

白皮书

基于 MCU 的高精度测量系统

瑞萨电子株式会社，Renesas Synergy™产品管理团队资深经理 Pedro Pachuca

2018 年 11 月

摘要

测量系统在工业、医疗和楼宇自动化应用中发挥着重要作用，从传感器收集的数据可用来提高效率，确保可靠性或确认设备是否在安全运行。本文概述了如何实施基于 MCU 的高精度系统，以便减少物料清单、简化设计并缩短面市时间。

引言

在医疗、工厂和楼宇自动化应用中，常用的传感器包括温度传感器、力传感器、压力传感器、pH 传感器和生物传感器等。这些传感器可生成与其想要检测或测量的物理属性相关的模拟电信号。大多数这些传感器提供的是易受噪声影响的低电平模拟输出信号。为了采集到高精度的数据，系统需要确保信号完整，并放大信号以及将信号转换为可被数字系统解析的电平。

此外，传感器类别还有 *无源或有源* 之分：

- 无源传感器生成输出信号无需激励源，例如热电偶。
- 有源传感器则需要使用外部激励源，例如生物传感器或热敏电阻。此外，这些传感器还需要激励电流或电压才能产生电输出。

无论无源还是有源传感器，设计人员都面临挑战，既要设计出精确的系统，又要降低成本并满足严苛的截止日期要求。降低设计复杂性是克服这些挑战的主要选项之一。

鉴于高集成度和灵活性挑战，本白皮书将讨论基于 MCU 的高精度数据采集系统如何通过消除外部组件来降低设计复杂性。Renesas Synergy™ S1JA 群组 MCU 具有高度集成、高精度模拟功能，我们将以此为例进行说明。新实施的模拟开关作为互连结构，可使用软件控制，巧妙融入运算放大器 IP，帮助我们灵活地开发从基本模拟电路到复杂模拟模块的所有器件，尽可能减少外部组件。

测量系统

基本测量系统主要包括三个阶段：传感器、信号调节和信号处理，如图 1 所示。传感器阶段将物理属性（例如力）转换成电信号（例如电压、电流、电阻、电容等）。信号调节阶段将微小的信

号变化转换为更适合进行其他处理的电平。信号处理阶段将模拟信号转换为数字表示形式 - 数字化信号有助于进一步分析，从而使系统能够实施特定的任务或行为。

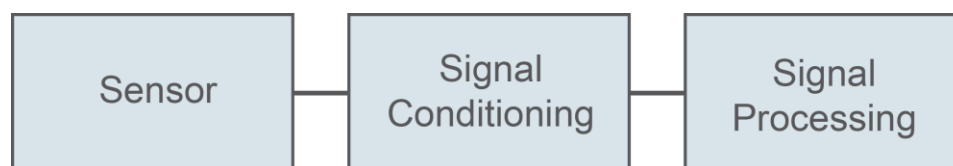


图1: 基本测量系统

信号调节阶段对于保证测量系统成功十分重要。传感器的信号通常相当敏感，并且幅值很小。在放大时需要特别注意输出灵敏度，无论内部生成还是外部引发或导致的噪声均会表现为误差，往往会使信号中的信息失真。作为信号调节阶段的一部分，有源传感器需要恒定或动态的激励信号。生物传感器是需要动态激励的有源传感器的一例。要正确激活传感器，应随时间推移小心应用一段范围的可变信号，让化学反应完成。要保证可靠地输出传感器信息，激励信号的精度和灵敏度至关重要。

信号调节阶段使用的电子组件必须精心选择，因为有些电气参数可能会对信号调节阶段的质量造成重大影响。本文将简要说明信号调节电路，以及信号调节电路中最常用电子组件的部分最重要电气特性。

信号处理阶段通常使用数据转换器实施，例如模数转换器和线性化电路。模数转换器的准确性和精度具有重要意义，因为这两项参数会对整个测量系统产生可观影响。我们将准确性定义为实际值与测量值之间的误差。如果此误差过大，测量系统可能导致整个系统出现异常或错误行为。本文介绍了一些最常用的信号处理元件及其电气参数。

鉴于 **Renesas Synergy S1JA MCU** 高度集成的模拟功能、灵活性和易用性，我们将以此为例来说明信号调节和信号处理阶段，并着重介绍模拟功能的关键电气参数。

信号调节电路

传感器的满量程输出相对较小，因此正确调节它们的输出之后，才能进行数字处理。图 2 显示了最常用的信号调节电路，例如放大、滤波和阻抗耦合。

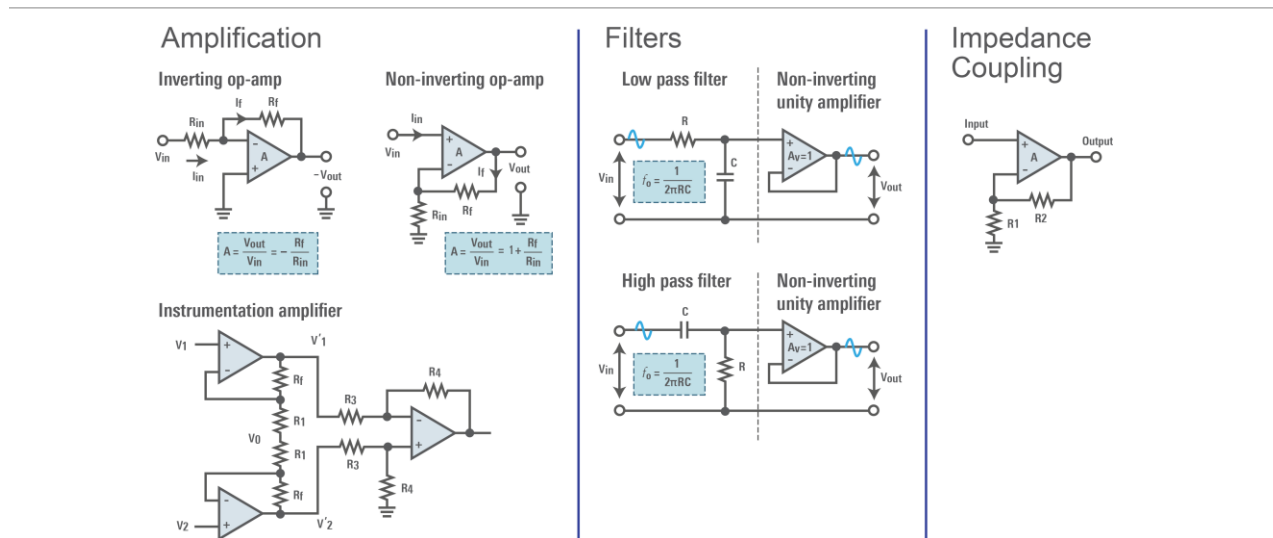


图2：信号调节电路

传统上，信号调节电路使用外部独立组件 (OP-AMPS) 实施。在集成的微控制器产品中实现输入偏移、轨到轨操作和输入噪声密度等敏感参数非常困难。不过，技术工艺和设计技术的进步使这些电路可实现高质量和可靠的参数指标。

例如，Renesas Synergy S1JA MCU 可提供三种不同的运算放大器。此外，新实施的模拟开关可巧妙地实施为互连结构，使用户能够在尽可能减少外部组件的前提下设计信号调节电路。图 3 显示了运算放大器的实施情况；此外简要说明了其灵活性。

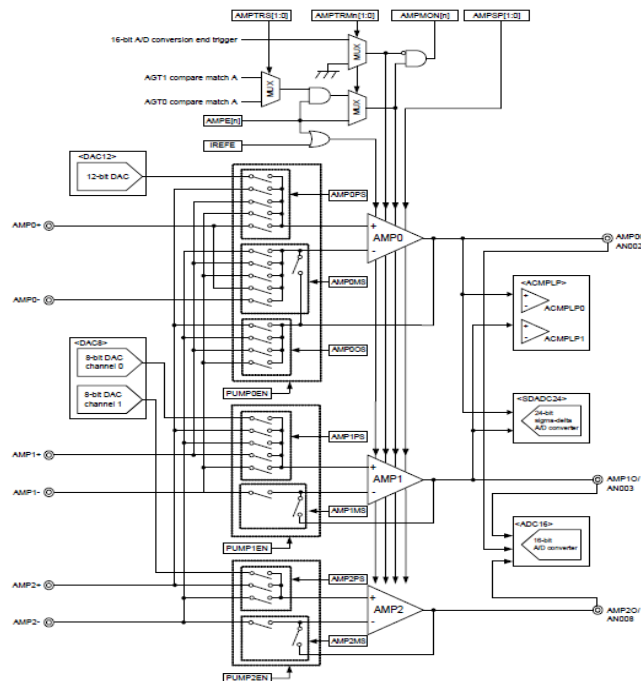


图3：用于信号调节的 Renesas Synergy S1JA 运算放大器实施方案

S1JA 集成的 OPAMP 配置功能

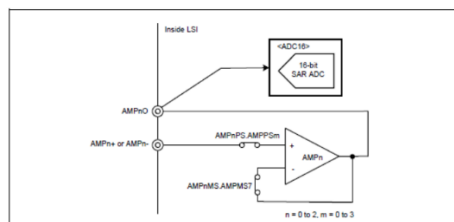
S1JA MCU 的集成式运算放大器提供以下功能和功能模式，增加了可实施的配置数。内部连接通过消除外部 PCB 布线降低 PCB 复杂性。

- 三个单元的 OPAMP0 和 OPAMP1 可用来向低功耗模拟比较器 (ACMPLP) 和 24 位 Sigma-Delta 模数转换器 (SDADC24) 输入信号
- 支持高速模式（高电流消耗）、中速模式（中等电流消耗）和低功耗模式（慢速响应），根据响应速度与电流消耗之间的取舍可选择任何模式
- 异步通用定时器 (AGT) 的触发可启动运算
- 16 位模数转换终止触发器可停止运算
- 所有单元均包含可选择输入信号的开关。此外，OPAMP0 还包含可选择输出引线的开关
- OPAMP 输出可从 AMP0O 引线输出至 AMP2O 引线，无需经由开关
- 所有 OPAMP 单元的 I/O 信号均可用作 ADC16 的输入信号
- DAC8 和 DAC12 的信号输出可用作每个 OPAMP 的正输入信号
- 电压跟随器电路可通过反馈自己的 OPAMP 输出信号作为 OPAMP 的负输入信号进行配置。

图 4 显示了如何使用可通过软件控制的互连开关结构轻松实施常见的信号调节电路（详细信息请参见 renesas.com 上的 S1JA 用户手册）。

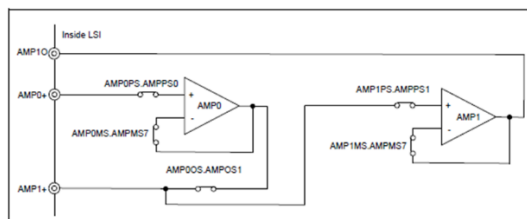
Voltage follower

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



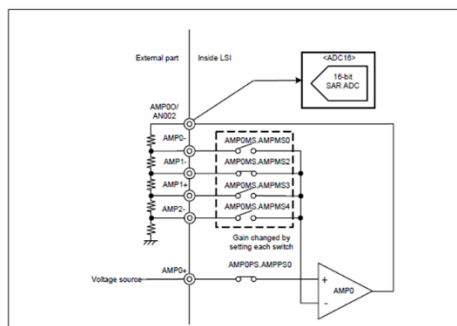
Cascade voltage follower

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

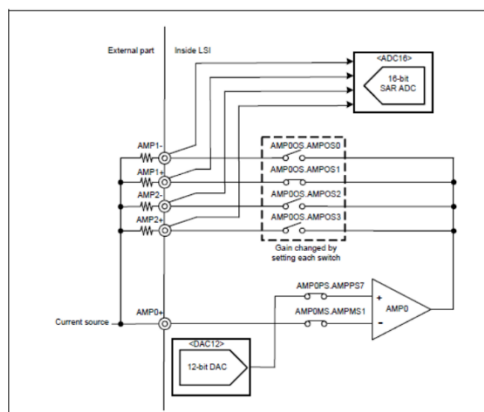


图4：使用 Renesas S1JA MCU 实施的信号调节电路

检测放大器和数模缓冲放大器等其他配置可使用互连开关结构轻松实施。作为可通过软件配置的互连结构，有些配置可实时进行，为新一级应用铺平道路。除了灵活的可配置性，S1JA 的运算放大器还提供用户微调功能，用于调整偏移以符合用户要求。

信号处理电路

信号处理链的基本模拟功能之一是模数转换器 (ADC)，其基本功能是采样模拟系统并创建数字表示形式。ADC 位于任何数字电路的前端，需要处理来自外部世界的信号。

选择何种 ADC 类型取决于具体的应用要求。不过，尽管 ADC 有许多类型，但主要功能相同 - 将特定信号转换为特定位数。为了说明，以下示例使用阶梯斜升技术展示 ADC 的基本功能。

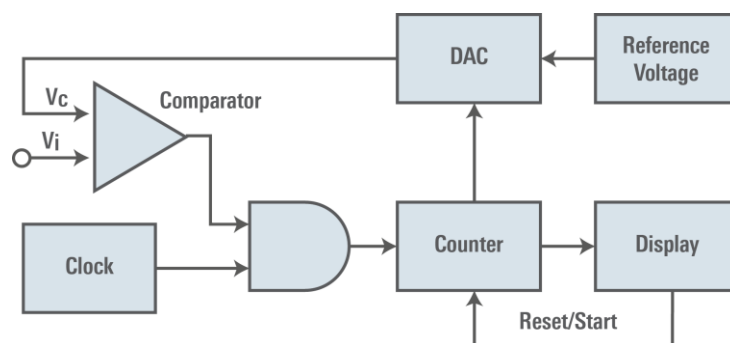


图5：ADC 基本功能

基本原理：将 V_i 输入与内部阶梯型电压进行比较。测量开始时， $V_c = 0$ 且计数器设置为 0。比较器输出设置为：当 $V_i > V_c$ 时，比较器输出高电平，并且计数器开始基于时钟输入计数。计数器向 DAC 提供输入，后者开始生成输出电压，从而提高 V_c 。当 V_c 等于或稍大于 V_i 时，比较器输出

将更改极性并且低电平，从而停止计数器。计数与 V_c 成正比，因此与 V_i 亦成正比，并且计数器保留信号值的数字表示形式。

如上所述，ADC 有许多类型。本文将重点介绍逐次逼近寄存器和 Sigma Delta ADC，以及在 Renesas Synergy S1JA MCU 中如何实施这些 ADC 来提供完整测量系统。

Renesas Synergy S1JA 逐次逼近寄存器 (SAR) ADC

S1JA MCU 提供的是 16 位逐次逼近模数转换器。通过实施此款 ADC，用户可搭配使用运算放大器和模拟开关的互连结构，使用 MCU 内部资源（例如精密基准电压）并消除专用外部晶振（外部 ADC 组件），从而减少物料清单并简化设计。图 6 显示了 S1JA 的 SAR ADC 实施细节。

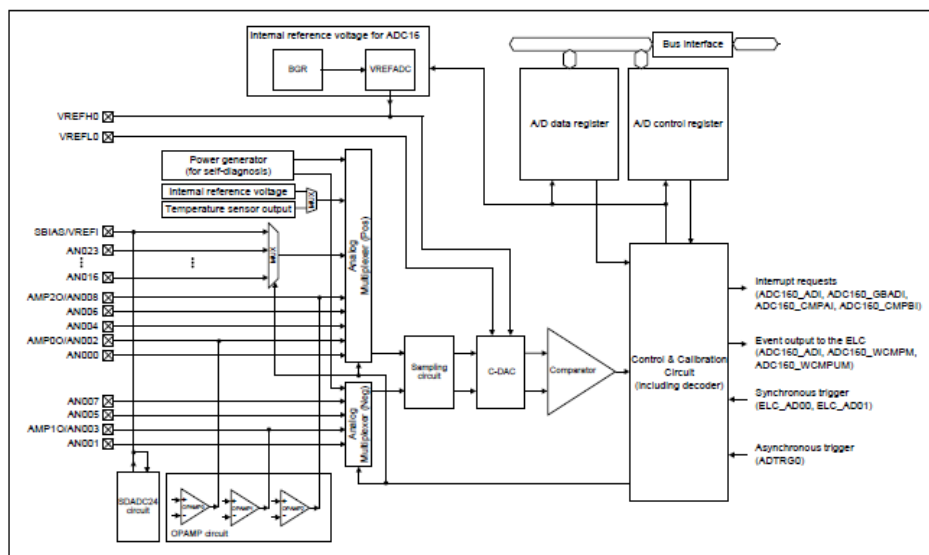


图 6: S1JA 的 SAR ADC 实施方案

S1JA SAR ADC 提供多达 17 个模拟输入通道和一个内部基准电压，可选择用于转换，这是减少物料清单的重要选项之一。对于 1.5 V、2 V 和 2.5 V 典型值，内部基准电压可编程。凭借广泛的选项，用户可避免使用外部基准电压。

在内部，用于信号调节的 S1JA 内部运算放大器可连接至 SAR ADC 输入，从而消除可能损害信号完整性的外部路径。此外，安全功能（例如自我诊断和模拟输入断开检测）无需使用外部组件即可监控适当的 ADC 功能。

表 1 简要概述了 S1JA 的 SAR ADC 的电气规格。

参数	典型值	单位	请参阅用户手册了解 具体条件
精度	16	位	
积分非线性 (INL)	± 4	LSB	
微分非线性 (DNL)	-1 - +2	LSB	
ENOB	13.2	位	
转换时间	0.82	uS (每通道)	

表 1: S1JA 的 SAR ADC 技术规格

S1JA SAR ADC 还可通过在 C-DAC 阶段获取内部生成的模拟输入使用条件下的线性校准值和增益（偏移）校准值，提供校准功能来实现高精度测量。这使用户能够在每次测量开始时校准 ADC 以获取最佳结果。校准基于以下三个步骤执行：

步骤 1 - 在 ADC 转换开始时，计算 C-DAC 线性误差和增益的校准值

步骤 2 - 完成所有值的计算后，生成 ADC 中断校准

步骤 3 - 完成校准，用户可开始扫描程序

当 ADC 时钟等于 32Mhz 时，完成校准的时间预计大约为 24.22ms。

Renesas Synergy S1JA 24 位 Sigma-Delta 模数转换器

Sigma-Delta ADC 基本上包含一个过采样调制器和一个数字/抽样滤波器，两者配合生成高精度数据流输出。这些 ADC 广泛用于各种工业应用，从温度传感器和工业称量台到工艺控制传感器等等。典型的独立 Sigma-Delta ADC 需要使用外部精密基准电压和外部时钟；这些外部组件会增加整体设计的复杂性和成本。

Renesas Synergy S1JA MCU 提供了一种集成解决方案，可支持单端微差测量功能。可选择的基准电压在 0.8 V 至 2.4 V 范围内（增量为 0.2 V）可使用内部基准电压，选择范围更大更灵活，可满足大量应用要求。此外，24 位 Sigma-Delta A/D 转换器时钟基于 MCU 外设时钟生成，无需使用外部时钟，由此可降低成本和设计复杂性，并可提高系统可靠性。

功耗敏感型设计需要低功耗运行，而 S1JA 的集成式 Sigma-Delta ADC 提供低功耗转换模式，使用的参考时钟范围介于 125 KHz 到 500 KHz。这源于 MCU 的内置分频器，无需再使用外部低频时钟。

在典型测量系统中，信号调节系统的输出连接到 Sigma-Delta ADC，将模拟信号转换为数字表示形式。使用集成式 OPAMP 的模拟开关“互连结构”可轻松实现这种连接，无需外部连接并可简

化 PCB 设计，如图 7 所示。可选择 OPAMP0 输出和 OPAMP1 输出作为 Sigma-Delta ADC 的输入。

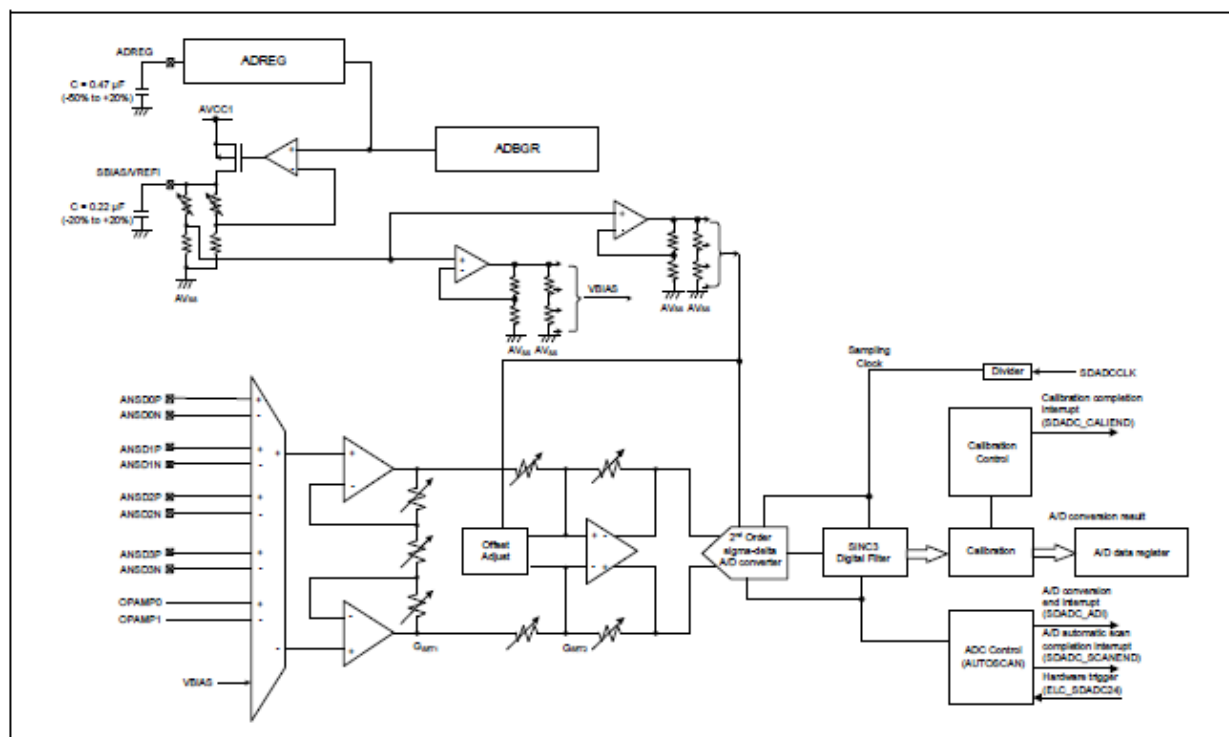


图7: 用于Renesas S1JA MCU 的 Sigma-Delta ADC 实施方案

S1JA Sigma-Delta ADC 集成的一种独特功能是 **SBIAS**，可用来为外部传感器供电。输出电压范围在 **0.8 V** 至 **2.2 V** 之间，设置步距为 **0.2 V**。输出电流为 **10 mA**（最大值）。**SBIAS** 配备过电流（电流超出最大值）保护电路。如果出现过电流状态，保护电路将保护内部电路。**SBIAS** 电路使偏差传感器无需使用外部电源。

除本文所述的优点之外，**S1JA Sigma-Delta ADC** 还可通过事件链接控制器模块来控制开始转换操作，该模块可使用各种外围模块生成的事件请求作为源信号，以将其连接到不同的模块，从而在这些模块之间建立直接链接，无需 **CPU** 干预。设计人员可利用这种功能来实施不同的功能，增强产品性能，例如精确时间测量或动态偏差系统。有关更多详细信息，请参阅用户手册的 **S1JA 事件链接控制器** 章节。

结论

利用提供高精度模拟功能（例如运算放大器）的完全集成式微控制器（例如 S1JA）、Sigma-Delta ADC、逐次逼近 ADC 和数模转换器，设计人员可以简化设计，而无需使用外部组件。此外，它们还可降低成本并提高系统可靠性。技术工艺和设计技术的进步，让以前必须依靠外部专

用组件的高质量规格的模拟功能无需借助外部组件也能实施。微控制器中集成的模拟功能可创建模数组合功能，在用户控制下配合使用。新应用设计的局限仅在于设计人员的想象力。

© 2018 Renesas Electronics America Inc. (REA). All rights reserved. 所有商标或商业名称均是其各自所有者的资产。REA 认为本文档所含的信息在提供时准确无误，但对其质量或使用不承担任何风险。所有信息均按原样提供，不作任何种类的担保，无论是明示、暗示、法定担保，还是因交易、使用或贸易惯例引发的担保，包括但不限于对适销性、对特定目的适宜性或非侵权性的担保。REA 对因使用或依赖本文档所含信息造成的任何直接、间接、特殊、结果、偶然或其他损失概不负责，即使已提示相关损失的可能性亦不例外。REA 保留停止这些产品或更改其产品设计或规范或本文档其他信息的权利，恕不另行通知。所有内容均受美国和国际版权法保护。除非本文明确声明，否则未经瑞萨电子（美国）事先书面许可，不得以任何形式或方式复制本材料的任何部分。访客或用户不得因任何公开或商业目的而修改、分发、发布、传播本材料的任何内容或制作其衍生作品。