

工程師的訊號處理指南

概述

許多應用都必須透過感測器執行環境或結構量測，例如量測溫度與振動。如果希望資料擷取裝置能有效且準確地量測訊號，就必須先針對這些感測器執行訊號處理。訊號處理功能是資料擷取系統中最重要元件，因為如果使用示波器執行量測之前沒有先最佳化實際訊號，您就無法確定量測結果是否準確。

由於訊號處理功能的需求因感測器種類而有所不同，所以無法使用同一台儀器為各式各樣的感測器執行訊號處理。舉例來說，因為熱電偶產生的訊號電壓值極低，所以需要執行線性化、放大與濾波等處理；而應變規與加速規則需要執行激發處理。有些訊號可能無需執行任何處理作業，但必須完全與高壓電隔離。製作完美訊號處理系統的成功關鍵，就是確實了解必須使用的電路，以確保無論採用任何通道組合，都可以得到正確的量測結果。

此技術文章說明了大多數感測器最常使用的一些訊號處理功能，有助於掌握開發與維護已完成訊號處理的量測系統時，應該考量到哪些重要因素。

- [訊號處理基本概念](#)
- [感測器專屬的訊號處理](#)
- [建置訊號處理系統時的重要考量](#)
- [建置訊號處理系統](#)

訊號處理基本概念

大多數的訊號都需要在數位化之前先完成處理。由於熱電偶訊號的電壓準位非常小，因此必須在數位化之前先行放大。有些感測器，例如電阻溫度偵測器 (RTD)、熱敏電阻、應變規與加速規，需要先激發才能運作。這些準備技術都算是訊號處理。

下列是幾種最常用的訊號處理類型與各種訊號處理的功能，並舉例說明各訊號處理的使用時機，從而幫助您評估適用的訊號處理選項。

放大

放大器可提高輸入電壓的強度，以進一步符合類比數位轉換器 (ADC) 範圍，藉此提升量測作業的解析度與敏感性。如果在較接近訊號來源的地方使用外接訊號處理器或傳感器，就能在環境雜訊影響電壓之前，先行提高電壓強度以提升量測的訊噪比 (signal-to-noise)。需要放大處理的感測器中，以熱電偶與應變規最為常見。

衰減

衰減作用與放大功能相反。如果需要數位化的電壓超過 ADC 範圍時，就必須先完成衰減作業。這種訊號處理作業可降低輸入訊號的振幅，讓處理過的訊號保持在 ADC 範圍內。當量測電壓超過 10 V 時，就必須執行衰減。

濾波

濾波器可依特定的頻率範圍，阻絕非必要的雜訊。低通濾波器一般都用來在電子量測作業中阻擋雜訊 (如 50/60 Hz 功率)，或是用來避免高頻率訊號失真。只要針對高於 Nyquist 頻率的訊號，使用反失真濾波器執行衰減，就能避免失真情況。反失真濾波器就是一種低通濾波器，其特性為通帶平坦且下降快速。由於加速規與麥克風量測作業通常都是在頻域中執行分析，因此反失真濾波器很適合用於聲音與振動應用。

隔離

如果電壓訊號大幅超過示波器的範圍，就可能破壞量測系統並傷害操作者。為了避免發生上述情形，隔離通常會搭配衰減一起使用，以保護系統與使用者免於電壓或電壓突波的危險性。如果感測器的接地面與量測感測器的接地面不同時 (例如固定於引擎上的熱電偶)，就必須執行隔離。

激發

許多類型的傳感器都需要激發作用。應變規、熱敏電阻與 RTD 都需要外接電壓或電流來激發訊號。RTD 和熱敏電阻量測包含 1 組電流來源，並可將電阻中的變量轉換為可量測的電壓。加速規通常內建放大器，並由量測裝置提供電流激發。應變規為電阻極低的裝置，通常用於具備電壓激發源的惠斯登電橋 (Wheatstone bridge) 設定中。

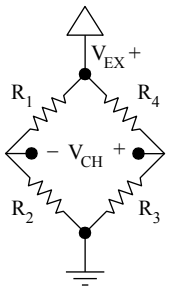


圖 1. 受到激發的惠斯通電橋

線性化

如果感測器所產生的電壓訊號與物理量測結果不呈線性關係，就必須執行線性化作業。線性化是一種使用訊號處理功能或軟體功能來編譯感測器訊號的作業流程，而熱電偶就是需要線性化處理的感測器典型範例。

冷點補償

如果希望得到準確的熱電偶量測結果，就必須採用冷點補償 (CJC)。熱電偶是透過 2 種相異金屬之間的電壓差來量測溫度，然而熱電偶與資料擷取裝置端點之間的連結點也會產生電壓，因此可能產生誤差。CJC 可以在該接點提供合適的溫度並執行修正，從而提升量測準確度。

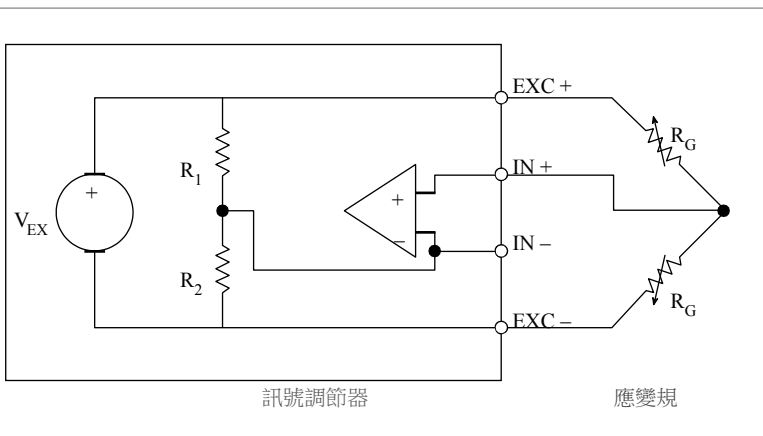


圖 2
半橋接應變規電路之連線

橋接補償

1/4 與半橋接感測器都需要橋接總成 (Bridge Completion) 才能形成擁有 4 個電阻器的惠斯通電橋。應變規訊號處理器通常都能提供半橋接總成網路，內含高精確度的電阻器。在偵測所有啟用中感測器的微小電壓變化時，這些補償電阻器可以做為參考。

取樣方法

示波器通常都是資料擷取系統當中最昂貴的元件。多工處理能依序將眾多訊號路由至單一示波器，因此可有效率地大量擴充系統通道數。如果要同時量測兩個以上的訊號，比如說執行結構分析，建議採用同步取樣。

感測器專屬的訊號處理

如果要得到最佳量測結果，就務必了解每個量測類型的訊號處理需求。您應該根據執行應用時使用的感測器來選擇合適的訊號處理方式，才能獲得最佳量測結果。表 1 針對不同類型感測器與量測作業，歸納出各種訊號處理功能。

	放大	衰減	隔離	濾波	激發	線性化	冷點補償 (CJC)	橋接補償
熱電偶	3	–	3	3		3	3	–
熱敏電阻	3	–	3	3	3	3	–	–
RTD	3	–	3	3	3	3	–	–
應變規	3	–	3	3	3	3	–	3
負載、壓力、力矩	3	–	3	3	3	3	–	–
加速規	3	–	3	3	3	3	–	–
麥克風	3	–		3	3	3	–	–
LVDT/RVDT	3	–	3	3	3	3	–	–
高電壓	–	3	3	–	–	–	–	–

表 1. 感測器架構量測作業的特殊需求

溫度感測器

熱電偶、RTD 與熱敏電阻是最常用來量測溫度的感測器，這種感測器的電壓輸出極低，通常以毫伏 (millivolt) 為單位，而由於這些感測器的電壓輸出過小，因此輸入範圍較大的量測裝置往往無法提供準確的量測結果。舉例來說，一般熱電偶的訊號範圍是 $\pm 80 \text{ mV}$ ，如果您使用輸入範圍介於 $\pm 10 \text{ V}$ 的 16 位元示波器執行量測，就只能使用 0.8% 的 ADC 範圍。為了解決此問題，您應該執行放大處理以加大輸出訊號並符合 ADC 的輸入範圍。

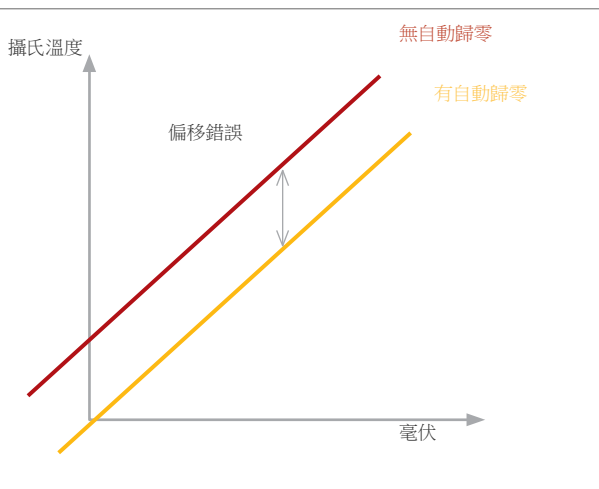


圖 3. 自動歸零能補償量測裝置中的偏移錯誤

先前提到熱敏電阻、RTD 與熱電偶的輸出訊號往往趨近 0 V，而在這樣的狀況下，量測裝置的偏移錯誤很可能會嚴重影響整體準確度。偏移錯誤是指所量測到溫度相對於參考溫度的偏差值，許多裝置都內建自動歸零功能，能夠在擷取溫度資料之前先自動量測內部偏移，並補償量測裝置中的偏移錯誤。如果量測裝置並無自動歸零功能，就必須確保裝置定期執行校準，並參閱規格說明文件以了解偏移錯誤對整體準確度的影響。

由於溫度量測的速度通常較慢，因此很容易受到高頻率雜訊影響。一般多半使用低通濾波器來降低高頻率雜訊與 50 與 60 Hz 的電源線雜訊；此類雜訊普遍存在於實驗室與工業環境中。

熱電偶

熱電偶有其專屬的訊號處理需求。熱電偶與資料擷取裝置接線/端點之間的連結點會形成冷點 (cold junction)，而這些冷點產生的電壓會計入淨量測值當中。如圖 4 中的系統所示，原本希望得到的量測結果應該是 AB，但實際上得到的量測結果卻變成 AB+AC+BC。這些由多餘結接點產生的電壓稱為冷點錯誤。如果要修正此錯誤，就必須由總量測值中扣除 AC 與 BC 的已知溫度，才能獲得正確的溫度。此調整步驟稱為冷點補償 (CJC)。大多數熱電偶量測裝置都包含內建式 CJC 與自動調整的軟體功能。如果資料擷取裝置不具備內建式 CJC，就必須由外部量測溫度，才能使用軟體解決量測溫度差異。

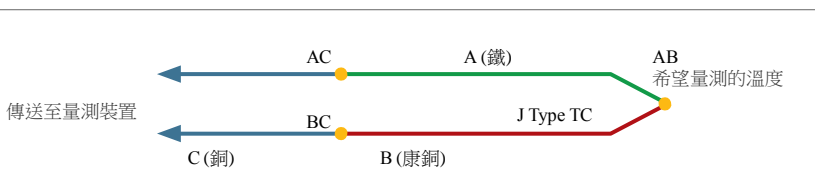


圖 4
冷點錯誤會把多餘的電壓加入熱電偶量測結果

雖然 CJC 能協助解決冷點造成的錯誤，但 CJC 本身與 CJC 的建置方式也都能產生錯誤。整體 CJC 錯誤包含來自 CJC 感測器的錯誤、來自 CJC 感測器量測裝置的錯誤，以及冷點與 CJC 感測器之間的熱梯度，而冷點與 CJC 感測器之間的溫度梯度是最大的誤差因素。如果將 CJC 盡可能放置在最靠近熱電偶接頭的位置，就能降低上述這種 CJC 錯誤。

如果要減少來自 CJC 感測器的錯誤，就必須使用設定在冷點溫度承受範圍內的準確溫度感測器，例如 RTD、熱敏電阻或 IC 溫度感測器。如果要減少來自量測裝置的錯誤，就必須使用準確度符合應用需求的裝置、定期校準裝置並僅在製造商建議的環境中執行操作。

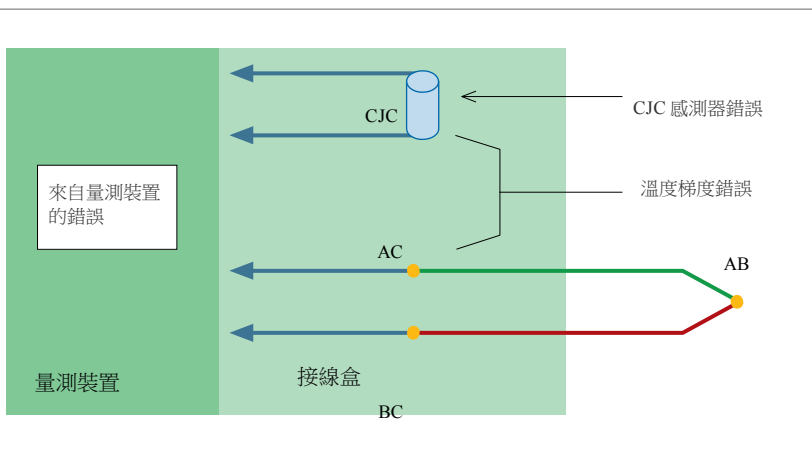


圖 5.
熱電偶量測系統

如果熱電偶直接固定/焊接在導體上或是浸泡於水中，也可能會產生雜訊。熱電偶連接至導體時，很容易受到共模雜訊和接地迴路的影響。隔離功能可避免接地迴路，並可大幅提升共模雜訊的抑制效果。若導體具有高共模電壓，就必須完成隔離處理，才能有效量測大型共模電壓。

熱敏電阻與 RTD

熱敏電阻與 RTD 都是主動式溫度感測器，需要進行電壓或電流激發。必須特別注意的是，如果輸入大量的激發電流，就可能造成自體發熱，從而影響量測精確度。若無法幫助散熱，應考慮降低激發電流。使用 RTD 或熱敏電阻時，應該使用先前提到的設定方式來建置放大濾波器與低通濾波器，才能避免產生雜訊效果。

應變規

進行應變規量測作業時，往往需要感測極小的電阻變化，因此必須選擇並使用適合的橋接與訊號處理，才能讓量測結果準確可靠。應變規分為三種：1/4 橋接、半橋接，與全橋接應變規。這些名稱代表主動感測式應變規當中惠斯通電橋的接腳數量。換言之，如果選用 1/4 橋接或半橋接，就必須需要橋接補償電路。訊號處理電路應變規通常都設計成適用於半橋接補償網路。

如果您使用的是 1/4 橋接感測器，就需要採用第三個電阻器（一般稱之為 1/2 橋接補償電阻器）。

由於大多數應變規都跟溫度感測器一樣擁有極低的輸出準位（低於 100 mV），很容易受到雜訊影響，因此需要進行放大處理。使用低通濾波器能有效避免雜訊影響不必要的高頻率元件。

應變規所需的電壓激發準位介於 2.5 V 至 10 V 之間。

如果改變已知應變準位的輸出電壓，將會提高激發電壓的正比例（direct proportion）。雖然較高的激發電壓會按比例產生較高的輸出電壓，但較高的電壓也會因為自體發熱而造成更嚴重的錯誤。自體發熱會改變應變規的電阻性與敏感度、影響轉移應變時的黏性，並在導線與箔片應變規之間產生溫度影響。

如果結構的散熱性不佳（如塑膠），溫度的影響將會更加嚴重。為了減少自體發熱的情形，您可以選用較大表面積的應變規來讓散熱性更佳，或是降低激發準位。

如果應變規電路距離訊號處理電路與激發來源過遠，長導線與小型應變規接線可能會降低傳送至橋接的激發電壓。使用遠端感測可以補償此項錯誤。遠端感測可量測實際傳送至感測器與的激發量，並可透過負反饋（Negative feedback）來調整激發電源，以補償導線耗損並供應橋接所需的電壓。

如果應變規已完成安裝並連接至惠斯通電橋，就不太可能在尚未安裝應變的情況下達到完全 0 伏特。導線電阻、應變規的瑕疵、預應變（Pre-strained）安裝條件，都會產生「不為零」的初始電壓偏移。這時候就需要使用硬體或軟體來執行偏移歸零或歸零校準，才能補償既有的橋接不平衡現象。若使用軟體進行補償，您可以在套用應變之前先進行初始量測，並在應變計算中使用此初始電壓以計算應變偏移。

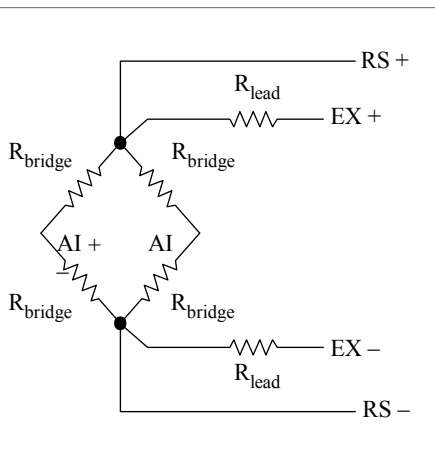


圖 6.
遠端感測會量測傳送至感測器的
實際激發準位。

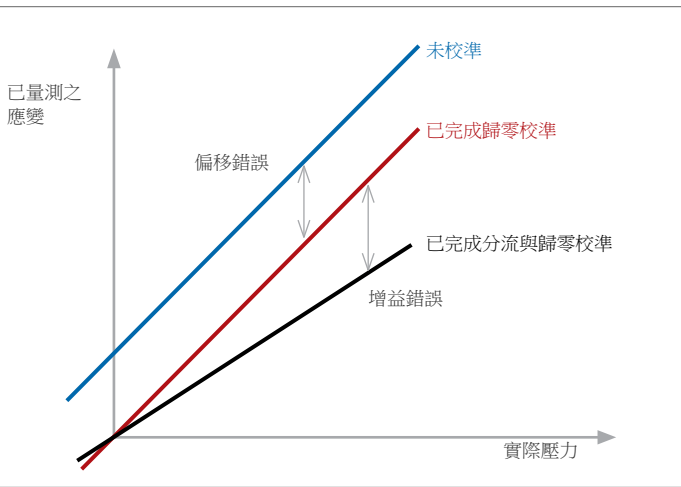


圖 7.

歸零與分流校準都能調整量測裝置的偏移與增益錯誤。

此方式既簡單又迅速，而且不需要執行任何手動調整。然而但以軟體補償傳統量測系統的缺點就是會因大型偏移而縮小有效量測範圍。另一個方法就是使用硬體來平衡橋接。首先量測初始應變，接著將電位計視為惠斯通電橋的接腳並執行微調，從而實際將橋接的輸出調整為零。您可以藉由控制電位計的電阻來控制橋接輸出的強度，並設定初始輸出為 0 V。

負載、壓力、力矩

最常用於量測負載、壓力與力矩的工具就是全橋接應變規架構感測器。由於執行全橋接設定時，惠斯通電橋的四個接腳都是應變規，因此您無須使用額外的電阻器或橋接補償電路。

負載、壓力與力矩感測器都能輸出低電壓或高電壓，輸出值取決於感測器的激發需求。感測器通常由量測裝置提供電力。低激發準位感測器的輸出訊號一般都限於毫伏或伏特範圍內，而高激發準位感測器則需要更高壓的外接電源，才能正常運作並輸出 $\pm 5\text{ V}$ 、 $\pm 10\text{ V}$ 或 4 至 20 mA 的電壓/電流。由於本章節主要討論全橋接應變量測，因此先前提及的應變量測訊號處理方式(如遠端感測與分由校準)也適用於負載、壓力與力矩的量測作業。

加速規與麥克風

形式非常接近的聲音與振動量測作業。加速規與麥克風都能量測震盪，兩者差異僅在於所使用的媒體不同，因此聲音與振動量測的理論與所需使用的訊號處理技術都十分相似。加速規與麥克風所使用的訊號處理種類主要取決於兩者是否具備內建放大器。由於加速規產生的電荷極小，因此感測器的電子訊號極可能受雜訊影響；此時必須使用敏感的電子儀器放大並處理該訊號。

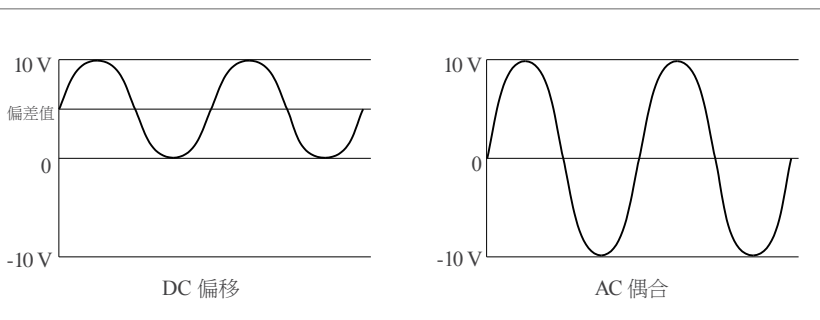


圖 8.

AC 耦合能過濾掉訊號中的 DC 元件，從而提升量測解析度。

內建電子壓電 (IEPE) 感測器能讓電荷放大器或電壓放大器更靠近感測器，從而提升雜訊阻絕功能，並更容易執行封裝作業。這種訊號處理方式能為感測器內部的電路提供穩定的電流來源。由於壓電式加速規為高阻抗的來源，因此您使用的高電荷敏感度放大器必須具備低雜訊、高輸入阻抗與低輸出

阻抗等特性。麥克風與加速規一樣能由外部或內部供電。外部極化的電容式麥克風需要 200 V 外部電源。前置極化麥克風則由 IEPE 前置放大器提供電源，而該放大器需要穩定的電流來源。

啟動 IEPE 訊號處理時，將根據激發電流與感測器阻抗，產生對應的 DC 電壓偏移。感測器所擷取的訊號同時包含 DC 與 AC 元件，而 DC 元件也於此處將 AC 元件從零開始偏移。由於訊號放大作用受到 ADC 範圍的限制，因此會降低量測的解析度。如果要解決此問題，可以建置 AC 偶合；AC 偶合又稱為電容偶合，此方式透過與訊號串聯的電容來過濾訊號中的 DC 元件。

LVDT

線性可變差動轉換器 (LVDT) 與旋轉式可變差動轉換器 (RVDT) 都是量測位置時常用的感測器。LVDT 的運作方式很類似變流器，其結構包含一個靜態式線圈總成與可動式核心。LVDT 能將任何給定的核心位置連接至特定的訊號值，從而得以量測位移狀況。LVDT 的正常運行取決於訊號處理電路。

為了激發主線圈，您必須產生正弦訊號，此訊號通常介於 400 Hz 與 10 kHz 之間，而訊號頻率必須至少是核心運動最高預期頻率的 10 倍以上。您除了應該使用與激發時相同的正弦波來為次要輸出訊號解調變，也應該使用低通濾波器來移除高頻率漣波。這樣一來，所得到的輸出就會是與核心位移成比例的 DC 電壓。

建置訊號處理系統時的重要考量

請注意，在設計任何剛完成處理的量測系統時，有些讓系統正常運作的變數可能與前述處理電路直接相關，有些則與建置方式、系統整合與設計維護等實作層面有所關聯。若忽略這些原則，可能會嚴重影響完成計畫需要花費的時間、金錢與資源。

整合性

訊號處理系統必須能輕鬆整合系統其他部分。如果徹底了解量測鏈中各元件之間的互動情況，就能分析預期結果並為意外事件執行排錯。量測鏈中的每個環節 (感測器、訊號處理各階段、ADC 或通訊匯流排等) 都可能成為錯誤的起源，並降低系統規格。您應該盡可能將量測鏈合併為單一系統 (例如在單一模組中整合訊號處理與 ADC)，藉以降低錯誤風險。

連接功能

如果在將訊號連接至訊號調整系統之前未考慮周全，很有可能造成重大問題。同級最佳的訊號處理系統應該能提供各種連接功能選項，例如熱電偶插頭、螺絲接頭與連接器。由於應用不斷變動，因此連接功能也應時時更新，提供 D-SUB、RJ45/50、mini-XLR 與 LEMO 等各種選項。隨著技術需求持續演變，為各種測試需求設計全新的連接功能裝置會讓管理難度越來越高。如果使用的方式具備眾多連接功能選項，就能減少連線與維護方面的問題。

擴充性

您只要採用模組化的方式來架構系統，就能靈活地變動並擴充通道數與訊號混合類型。如果架構的跨功能程度很高，就可能需要執行大幅度的翻新才能完成極小的變動。舉例來說，您希望能記錄溫度資料以評估測試槽中的引擎設計限制，由於熱電偶的作業範圍較廣，您原本使用熱電偶執行量測，然而為了能夠微調溫度以避免元件故障，您打算換成更準確的感測器 (例如 RTD)。而由於 RTD 是主動式感測器，因此必須在系統中加入電流刺激。若設計時採用模組化方式，就能輕輕鬆鬆替換熱電偶模組。然而如果熱電偶模組與 PCB 上的其他熱電偶模組整合於一體，便只剩下兩種選擇：繼續使用熱電偶執行量測，或大筆投資重新設計系統。

隔離

如果所測量到的訊號為高電壓或尖波電壓，您就應該將這些訊號由系統中隔離出來。如果隔離程度不夠，就可能對操作人員的安全性造成威脅，也可能破壞整體資料擷取系統的完整性。當您在判定系統隔離需求的時候，應該要具備穩定且準確的隔離規格，例如安全工作電壓額定與安裝額定。各家廠商都定期檢查隔離規格與認證，以確保產品符合業界標準。只要您充分了解這些需求，就能成功製造出隔離系統。

頻寬

設計或指定資料擷取系統時，應確認系統頻寬足夠應付您所需要的資料傳輸率，並能容納未來通道數成長。系統頻寬通常以每秒取樣為單位 (赫茲)。如果要了解系統所需的最小頻寬，可以將預期通道總數乘以每個通道的最大取樣率。

在為訊號處理設計或指定產品時，應該考量到可能影響系統頻寬的外部因子。舉例來說，許多壓力感測器都具備極高的輸出值，因此不需要執行放大。然而由於這些感測器的輸出阻抗極高，因此分工資料擷取裝置或掃描資料擷取裝置的通道設定時間會大幅增加。如果取樣率太高，電容就沒辦法及時充電或放電至正確的電壓，從而產生重影現象。如果您並未於訊號處理裝置當中加入電壓跟隨器或緩衝電路，就需要限制最高取樣率。

軟體

如果您將設定、開發與測試系統所需執行的工作與時間納入考量，就會發現測試與量測系統的主要花費都偏重於應用開發方面。如果您在專為這類型工業應用設計的環境中執行開發，就能大幅降低成本。舉例來說，雖然現在已經可以使用硬體來為應變規執行歸零校準，但您可能不希望將這樣的重責大任交付給操作人員或技師，所以您應該使用軟體來補償初始應變偏移，以確保每次擷取前都已確實完成校準。大部分的開發環境 (如 LabVIEW) 都已針對這類型的工作執行最佳化處理，讓您更具生產力，並將時間花費在更重要的項目上。

設定與安裝

任何訊號處理系統都應該操作簡便，絕對不能因為安裝過於複雜或發生設定問題而浪費時間。理想的訊號處理系統應該能檢查硬體、告知使用者哪些設備已就位，並提供軟體介面以執行設定。您也應該使用軟體環境來設定並擴充通道。

校準

您應該定期校準整體資料擷取系統，以得到最準確的量測結果。雖然大多數的量測裝置都已於生產過程中執行校準，但準確度往往隨著時間而下降。許多商用現成 (COTS) 系統都配備準確的快取電壓參考，讓使用者能調整量測系統以補償溫度變動。這種方式不僅適合用於短期的環境變化，也經常做為簡單的效能檢驗方式，在執行測試序列前先行確認操作系統完整無誤。請注意，由於快取參考也可能產生偏移，所以此方式不能取代外部校準服務。唯有外部校準服務才能讓系統時時以最佳效能運作。

如果有度量衡實驗室，您就能輕鬆的依照書上記載的校準程序執行校準。然而如果書本已過時，無法使用度量衡實驗室而又找不到建置系統的工程師，要讓系統維持校準標準很有可能費時費力。良好的 CORS 訊號處理系統能提供最新版的規格標示與校準服務，從而解決上述問題。

維護

您一旦完成訊號處理設計，就應該將所有系統資訊整理成正式文件。如果沒有詳細的文件說明，使用者就幾乎不可能自行為系統除錯、增加新功能或複製系統。您應該要事先隨時做好準備，以免設計系統的工程師任職於其他公司或投入其他計畫，而您手邊卻沒有任何系統相關說明文件。如果您花時間開發並記錄所使用的測試程序，就能在執行維修或修改時省下時間與金錢。雖然許多整合式處理服務和 ADC 硬體的 COTS 供應商都提供這類型的說明文件，但您仍需要檢驗並記錄下接線與連線圖。

實作訊號處理系統

當您考量建置並整合專屬客制化訊號處理系統，或是購買內建訊號處理解決方案時，應該仔細評估應用需求、可用資源與其他重要考量，這樣才能做出正確的決定。您可使用下表來協助選擇最適合個人應用的方式：

內建訊號處理與客制化訊號處理使用案例：

內建訊號處理	客制化訊號處理
<p>最適合：</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 混和式量測系統 ■ 具有彈性的系統或具有擴充潛能的系統 ■ 計畫時間/時限較短 ■ 可能會被複製的系統 ■ 必須長期維護的系統 	<p>最適合：</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 規模較小、功能與通道數量均固定的系統 ■ 硬體預算較低的計畫，且團隊較擅長執行類比設計 ■ 時間較長的計畫 ■ 訊號輸入非常特製化的系統

您應該將訊號處理系統視為一個處理平台，資料擷取系統的量測能力都來自於這個平台。由於目前市面上有許多產品都能準確地完成訊號處理，因此您不需要再花時間執行客制化處理。



NI 提供兩種具備訊號處理資料擷取系統的平台：CompactDAQ 與 PXI。這些系統都包含多通道訊號處理模組，並在單一機箱中提供類比輸入、類比輸出、數位 I/O、計數器/計時器與切換。

CompactDAQ 與 PXI 平台不僅滿足您一切客制化處理需求，也讓您對量測成果的準確度充滿信心。由於我們的產品將訊號處理電路、高解析度 ADC 與通訊匯流排融合為一體，因此能降低整合獨立元件可能造成的錯誤，而硬體設計投資成本也遠低於客制化電路。

作者：

David Ashlock，NI 資料擷取
產品經理

Anjelica Warren，NI 資料擷取
產品經理