

白皮書

以 MCU 為基礎的高精度量測系統

Pedro Pachuca · 瑞薩電子公司瑞薩 Synergy™ 產品管理團隊資深經理

2018 年 11 月

摘要

量測系統在工業、醫療和建築物自動化應用中，扮演著關鍵角色，這些應用經由感測器收集資料，用來提高效率，確保可靠度，或確定設備能安全地操作。本文概述了如何實作基於 MCU 的高精度系統，以減少材料清單，簡化設計，並縮減產品上市時間。[\(點此可瀏覽本文英文版\)](#)



簡介

溫度、作用力、壓力、酸鹼度等感測器，以及生醫感測器，通常用於醫療，工廠和建築物自動化應用。這些感測器產生的電氣類比訊號，與感測器所要檢測或量測的目標或其物理特性有關。這些感測器中，絕大多數是提供低電位類比輸出訊號，容易受到雜訊的影響。為了讓擷取的資料具備高精確度，系統需確保訊號的完整性，再將訊號放大，並轉換為足以讓數位系統解讀的電位。

感測器分為被動式與主動式：

- 被動感測器（如熱電偶）不需要激勵源也可以生成輸出訊號。
- 主動感測器，如生醫感測器或熱敏電阻，需要外接激勵源。這些感測器還需要用來激勵的電流或電壓，以產生電氣輸出。

無論感測器是被動式還是主動式，設計人員都得面對設計精確系統的挑戰，還得持續降低成本，並在要求的最後期限內如期完成。降低設計的複雜度，也是克服這些挑戰的主要選項之一。

本白皮書將討論以 MCU 為基礎的高精度資料擷取系統，要如何降低設計複雜度，而這可以由挑戰高整合度和設計彈性，藉此削減外部元件的方向來達成。瑞薩 Synergy™ S1JA Group MCU 就是一個具備高整合度、高精度類比功能的例子。其類比開關是以新穎的方法來實現，當作互連結構，可以軟體控制，並且策略性地實作，成為運算放大器 IP 的一部分，能夠只用最少的外部元件，實作出小到基本的類比電路，大到複雜的類比模組，具有最大的開發彈性。

量測系統

基本量測系統主要由三級組成：感測器級、訊號調節級和訊號處理級，如圖 1 所示。感測器級將物理特性（例如作用力）轉換為電訊號（例如電壓、電流、電阻值、電容值等）。訊號調節級將小訊號的變化，轉換為更適合於額外處理的電位。訊號處理級將類比訊號轉換為數位表示法——數位化的訊號能夠進行進一步分析，讓系統實現某些任務或行為。

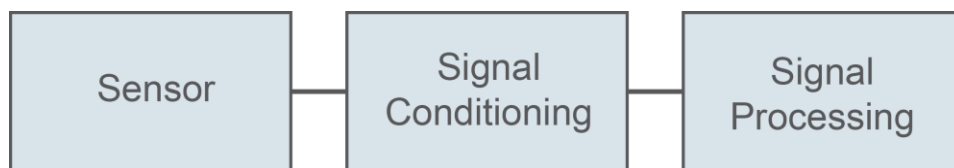


圖 1：基本量測系統

想要保證量測系統成功，訊號調節級真的非常重要。感測器的訊號通常相當敏感，幅度非常小。輸出的顆粒性（granularity）在放大時需要特別小心，雜訊無論是由內部產生，還是經由外部的感應或傳導而來，都會外顯成誤差，這往往會使訊號失真。主動感測器需要激勵訊號，這算是訊號調節級的一部分，而該訊號可以是定值或是動態值。生醫感測器就是主動感測器，又需要動態激發的好例子。為了正確起動感測器，應該隨著時間的推移，小心地運用一系列可變訊號，以便完成化學反應。激勵訊號的精確度和顆粒性，對於保證感測器訊號的可靠輸出極為重要。

用於訊號調節的電子元件必須仔細挑選，因為某些電氣規格會顯著影響訊號調節級的品質。本文包含對訊號調節電路的簡要說明，以及最常用在訊號調節電路中的電子元件，某些最重要的電氣特性所帶來的影響。

訊號處理級通常使用資料轉換器來實作，例如類比數位轉換器和線性化電路。類比數位轉換器的準確度和精密度特別讓人感興趣，因為這兩個規格的影响，會對整個量測系統產生相當大的作

用。我們將準確度定義為實際值和測量值之間的誤差。如果誤差太大，我們的量測系統，可能會導致整個系統出現不穩定或錯誤的行為。本文介紹了一些最常見的訊號處理要素，以及其電氣規格。

因為瑞薩 Synergy S1JA MCU 具有類比功能的高整合度、彈性和易用性，所以在這裡用來做為例子，解釋訊號調節級、訊號處理級，以及突顯類比功能的關鍵電氣規格。

訊號調節電路

感測器的滿刻度輸出相對較小，因此在應用數位處理之前，該對其輸出進行適當的調節。圖 2 顯示了最常見的訊號調節電路，如放大、濾波和阻抗耦合。

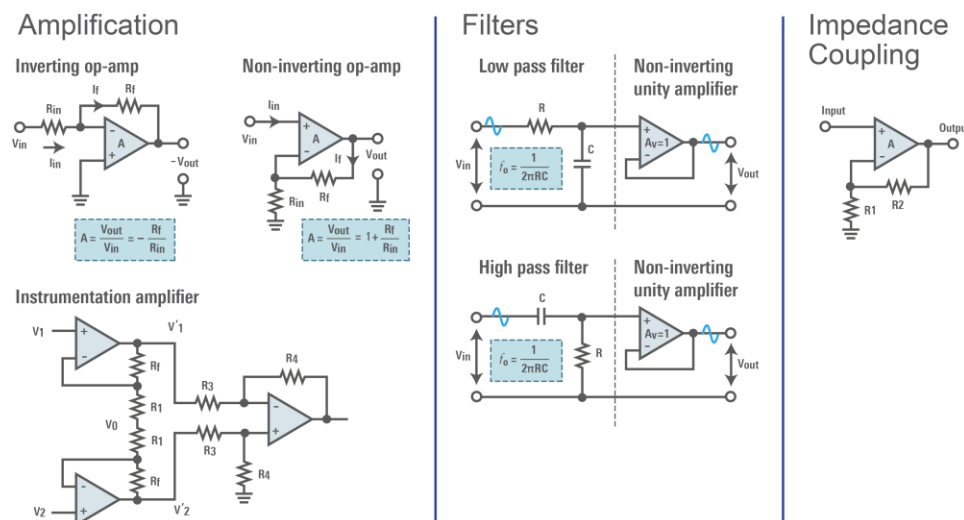


圖 2：訊號調節電路

傳統上，訊號調節電路使用外部獨立元件（OP-AMPS）來實作。在積體微控制器產品中很難實現靈敏的規格，例如輸入偏移電壓（input offset）、軌對軌操作，以及輸入雜訊密度。然而，技術製程和設計技巧的進步，讓這些電路以非常高品質和可靠的規格實現了。

舉例來說，瑞薩 Synergy S1JA MCU 提供三組不同的運算放大器。除此之外，其類比開關是以新穎的方法來實現，當作互連結構，讓使用者以最少的外部元件設計出訊號調節電路。圖 3 顯示了運算放大器的實作;還包括其彈性的簡要說明。

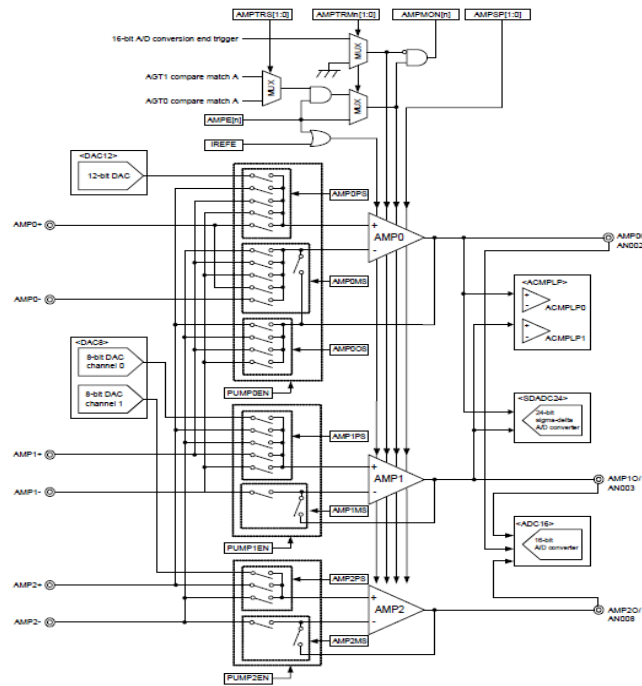


圖 3：瑞薩 Synergy S1JA 運算放大器的實作用於訊號調節

S1JA 內建 OPAMP 配置功能

S1JA MCU 的內建運算放大器，提供以下能力和功能模式，增強了可實作的配置數量。內部連接削減了使用外部 PCB 走線的需求，進而降低了 PCB 的複雜度。

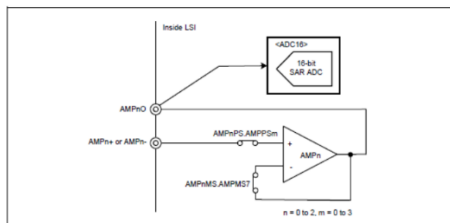
- 這三個單元的 OPAMP0 和 OPAMP1 可用來輸入訊號給低功耗類比比較器 (ACMPLP) 和 24 位元的三角積分 A/D 轉換器 (SDADC24)
- 支援高速模式 (高電流消耗)、中速模式 (中等電流消耗) 和低功耗支援模式 (慢速反應)，並且可以根據反應速度和電流消耗之間的取舍來選擇任何模式
- 可以透過非同步通用計時器 (AGT) 的觸發訊號來啟動操作
- 可以透過 16 位元 A/D 轉換結束觸發訊號來停止操作
- 所有單元都有可選擇輸入訊號的開關。除此之外，OPAMP0 更有一個可以選擇輸出接腳的開關
- OPAMP 的輸出可以從 AMP00 到 AMP20 接腳來輸出，而不通過開關
- 所有 OPAMP 單元的 I/O 訊號可用於 ADC16 的輸入訊號
- DAC8 和 DAC12 的訊號輸出可用作每個 OPAMP 的正輸入訊號

- 可以藉由回授自身的 OPAMP 輸出訊號，作為 OPAMP 的負輸入訊號，來配置電壓跟隨器電路。

圖 4 顯示了要如何使用軟體控制的互連開關結構，以輕鬆實作常見的訊號調節電路（詳細資訊可在 renesas.com 的 S1JA 使用手冊中找到）。

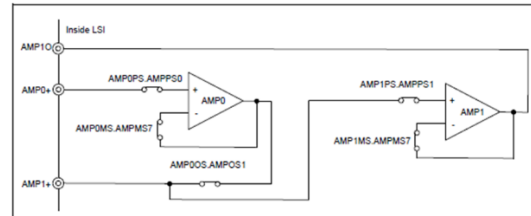
Voltage follower

A general operational amplifier can configure a voltage follower by feeding back its own output signal as its own negative input signal.



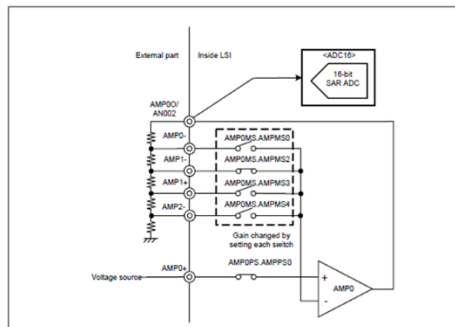
Cascade voltage follower

Use general-purpose analog port n (AMP1+, AMP1-, AMP2+ or AMP2-) to input the pre-amplifier output signal to the post amplifier. To connect the signal output from the voltage follower of operational amplifier 0 to the positive input of operational amplifier 1



Programmable non-inverter amplifier

A programmable non-inverting amplifier can be configured using a combination of configurable switches and external resistors connected to general-purpose analog ports.



Programmable Trans-Impedance Amplifier

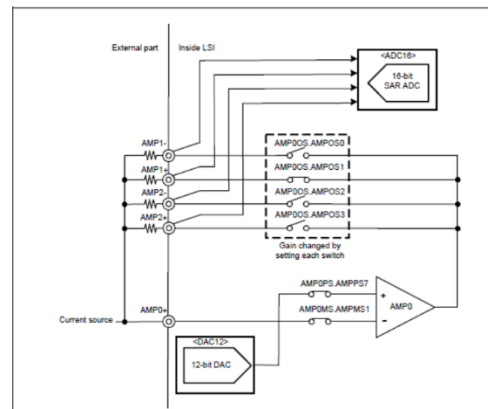


圖 4：使用瑞薩 S1JA MCU 實作訊號調節電路

使用互連開關結構，也可以輕鬆實作其他配置，例如儀錶放大器和數位至類比緩衝放大器。因為是可以用軟體配置的互連結構，所以一些配置可以在運行間完成，為應用的全新高層次開啟了大門。除了有彈性的可配置性外，S1JA 的運算放大器還提供使用者微調功能，可根據使用者的要求調整偏移電壓。

訊號處理電路

訊號處理鏈中的基本類比功能之一，就是類比數位轉換器（ADC），其基本功能是量取類比系統並產生數位表示法。ADC 位於數位電路的前端，來處理任何來自外部世界的訊號。

我們會根據具體的應用要求，來選擇某一種 ADC。然而，儘管 ADC 的類型很多，但主要功能則是相同的——將某個訊號轉換為某些數量的位元。為了便於說明，下面是一個使用階梯斜坡技術（staircase ramp technique），來解釋 ADC 基本功能的範例。

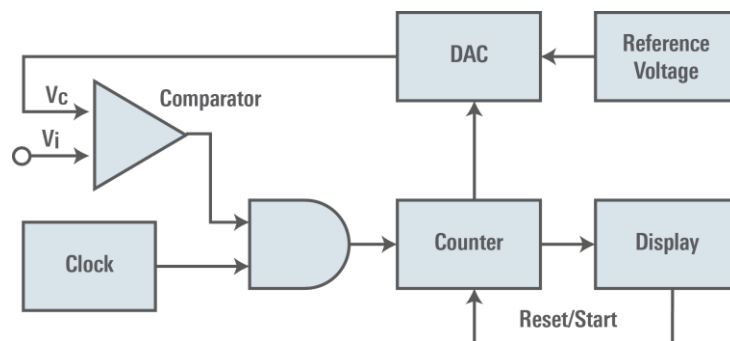


圖 5：ADC 基本功能

基本原理：Vi 輸入與內部的階梯化電壓進行比較。在測量開始時， $V_c = 0$ 並且計數器設為 0。比較器輸出則是設為，當 $V_i > V_c$ 時，比較器輸出閘打開，計數器根據時脈輸入開始計數。計數器提供數值給 DAC，使 DAC 開始產生輸出電壓，進而增加 V_c 。當 V_c 等於或略大於 V_i 時，比較器輸出改變極性並關閉輸出閘，停止計數器。計數的數值與 V_c 成比例，因此與 V_i 成比例，而且計數器會保持住訊號值的數字表示法。

如上所述，ADC 有許多種類型。在本文中，我們將重點介紹連續逼近暫存器式 ADC 與三角積分式 ADC，以及如何在瑞薩 Synergy S1JA MCU 中實作這些 ADC，以提供完整的量測系統。

瑞薩 Synergy S1JA 連續逼近暫存器式（SAR）ADC

S1JA MCU 提供 16 位元連續逼近暫存器式類比數位轉換器（Successive-Approximation Register ADC，SAR ADC）。藉由搭配使用運算放大器與類比開關的互連結構，以及使用 MCU 的內部資源（如精密參考電壓），還有削減 ADC 專用的外接晶體振盪器，該 ADC 的實作，讓使用者能夠減少材料清單，並且簡化設計。圖 6 顯示了 S1JA 的 SAR ADC 實作細節。

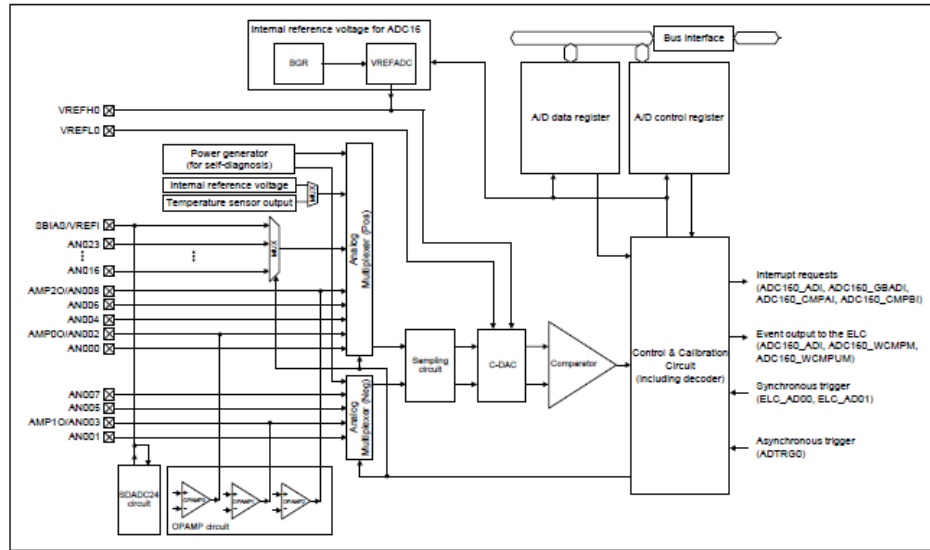


圖 6 : S1JA 的 SAR ADC 實作

S1JA SAR ADC 提供多達 17 個類比輸入通道，以及一個可選擇的轉換用內部參考電壓，這是削減材料清單的重要選項之一。內部參考電壓可規劃為 1.5 V、2 V 和 2.5 V 典型值。藉由各式各樣的選項，使用者就可以淘汰掉外部電壓參考源。

可用於訊號調節的 S1JA 內部運算放大器，也可以內部連接到 SAR ADC 輸入，進而淘汰了可能危及訊號完整性的外部走線。除此之外，安全功能（如自我診斷和類比輸入斷開檢測）也不必外接元件，即可監控本身的 ADC 功能。

表 1 簡要概述了 S1JA SAR ADC 的電氣規格。

參數	典型值	單位	有關具體條件，請參閱 使用手冊
解析度	16	位元	
積分非線性 (INL)	± 4	LSB	
微分非線性 (DNL)	-1 至 +2	LSB	
ENOB	13.2	位元	
轉換時間	0.82	µs (每通道)	

表 1 : S1JA 的 SAR ADC 技術規範

S1JA SAR ADC 還提供校正功能，藉由在 C-DAC 級使用條件下的內部生成類比輸入，得到線性誤差校正和增益（偏移）誤差校正值，來實現高精度測量。使用者能夠在每次測量開始時校正 ADC，以獲得最佳結果。校正基於以下三個步驟來執行：

步驟 1 — 當 ADC 轉換開始時，計算 C-DAC 線性誤差和增益的校正值

步驟 2 — 完成全部值的計算後，將生成 ADC 中斷校正訊號

步驟 3 — 完成校正，使用者可以開始掃描程序

當 ADC 時脈等於 32MHz 時，估計校正完成的時間約花費 24.22ms。

瑞薩 Synergy S1JA 24 位元三角積分式 A/D 轉換器

三角積分式類比數位轉換器（Sigma-Delta ADC， $\Sigma\text{-}\Delta$ ADC）基本上是由一個過取樣調變器（oversampling modulator）和一個數位/數位降頻濾波器（digital/decimation filter）所組成，協同工作以產生高解析度的資料流輸出。這種 ADC 用於各式各樣的工業應用，從溫度感測器、工業級磅秤，到流程控制感測器都有。典型的獨立三角積分式 ADC 需要外部精密參考電壓和外部時脈；這些外部元件增加了整個設計的設計複雜性與成本。

瑞薩 Synergy S1JA MCU 提供了支援單端和差動量測能力的整合解決方案。參考電壓是可選擇的，可以使用 0.8 V 至 2.4 V 範圍內的內部參考電壓，增量為 0.2 V，這樣可以進行廣泛而有彈性的選擇，以滿足各種應用要求。此外，24 位元三角積分式 A/D 轉換器的時脈，是由 MCU 週邊時脈來產生，不必用外部時脈，因此可以降低成本和設計複雜度，同時提高了系統可靠性。

功耗過敏設計（power-sensitive design）需要在低功耗下操作，S1JA 內建的三角積分式 ADC 使用 125 KHz 至 500 KHz 的參考時脈，來提供低功耗轉換模式。這是透過在 MCU 中使用內部除頻器實現的，不必使用外部低頻時脈。

在典型的量測系統中，訊號調節系統的輸出連接到三角積分式 ADC，以將類比訊號轉換為數位表示法。使用內建 OPAMP 的類比開關「互連結構」，可以輕鬆實作這種連接，不需要由外部連接，因而簡化 PCB 設計，如圖 7 所示。可選擇 OPAMP0 輸出和 OPAMP1 輸出作為三角積分式 ADC 的輸入。

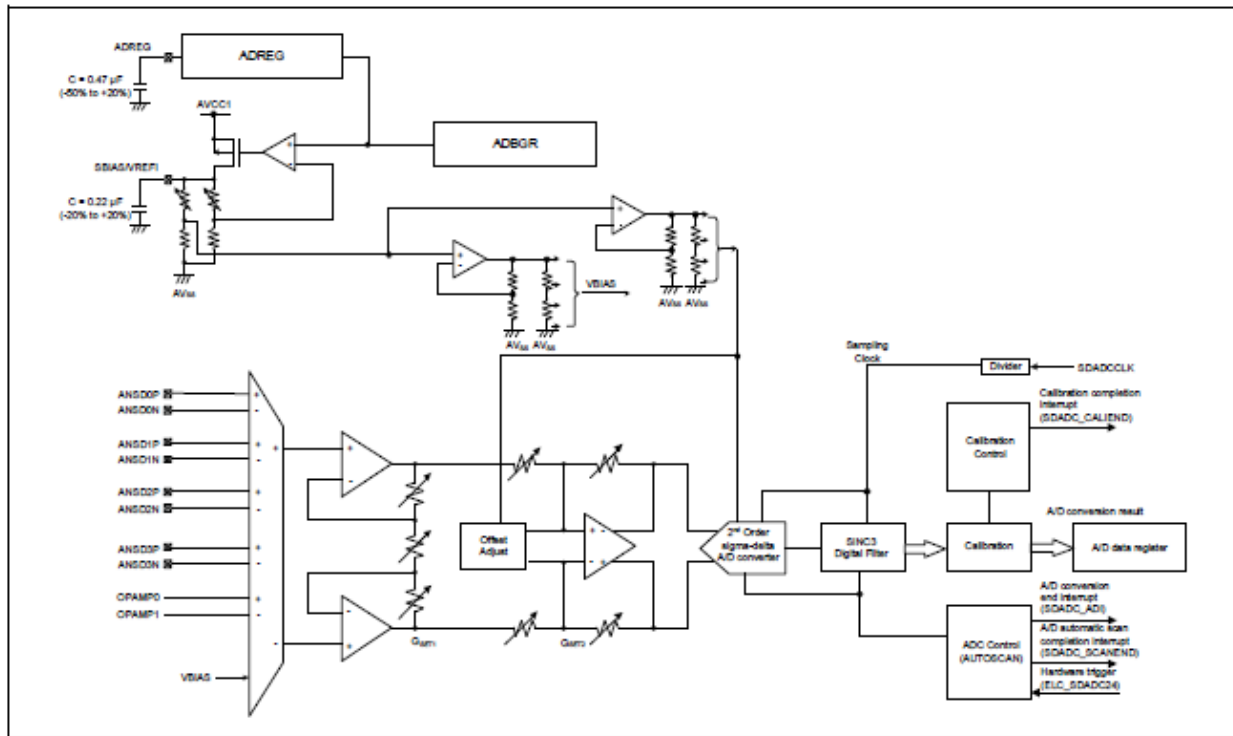


圖7：瑞薩S1JA MCU的三角積分式ADC實作

有一項整合在S1JA三角積分式ADC中的獨特功能是SBIAS，可用於為外部感測器供電。輸出電壓範圍為0.8 V至2.2 V，可以設定的單位為0.2 V。輸出電流為10 mA（最大值）。SBIAS具有過流（電流超過最大值）保護電路。如果發生過電流狀態，保護電路會保護內部電路。SBIAS電路讓使用者可以削減掉原先必須為感測器提供偏壓的外部電源。

除了本文中提供的優勢外，S1JA三角積分式ADC的啟動轉換（start-conversion）還可以透過事件連結控制器模組（event-link controller module）進行控制，該模組可以將各種週邊模組生成的事件請求當作訊號源，再將這些訊號連接到不同的模組，也允許模組之間的直接連結，不必由CPU來介入。設計人員可以使用此功能來實現不同的功能來增強其產品，例如精確定時測量或動態偏壓系統。有關更多詳細資訊，請參閱使用手冊中的S1JA事件連結控制器章節。

結論

完全整合型微控制器（例如 S1JA）可提供高精度類比功能，如運算放大器、三角積分式 ADC、連續逼近式 ADC 和數位類比轉換器，使設計人員藉由削減外加元件來簡化設計。除此之外，這麼做還可以降低成本並提高系統可靠度。技術製程和設計技術的進步，讓以前只能用外部分離元件來實作的高品質規格類比功能，現在得以直接實現。在微控制器中內建類比功能，提供了有趣的方向來創建類比和數位功能的組合，而且完全在使用者控制下協同工作。設計師的想像力才是設計新應用的唯一限制。

©2018 瑞薩電子美國公司（REA）。版權所有。所有商標均為其各自所有者的財產。REA 相信此處的資訊在提供時是正確的，但不承擔其品質或使用上的風險。所有資訊均以其原始狀態提供，且無任何明示、暗示、法定、或由交易、使用、或貿易慣例所產生的保證，包括但不限於適銷性、特定用途適用性、或不侵權。REA 不對因使用或依賴此處資訊而導致的任何直接、間接、特殊、後果性、偶發性、或其他損害承擔責任，即使已被告知可能發生此類損害。REA 保留權利在不另行通知的情況下，停止產品或更改其產品的設計或規格或此處的其它資訊。所有內容均受美國和國際版權法保護。除非此處特別許可，未經瑞薩電子美國公司事先書面許可，不得以任何形式或透過任何方式複製本文中的任何部分。訪客或使用者不得針對此處的任何內容，進行修改、散佈、發行、傳送、或創建衍生產品，用於任何公共或商業目的。