

TI Designs

该参考设计展示了如何借助无线链路来构建隔离式 pH 传感器。由于大多数现代消费类设备中均集成了 Bluetooth® 智能，因此本文选用该无线技术以方便进行测试和演示。采用的外形规格和电气连接与 TI SensorTag 生态系统兼容，允许通过其他无线技术（Zigbee、WiFi、低于 1GHz 等）轻松实现原型设计。同时，选用的 pH 前端还可实现工业级精度和分辨率。

设计资源

TIDA-00561	设计文件夹
LMP91200	产品文件夹
ADS1120	产品文件夹
REF3220	产品文件夹
TS5A3159	产品文件夹
SensorTag	工具文件夹

设计特性

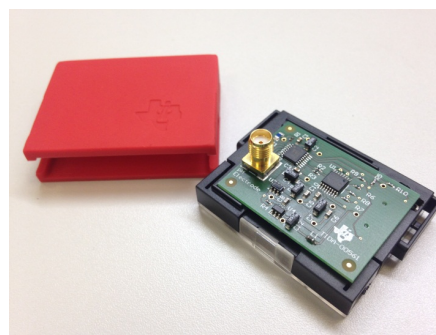
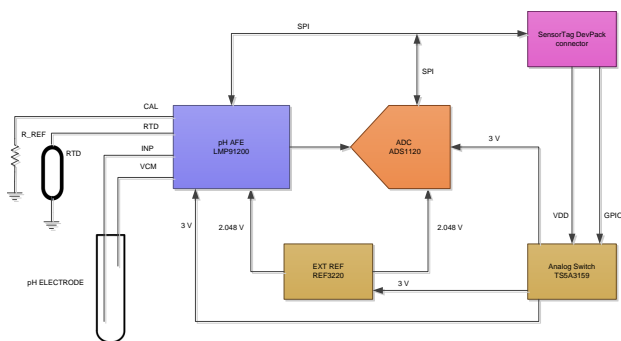
- 隔离式（无线）pH 传感器发送器
- 蓝牙智能接口
- pH 输入偏置电流 < 7pA
- 在广播模式下低于 200µA
- 包含用于温度补偿的 PT100
- 精度：在 25°C 时为 ±0.01 pH
- 可重复性：在 25°C 时为 ±0.01 pH
- 温度范围：-40°C 至 125°C

特色应用

- 隔离式现场发送器
- 无线现场发送器



咨询我们的 E2E 专家
WEBENCH® 设计中心



该 TI 参考设计末尾的重要声明表述了授权使用、知识产权问题和其他重要的免责声明和信息。

1 系统概述

1.1 系统简介

pH 测量是一个涵盖甚广的通用测量领域，适用于从过程控制（pH 漂移可能表明过程漂移）到回收厂以及非工业领域的各种应用范围。实验室测试和测量设备、家庭自动化设备（如游泳池监控、饮用水质量监控等电网基础设施监控）以及其他设备可能也会涉及 pH 测量。

该参考设计具有高精度、温度补偿并在 PLC/DCS/PAC 和感应元件本身之间提供电气隔离，专门用于满足过程控制应用的需求。

该 TI 参考设计中介绍的系统旨在解决以下难题：

表 1. TIDA-00561 行业解决方案

行业难题	TIDA-00561 解决方案
接地回路电势差	通过无线通信实现接地回路隔离
无线通信标准碎片	与大多数便携式电子产品兼容的蓝牙智能接口
pH 探针高阻抗	输入偏置电流低于 7pA 的模拟前端
对环境噪声敏感的 pH 感应	硬件支持的三轴探针（具有信号线屏蔽件）

1.2 主要系统规格

表 2 仅说明了 SensorTag 应用于完整系统时 pH 传感器板的性能以及相应的温度限制。

表 2. 主要系统规格

参数	规格	值	详细信息
输入偏置电流	85°C	< 6.5pA	请参阅 节 3.1.4
精度		< 0.02pH	请参阅 4.2 节 和 6 节
温度范围	T _A	-40°C 至 125°C	请参阅 节 3.1.4 , 节 3.1.5 , 节 3.1.6 , 节 3.1.7

2 工作原理

本节旨在围绕 pH 测量主题进行一般性介绍，从 pH 的国际标准定义开始，帮助读者了解在后续各节中做出的设计决策。

2.1 pH

本节介绍 pH 定义、pH 测量方法（化学角度和电子角度）、可实现的精度以及相关的测量条件。

2.1.1 pH 定义

在常见的物理化学量中，pH 的概念非常独特。其定义式如下所示：

$$\text{pH} = -\lg a_{\text{H}} = -\lg \left(\frac{m_{\text{H}} \gamma_{\text{H}}}{m^{\circ}} \right) \quad (1)$$

其中

- a_{H} 是相对（质量摩尔浓度基准）活度
- γ_{H} 是氢离子 H^+ 在质量摩尔浓度 m_{H} 溶液中的摩尔活度系数
- m° 是标准质量摩尔浓度

就定义而言，这是一个纯理论定义。根据定义，pH 需要计算单个离子的活度（氢离子），但是无法通过有效的方法测量这一活度。[1]

这就导致出现了多种国际惯例，直至 *DEFINITION OF pH SCALES, STANDARD REFERENCE VALUES, MEASUREMENT OF pH AND RELATED TERMINOLOGY*[2] 中出现并正式规定了一种国际公认的可行测量方法。该方法使用一种名为“哈纳特电池”的电池进行测量，是 pH 绝对测量的主要方法。

哈纳特电池的定义式如下： $\text{Pt} \mid \text{H}_2 \mid \text{buffer S, Cl}^- \mid \text{AgCl} \mid \text{Ag}$

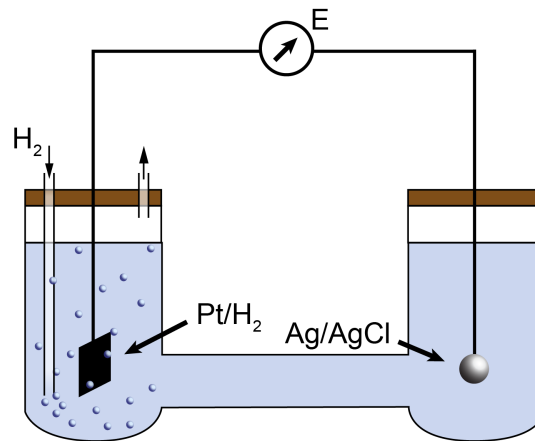


图 1. 用于一级 pH 测量的哈纳特电池

注：根据 IUPAC 有关命名法和符号的推荐文献[3]，单个竖线 (|) 表示相界，虚竖线 (|) 表示两种电解质溶液之间的液体-液体接界（将在该接界上产生电势差），双虚竖线 (||) 表示类似的液体接界，假设其中 LJP 实际为零（约为电池电势差的 1%）。

未满足全部一级标准但可以使用原电池为其指定 pH 值的物质被视为二级标准物质。表 3 中列出了部分二级标准材料的参考 pH(SS) 值。

表 3. pH(SS) 二级标准参考[3]

二级标准	温度 (°C)									
	0	5	10	15	20	25	30	37	40	50
0.05mol kg ⁻¹ 四草酸钾 ⁽¹⁾		1.67	1.67	1.67	1.68	1.68	1.68	1.69	1.69	1.71
0.05mol kg ⁻¹ 一缩二羧乙酸氢钠 ⁽²⁾		3.47	3.47	3.48	3.48	3.49	3.50	3.52	3.53	3.56
0.1mol dm ⁻³ 醋酸 + 0.1mol dm ⁻³ 醋酸钠	4.68	4.67	4.67	4.66	4.66	4.65	4.65	4.66	4.66	4.68
0.1mol dm ⁻³ 醋酸 + 0.1mol dm ⁻³ 醋酸钠	4.74	4.73	4.73	4.72	4.72	4.72	4.72	4.73	4.73	4.75
0.02mol kg ⁻¹ 磷酸哌嗪 ⁽³⁾	6.58	6.51	6.45	6.39	6.34	6.29	6.24	6.16	6.14	6.06
0.05mol kg ⁻¹ 三羟甲基氨基甲烷盐酸盐 + 0.0167mol kg ⁻¹ 三羟甲基氨基甲烷 ⁽³⁾	8.47	8.30	8.14	7.99	7.84	7.70	7.56	7.38	7.31	7.07
0.05mol kg ⁻¹ 四硼酸二钠	9.51	9.43	9.36	9.30	9.25	9.19	9.15	9.09	9.07	9.01
饱和 (25°C) 氢氧化钙	13.42	13.21	13.00	12.81	12.63	12.45	12.29	12.07	11.98	11.71

⁽¹⁾ 四乙二酸钾 (KH₃C₄O₆)

⁽²⁾ 2,2'-氧二醋酸氢钠

⁽³⁾ 2-氨基-2-(羟甲基)-1,3-丙二醇或三(羟甲基)氨基甲烷

除了 pH 二级标准，在实验室和工业场地环境中测量 pH 的最常见方法是使用玻璃电极（有关更多详细信息，请参阅节 2.1.4）。

2.1.2 pH 标度

一种相对常见的误区认为 pH 值标度介于 0 至 14 之间，但事实并非如此。自然环境中也存在负 pH 值（例如，在酸性极强的矿井水中）[3]。

形形色色的教科书让这一概念得到了广泛传播，而除此之外，造成这种误解的原因也与缺乏合适的 $\text{pH} < 1$ 缓冲液标准以及相关实验所面临的难题有关。图 2 给出了本设计指南采用的 pH 标度建议表示方法：

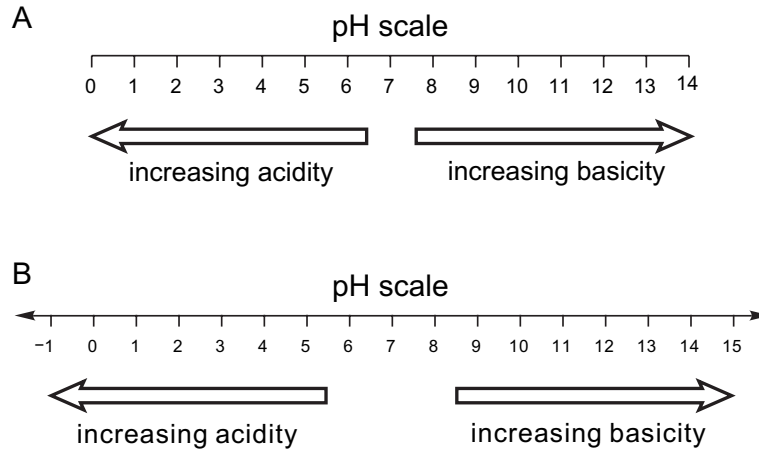


图 2. 两种 pH 标度：A) 常见教科书图解，
B) 更为宽泛的开放性标度图解

在现实层面上，通过查阅文献，我们发现以下事实：

- Ebeko 火山附近温泉的 pH 值预计低至 -1.7 [5][6]
- 美国加利福尼亚州 Iron Mountain 的 Richmond 矿井的 pH 低至 -3.6 [9]
- 某些工业产品的 pH 介于 -2 至 16 之间[10]
- 有关其他工业产品的描述称“包含非水溶剂的溶液的 pH 值可能超出 $[0$ 至 $14]$ 的范围”[11]

2.1.3 pH 精度

一级 pH 电池不确定度大约为 0.004[2]。对于工业传感器，优于 0.02 pH 的不确定度没有任何意义，图 3 显示了能够对此进行更好解释的计量学溯源。

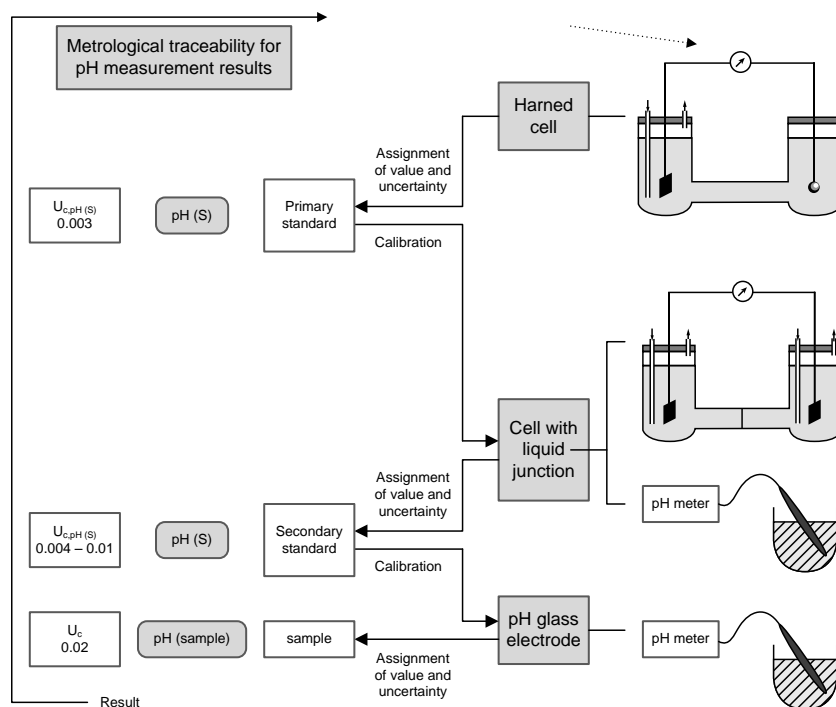


图 3. pH 的计量学溯源原理图

除了有关一级 pH 的参考，为了在设计电子系统时保持相应的 pH 测量不确定度，表 4（摘自 *DEFINITION OF pH SCALES, STANDARD REFERENCE VALUES, MEASUREMENT OF pH AND RELATED TERMINOLOGY*, Table 4[2]）列出了限制测量系统精度的相应物理化学不确定度：

表 4. 各个系统设计目标精度对应的 pH 不确定度

	U(pH) (包含因子 2)	备注
一级标准 (PS)		
通过哈纳特电池 I 测得的 PS 不确定度 (由 NMI 测得)	0.004	
通过哈纳特电池 I 测得的 PS 重复性 (由 NMI 测得)	0.0015	
与哈纳特电池 I 相比较的测量再现性	0.003	EIROMET 比较
PS 缓冲液批次之间的典型差异	0.003	
二级标准 (SS)		
与通过哈纳特电池 I 测得的相同 PS 相比较的 SS 值	0.004	相对于所采用的 PS，增加的不确定度可以忽略
通过哈纳特电池 I 测得的 SS 值	0.01	例如，生物缓冲液
根据电池 II 或 IV 的不同 PS 标记的 SS 值	0.015	
通过电池 V 测得的 SS 值 (与 Pt H ₂ 不兼容)	0.02	基于邻苯二甲酸盐的示例
电极校准		
多点 (5 点) 校准	0.01 至 0.03	
通过插入法进行的校准 (2 点)	0.02 至 0.03	
校准 (1 点)， $\Delta\text{pH} = 3$ ，以及假设的斜率	0.3	

表 4 介绍了不同的校准方法及其对应的不确定度。不过，本设计指南并没有详述实验室步骤；以下各节高度概述了有关步骤以及相应的适用范围。

2.1.3.1 pH 精度 - 5 点校准

多点校准需要使用多达五种标准缓冲液。就可获取的统计信息而言，即使测量点超过五个，也不会显著改善测量结果。

利用所测得电势差的线性回归得出校准函数。

2.1.3.2 pH 精度 - 2 点校准

在大多数实际应用中，玻璃电极电池通过两点校准或定标法进行校准。这种方法利用具有 pH(S1) 和 pH(S2) 的两种标准缓冲溶液来标定未知的 pH(X)。

通常情况下，定标法要求所选缓冲液的 pH(S1) 和 pH(S2) 应分别恰好高于和低于 pH(X)；不过，IUPAC 并未对此做出强制要求。

2.1.3.3 pH 精度 - 1 点校准

考虑到单点校准不足以确定两个斜率偏移，更多情况下，斜率的理论值是假定值，而实际斜率可能最多比该值低 5%。

因此，一点校准得到的 pH(X) 不确定度最高。由于斜率和偏移可能会随着电极的老化而变化，所以，这种方法最不可靠。

2.1.3.4 pH 精度 - 低于 1 和高于 13

即使在现在，一级标准也仅定义为低至 3（二级 pH 标准仅低至 1.67）。因此，当 pH 值低于 1.0 pH 时，玻璃电极可能会受到化学侵蚀并导致得出的酸值存在误差也就不足为奇了。

与之类似，通过标准玻璃电极测量 pH 高于 11 的溶液的精度时，应在使用系统生成并采样的电压之前仔细检查所测溶液。

对于极端的 pH 值，可以考虑使用替代测量方法，如环形电导率测量。

2.1.3.5 混合溶剂测量法

考虑到玻璃电极主要用于测量水溶液中的 pH，当测量非水溶剂时，pH 读数将偏离预期值。

在这些情况下，应在实验室环境下在混合溶剂溶液中进行 pH 测量，并在线上之前将测量数据与玻璃电池测量数据相关联。此外，在开始进行现场测量之前应考虑电极的 O 形环退化。

2.1.4 pH 玻璃电极

现代 pH 电极是一种组合电极，其中包含两个主要部件：玻璃电极和参比电极，如图 4 中所示。pH 本质上通过测量这两个电极之间的电压差进行确定。电极的末端有一张薄膜，由一种特殊玻璃制成，能够进行离子交换。正是该元件可以感应测试溶液的氢离子浓度。参比电极电势是恒定的，由与参比充填液（其 pH 保持为七）接触的参比电极内部元件生成。

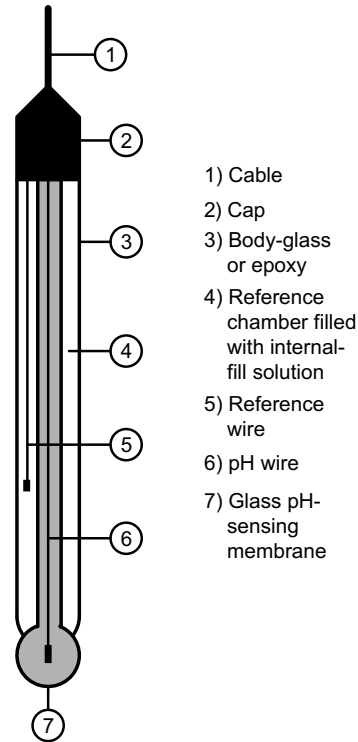


图 4. 典型的 pH 玻璃电极

作为 pH 函数的电压斜率称为能斯特电势。

2.1.4.1 pH 电极特性

对任何传感器而言，在使用 pH 电极进行设计时，设计人员都务必要了解传感器特性及其对特定应用的影响。这些特性包括传感器是有源还是无源、单极还是双极以及是否具有电压或电流输出。还应该考虑传感器敏感度、线性、满量程和源阻抗。

pH 电极是无源传感器，这意味着无需激励源（电压或电流）。由于其电极的输出可能在参考点上下摆动，因此它被归类为双极传感器。它生成的电压输出与所测溶液的 pH 线性相关。

pH 电极的源阻抗非常高，因为薄玻璃泡具有很大的电阻，其范围通常为 10 至 1000MΩ。这意味着只能通过高阻抗测量器件来监测电极。

pH 电极的传递函数为：

$$\text{pH}(X) = \text{pH}(S) + \frac{(E_S - E_X)F}{RT \ln(10)} \quad (2)$$

其中

- pH(X) = 未知溶液 (X) 的 pH
- pH(S) = 标准溶液的 pH = 7
- E_S = 参比电极或标准电极处的电势
- E_X = pH 测量电极处的电势
- F 表示法拉第常数 = $9.6485309 \times 10^4 \text{C mol}^{-1}$
- R 表示通用气体常数 = $8.314510 \text{J K}^{-1} \text{mol}^{-1}$
- T 表示以开尔文为单位的温度

如图 5 和图 6 中的传递函数所示，pH 测量电极生成的电压随着溶液 pH 的增大而降低。

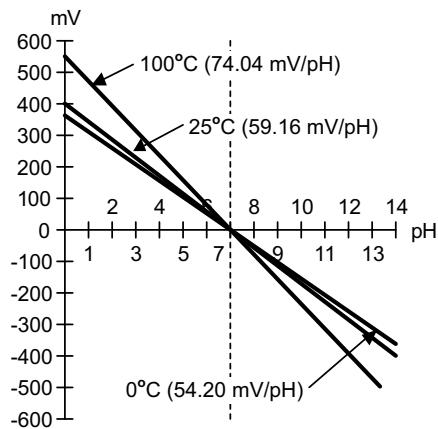


图 5. pH 电极传递函数

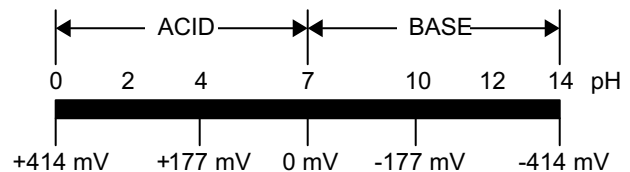


图 6. pH 标度

请注意，pH 电极的敏感度随温度的变化而变化。pH 电极传递函数显示，敏感度随温度的增大以线性方式增加（根据公式 3）：

$$\frac{RT \ln(10)}{F} \text{ or } 0.000198T \text{ V / pH} \quad (3)$$

由此可以得出与温度相关的传感器输出满标量程。例如，25°C 时，电极敏感度为 59.16mV/pH，电极的输出将从 $-7 \text{ pH} \times -59.16\text{mV/pH} = 414.12\text{mV}$ (pH 0 强酸) 摆动到 $7 \text{ pH} \times -59.16\text{mV/pH} = -414.12\text{mV}$ (pH 14 强碱)。不过，如果测量的溶液温度增加至 100°C，输出将从 $-7 \text{ pH} \times -74.04\text{mV/pH} = 518.29\text{mV}$ 向下摆动至 $7 \text{ pH} \times -74.04\text{mV/pH} = -518.29\text{mV}$ 。鉴于这种性质，了解所测溶液的温度并进行相应的测量补偿至关重要。

在 pH 为 7 的溶液中时，25°C 的理想电极将生成 0mV。当然，在现实世界中，电极不可能处于理想状态，因此将产生偏离 0mV 的实际读数。这种变化称为电极的偏移误差。如先前所述，25°C 理想电极的敏感度为 59.16mV/pH 单位。任何相对于该理想值的变化都被规定为电极的量程误差。如果需要达到高系统精度，则需要通过校准来处理这些误差。

2.1.5 电气噪声

考虑到高输出阻抗，最经典的方法是设计具有高输入阻抗的有源输入电路，以避免电压读数由于欧姆定律而偏置。

该高输入阻抗电路导致的后果是，在噪声环境中，pH 探针电缆拾取的噪声可能很大（也就是说，高于所述的系统精度）。

多种情况都会造成这种后果：

- 模拟域滤波（在 ADC 级抑制混叠噪声所需的任何方法）
- 数字域滤波（允许设置移动平均值和标准偏差，此外还可剔除异常值）
- 使用三轴电极电缆（将屏蔽来自噪声的信号）

3 设计方法

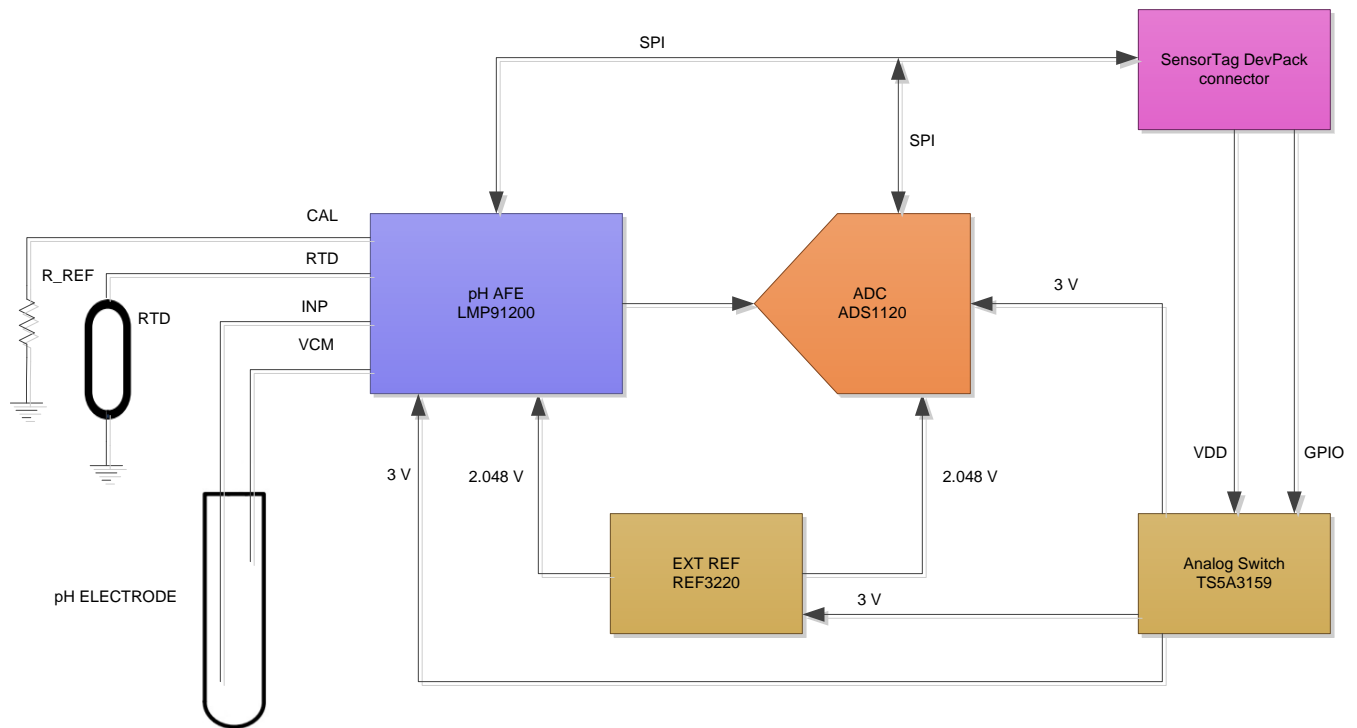


图 7. 可用作无线 **Sensor Tag** 扩展板的 pH 传感器电子产品

用于 pH 测量的无线系统需要满足多种功能需求：

- 可进行 pH 电极电压采样的高输入阻抗
- 可实现 pH 温度相关性补偿的温度测量
- 可最大程度延长电池运行时间的低功耗
- 可最大程度降低测量不确定度的噪声抑制

以下各节介绍如何解决这些设计难题。

3.1 设计概念高度概述

3.1.1 信号链

连接传感器需要完整的信号链。该设计围绕 AFE LMP91200 进行构建，该器件为外部探针、pH 电极和 RTD 传感器（pt100 或 pt1000）提供第一个接口。它设置电极的电压共模 (V_{CM})，抑制 RTD 中的电流，多路复用输入，并输出将由模数转换器 (ADC) 进行采样的差分信号。LMP91200 的低输入偏置电流可以使输入偏置电流和电极电阻生成的电压误差达到最小。实际上，pH 电极的输出阻抗极高，其范围为 10 至 1000M Ω 。例如，假设使用的 pH 电极的阻抗为 10M Ω 并且所用运算放大器的偏置电流为 3nA，如果不使用 LMP91200，那么由于该放大器的输入偏置电流和 pH 电极的源阻抗而导致的误差为 30mV。使用 LMP91200，通过 125fA 的输入偏置电流，可将该误差降至 1.25 μ V。

3.1.2 ADC

ADS1120 是 16 位精密 Σ - Δ ADC，用于实现最大精度。通常，良好的 pH 探针在 0 至 14 的 pH 范围内具有 ± 0.01 pH 的分辨率以及 -0.4 至 0.4 V 的电压范围。要检测 0.01 pH 的变化，需要小于 0.51mV 的分辨率。考虑电路的有效位数 (ENOB) 为 14，对于 2.048V 基准，ADC 将提供每位 0.125mV 的分辨率，这可以满足最佳的 pH 探针需求。为了从 ADC 的差分输入满标量程获益，在读取 pH 数据时使用值为 4 的 PGA。

3.1.3 PT100 校准

使用具有 0.1% 精度的 100 Ω 基准电阻器进行内部校准和误差补偿。如果使用 PT1000 RTD，则应使用 1000 Ω 基准电阻器代替 100 Ω 基准电阻器。LMP91200 和 ADS1120 从 REF3220 获取相同的基准电压，并且两者连接在同一条 SPI 总线上。

3.1.4 LMP91200 – pH 前端

特性:

- 用于温度测量的可编程输出电流
- 可编程输出共模电压
- 有源保护
- 板载传感器测试
- 由 Webench 传感器 AFE 设计工具提供支持
- 由 Webench 传感器设计工具提供支持

主要规格:

- 除非另有说明, 否则 $T_A = 25^\circ\text{C}$ 时的典型值为 $V_S = (V_{DD} - GND) = 3.3\text{V}$
- pH 缓冲器输入偏置电流 ($0 < V_{INP} < 3.3\text{V}$)
 - 25°C 时的最大值: $\pm 125\text{fA}$

- 85°C 时的最大值: $\pm 445\text{fA}$
- pH 缓冲器输入偏置电流 ($-500\text{mV} < V_{INP} - V_{CM} < 500\text{mV}$), $V_S = (V_{DD} - GND) = 0\text{V}$
 - 25°C 时的最大值: $\pm 600\text{fA}$
 - 85°C 时的最大值: $\pm 6.5\text{pA}$
- pH 缓冲器输入偏移: $\pm 200\mu\text{V}$
- pH 缓冲器输入偏移电压漂移: $\pm 2.5\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
- 电源电流 (pH 模式): $50\mu\text{A}$
- 电源电压: 1.8 至 5.5V
- 工作温度范围: -40°C 至 125°C
- 封装: 16 引脚 TSSOP

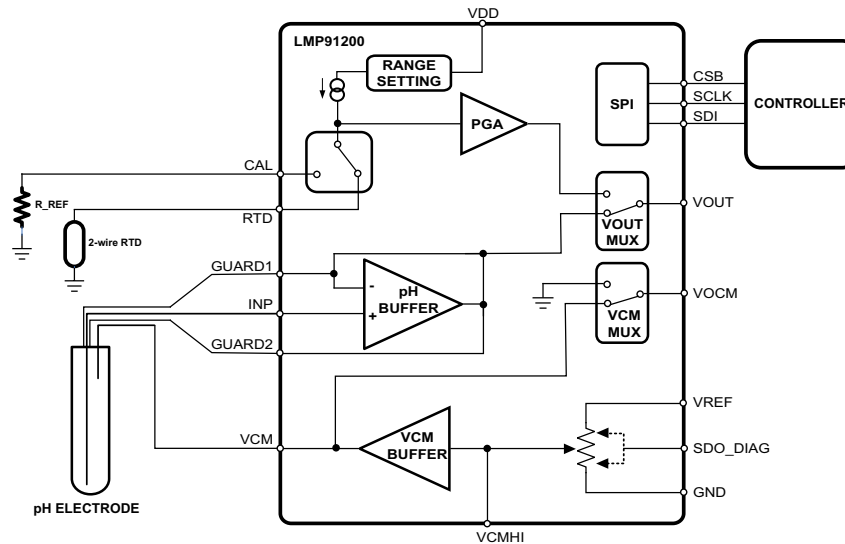


图 8. LMP91200 典型应用

pH 缓冲器是具有低输入偏置电流的单位增益缓冲器。利用共模选择器, 可以根据在 V_{REF} 引脚上施加的电压基准设置七个不同的共模电压值 (从 $1/8$ 到 $7/8 V_{REF}$, 阶跃为 $1/8 V_{REF}$)。

如先前所述, LMP91200 还支持 RTD。内部电流源是编程电流发生器, 能够生成四种不同的电流值 ($100\mu\text{A}$ 、 $200\mu\text{A}$ 、 1mA 、 2mA), 以便很好地激励 PT100 和 PT1000 热敏电阻器。选择的电流源自 RTD 引脚 (对于热敏电阻器连接) 或 CAL 引脚 (对于基准电阻器连接)。热敏电阻器或基准电阻器上的电压由 PGA (5V/V 、 10V/V) 进行放大, 并在 LMP91200 设置为温度测量模式时在 VOUT 引脚上提供。

3.1.5 ADS1120 - 低功耗 ADC

特性:

- 低电流消耗: 在占空比模式下低至 120 μ A (典型值)
- 宽电源范围: 2.3 至 5.5V
- 可编程增益: 1 至 128V/V
- 可编程数据速率: 高达 2kSPS
- 16 位无噪声分辨率 (20SPS 时)
- 采用单周期稳定数字滤波器, 在 20SPS 时实现同步 50Hz 和 60Hz 抑制
- 两个差分输入或四个单端输入
- 双匹配可编程电流源: 50 μ A 至 1.5mA
- 集成 2.048V 基准电压: 5ppm/ $^{\circ}$ C (典型值) 漂移
- 内部 2% 精确振荡器
- 内部温度传感器: 0.5 $^{\circ}$ C (典型值) 精度
- SPI 兼容接口 (模式 1)
- 封装: 3.5 \times 3.5 \times 0.9mm VQFN

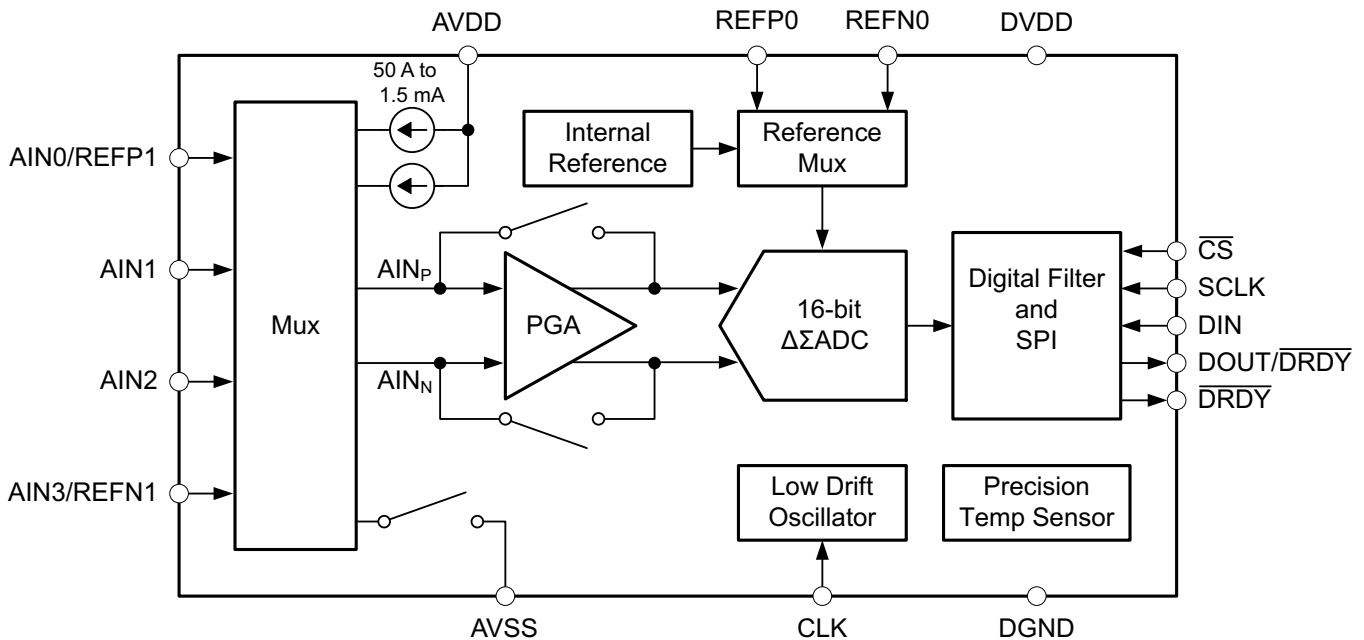


图 9. ADS1120 功能框图

3.1.6 REF3220 - 电压基准

特性:

- 出色的指定漂移性能:
 - 0°C 至 125°C 时为 7ppm/°C (最大值)
 - -40°C 至 125°C 时为 20ppm/°C (最大值)
- 微型封装: SOT23-6
- 高输出电流: $\pm 10\text{mA}$
- 高精度: 0.01%
- 低静态电流: 100 μA
- 低压降: 5mV

3.1.7 TS5A3159 - 用于实现高功效的负载开关

特性:

- 指定的先断后合开关
- 低导通电阻 (1 Ω)
- 控制输入可承受 5V 电压
- 低电荷注入
- 出色的导通电阻匹配
- 低的总计谐波失真
- 1.65V 至 5.5V 单电源运行
- 闩锁性能超过 100 mA, 符合 JESD 78 II 类规范
- ESD 性能经测试符合 JESD 22 规范
 - 2000V 人体放电模型 (A114-B, II 类)
 - 1000V 充电器件模型 (C101)

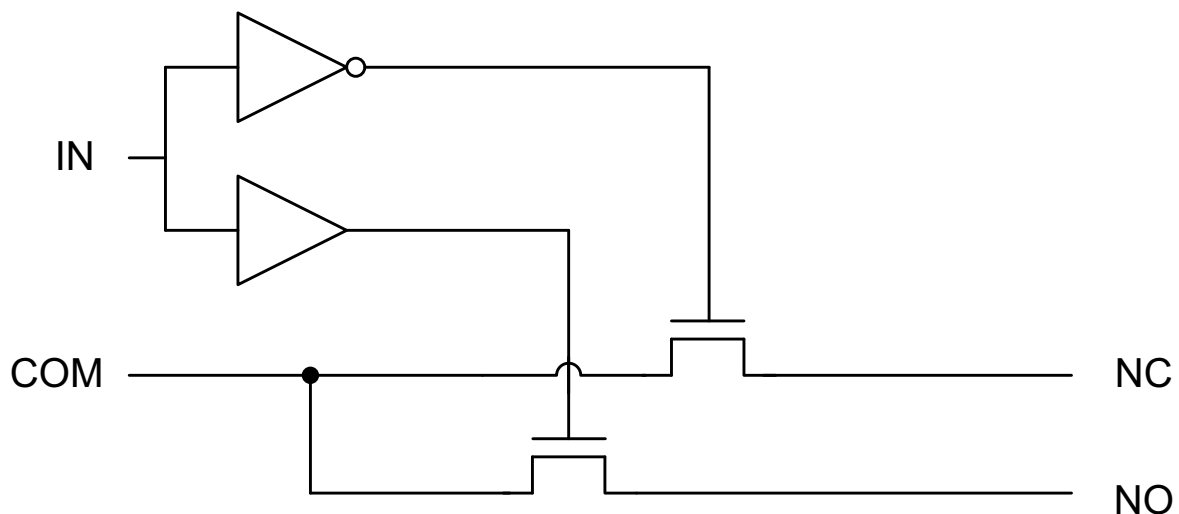


图 10. TS5A3159 框图

4 设计计算

本节介绍完成电子设计所需的产品说明书中的各种主要参数。

4.1 信号调节

LMP91200V 为 ADS1120 的输入提供的 V_{OUT} 和 V_{OCM} 不处于 PGA 的线性工作范围之内。以下公式提供了对输入共模电压范围的要求：

$$V_{CM(MIN)} \geq AVSS + 0.2 + \frac{V_{IN} \times PGA}{2} \quad (4)$$

$$V_{CM(MIN)} \geq AVDD - 0.2 - \frac{V_{IN} \times PGA}{2} \quad (5)$$

由于 PGA 的特定设计实现方案，除这些公式之外，最低 V_{CM} 还必须满足公式 6：

$$V_{CM(MIN)} \geq AVSS + \frac{AVDD - AVSS}{2} \quad (6)$$

为计算最小和最大共模电压限值，必须使用应用中出现最高差分输入电压 ($V_{IN(MAX)}$)。

在该设计中， $A_{INn} = V_{REF}/2 = 1.024$ ， $A_{INp} = 1.024 \pm 415mV$ ，这是测量的 pH 值。注入到 pH 电极中的共模电压等于 1.024V。为了获取最高的分辨率，最大可设置增益等于 4，因此 PGA 不会饱和。不过，在增益等于 4 且使用 3.3V 的 AVDD 为 ADS1120 加电的情况下，该设计不考虑对 PGA 输入共模电压范围的要求。考虑 $V_{IN(MAX)} = A_{INn} - A_{INp(MIN)} = 1.024 - 0.609 = 0.415V$ ， V_{CM} 的下限必须等于 1.03V 并且上限必须等于 2.27V。在该情况下， $V_{CM} = (A_{INp} + A_{INn})/2$ 等于 0.8165V，这超出了下限。

因此，ADS1120 配置为绕过内部 PGA，同时仍提供高输入阻抗和 4V/V 的增益。

4.2 精度

从纯粹的电子角度而言，测量的精度和可重复性将由以下因素决定：

- LMP91200 的输入参考噪声： $E_{n_RMSpH} = 4\mu V$
- ADS1120 的输入参考噪声： $N_{ADS1120} = 3.71\mu V_{RMS}$
- LMP91200 的偏移： $200\mu V$
- ADS1120 的偏移： $V_{IO} = \pm 30\mu V$
- ADS1120 输入处的抗混叠滤波器的截至频率
- ADS1120 中 PGA 的放大率

在进行校准以消除偏移和增益误差之后：

$$\text{Total Error Budget} = \sqrt{((E_{n_RMSpH} + N_{ADS1120}) \times 4)^2} = 30 \mu V_{RMS} \quad (7)$$

考虑 ADS1120 $LSB = V_{REF}/2^N = 2.048/2^{16} = 31\mu V$ 将导致对系统产生电子噪声贡献。

5 布局注意事项

本节介绍 **SensorTag** 的机械需求以及 **pH** 的低噪声拾取布局注意事项。

设计的板必须与 **SensorTag** 板进行机械堆叠，然后两者必须安装在红色的橡胶套内以形成一个便携式系统。从这个意义上讲，板的尺寸和皮肤连接器的位置起着至关重要的作用。

为了正确连接两个板，除皮肤连接器之外，设计的板的底层应不带任何组件，这一点很重要。此外，位于顶层的组件必须为 **SMD**，因为穿孔组件可能会导致连接问题（由于其伸出 **PCB** 的引线）。

在 **pH** 测量中，由于 **pH** 电极的高阻抗，需要小心地进行电路布局。强烈建议采用防护技术，从而通过使 **LMP91200** 的输入与 **PCB** 上的大电压梯度相隔离来降低寄生泄漏电流。防护装置是环绕输入线路的低阻抗导体，其电势会上升到输入线路的电压。输入引脚应受到充分的防护，如布局中所示。防护迹线应完全环绕输入连接处。此外，它们应位于 **PCB** 的两侧并连接在一起。借助 **LMP91200**，无需任何其他外部运算放大器即可轻松防护环。该环需要连接至防护引脚（**GUARD1** 和 **GUARD2**），它们处于 **INP** 引脚的同一电势。阻焊层不应覆盖输入和防护区域（包括 **PCB** 任一侧上的防护迹线）。

此外，对于无线设计，射频收发器的位置应尽可能远离 **pH** 探针。

6 验证和特性评定

本节介绍如何测试该 TI 参考设计以及特性评定结果。

我们使用 MSP430FR5969 LaunchPad 执行测试，具体连接方式为：MSP430FR5969 LaunchPad 通过无极性条状连接器的引脚接头连接到 TIDA-00561，然后将一个 pH 探针连接到 TIDA-00561。实现了 Energia 代码，以配置 ADS1120 和 LMP91200，通过 SPI 采集数据，并将其显示到 PC 的串行监视器。

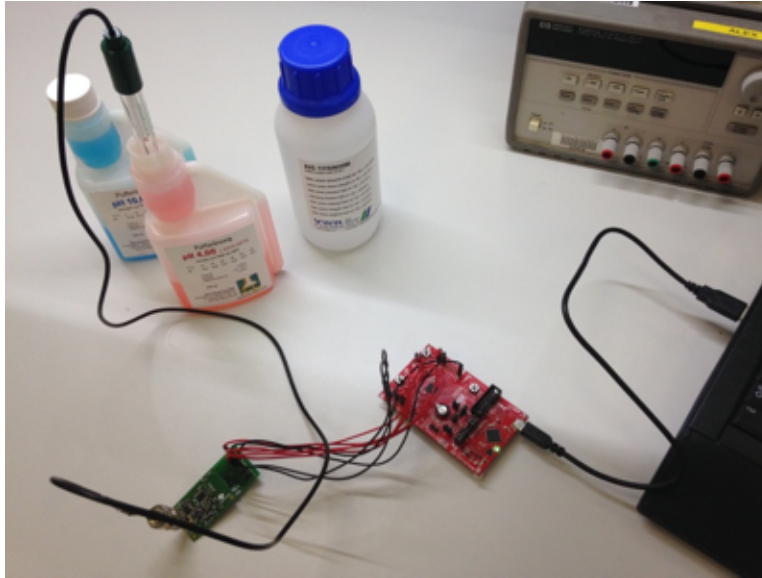


图 11. 测试设置

执行了两项不同的测试，一项使用 EXTECH INSTRUMENTS 提供的 pH 探针 (601500) 和三种 pH 缓冲溶液 (4、10 和 7) 测量不同的 pH 值，另一项将 TIDA-00561 的输入与 50Ω SMA 连接器进行短路，以测量不同温度下的 V_{OUT} 。pH 探针具有 0 至 14 的 pH 范围以及 0.02 pH 的精度。pH 值按照以下公式依赖于温度：

$$E = E_0 + \left(2.3 \frac{RT}{nF} \right) \log aH^+ \quad (8)$$

其中

- E 是测量的感应电极的电势
- E_0 与参比电极的电势相关
- $(2.3 RT/nF)$ 是能斯特因子
- $\log aH^+$ 是 pH ($aH^+ =$ 氢离子的活度)

$2.3 RT/nF$ 包含气体定律常数 (R)、法拉第常数 (F)、以开尔文为单位的温度 (T) 以及该过程中涉及的离子的化学计量数 (n)。对于 pH，其中 $n = 1$ ，能斯特因子为 $2.3 RT/nF$ 。由于 R 和 F 是常数，因此因子（因此以及电极行为）取决于温度。能斯特因子等于电极斜率，它是电极对所检测离子的响应的测量。

当温度为 25°C 时，理论能斯特斜率为 59.16mV/pH 单位。温度通过 TIDA-00561 上的 RTD 进行测量。请注意，最佳方法是使 RTD 直接位于缓冲溶液的内部，因为这里的温度可能不同于环境温度。

由于空间受限以及 SensorTag 配备了能够检测溶液中的温度的红外热电堆温度传感器 (TMP007)，因此该设计具有板载 SMD RTD。对于第一项测试，在室温（约 25°C）下采集了三种不同溶液的 1000 个 pH 值。

首先，测量了 pH 缓冲液等于 7 的电压值。理想情况下用户应获得 0mV；不过，可能会从直方图中看到等于 10.92mV 的中值。许多因素都会引入误差，例如缓冲溶液精度、电极精度、TIDA-00561 本身引入的误差以及温度。

范围（或测量的电压最大值减去最小值）等于 328.13μV，这表明信号的噪声相当大。这是由对外部干扰非常敏感的 pH 电极高阻抗导致的。此外，由于同轴电缆不像三轴电缆那样具有额外的绝缘层和第二个传导护层，因此同轴电缆也无法抗干扰。对于 pH 测量，短电缆要优于长电缆。

不过，标准偏差等于 61.78μV，这意味着高范围问题主要是由异常值导致的。由于未对结果求平均值，因此您可以得出这样的结论：我们获得了我们预期的结果。要计算 pH，请使用公式 9，它是通过前一个公式并考虑 25°C 的温度推导出来的：

$$\text{pH} = 7 - \frac{V_{\text{OUT}}(\text{mV})}{59.16 \left(\frac{\text{mV}}{\text{pH}} \right)} \quad (9)$$

中值等于 6.79 pH，范围等于 0.005 pH，标准偏差为 0.001 pH - 这些值远小于 pH 电极的精度 (0.02 pH)。

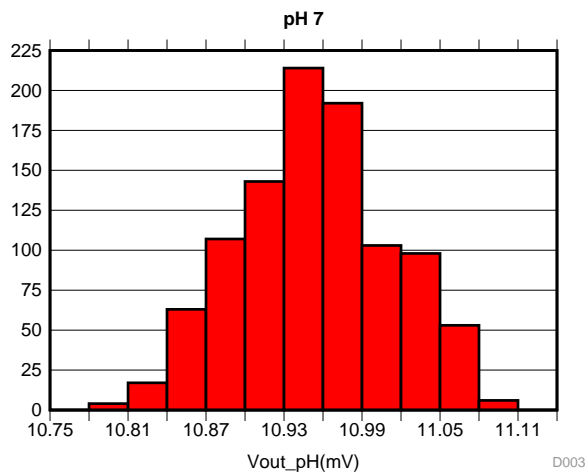


图 12. pH 缓冲液等于 7 时测量的 V_{OUT}

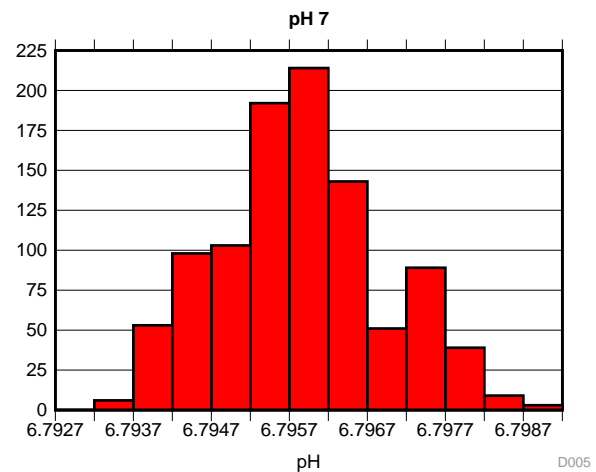


图 13. pH 缓冲液等于 7 时测量的 pH

针对等于 4.01 和 9.94 的 pH 值执行了相同的分析。结果如下面的图中所示：

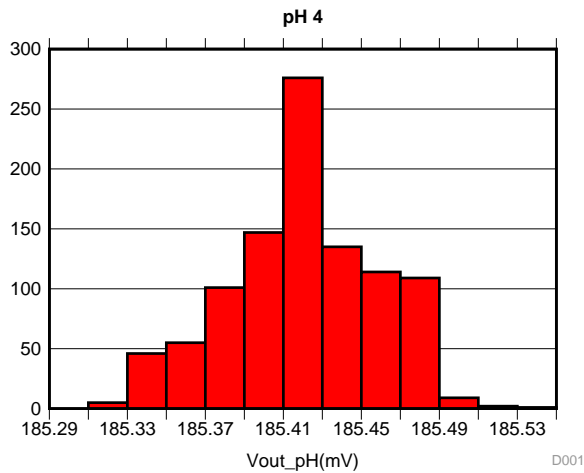


图 14. pH 缓冲液等于 4 时测量的 V_{OUT}

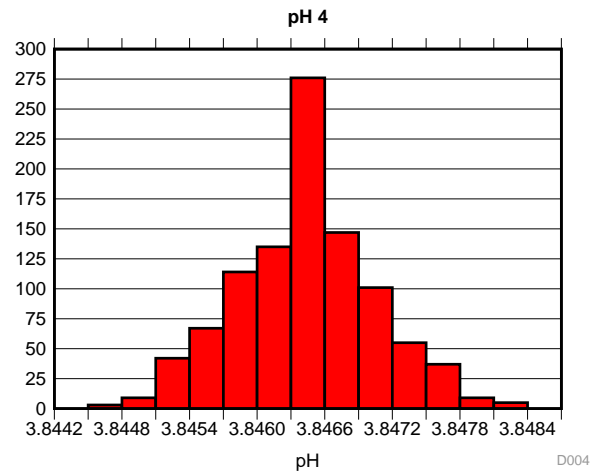


图 15. pH 缓冲液等于 4 时测量的 pH

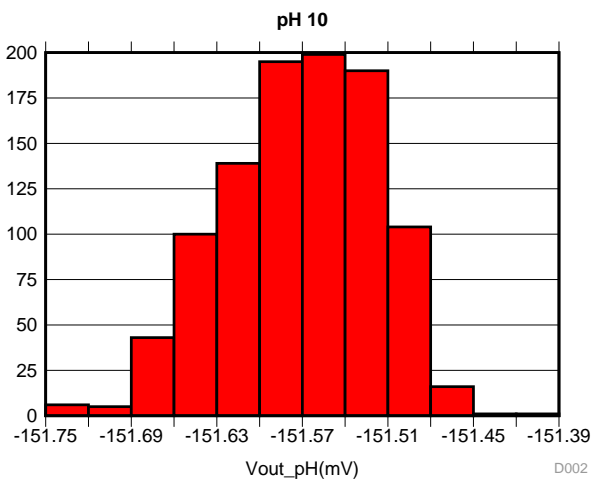


图 16. pH 缓冲液等于 10 时测量的 V_{OUT}

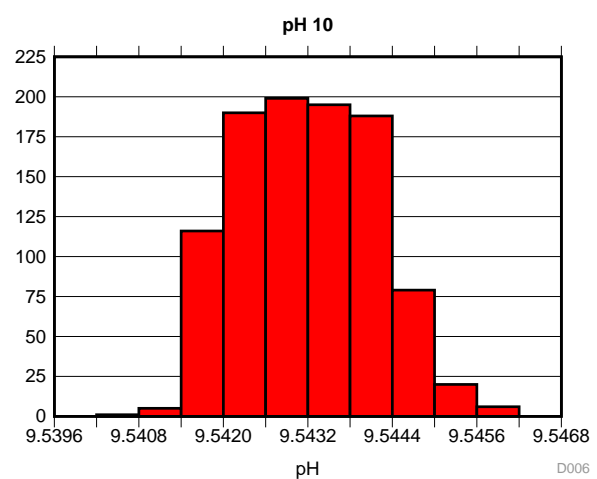


图 17. pH 缓冲液等于 10 时测量的 pH

pH 4 和 pH 10 的标准偏差和范围与针对 pH 7 计算得出的结果非常类似，如表 5 中所示。

表 5. 测试结果

pH	4	7	10
V_{std_dev}	0.04mV	0.06mV	0.05mV
V_{range} (最大值减最小值)	0.22mV	0.33mV	0.34mV
V_{median}	185.4mV	10.9mV	-151.6mV
pH	4	7	10
pH_{std_dev}	0.0006 pH	0.001 pH	0.0009 pH
pH_{range} (最大值减最小值)	0.004 pH	0.005 pH	0.006 pH
pH_{median}	3.85 pH	6.79 pH	9.54 pH

中值受偏移和增益误差的影响，此外还受先前的测量可能会稍微污染溶液或电极或缓冲溶液陈化可能会稍微改变其值事实的影响。

如先前所述，在不同温度下进行的测量是在输入短路的情况下执行的，因此 pH 探针不会产生干扰。对于每个温度（-40°C、25°C 和 85°C），采集 1000 个 V_{OUT} 测量值。从直方图中可以看到，结果相当稳定，仅在每个温度的两个编码之间有变化。

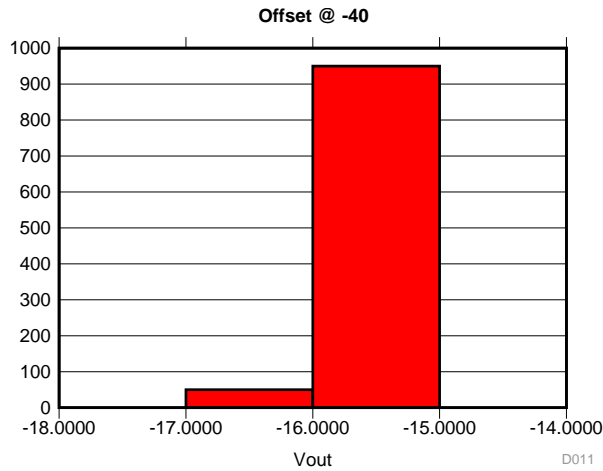


图 18. -40°C 下测量的偏移

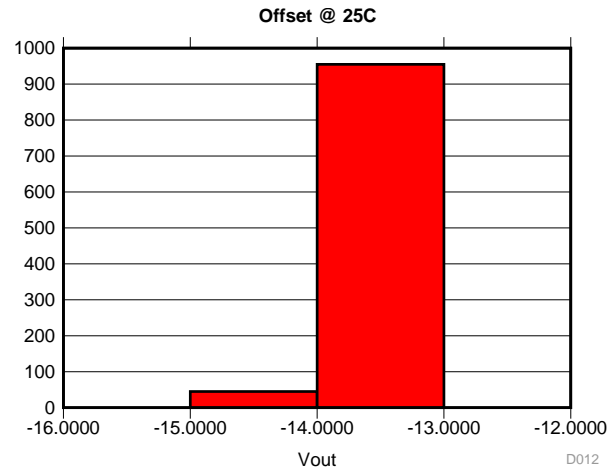


图 19. 25°C 下测量的偏移

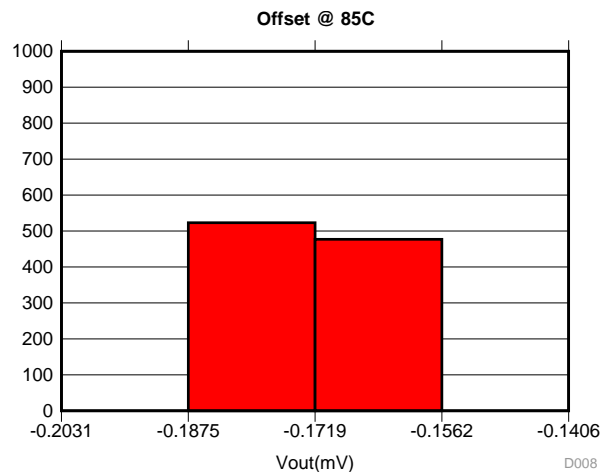


图 20. 85°C 下测量的偏移

室温下的结果与 ADS1120 的数据表中显示的噪声性能相当，该数据表中显示 PGA 禁用情况下的 ENOB、AVDD = 3V、AVSS = 0V、VREF = 2.048（不过在 TIDA-00561 中有外部基准）并且 ADC 在正常运行模式下工作。最后，在图 21 中，作为温度的函数的 V_{OUT} 显示偏移漂移等于 $0.5\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 。

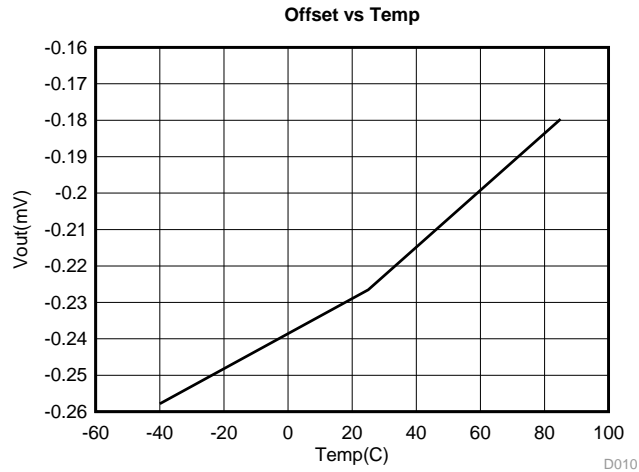


图 21. 偏移漂移与温度

7 入门

有关 SensorTag 的一般信息，请参阅 SensorTag wiki (<http://processors.wiki.ti.com/index.php/SensorTag2015>)。

要设置无线 pH，请执行以下步骤：

1. 下载 IAR Embedded Workbench for ARM。
2. 通过 XDS200 USB 调试探针将 SensorTag 连接到 PC。请勿从 SensorTag 中拆下电池。
3. 将无线 pH 传感器发送器 DevPack 固件上传到 SensorTag 中。如需获取无线 pH 传感器发送器 DevPack 固件，请联系您的 TI 代表。
4. 将无线 pH 传感器发送器 DevPack Android™ 应用上传到所需的 Android 设备中。如需获取无线 pH 传感器发送器 DevPack Android 应用，请联系您的 TI 代表。
5. 将无线 pH 连接到 Sensor Tag:
 - a. 拆下红色护套。
 - b. 将无线 pH 传感器发送器 DevPack 安装到 SensorTag 上。
 - c. 通过 SMA 至 BNC 适配器将 pH 探针连接到无线 pH 传感器发送器 DevPack。
 - d. 将 pH 探针浸没在所需的溶剂中。
6. 打开 SensorTag。
7. 在 Android 设备上启动应用。
8. 在 Android 设备上读取 pH 值。

注：在不使用 pH 探针时，应小心处理，以确保最大程度地延长其寿命。有关更多详细信息，请参阅 pH 探针的制造商说明。

8 设计文件

8.1 电路原理图

要下载原理图，请参阅 [TIDA-00561](#) 中的设计文件。

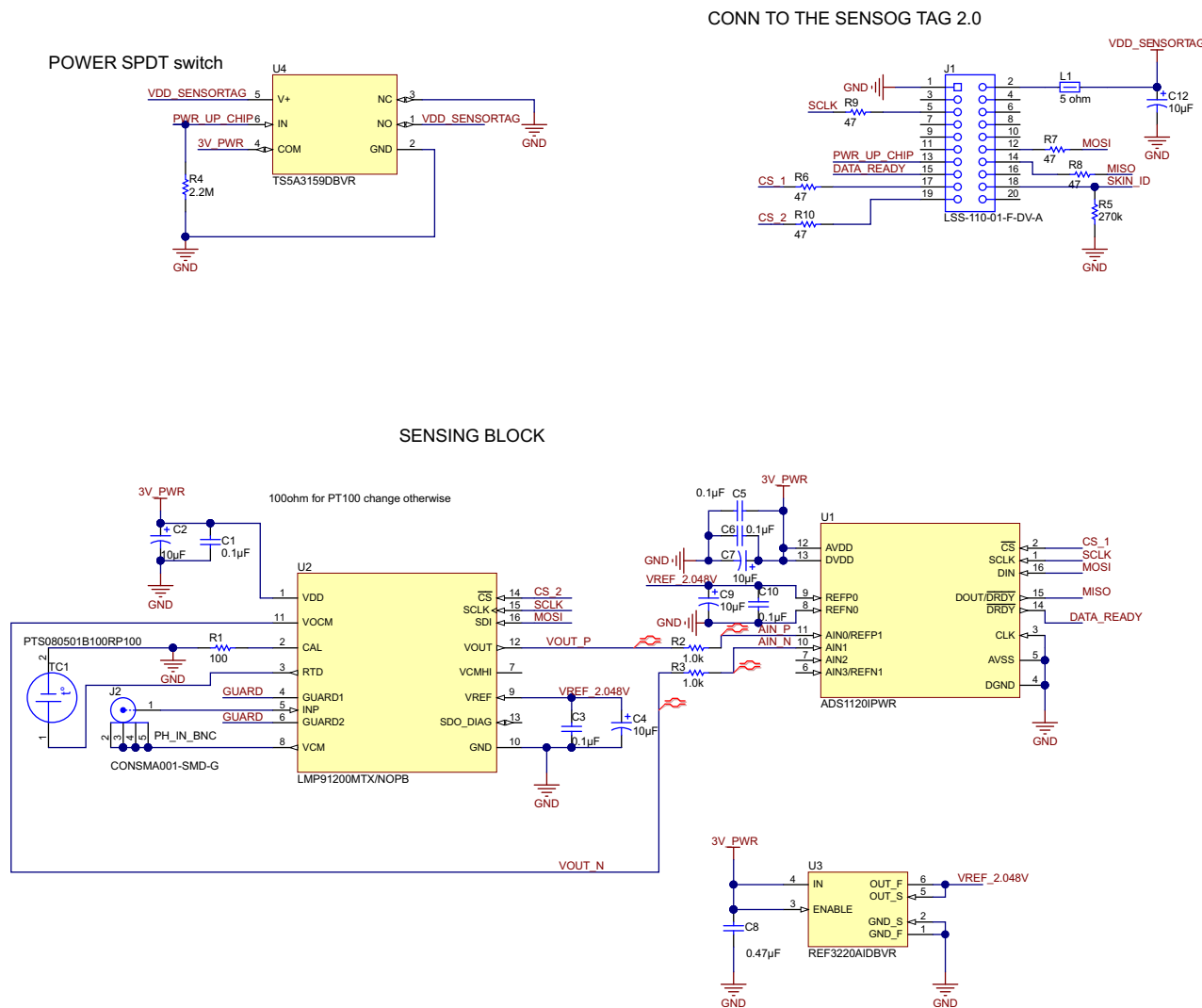


图 22. 无线 pH 传感器原理图

8.2 物料清单

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-00561](#) 中的设计文件。

8.3 板层图

要下载板层图，请参阅 [TIDA-00561](#) 中的设计文件。

8.4 Altium 项目

要下载 Altium 项目文件，请参阅 [TIDA-00561](#) 中的设计文件。

8.5 Gerber 文件

要下载 Gerber 文件，请参阅 [TIDA-00561](#) 中的设计文件。

8.6 装配图

要下载装配图，请参阅 [TIDA-00561](#) 中的设计文件。

9 软件文件

要下载软件文件，请联系您的 TI 销售代表。

10 参考文献

1. International Union Of Pure and Applied Chemistry, *MEASUREMENT OF pH. DEFINITION, STANDARDS, AND PROCEDURES (IUPAC Recommendations 2002)*
(<http://www.iupac.org/publications/pac/2002/pdf/7411x2169.pdf>)
2. International Union Of Pure and Applied Chemistry, *DEFINITION OF pH SCALES, STANDARD REFERENCE VALUES, MEASUREMENT OF pH AND RELATED TERMINOLOGY*
(<http://pac.iupac.org/publications/pac/pdf/1983/pdf/5509x1467.pdf>)
3. Chemistry International, *A Century of pH Measurement*, Vol. 32, No. 2, March-April 2010
(http://www.iupac.org/publications/ci/2010/3202/1_mfcamoses.html)
4. Chemical Education Today, *Negative pH Does Exist*, (<http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ed083p1465>)
5. Ivanov V. V., *The present hydrothermal activity of the volcano Ebeko on island of Paramshir*, Geokimiya No 1, p.63–67, 1957
6. Nikitina, L. P. Presented at Proceedings of the Water-Rock Interaction Symposium, Prague, Czechoslovakia, 1974
7. Nordstrom, Darrell Kirk; Alpers, C. N. *Proceeding National Academy Science USA*, 1999, 96, 3455
8. Nordstrom, Darrell Kirk; Alpers, C. N.; Ptacek, C. J.; Blowes, D. W. *Environ. Sci. Technol.* 2000, 34, 254
9. Nordstrom, Darrell Kirk. *Geological Survey: Negative pH and Extremely Acidic Mine Waters from Iron Mountain, California*, USGS Staff, Published Research US Geological Survey, Jan 1, 2000, *Environmental Science & Technology*, 34, p.254–258
10. Yokogawa Electric Corporation, *PH450G 4-Wire pH/ORP Analyzer*, Product Page
(<http://www.yokogawa.com/an/ph-orp/an-ph450g-001en.htm>)
11. Emerson Process Management, *The Theory of pH Measurement*, Application Datasheet ([PDF](#))

11 关于作者

MATTHIEU CHEVRIER 是德州仪器 (TI) 的系统架构师，负责定义和开发面向工业领域的参考设计解决方案。Matthieu 在工作中充分利用了他在嵌入式系统设计的硬件（电源管理、混合信号等）和软件（底层驱动器、RTOS 和编译器等）方面积累的丰富经验。Matthieu 毕业于法国常青藤大学高等电力学院，拥有电气工程理学硕士 (MSEE) 学位。他持有 IPO、EPO 和 USPTO 的专利。

GIOVANNI CAMPANELLA 是工厂自动化和控制组织中现场发送器团队的一名工业系统工程师。他在意大利博洛尼亚大学获得了电子与通信工程专业的学士学位，并在都灵理工学院获得了电子工程专业的硕士学位。他在传感器和模拟信号链（专注于磁通门和分析感应技术）以及直流刷式伺服驱动器的混合信号控制方面拥有丰富的设计经验。

AMJAD EL HILALI 是德州仪器 (TI) 的现场应用工程师，负责为工业客户提供技术支持。Amjad 在工作中充分利用了他在硬件设计（感应和电源管理）和软件设计（RTOS、射频协议和信号处理）方面积累的经验。Amjad 毕业于法国里昂国立应用科学学院，拥有电气工程学硕士学位。

修订版本 B 历史记录

注：之前版本的页码可能与当前版本有所不同。

Changes from A Revision (August 2015) to B Revision	Page
• 已更改 软件文件的位置	26

修订版本 A 历史记录

Changes from Original (June 2015) to A Revision	Page
• 已更改 预览页面	1

有关 TI 设计信息和资源的重要通知

德州仪器 (TI) 公司提供的技术、应用或其他设计建议、服务或信息，包括但不限于与评估模块有关的参考设计和材料（总称“TI 资源”），旨在帮助设计人员开发整合了 TI 产品的应用；如果您（个人，或如果是代表贵公司，则为贵公司）以任何方式下载、访问或使用了任何特定的 TI 资源，即表示贵方同意仅为该等目标，按照本通知的条款进行使用。

TI 所提供的 TI 资源，并未扩大或以其他方式修改 TI 对 TI 产品的公开适用的质保及质保免责声明；也未导致 TI 承担任何额外的义务或责任。TI 有权对其 TI 资源进行纠正、增强、改进和其他修改。

您理解并同意，在设计应用时应自行实施独立的分析、评价和判断，且应全权负责并确保应用的安全性，以及您的应用（包括应用中使用的 TI 产品）应符合所有适用的法律法规及其他相关要求。您就您的应用声明，您具备制订和实施下列保障措施所需的一切必要专业知识，能够 (1) 预见故障的危险后果，(2) 监视故障及其后果，以及 (3) 降低可能导致危险的故障几率并采取适当措施。您同意，在使用或分发包含 TI 产品的任何应用前，您将彻底测试该等应用和该等应用所用 TI 产品的功能。除特定 TI 资源的公开文档中明确列出的测试外，TI 未进行任何其他测试。

您只有在为开发包含该等 TI 资源所列 TI 产品的应用时，才被授权使用、复制和修改任何相关单项 TI 资源。但并未依据禁止反言原则或其他法律授予您任何 TI 知识产权的任何其他明示或默示的许可，也未授予您 TI 或第三方的任何技术或知识产权的许可，该等产权包括但不限于任何专利权、版权、屏蔽作品权或与使用 TI 产品或服务的任何整合、机器制作、流程相关的其他知识产权。涉及或参考了第三方产品或服务的信息不构成使用此类产品或服务的许可或与其相关的保证或认可。使用 TI 资源可能需要您向第三方获得对该等第三方专利或其他知识产权的许可。

TI 资源系“按原样”提供。TI 兹免除对 TI 资源及其使用作出所有其他明确或默示的保证或陈述，包括但不限于对准确性或完整性、产权保证、无复发故障保证，以及适销性、适合特定用途和不侵犯任何第三方知识产权的任何默认保证。

TI 不负责任何申索，包括但不限于因组合产品所致或与之有关的申索，也不为您辩护或赔偿，即使该等产品组合已列于 TI 资源或其他地方。对因 TI 资源或其使用引起或与之有关的任何实际的、直接的、特殊的、附带的、间接的、惩罚性的、偶发的、从属或惩戒性损害赔偿，不管 TI 是否获悉可能会产生上述损害赔偿，TI 概不负责。

您同意向 TI 及其代表全额赔偿因您不遵守本通知条款和条件而引起的任何损害、费用、损失和/或责任。

本通知适用于 TI 资源。另有其他条款适用于某些类型的材料、TI 产品和服务的使用和采购。这些条款包括但不限于适用于 TI 的半导体产品 (<http://www.ti.com/sc/docs/stdterms.htm>)、[评估模块](http://www.ti.com/sc/docs/sampters.htm)和样品 (<http://www.ti.com/sc/docs/sampters.htm>) 的标准条款。

邮寄地址：上海市浦东新区世纪大道 1568 号中建大厦 32 楼，邮政编码：200122
Copyright © 2017 德州仪器半导体技术（上海）有限公司