換函式與理想轉換函式之間的斜率差異。將這兩個錯誤項目加總後，即可判斷特定量測的整體準確度規格。NI SMU 的偏移錯誤通常以絕對單位 (mV 或 μA) 表示，增益錯誤則多以讀數或要求值的百分比表示。這是因為無論嘗試輸出的值為何，偏移錯誤的效應皆相同。但是，增益誤差是斜率的差異，因此隨著輸出值增加，錯誤幅度亦會隨之擴大。

讓我們來思考以下範例：利用 NI PXIe-4139 SMU 的規格進行準確度計算，以量測 5 mA 電流。為了進行此量測作業，在 SMU 上採用 10 mA 量測範圍。根據 PXIe-4139 規格，在 10 mA 範圍時的 SMU 準確度為 0.022% 的讀數 + 200 nA。在此準確度規格下，0.022% 代表增益錯誤，而 200 nA 代表偏移錯誤。將這兩者加總後，即可獲得完整的準確度規格。

準確度 = 增益錯誤 + 偏移錯誤

$$\text{準確度} = (0.022\% \times 5 \text{ mA}) + 200 \text{ nA} = 1.3 \mu\text{A}$$

置入電流讀數值後，可看到準確度為 1.3 μA ，意味著 5 mA 的讀數應在實際電流 $\pm 1.3 \mu\text{A}$ 的範圍內。

有一項重要因素會對儀器準確度造成影響，那就是儀器溫度。只有當機板溫度介於最後一次自我校準完成時溫度的上下 1 °C 範圍內時，在前述範例計算中使用的準確度規格才有效。例如，如果機板溫度在執行自我校準時為 25 °C，只有當目前機板溫度介於 24 °C 與 26 °C 之間時，準確度規格才有效。

當機板溫度介於自我校準溫度的上下 5 °C 範圍內時，增益錯誤與偏移錯誤皆會增加；準確度規格會變成 (0.03% 的讀數) + 600 nA。您可利用新規格重新計算 5 mA 量測的準確度：

$$\text{準確度} = (0.03\% \times 5 \text{ mA}) + 600 \text{ nA} = 2.1 \mu\text{A}$$

溫度的些微差異會讓儀器準確度減少 0.8 μA 。進行低電流或低電壓量測時，您應定期執行自我校準，以修正這類溫度影響 (請參閱「校準」一節)。

準確度與速度

SMU 的量測速度為根據孔徑時間判斷。孔徑時間是類比轉數位轉換器 (ADC) 讀取 SMU 電壓或電流的期間。在圖 4 中，孔徑時間決定了量測期間所持續的時間長短。改變儀器的孔徑時間，即

可靈活調整擷取窗期，針對高精度度量測作業延長窗期，或針對高速擷取作業縮短窗期。延長量測孔徑能使儀器有更多時間來取樣並達到平衡，進而減少量測雜訊。



圖 4. 取樣訊號的 SMU 孔徑時間圖解

針對孔徑時間對量測雜訊的影響，SMU 規格提供了量化資料。舉例來說，圖 5 所示為 PXIe-4139 SMU 孔徑時間與量測雜訊的相關圖。您可看到當孔徑時間增加時，雜訊準位就大幅下降。此外，在較高的電壓範圍中，雜訊準位也較高。如果您的應用需要進行低電壓或低電流量測，儀器應設定為使用可行的最低量測範圍。

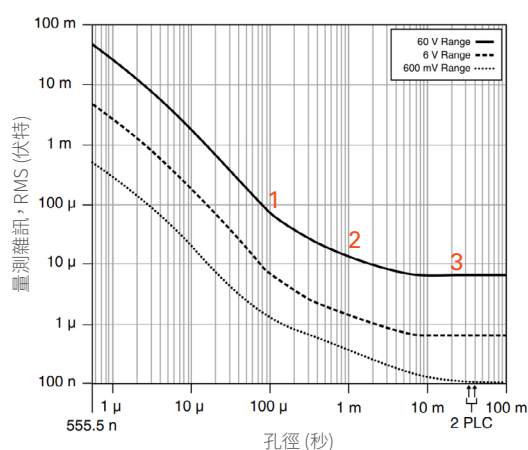


圖 5. 電壓雜訊 vs. 孔徑

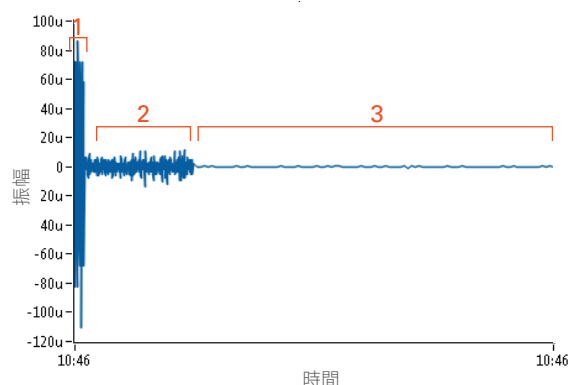


圖 6. PXIe-4139 在多種量測孔徑時間中的雜訊效能

圖 6 中顯示了在 3 種不同孔徑設定下，使用 60 V 範圍之 PXIe-4139 SMU 的實際雜訊效能。圖中第一個部分的孔徑時間設為 100 μ s。可以看到，在孔徑時間較低時，雜訊偏高。在第二個部分，孔徑時間設為 1 ms，讀數中的雜訊因而大幅減少。在最後一個部分，孔徑時間設為 16.7 ms，這是一個電源線週期。在此設定中，雜訊微小到幾乎毫不顯著。

「利用新的 [PXI] 平台架構，不但可以讓量測與效能無損，還能夠降低 3 倍的成本、提高 10 倍的半導體檢驗效能。」

Ray Morgan, ON Semiconductor 產品線經理

常見的最佳做法之一，是將孔徑時間設為整數乘以 1 個電源線週期。在電網頻率為 60 Hz 的國家/地區中，1 個電源線週期等於 16.67 ms，但是在採用 50 Hz 電網的國家/地區中，1 個電源線週期等於 20 ms。對多個電源線週期進行取樣時，60 Hz 或 50 Hz 雜訊會從 DC 量測中加以平均。

許多應用皆需要將測試時間最佳化，這代表孔徑時間需降至最低。但是，低孔徑時間可能會對量測帶來額外雜訊，並使讀數的準確度受到侷限。另一方面，如果您想檢驗負載的瞬變響應，而準確度並非您的主要考量，則可使用較短的孔徑時間，以利用 SMU 將訊號數位化。例如，PXIe-4139 SMU 的取樣速度可達 1.8 MS/s。這麼一來，您就能觀察訊號的詳細瞬變特性。開發應用時，請務必留意速度與準確度之間是否取得平衡。

脈衝

許多 SMU 的另一項實用特點，就是脈衝。使用脈衝功能，即可在短時間內產生高於儀器可供應範圍的功率準位。因此，在使用脈衝模式與 DC 模式時，SMU 的 IV 範圍並不相同（請參閱圖 7 所示的詳細 IV 範圍圖片）。

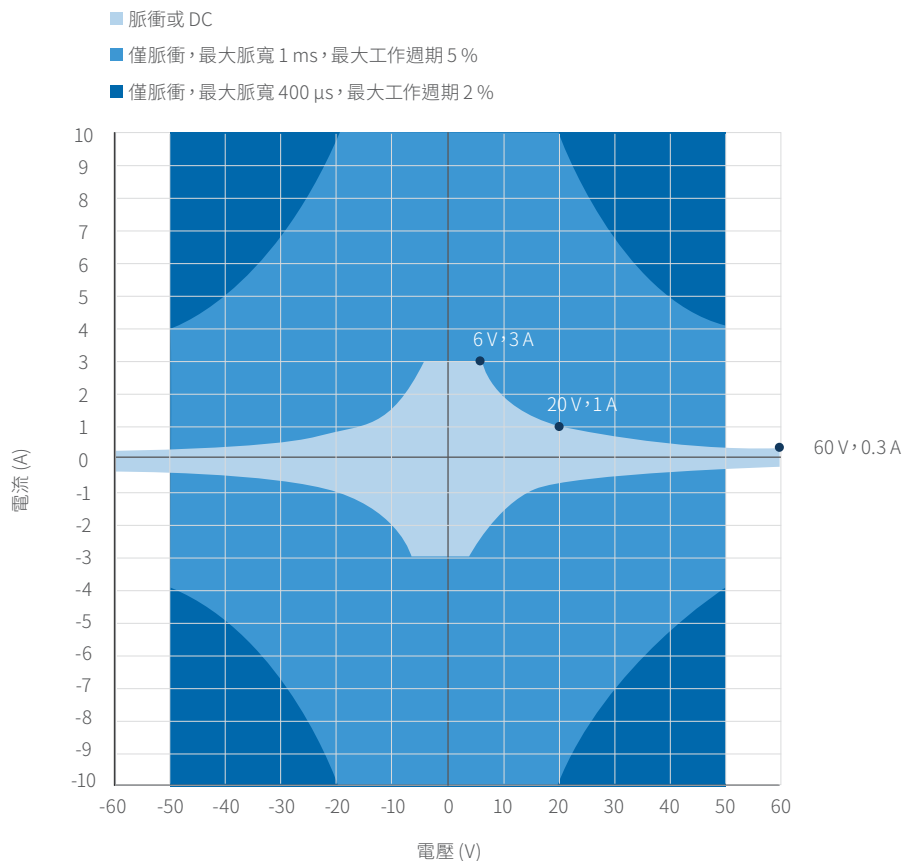


圖 7. 使用脈衝的 SMU IV 範圍範例

具有脈衝功能的 SMU 使用獨特的輸出架構，可達到比額定 DC 範圍更高的功率。其具備內建電容，在裝置未供電時仍會帶電。裝置輸出脈衝時，電容會放電以提供超過標準規格的功率。由於這類 SMU 暫時輸出的功率會高於從電源供應器所汲取的功率，因此其輸出功率的速度與時間有限。對關鍵脈衝規格的限制可確保 SMU 穩定輸出所需的功率，而且不會因為汲取過多功率而出現過熱狀況。前述規格包括工作週期、最大功率、最大脈衝啟動時間、最小脈衝啟動時間與最小脈衝週期。

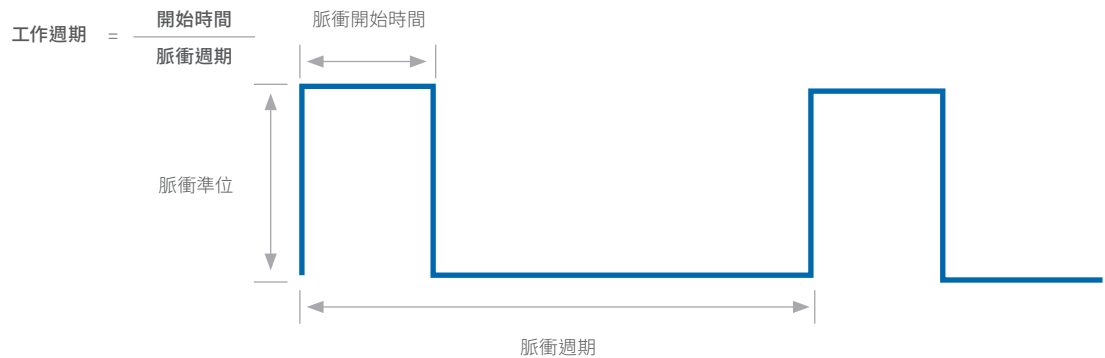


圖 8. 關鍵脈衝規格

脈衝一般用於限制 DUT 在高功率測試期間須散出的熱能。如果向 DUT 提供穩定的高功率 DC 訊號，會使 DUT 的溫度升高，此溫度變化可能導致 DUT 的電氣與物理屬性改變。如果溫度變化劇烈，可能會足以影響量測作業，或甚至使 DUT 損壞。但是藉由脈衝功率，即可減少經由 DUT 的耗電量，並且讓自行發熱的影響降至最低。

使用脈衝模式時的另一個考量，是 SMU 的瞬變響應。以脈衝模式執行測試時，脈寬必須夠長才能讓儀器執行穩定的量測，但是也要夠短才能將 DUT 自行發熱的狀況降至最低。為了達到這一點，您必須確定瞬變響應達臨界阻尼。存在欠阻尼響應時 (如圖 9)，輸出就會過衝或變得不穩定，如此即無法進行良好的量測作業，甚至還可能會使 DUT 損壞。如果存在過阻尼響應 (如圖 10)，脈衝即無法以夠快速度達到所需的輸出準位。如果響應達臨界阻尼 (如圖 11)，訊號會迅速趨穩，讓您有時間可量測脈衝。為了確保 SMU 可產生乾淨的脈衝，必須使用取樣率夠快的儀器將瞬變響應數位化。例如 PXIe-4139 等部分 SMU 具有此功能，但如果您的 SMU 沒有這項功能，則需要使用示波器。

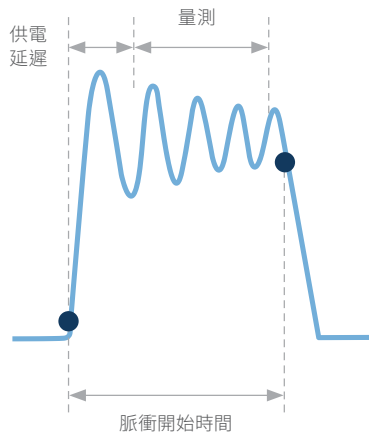


圖 9. 欠阻尼瞬變響應

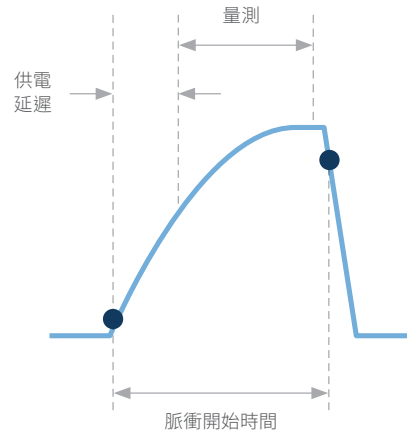


圖 10. 過阻尼瞬變響應

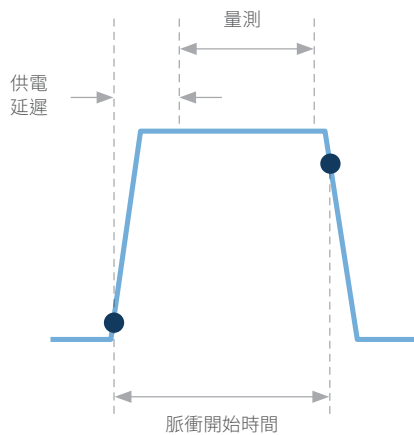


圖 11. 達臨界阻尼的瞬變響應

DC 量測最佳做法

除了 SMU 儀器本身外，測試設定也是會影響量測的關鍵因素。儀控設備無法彌補不良的訊號品質。若進行高準確度的 DC 量測，必須具有高精確度的訊號。如果採用的訊號包含許多雜訊，那麼即使使用高品質儀器，也無法獲得準確的量測結果。許多不同的雜訊與錯誤來源皆可能會影響訊號，不過本技術文章中包含多種有助解決這些問題的方式。由於不同類型的量測會受到不同類型的錯誤左右，因此您也需要了解應用各項方法的時機與方式為何。本節討論的方法適用於所有類型儀器進行的 DC 量測作業，而非僅限於 SMU。不過，因為本指南的重點為 SMU，所以使用的範例大多也以此儀器為主。綜合本節的最佳做法與前一節中的儀器資訊後，您即可對執行高準確度 DC 量測的方式擁有全面性的了解。

使用遠端感測抵銷導線電阻的影響

遠端感測可用於消除量測的導線電阻影響。在標準的雙線式設定中，如果將電源供應器設為 5 V，則會因為導線電阻所導致的電壓位降，讓 DUT 的電壓稍微低於 5 V。例如，3 公尺長的 24 AWG 銅線具有約 0.25 Ω 的電阻。如果從 SMU 供應 5 V 與 1 A，則前述整條線的電壓電位會降低 0.25 V。遠端感測可避免發生這類影響，確保 DUT 確實達到 5 V。

遠端感測使用四線式設定，其中包含一組高阻抗感測線。在遠端感測期間，一組導線乘載輸出電流，另一組導線則直接量測 DUT 端點處的電壓。圖 12 顯示了乘載輸出電流的 HI 與 LO 線，感測 HI 與感測 LO 線則直接量測 DUT 端點處的電壓。若有大量電流流經輸出導線，會提高導線的電壓壓降，但是流經高阻抗感測線的電流量可忽略，因此亦可忽略導線電阻所造成的電壓壓降。利用感測線與 SMU，即可透過提高輸出處的電壓，補償導線電阻所導致的電壓壓降，進而在感測線上維持所需的輸出電壓。這代表，您能向 DUT 供應更接近實際定義的電壓。

「相較於類似的傳統桌上型設備 (Keithley 與 Agilent)，單一設定可省下約 20,000 美元；我們省下了原本需要花在模組、空間、能源與開發部分的成本。」

Junifer B. Frenila, Analog Devices 產品工程師

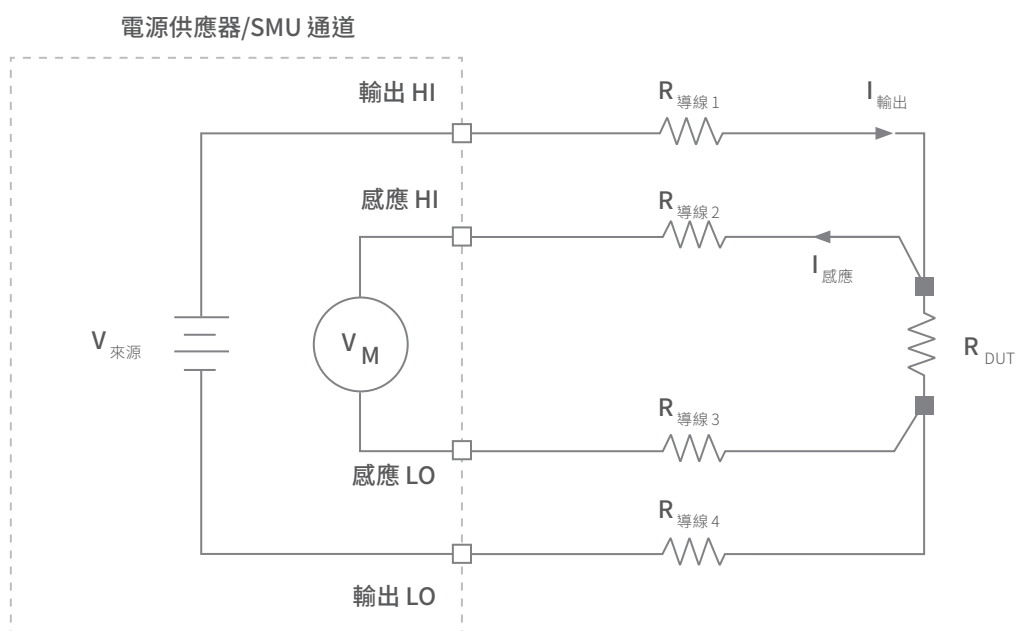


圖 12. 四線式遠端感測測量設定

具備遠端感測功能的裝置設有額外規格，用來在使用遠端感測時計算準確度。為讓您更深入了解如何計算這項準確度，以下使用 PXIe-4139 SMU 的規格舉例說明。在此範例中，採用 SMU 的 600 mV 範圍計算 500 mV 輸出的遠端感測準確度。表 1 所示為額外的設定屬性。

HI 路徑導線壓降	3 V
HI 感應導線電阻	2 Ω
LO 路徑導線壓降	2.5 V
LO 感應導線電阻	1.5 Ω

表 1. 遠端感測測量設定的屬性

使用 600 mV 範圍時，SMU 準確度為 0.016% + 30 μ V。此儀器的遠端感測電壓準確度規格指出：

「在電壓準確度規格中，每有 1 伏特的 HI 導線壓降，即加入 (3 ppm 的電壓範圍 + 11 μ V)，再加上對應感測導線電阻在每 1 Ω 有 1 伏特導線壓降時即增加的 1 μ V。」

您可利用以下公式計算遠端感測準確度：

準確度 = (SMU 準確度, 範圍 = 600 mV) + 導線電壓壓降導致的錯誤 + 因導線電阻造成之導線電壓壓降而導致的錯誤

$$\text{準確度} = (500 \text{ mV} * 0.016\% + 30 \text{ } \mu\text{V}) + \frac{600 \text{ mV} * 3 \text{ ppm} + 11 \text{ } \mu\text{V}}{1 \text{ V 的導線壓降}} * 3 \text{ V} + \frac{1 \text{ } \mu\text{V}}{\text{V} * \Omega} * 3 \text{ V} * 2 \Omega + \frac{1 \text{ } \mu\text{V}}{\text{V} * \Omega} * 2.5 \text{ V} * 1.5 \Omega$$

$$\text{準確度} = (80 \text{ } \mu\text{V} + 30 \text{ } \mu\text{V}) + 12.8 \text{ } \mu\text{V} * 3 + 6 \text{ } \mu\text{V} + 3.8 \text{ } \mu\text{V}$$

$$\text{準確度} = 158.2 \text{ } \mu\text{V}$$

這意味著, 實際輸出介於 500 mV 的上下 158.2 μV 內。在上方計算中, 括號內部分代表使用 600 mV 範圍時的 SMU 準確度。公式的其他部分, 則代表遠端感測電壓準確度規格。

使用遠端感測時, 應盡可能地將感測線連接在靠近 DUT 的位置。如此可讓感測線在 DUT 處獲得準確的電壓讀數。然而, 有時無法將感測線直接連接至 DUT, 例如若 DUT 位於機板內無法直接接觸的區域。此時, 雖然在遠端感測連接處供應的電壓準確, 但是介於遠端感測連接處與實際 DUT 之間的額外電阻, 卻會造成電壓壓降。為了確保 DUT 達到準確的電壓準位, 可使用部分 SMU 來設定負輸出電阻。若要消除不需要的電壓壓降, 可設定負輸出電阻, 並使其等於介於遠端感測連接處與 DUT 之間的路徑電阻。這麼一來, 即使遠端感測線無法直接連接至 DUT, 儀器仍能向 DUT 供應準確的電壓。

遠端感測特別有助於進行低電阻量測。您可透過供應電流並量測電壓以計算電阻的方式, 使用 SMU 與多功能數位電錶 (DMM) 進行電阻量測。進行低於 100 k Ω 的精確電阻量測時, 需要使用四線式遠端感測設定, 以將導線電阻的影響降至最低, 而非採用雙線式設定。在前面您已了解, 在使用雙線式方法時, 導線電阻會對電壓量測造成何種影響。由於是根據電壓量測來計算電阻量測, 因此電壓讀數錯誤就會電阻讀數錯誤。利用四線式方式, 可減少導線電阻的影響, 獲得更準確的量測結果。

表 2 所示為遠端感測在量測時所造成的差異。此資料是利用 DMM 透過切換器量測電阻器所得。切換器的導線電阻讓量測結果增加 0.522 Ω , 代表錯誤率達 5.24 %。使用遠端感測時, 可減少導線電阻的錯誤, 獲得更準確的讀數。

實際電阻	無遠端感測的量測	具遠端感測的量測
9.958 Ω	10.48 Ω	9.958 Ω

表 2. 使用遠端感測補償導線電阻

使用遠端感測時, 請留意儀器的限制。SMU 與 DMM 可因應的電壓壓降程度具有上限。例如, PXIe-4139 可補償每根導線的導線壓降最高為 3 V。這代表, 裝置可補償 HI 側的 3 V 壓降, 以及 LO 側的 3 V 壓降。達到限制後, 儀器即無法進一步補償導線電阻。未獲得補償的導線電阻會降低量測的準確度。

補償偏移電壓

進行低電壓量測時, 需要減少偏移電壓的影響。常見的偏移電壓來源之一是熱 EMF。發生熱 EMF 時, 在以不同金屬製成的導線間會形成熱電偶, 進而在電路中造成錯誤電壓。例如, 如果在設定中將切換器與 SMU 配對以進行量測, 則因為訊號路徑中存在不同接點, 就會使切換器成為熱 EMF

錯誤的來源。切換器規格中通常包含熱 EMF。NI PXI-2530 矩陣切換器使用簧片繼電器，且熱 EMF <50 μV 。如果您的量測在毫伏範圍內或更低，那麼切換器的熱 EMF 即會導致產生嚴重錯誤。

偏移補償可用於抵消熱 EMF 的影響。若要使用 SMU 實作偏移補償，您必須將裝置設定為進行兩項量測。圖 13 中說明了前述量測。在第一個量測週期中，SMU 電流來源為開啟，且電壓量測包含熱 EMF。在第二個量測週期中，SMU 電流來源為關閉，代表其只會量測熱 EMF 所造成的電壓。接著，將第一個量測結果減去第二個量測結果後，就能獲得不包含熱 EMF 影響的準確量測結果。

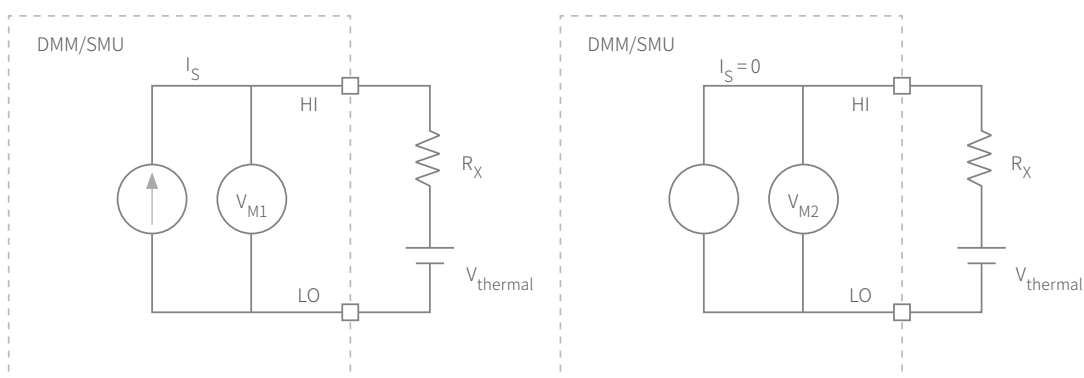


圖 13. 偏移補償量測週期

下一個公式為計算方式。在此公式中， V_{OC} 代表採用偏移補償後的電壓。 V_{M1} 是電流來源開啟時的電壓量測結果， V_{M2} 則是電流來源關閉時的電壓量測結果。 I_S 代表來自 SMU 電流來源的電流， R_X 則代表負載的電阻。最後， $V_{thermal}$ 是因熱 EMF 而導致的偏移電壓。

$$V_{OC} = V_{M1} - V_{M2} = (I_S R_X + V_{thermal}) - V_{thermal} = I_S R_X$$

這兩個量測結果皆包含熱 EMF 偏移，即 $V_{thermal}$ 。因為兩個量測結果皆存在偏移電壓，因此用第一個量測減去第二個量測即可消除該偏移。

另一種消除偏移電壓的方式，則是電流回掃法。就像偏移補償法一樣，電流回掃法也需要進行兩項量測。第一個量測以正電流進行，第二個量測則以負電流進行。前述量測的數學表示式如下所示。

$$V_{M1} = I_S R_X + V_{thermal}$$

$$V_{M2} = -I_S R_X + V_{thermal}$$

一樣地，由於兩個量測皆包含 $V_{thermal}$ ，因此您可結合這兩個量測結果以消除此偏移，如下所示。

$$V_{CR} = \frac{V_{M1} - V_{M2}}{2} = \frac{(I_S R_X + V_{thermal}) - (-I_S R_X + V_{thermal})}{2} = I_S R_X$$

電流回掃法的優點之一，在於可實現準確度比偏移補償法更高的量測。這是因為，最後的量測結果是將兩個量測結果平均後所得。而此方法的缺點，則是必須具備可供應正電流與負電流的裝置，偏移補償法則僅需要正電流。

將外部雜訊降至最低

進行敏感的量測作業時，需要考量雜訊對讀數的影響。雜訊可能來自數個來源，例如電磁干擾或寄生電容。電磁干擾包含來自頻譜上多種頻率的干擾。電視、AM/FM 無線電與電源線，都可能是電磁干擾的來源。當量測電路鄰近存在帶電物體時，就會產生寄生電容。若 2 個電壓不同的電導體彼此靠近，兩者間產生的電場會讓電荷儲存在其上。這會顯現為量測的震盪雜訊或偏移。利用屏蔽即可減少電場的影響，並將量測的錯誤降至最低。

屏蔽是藉由以導電材料製成的屏障阻擋電磁場，以在某空間中減少電磁場的做法。實作時，需對整個量測電路進行屏蔽，因此 DUT 與用以連接 DUT 的連接線皆須受到屏蔽。Faraday 機架與抗雜訊式連接線現在十分普遍，可用於屏蔽 DUT 周圍區域與導線。同軸連接線是一種常見的抗雜訊式連接線。其線芯封入絕緣層內，而絕緣層則以屏蔽包覆。外部屏蔽可保護內部線芯免受電子雜訊影響（請參閱圖 14）。在此可看到屏蔽連接至儀器的 LO 端點。因此，受到屏蔽擷取的電磁干擾或寄生電容會流至接地，而非儀器的 HI 端點。您可對連接線加裝接地層，以因應 HI 與 LO 端點間的寄生電容情況（請參閱「防範漏電流」一節）。如果儀器的 LO 端點為浮懸在地面上方，則應在測試設定周圍加裝另一個機架，以免操作人員意外觸碰到屏蔽。

「我們成功將冗長的手動測試流程轉換為高度自動化的測試週期，還把長達數週的迴歸測試縮短為幾天，並提高可靠性、可重複性與維護效能。」

Sambit Panigrahi, 德州儀器 (TI) 系統整合與工具主管

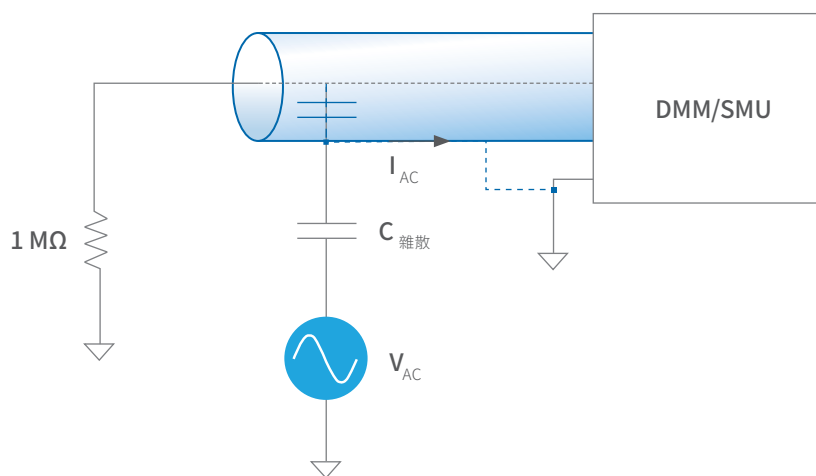


圖 14. 本電路簡圖說明屏蔽如何藉由以導電材料製成的屏障阻擋電磁場，以在某空間中減少電磁場

對高阻抗量測來說，屏蔽可帶來極大助益。在圖 14 中， I_{AC} 是雜訊來源 V_{AC} 所造成的電流。如果不使用屏蔽，該感應電流即會出現在量測電路中。如果進行高電阻量測，感應電流的影響會更為擴大。根據歐姆法則，電阻較高時， I_{AC} 會讓量測發生更大的電壓錯誤。因此，使用高電阻 DUT 進行作業時，屏蔽非常重要。

使用抗雜訊式連接線將 DUT 連接至儀器時，應將屏蔽連接至儀器接地或 DUT 接地兩者其中之一，但不得同時連接至兩者。這是為了避免在量測設定中造成接地迴路。當系統有 2 個電壓電位相異的接地參考點時，就會產生接地迴路。這會導致電流在 2 個接地參考點之間流動，並且影響量測。如果 DUT 接地，且連接線的屏蔽同時連接至 DUT 接地與儀器接地，就可能形成接地迴圈。僅將屏蔽連接至一端，即可避免發生這類電位問題。

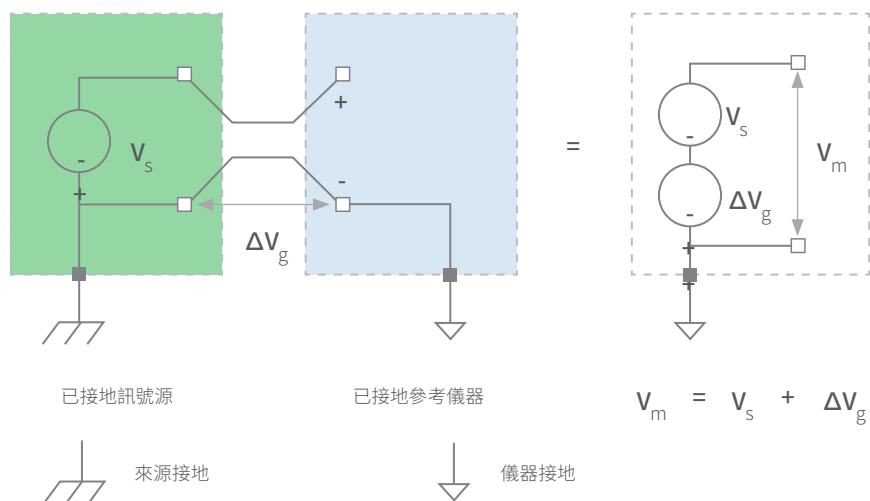


圖 15. 使用接地參考系統量測的接地訊號來源，造成接地迴圈與量測錯誤。

另一個可能的外部雜訊來源，則是磁場。磁場在電路中造成的電壓大小，與該電路包圍的區域成比例。如果量測導線在電路中構成較大迴圈，則此設定更容易受到磁場雜訊的影響。改為採用雙絞線是簡單且普遍的解決方式。使用雙絞線時，導線為絞繞在一起，因此能減少受電路包圍的區域，讓設定較不易受到磁場雜訊影響。您可在雙絞線週圍加上屏蔽，保護導線免受外部電磁雜訊影響。

防範漏電流

屏蔽可避免外部電磁雜訊影響量測，防護則可避免屏蔽與量測電路之間的漏電流與寄生電容。使用同軸連接線等無防護的連接線時，連接線絕緣與負載並聯，這會導致漏電流在 HI 與 LO 端點之間流動。在圖 16 中， I_L 代表在 HI 與 LO 之間流動的漏電流。這意味著 SMU 裝置所量測的電流，是負載電流 I_{Load} 與漏電流 I_L 的加總結果。

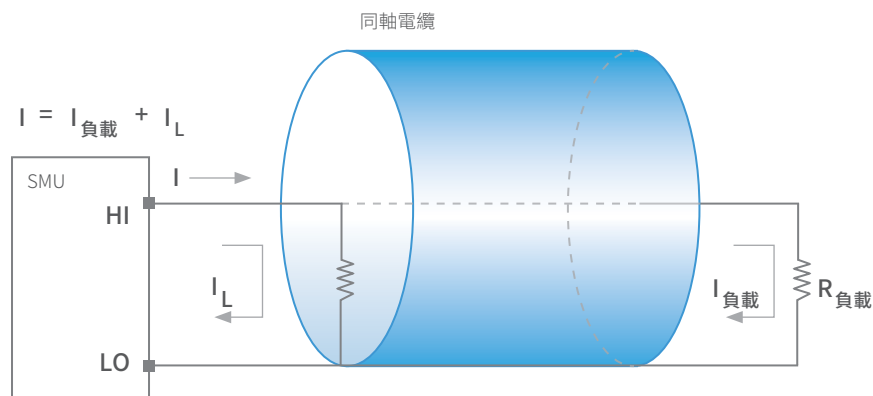


圖 16. 同軸連接線中的漏電流

進行低電流與極低電流量測時，防護特別重要。為了解其重要性，請計算使用同軸連接線供應 50 V 時，漏電流會對量測產生多大的影響。在同軸連接線中，以絕緣層隔離內部線芯與外部屏蔽。理想上，絕緣具有無限大的電阻，但是實際上電阻有限。每條同軸連接線的絕緣電阻皆不同，不過現在假設某特定連接線的電阻為 100 GΩ。您可計算出通過絕緣的漏電流。

$$I_L = \frac{50 \text{ V}}{100 \text{ G}\Omega} = 0.5 \text{ nA}$$

根據此計算結果，如果應用需要進行毫微微安培的量測，那麼就不能使用同軸連接線。此外，隨著電壓準位增加，漏電流量也會增加。

若要進行這類低電流量測，應使用 3 軸式連接線。圖 18 所示為 3 軸式連接線的簡圖。3 軸式連接線在連接線線芯與屏蔽之間，附有一層額外的導電護套，稱為防護。此中間層連接至 SMU 的接地端點。SMU 的防護端點，是由接續 HI 端點電壓而來的單位增益緩衝所驅動。單位增益緩衝是負反饋運算放大器（請參閱圖 17），此運算放大器的輸出 V_{out} 連接至其負輸入端點。將運算放大器的正輸入端點 V_{in} 連接至 SMU 的 HI 端點時，運算放大器的輸出電壓與 HI 端點的電壓相稱。

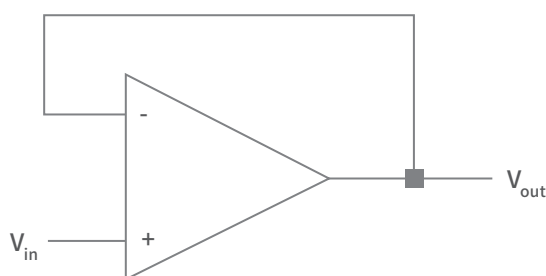


圖 17. 單位增益緩衝

由於 3 軸式連接線的防護層連接至此單位增益緩衝，防護層的電壓電位會與 HI 端點相同，因此在 HI 端點與接地端點之間的實際壓降為 0 V（請參閱圖 18）。因為電壓電位並無差異，在 HI 與防護之間就不會有漏電流動。部分漏電流 I_{Guard} 仍會從防護輸出流至 LO，不過因為電流是由單位增益緩衝供應，而非 HI 供應，因此前述洩漏情況不會影響輸出或量測。所以，3 軸式連接線可減少漏電流的影響，提供更準確的電流量測結果。

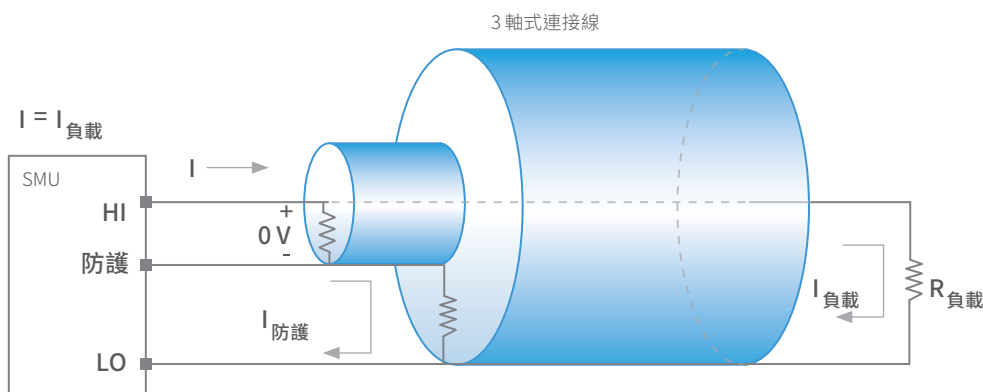


圖 18. 使用防護的影響

使用防護也可減少 SMU 的 HI 與 LO 端點之間的寄生電容。若 2 個電壓電位不同的電導體彼此靠近，兩者間的電場會讓電荷儲存在其上。此效應即為寄生電容。就同軸連接線而言，內部線芯（HI）靠近外部屏蔽（LO），因此會產生寄生電容。因為 HI 與 LO 之間的電壓電位存在極大差異，電容需要更長時間才能帶電，這也代表訊號需要較長時間才可趨穩。使用防護時，HI 與防護之間的電容無須如此廣泛帶電，因為其電壓電位相同。如此可以縮短訊號趨穩的時間。

需要運用防護的常見應用之一，是輸入洩漏測試。執行輸入洩漏測試時，需量測流入晶片上高阻抗輸入針腳的電流量。理想上，輸入針腳的阻抗為無限大，因此也不會產生電流。但是，現實中的 DUT 阻抗雖大但卻有限，所以一般會有介於微安培範圍或更低的小型電流流動。此測試一般使用 SMU 執行，因為如此可同時供應電壓並量測電流。

因為此為低電流量測，所以應使用 SMU 上的防護線以確保獲得最準確的量測結果。將 DUT 連接至 SMU 後，應將 SMU 設定為供應電壓。另外，您也應設定電流限制，保護 DUT 免於損壞。SMU 在供應電壓時，會量測來自 DUT 的電流洩漏情況。隨後您可比較漏電流值與該 DUT 的可接受限制，以了解 DUT 是否符合規格。請確定您並未同時量測 SMU 的 HI 與 LO 端點之間的電流洩漏情況。如果在此應用中採用同軸連接線，那麼連接線產生的漏電流也會包含在量測結果內，如此一來，即使實際的 DUT 漏電流符合規格，仍可能會讓 DUT 無法通過測試。若使用 3 軸式連接線與 SMU 的防護，將能獲得更準確的電流量測結果，確保 DUT 不會意外地無法通過測試。

「採用 PXI 平台，並在我們的 R&D 現場設立全球 PXI Champions，藉此在全球建立標準檢驗做法，而且相較於機架堆疊式與桌上型儀控設備，讓我們的測試範圍 [得以擴大]，並能進一步改善分析與品質。」

Christian Paintz, Melexis GmbH 特性參數描述能力中心主管

了解校準的重要性

您需要利用校準來確保儀器能以符合規格的水準執行。外部校準與自我校準，是兩種主要的校準型式。您可使用外部校準修正儀器的漂移，並使用自我校準修正溫度導致的錯誤。

外部校準是較複雜的程序，需要具備高精確度的電壓來源。執行外部校準時，儀器的內建 EEPROM 校準常數會受到調整與覆寫。裝置驅動程式會使用這些常數，以針對特定量測傳回適當的值。外部校準主要用於修正內建參考值的長期漂移或偏移，這都是自我校準無法處理的項目。為能與儀器已公開的規格保持一致，建議根據儀器每 1 年或每 2 年執行外部校準。

自我校準是更為簡單的流程，無須任何額外設備即能執行。此程序包含將已知內部參考值傳至機板的所有通道。隨後會讀取不同增益設定的參考電壓，並與預期值相比較。此溫度保護參考電壓，是用來修正溫度變化所導致的錯誤。元件的屬性根據作業溫度而定，所以應使用自我校準以補償溫度變化，確保儀器盡可能保持準確。圖 19、20 與 21 的圖片說明了自我校準可造成的差異。這些圖片是將數個裝置放在恆溫箱內並監控其效能後，製作而成。圖 19 所示為機板溫度在 24 小時期間的變化。圖 20 所示為偏移電壓準位在相同期間內的變化。高溫導致產生些微的正電壓偏移，低溫則造成負電壓偏移。但是，如果在每次量測前先進行自我校準，即可免除因溫度所導致的電壓偏移情況，而且也不會影響量測（請參閱圖 21）。

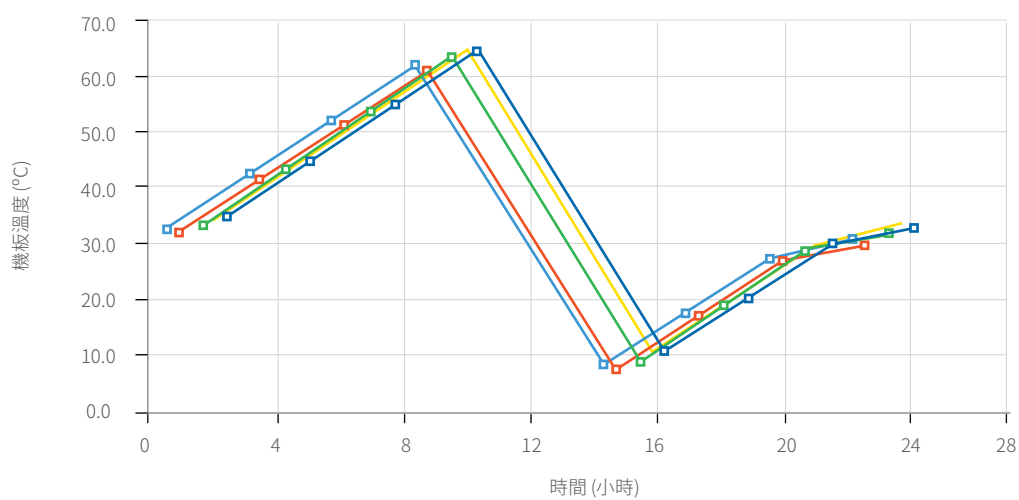


圖 19. 24 小時期間中的測試機板溫度

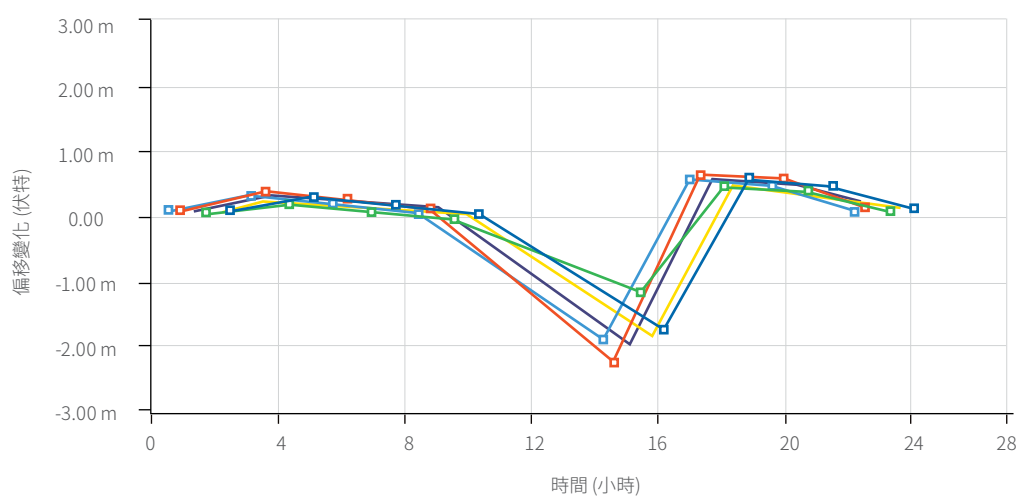


圖 20. 未進行自我校準的電壓漂移

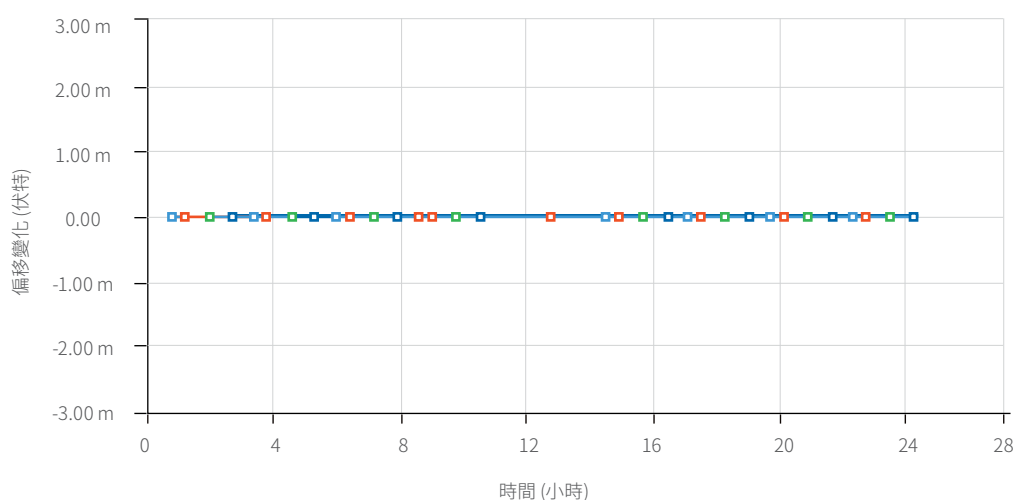


圖 21. 進行自我校準的電壓偏移

請記得，自我校準的準確度僅與內建參考電壓的準確度相同。因此，您必須根據製造商建議的間隔時間，為儀器進行外部校準，確保參考電壓符合規格。

「我們在檢驗上遇到的難題是，各種高度自動化的桌上型平台不斷增加；而我們在將所有產品交到客戶手中前，皆必須透過這些平台檢查產品，確保沒有任何缺陷留存其中。每種平台都必須兼具高速與靈活的特性，同時還要成本低廉，才能在需要時輕鬆地擴充並套用至全公司；這也是為何這些平台多數都以 PXI 為核心的原因。」

Marvin Landrum, 德州儀器 (TI) 檢驗基礎架構經理

結論

本指南中涵蓋的多種方法，皆有助您在需進行 DC 量測的應用中，達到更高的準確度。將這些方法應用到您的量測設定時，請謹記每種方法可因應的錯誤類型。如此您就能針對發生的量測問題，採用正確的解決方案。例如，如果發現低電流量測的上升時間偏慢，那麼改用 3 軸式連接線並加入防護，有助於解決此情況。如果發現存在電源線雜訊，可在設定中加入屏蔽，並將孔徑時間設定為 1 個電源線週期。若能掌握這些最佳做法，將可讓您的測試設備發揮最大效益。

如需深入了解 NI SMU 與其客制化瞬變響應或進階序列功能，[請造訪 ni.com/smu](https://ni.com/smu)。