



摘要

在工业环境中，传感器断线虽然并不常见，但也成为了一项无法避免的挑战，因此需要具有故障识别功能，以便主机可以采取纠正措施。电阻式温度检测器 (RTD) 便属于这类必须包含断线检测功能的传感器。本应用报告讨论了几种方式，利用 Δ - Σ 模数转换器 (ADC) 中常见的功能来帮助识别所有常见 RTD 配置中的断线问题。

内容

1 引言	2
2 用于检测 RTD 系统中断线问题的功能	3
2.1 使用持续 VREF 监控器来检测断线	3
2.2 使用周期性 VREF 监控器来检测断线	5
2.3 使用单独的模拟输入来检测断线	6
3 不同 RTD 配置的断线检测方法	8
3.1 2 线 RTD 中的断线检测	8
3.2 3 线 RTD 中的断线检测	9
3.3 4 线 RTD 系统中的断线检测	17
4 适用于 RTD 断线检测的稳定时间注意事项	22
5 总结	24
A 集成式 PGA 电源轨检测如何帮助识别断线问题	25
B 用于 RTD 断线检测的伪代码	27
B.1 用于 2 线 RTD 系统 (低侧或高侧 R _{REF}) 的伪代码	27
B.2 用于单 IDAC、3 线 RTD 系统 (低侧或高侧 R _{REF}) 的伪代码	27
B.3 用于双 IDAC、3 线 RTD 系统 (低侧或高侧 R _{REF}) 的伪代码	27
B.4 用于 4 线 RTD 系统 (低侧或高侧 R _{REF}) 的伪代码	28

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

电阻式温度检测器 (RTD) 是可测量宽温度范围的高精度传感器。RTD 适用于各种各样的工业应用，包括可编程逻辑控制器 (PLC) 中的 [模拟输入模块](#)、[温度变送器](#) 和 [患者监护设备](#)。这些动态商业和工业环境偶尔会导致 RTD 引线出现损坏或断开连接。为确保可靠运行，必须检测这类故障情况，以便主机控制器在可能的情况下能够纠正故障，或者在必要时将系统置于默认状态。

为了助力完成这个过程，本应用报告定义了如何在所有常见 RTD 配置中使用精密 Δ - Σ ADC 集成的功能来实现断线检测。本文档首先详细介绍了这些相关功能，包括这些功能的工作原理以及它们为什么对断线检测非常有用。后续各节分别介绍了每种 RTD 配置，逐一说明了每条引线（或一组引线）断开时会发生的情况，以及如何识别这些断线问题。最后，[附录 A](#) 和 [附录 B](#) 中分别介绍了帮助实现断线检测的额外功能以及伪代码。这些信息普遍适用于许多精密 Δ - Σ ADC，包括 [表 1-1](#) 中的器件：

表 1-1. 用于 RTD 测量的精密 Δ - Σ ADC

成本优化	低功耗	噪声最低
ADS1120	ADS114S06B	ADS125H02
ADS112C04	ADS114S08B	ADS1260
ADS112U04	ADS114S06	ADS1261
ADS1220	ADS114S08	ADS1262
ADS122C04	ADS124S06	ADS1263
ADS122U04	ADS124S08	—

最后，本应用报告假设用户对各种 RTD 配置有基本的了解，并大概知晓它们在正常运行条件下的工作情况。若要进一步了解这些主题，请参阅相关的 [RTD 测量基本指南应用报告](#)。

2 用于检测 RTD 系统中断线问题的功能

只需将集成到 ADC 中的激励电流源 (IDAC) 和电压基准 (VREF) 监控功能结合使用, 即可检测 RTD 断线问题。

表 1-1 中的所有器件都集成了两个匹配的电流源, 这些电流源通常用于在 RTD 上建立电压, 然后由 ADC 进行测量。对于 VREF 监控, 很多 ADC 都包含可供实时读取的分立式诊断电路。用于 VREF 监控的另一个选项涉及通过未使用的测量通道回读差分基准电压。以下各子节讨论了这两种情况。

2.1 使用持续 VREF 监控器来检测断线

图 2-1 以采用低侧基准电阻器 (R_{REF}) 的 4 线 RTD 为例, 显示了如何使用 IDAC 和 VREF 监控功能来检测 RTD 断线问题。此 RTD 配置使用一个 IDAC, 该电流会流过引线 1、 R_{RTD} 和引线 4, 最后通过 R_{REF} 流入大地。ADC 会测量 AINP 和 AINN 处的电压并使用在 R_{REF} 上建立的电压作为基准电压。

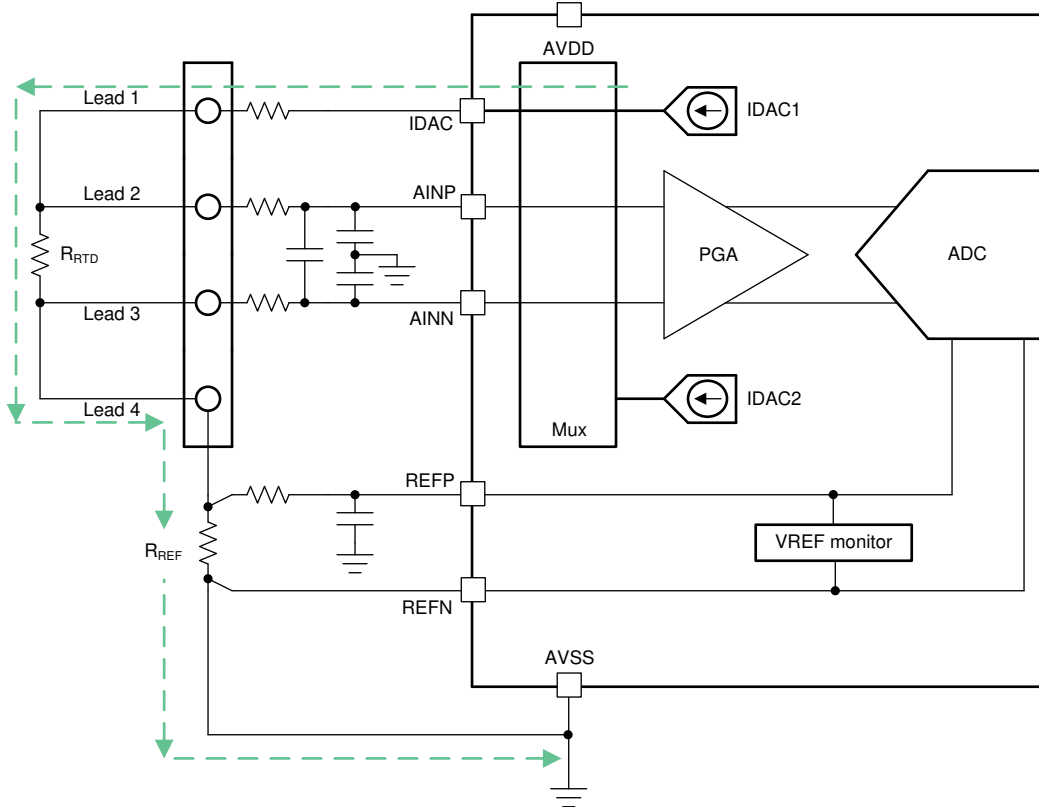


图 2-1. 采用低侧 R_{REF} 的 4 线 RTD 中的 IDAC 电流

发生断线时，电流可能不再流过 RTD，更具体的来说是不再流过 R_{REF} 。当没有电流流过 R_{REF} 时，ADC 会在 REFP 和 REFN 之间读取到约为 0V 的差分基准电压。例如，图 2-2 显示了如果引线 4 断开，IDAC 电流返回路径会变为开路。

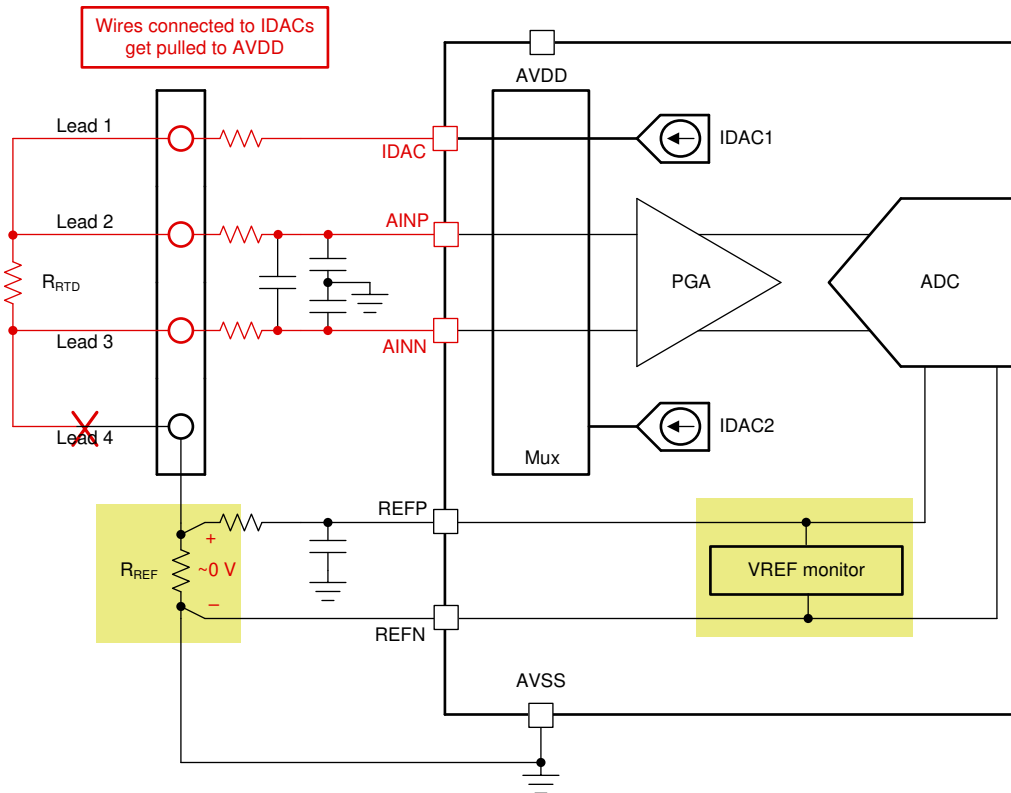


图 2-2. 使用持续 VREF 监控器来检测断线

在图 2-2 中，REFP 和 REFN 之间几乎为零的差分电压会触发 ADC 中的 VREF 监控器，其典型阈值为数百毫伏。该监控器会在 ADC STATUS 字节中设置标志，而主机可以持续读取该字节来确定纠正措施。换句话说，该监控会实时完成，而无需中断精确 RTD 测量。

2.2 使用周期性 VREF 监控器来检测断线

ADS1220、ADS122C04 和 ADS122U04 (以及其对应的 16 位器件) 提供了一种特定的输入多路复用器配置, 以内部 VREF 作为基准来测量外部 VREF 电压。ADS1220 数据表中的表 2-1 显示了使用设置 MUX[3:0] = 1100b 测量 $(V_{REFPx} - V_{REFNx}) / 4$ 的情况。发生断线问题时, 没有电流流过 R_{REF} , 因此该测量值约为 0V, 表示发生了故障。

表 2-1. 使用 MUX[3:0] 位启用 ADS1220 周期性 VREF 监控器

位	字段	类型	复位	说明
7-4	MUX[3:0]	R/W	0h	<p>输入多路复用器配置 这些位用于配置输入多路复用器。对于 AINN = AVSS 的设置, 必须禁用 PGA (PGA_BYPASS = 1), 并且仅可使用增益 1、2 和 4。 0000 : AINP = AIN0, AINN = AIN1 (默认) 0001 : AINP = AIN0, AINN = AIN2 0010 : AINP = AIN0, AINN = AIN3 0011 : AINP = AIN1, AINN = AIN2 0100 : AINP = AIN1, AINN = AIN3 0101 : AINP = AIN2, AINN = AIN3 0110 : AINP = AIN1, AINN = AIN0 0111 : AINP = AIN3, AINN = AIN2 1000 : AINP = AIN0, AINN = AVSS 1001 : AINP = AIN1, AINN = AVSS 1010 : AINP = AIN2, AINN = AVSS 1011 : AINP = AIN3, AINN = AVSS 1100 : $(V_{REFPx} - V_{REFNx}) / 4$ 监控 (PGA 已旁路) 1101 : $(AVDD - AVSS) / 4$ 监控 (PGA 已旁路) 1110 : AINP 和 AINN 短接到 $(AVDD + AVSS) / 2$ 1111 : 保留</p>

这种方法所面临的挑战是无法持续监控 VREF 电压。这时需要停止 RTD 测量并切换至监控通道, 因此与采用具有持续 VREF 监控器的 ADC 相比, 系统延迟和复杂性会增加。这时需要在延迟增加与系统对故障情况的响应时间要求之间做出权衡, 选择交错进行诊断测量的频率。

2.3 使用单独的模拟输入来检测断线

如果 ADC 无法集成 VREF 监控功能，那么可以参阅图 2-3，其中显示了如何利用一组专用的模拟输入来使用 ADC 信号路径测量基准电压。

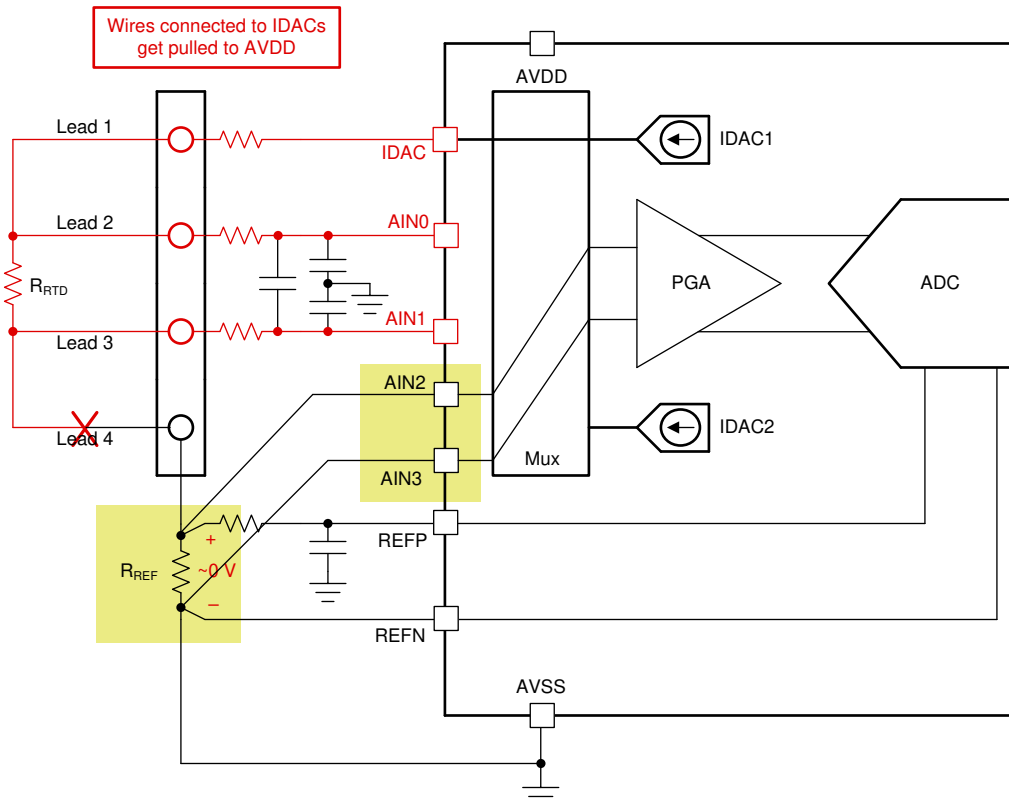


图 2-3. 使用单独的模拟输入来检测断线

图 2-3 中的系统使用 AIN0 和 AIN1 来测量 RTD 电压，并使用 AIN2 和 AIN3 来回读 R_{REF} 上的电压。和进行周期性 VREF 监控的情况相同，如果 AIN2 和 AIN3 之间测得的电压接近 0V，便会检测到故障。这时，主机可以在必要时采取纠正措施。与节 2.2 中所述的情况相似，使用这种方法面临的挑战是无法持续监控 VREF 电压。这时必须停止 RTD 测量，以便切换至监控通道，因此与采用了集成了 VREF 监控器的 ADC 相比，系统延迟和复杂性会增加。另外，当使用单独的模拟输入来测量 VREF 电压时，ADC 需要另一个基准电压源，因为 RTD 的基准电压源现在是测量通道。

尽管无法克服内部多路复用器开关导致延迟增加的问题，但通过使用具有多功能模拟输入的 ADC 可以对系统进行简化，如图 2-3 所示。使用这样的 ADC 则无需执行从 R_{REF} 到输入多路复用器的专用迹线，因为 REFx 会由 AINx 共享。例如，图 2-4 显示了 ADS1220 中的 AIN0 和 AIN3 分别如何与 REFP1 和 REFN1 共享。

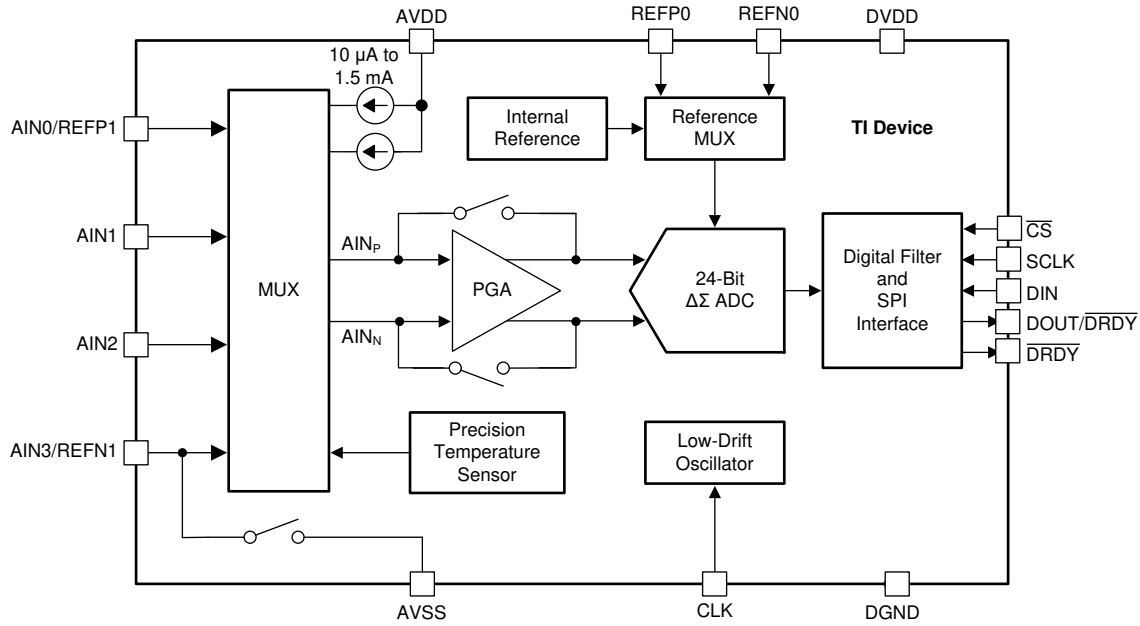


图 2-4. ADS1220 方框图

表 2-2 总结了集成到精密 Δ - Σ ADC (如表 1-1 中突出显示) 中的断线检测功能。

表 2-2. 精密 Δ - Σ ADC 中的断线检测功能总结

器件	双重匹配的 IDAC ?	VREF 监控器 ?
ADS1120	是：任何模拟输入	周期性 = $(VREFP_x - VREFN_x) / 4$
ADS112C04		
ADS112U04		
ADS1220		
ADS122C04		
ADS122U04		
ADS114S06B		持续 = 300 mV 阈值
ADS114S08B		
ADS114S06		
ADS114S08		
ADS124S06		持续 = 400 mV 阈值
ADS124S08		
ADS1260		
ADS1261		
ADS1262		
ADS1263		
ADS125H02	是：专用引脚	

本文的余下部分均涉及使用持续 VREF 监控器来检测 RTD 断线问题，因为这种方法最容易实现。不过，在所有配置中，仍可以使用周期性 VREF 监控器或专用模拟输入来确定断线问题。

3 不同 RTD 配置的断线检测方法

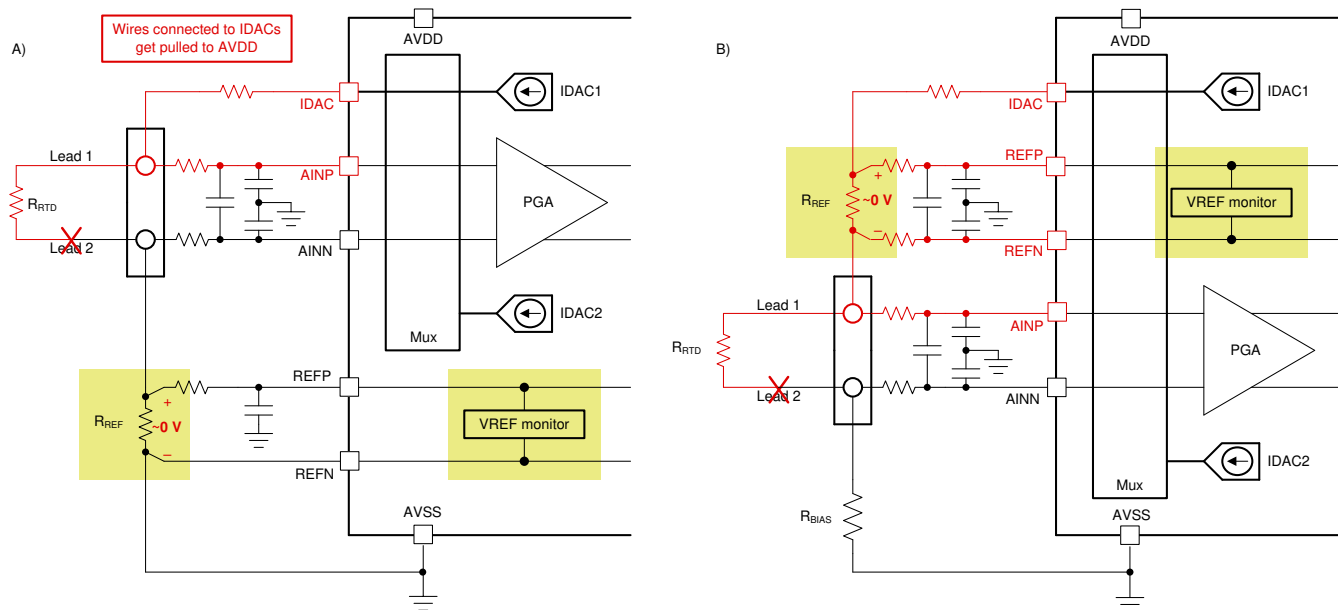
RTD 断线检测的最简单形式是能够检测任何断线问题。换言之，系统只需识别是否有一条或多条引线断开，而无需确定哪条引线断开。本文档讨论了以下 RTD 配置中每条引线（或一组引线）断开时发生的情况：

- 采用低侧 R_{REF} 的 2 线 RTD
- 采用高侧 R_{REF} 的 2 线 RTD
- 采用一个 IDAC 和低侧 R_{REF} 的 3 线 RTD
- 采用一个 IDAC 和高侧 R_{REF} 的 3 线 RTD
- 采用两个 IDAC 和低侧 R_{REF} 的 3 线 RTD
- 采用两个 IDAC 和高侧 R_{REF} 的 3 线 RTD
- 采用低侧 R_{REF} 的 4 线 RTD
- 采用高侧 R_{REF} 的 4 线 RTD

3.1 2 线 RTD 中的断线检测

2 线 RTD 用于提供低精度测量，因为其中没有选项来补偿引线电阻。不过，2 线 RTD 成本低且易于实现，因此非常适合成本敏感型应用。另外，2 线 RTD 中的断线检测很简单，尽管可能无法确定已断开的具体引线。

图 3-1 显示了 2 线 RTD 配置中引线 2 断开时会发生的情况：图 3-1a 显示了低侧 R_{REF} 实现，而图 3-1b 显示了高侧 R_{REF} 实现。尽管图 3-1 显示的是引线 2 断开的情况，但同样的检测方案也适用于引线 1 断开的情况或这两根引线都断开的情况。



A) Wire breaks (2W RTD, LS R_{REF})
B) Wire breaks (2W RTD, HS R_{REF})

图 3-1. 2 线 RTD 实现中的引线 2 断开：低侧（左）和高侧（右） R_{REF}

对于这两种参考配置，一根或多根引线断开都会导致没有电流流过 R_{REF} ，因为接地路径会断开。此事件会导致 R_{REF} 上的电压降至 0V，因此会将 VREF 监控器标志设为高电平。因此，若要在采用低侧或高侧 R_{REF} 的 2 线 RTD 配置中识别断线问题，请使用 ADC 中的 VREF 监控器。表 3-1 总结了采用 2 线 RTD 时所有断线状况对应的断线检测方法及其预期结果。

表 3-1. 2 线 RTD 系统（低侧或高侧 R_{REF} ）的断线检测总结

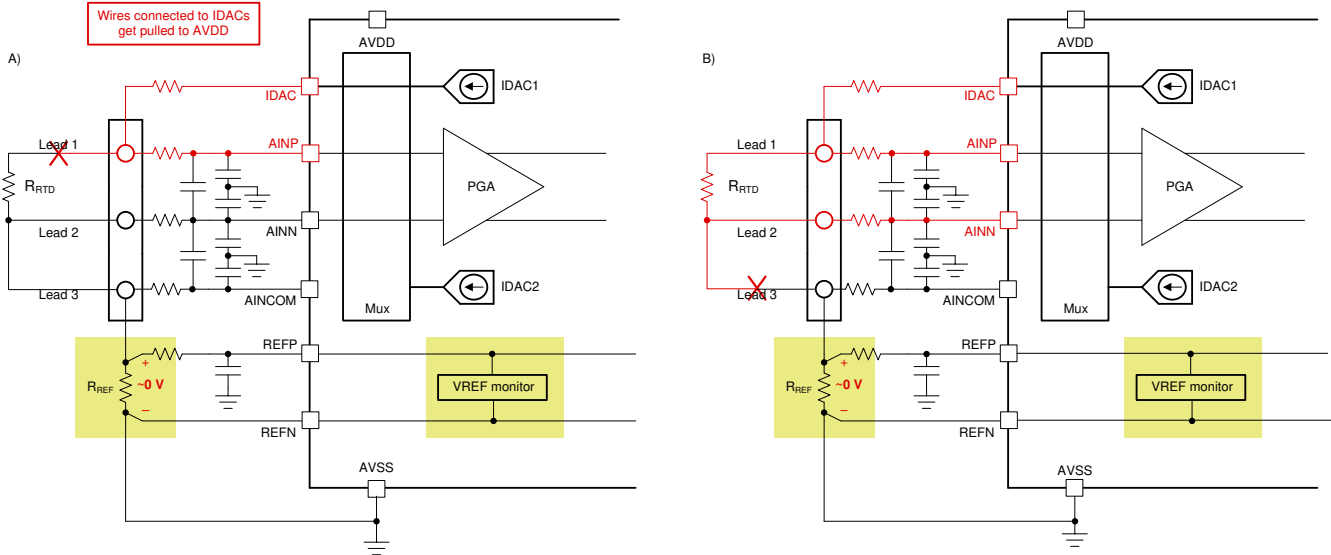
引线 1	引线 2	断线检测方法及其结果
连接	断开	• VREF 监控器 → VREF 电压 \approx 0V
断开	连接	
断开	断开	

3.2.3 线 RTD 中的断线检测

3 线 RTD 很好地平衡了精度和成本，在精密工业应用中很常见。单 IDAC 或双 IDAC 实现中都可以消除引线电阻误差。单 IDAC 实现和双 IDAC 实现会采用略有不同的断线检测方案，具体会在以下各子节中进行讨论。

3.2.1 单 IDAC、3 线 RTD 系统中的断线检测

与 2 线 RTD 配置相似，在单 IDAC、3 线 RTD 系统中，多数情况下只需读取 VREF 监控器，即可检测断线问题。图 3-2 显示了在引线 1 (如图 3-2a 所示) 或引线 3 (如图 3-2b 所示) 断开时，IDAC 电流没有接地返回路径。在这些情况下，VREF 监控器能够识别故障。



A) Lead 1 breaks (3W RTD, 1x IDAC, LS R_{REF})
B) Lead 3 breaks (3W RTD, 1x IDAC, LS R_{REF})

图 3-2. 单 IDAC、3 线 RTD 系统中的引线 1 (左) 和引线 3 (右) 断开

引线 2 也可能在图 3-2 所示的任意情况下断开，但必须单独根据 VREF 标志进行验证，节 3.2.1.1 和节 3.2.1.1.1 中对此进行了讨论。尽管图 3-2 仅显示了低侧 R_{REF} 配置，但这些结论适用于采用低侧和高侧 R_{REF} 的测量。

3.2.1.1 在单 IDAC、3 线 RTD 系统中检测引线 2 上的断线问题

如节 3.2.1 所述，采用单 IDAC、3 线 RTD 系统时，VREF 监控器无法检测引线 2 上的断线问题。换言之，正常工作期间会发生故障，并且单靠 VREF 监控器无法检测到该故障。数据可能会开始偏离期望值，但请不要假定该偏差是断线而不是其他系统异常导致的。图 3-3 显示了此行为。

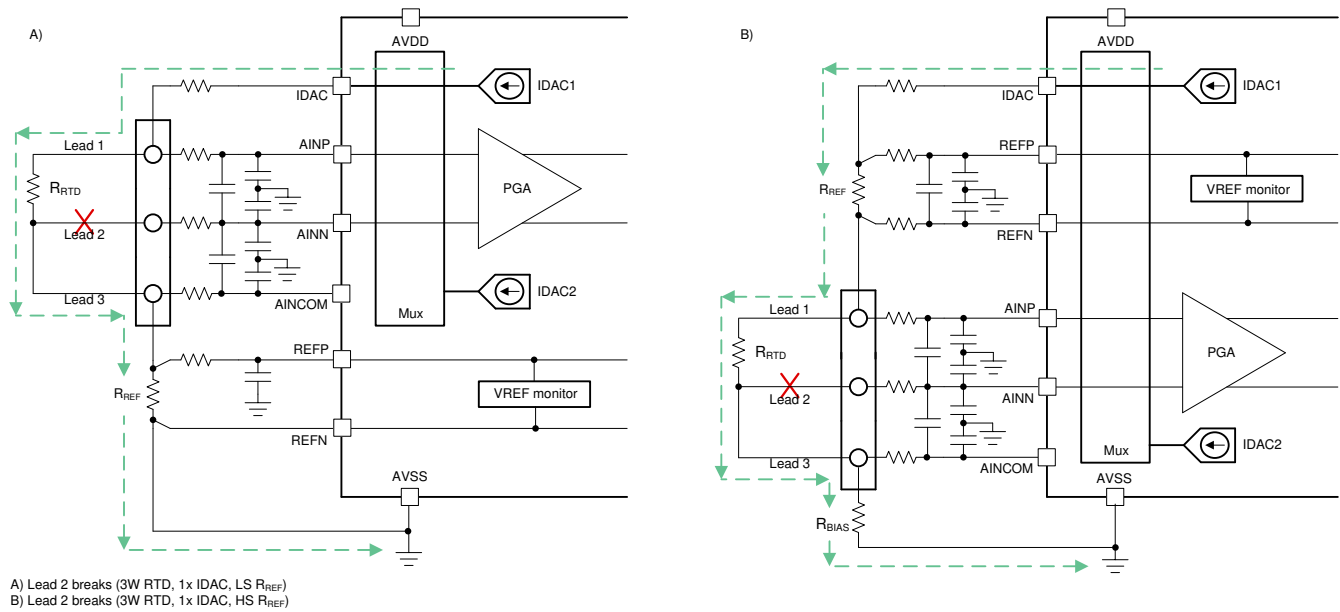


图 3-3. 在采用低侧 (左) 和高侧 (右) R_{REF} 的情况下，单 IDAC、3 线 RTD 系统中引线 2 断开时未检测到 VREF 监控器故障

若要检测断线问题，需要先停止精确 RTD 测量，然后更改系统配置设置，以执行诊断测量。在这种情况下必须停止 RTD 测量，因此需要在延迟的增加与系统对故障情况的响应时间要求之间做出权衡，选择交错进行诊断测量的频率。

若要在单 IDAC、3 线 RTD 系统时检测引脚 2 上的断线问题，需要区分低侧和高侧 R_{REF} 配置并将 IDAC 输出切换至不同的模拟输入。一些 ADC 并未集成将 IDAC 路由至任何模拟输入的功能，尤其是具有专用 IDAC 引脚的 ADC。因此，可能需要通过外部电路来执行此功能。无论是哪种方式，图 3-4 显示了如何使用低侧 R_{REF} 来启用 IDAC。

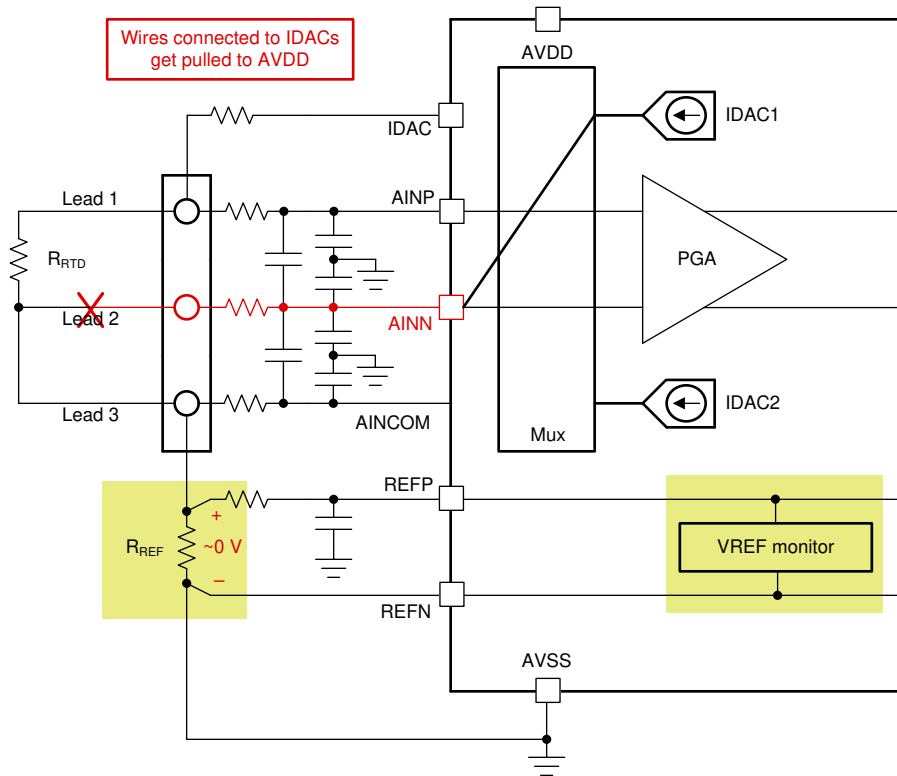


图 3-4. 诊断测量使用低侧 R_{REF} 来检测引线 2 是否断开

使用低侧 R_{REF} 时，将 IDAC 电流切换至流过引线 2。然后，使用 VREF 监控器以在引线 1 或引线 3 断开时指示故障。使用高侧 R_{REF} 的情况会更为复杂，需要专门讨论，具体如节 3.2.1.1.1 所述。

3.2.1.1.1 在采用高侧 R_{REF} 的单 IDAC、3 线 RTD 系统中检测引线 2 上的断线问题

如果使用的是高侧 R_{REF} ，则需要在执行诊断测量时进行多项配置更改：

- 切换 IDAC1 以在引线 2 上输出 (AINN)
- 启用 IDAC2 以在引线 3 上输出 (AINCOM)
- 选择 ADC 内部 VREF 作为基准电压源
- 选择 AINN 和 AINCOM 作为测量输入 (必要时)
- 降低 PGA 增益 (必要时)
- 减小 IDAC 电流强度 (必要时)

需要另一个基准电压源，以便检查对故障进行测量的结果，因为这种情况下无法强制电流流过 R_{REF} 。此操作与所有其他测量例程都不同，并一定要确保在诊断周期完成时重新选择外部 VREF 输入。

另外，在必要时考虑使用最后三个步骤，因为系统可能已在诊断测量开始前进行了这样的配置。例如，单 IDAC、3 线 RTD 系统始终要进行两次测量，以消除引线电阻：首先是 AINP 和 AINN 之间，其次是 AINN 和 AINCOM 之间。因此，可以在第二次测量后、已选择 AINN 和 AINCOM 时实现此诊断例程，从而节省一些通信和开关时间。另外，系统可能正在测量较大的 RTD (例如 Pt1000)，其中 PGA 增益已设为 1V/V 并且 IDAC 电流强度较小。后两个步骤对于故障检测非常重要，此节稍后会更详细地介绍这方面内容。

图 3-5 显示了如何为采用高侧 R_{REF} 的单 IDAC、3 线 RTD 系统实现诊断测量。

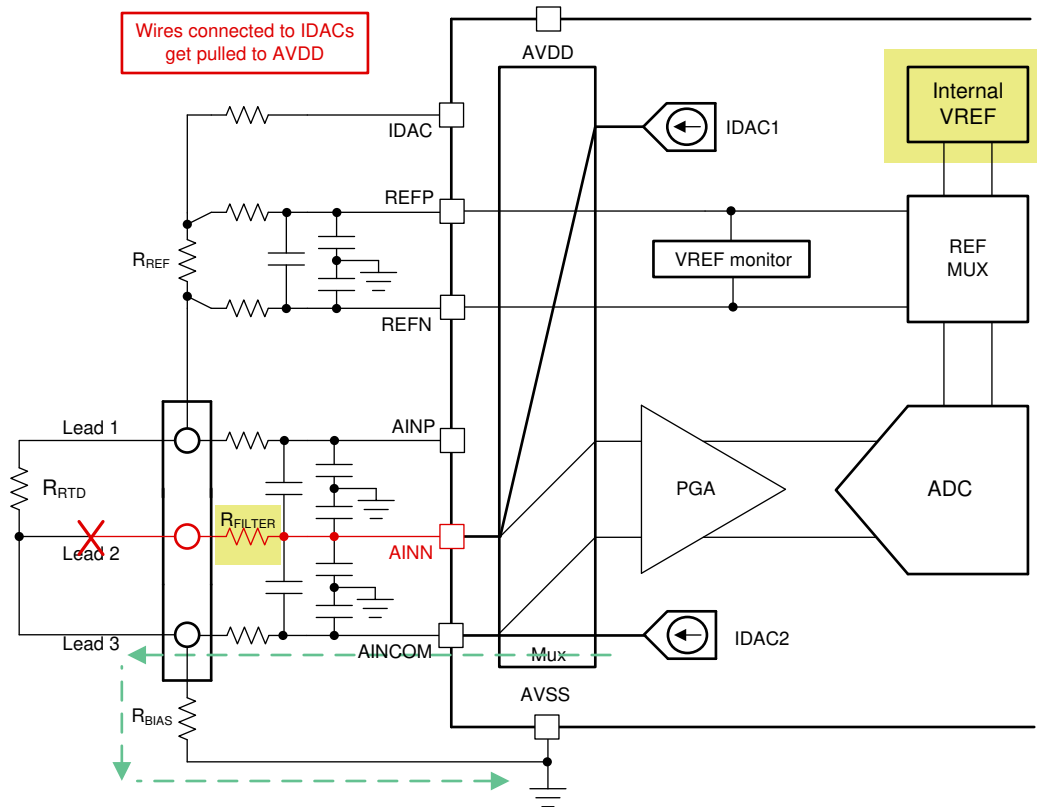


图 3-5. 诊断测量使用高侧 R_{REF} 来检测引线 2 是否断开

如果此诊断测量期间引线 2 未断开，那么 $AINx$ 引脚上会出现以下电压（由方程式 1 和方程式 2 确定）：

$$V_{AINN} = IDAC1 \cdot (R_{FILTER} + R_{LEAD2} + R_{LEAD3} + R_{BIAS}) + IDAC2 \cdot R_{BIAS} \quad (1)$$

$$V_{AINCOM} = IDAC1 \cdot R_{BIAS} + IDAC2 \cdot (R_{FILTER} + R_{BIAS}) \quad (2)$$

$AINN$ 和 $AINCOM$ 之间产生的差分电压 V_{IN} (no wire break) 可以通过方程式 3 计算，其中假定 $R_{LEAD2} = R_{LEAD3}$ ， $IDAC1 = IDAC2$ 且 R_{FILTER} 电阻器匹配良好：

$$V_{IN} \text{ (no wire break)} = V_{AINN} - V_{AINCOM} = IDAC1 \cdot (2 \cdot R_{LEADx}) \quad (3)$$

如果没有发生会导致电路运行方式发生故障的故障， V_{IN} (no wire break) 电压会非常小，因为 R_{LEADx} 在大多数情况下都小于 10Ω 。

相比之下，当引线 2 断开时， $IDAC1$ 接地路径会消失，从而导致 $IDAC1$ 试图强制电流进入高阻抗模拟输入 $AINN$ 。高阻抗作用相当于开路，因此当 $IDAC$ 电路尝试保持恒定电流时， $AINN$ 上的电压会升高。最终，此电压会被驱动至正电源 ($AVDD$)，使得目前的 $AINN$ 也约等于 $AVDD$ 。

另外， $AINCOM$ 上的电压实际上会降低，因为 $IDAC1$ 不再能够流过 R_{LEAD3} 和 R_{BIAS} ，进而导致 $AINCOM$ 处出现一个绝对电压，如方程式 4 所示：

$$V_{AINCOM} \text{ (wire break)} = IDAC2 \cdot (R_{FILTER} + R_{BIAS}) \quad (4)$$

$AINN$ 和 $AINCOM$ 之间产生的差分电压 V_{IN} (wire break) 可以通过方程式 5 计算得出：

$$V_{IN} \text{ (wire break)} = V_{AINN} - V_{AINCOM} = AVDD - IDAC2 \cdot (R_{FILTER} + R_{BIAS}) \quad (5)$$

假设根据此节开头时讨论的配置更改选择了较小的 IDAC2 强度， $V_{IN(wire\ break)}$ 会明显大于 $V_{IN(no\ wire\ break)}$ ，因此很容易检测到。为了量化较小的 IDAC2 强度所代表的意思，需要考虑系统中的 AVDD 电压以及 R_{FILTER} 和 R_{BIAS} 的大小，这两个电阻通常分别近似为 $1k\Omega$ 至 $5k\Omega$ 。例如，如果 $AVDD = 5V$ 、 $R_{FILTER} = 5k\Omega$ 且 $R_{BIAS} = 2k\Omega$ ，那么选择 $100\ \mu A$ 的 IDAC 强度会是一个不错的起点。假设 $R_{LEADx} = 10\Omega$ ，则可以将这些值输入方程式 6 和方程式 7，以确定结果是否能清楚地指示何时发生故障：

$$V_{IN(no\ wire\ break)} = IDAC1 \cdot (2 \cdot R_{LEADx}) = 100\ \mu A \cdot 2 \cdot 10\ \Omega = 0.002\ V \quad (6)$$

$$V_{IN(wire\ break)} = AVDD - IDAC2 \cdot (R_{FILTER} + R_{BIAS}) = 5\ V - 100\ \mu A \cdot (5\ k\Omega + 2\ k\Omega) = 4.3\ V \quad (7)$$

在本例中，应将 PGA 增益设为 1V/V，以便可以测量 $V_{IN(wire\ break)}$ 而不会导致放大器饱和。系统所需的具体增益最终取决于不同的电阻值、AVDD 和所选的 IDAC 电流强度，因此应注意适当地选择这些值。

3.2.1.2 单 IDAC、3 线 RTD 系统的断线检测总结

表 3-2 和表 3-3 分别总结了采用具有低侧和高侧 R_{REF} 的单 IDAC、3 线 RTD 系统时所有断线状况对应的断线检测方法 & 预期结果。

表 3-2. 采用低侧 R_{REF} 的单 IDAC、3 线 RTD 系统的断线检测总结

引线 1	引线 2	引线 3	断线检测方法及结果
连接	连接	断开	• VREF 监控器 → VREF 电压 ≈ 0V
连接	断开	连接	• 将 IDAC 设置为连接到引线 2 的通道 • VREF 监控器 → VREF 电压 ≈ 0V
断开	连接	连接	• VREF 监控器 → VREF 电压 ≈ 0V
连接	断开	断开	
断开	连接	断开	
断开	断开	连接	
断开	断开	断开	

表 3-3. 采用高侧 R_{REF} 的单 IDAC、3 线 RTD 系统的断线检测总结

引线 1	引线 2	引线 3	断线检测方法及结果
连接	连接	断开	• VREF 监控器 → VREF 电压 ≈ 0V
连接	断开	连接	• 将 IDAC1 设置为引线 2 并将 IDAC 2 设置为引线 3 • 选择内部 VREF • 更改 AINx、增益、IDAC 强度大小 (必要时) • 检查测量结果 → 较大的值表示出现了故障
断开	连接	连接	• VREF 监控器 → VREF 电压 ≈ 0V
连接	断开	断开	
断开	连接	断开	
断开	断开	连接	
断开	断开	断开	

3.2.2 双 IDAC、3 线 RTD 系统中的断线检测

在双 IDAC、3 线 RTD 系统中，尽管有些临界情况需要特别注意，但是之前各节所述的很多相同技术也有助于识别该系统中的断线问题。节 3.2.2.1 (低侧 R_{REF}) 和 节 3.2.2.2 (高侧 R_{REF}) 中介绍了这些情况。

不管使用的是低侧还是高侧 R_{REF} ，引线 3 上的断线问题都自动造成 IDAC 接地路径消失，进而导致 VREF 监控器故障。图 3-6 显示了这个断线问题在低侧 (左) 和高侧 (右) R_{REF} 配置中是如何发生的。如果除引线 3 以外的任何其他引线也断开，同样会出现此结果。

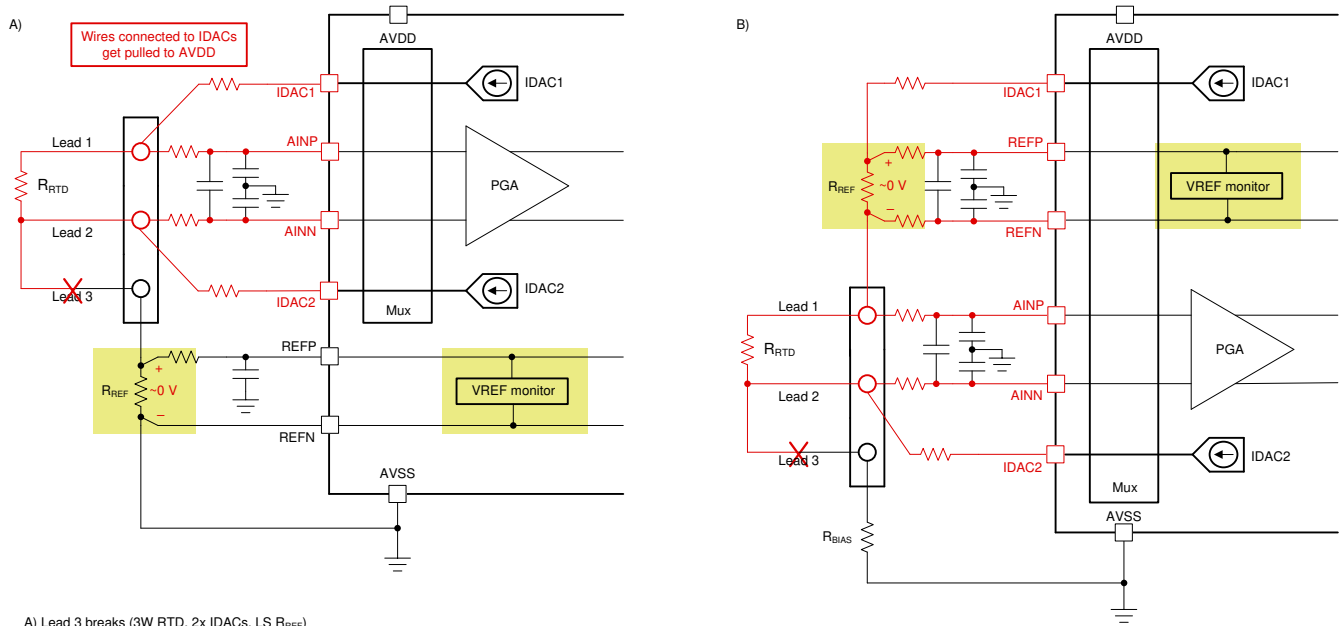


图 3-6. 在采用低侧 (左) 和高侧 (右) R_{REF} 的情况下，双 IDAC、3 线 RTD 系统中引线 3 断开时检测到 VREF 监控器故障

同样，如果低侧或高侧 R_{REF} 配置中引线 1 和引线 2 断开，两个 IDAC 都没有接地路径，因而会导致 VREF 监控器故障。图 3-7 显示了这个断线问题在低侧 (左) 和高侧 (右) R_{REF} 配置中是如何发生的。

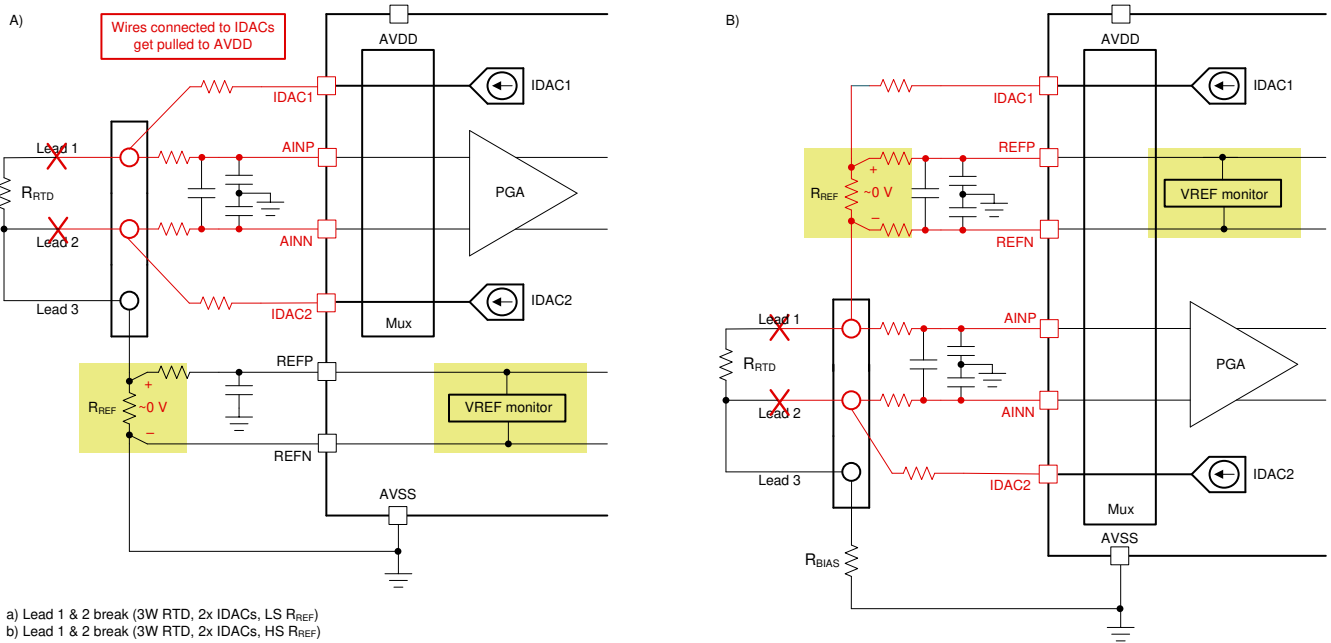


图 3-7. 在采用低侧 (左) 和高侧 (右) R_{REF} 的情况下, 双 IDAC、3 线 RTD 系统中引线 1 和引线 2 断开时检测到 VREF 监控器故障

双 IDAC、3 线 RTD 系统的挑战在于引线 1 或引线 2 上的断线问题。在这些情况下, 其中一个 IDAC 仍具有接地路径, 因此检测变得不那么简单。另外, 根据使用的是低侧还是高侧 R_{REF} 配置, 检测方案会有所不同。

3.2.2.1 在采用低侧 R_{REF} 的双 IDAC、3 线 RTD 系统中检测引线 1 或 2 断线问题

在低侧 R_{REF} 配置中, 引线 1 或引线 2 断开会消除一个 IDAC 的接地路径。不过, 第二个 IDAC 电流仍会流过 R_{REF} , 因此不太可能出现 VREF 监控器故障。图 3-8 显示了这种情况。

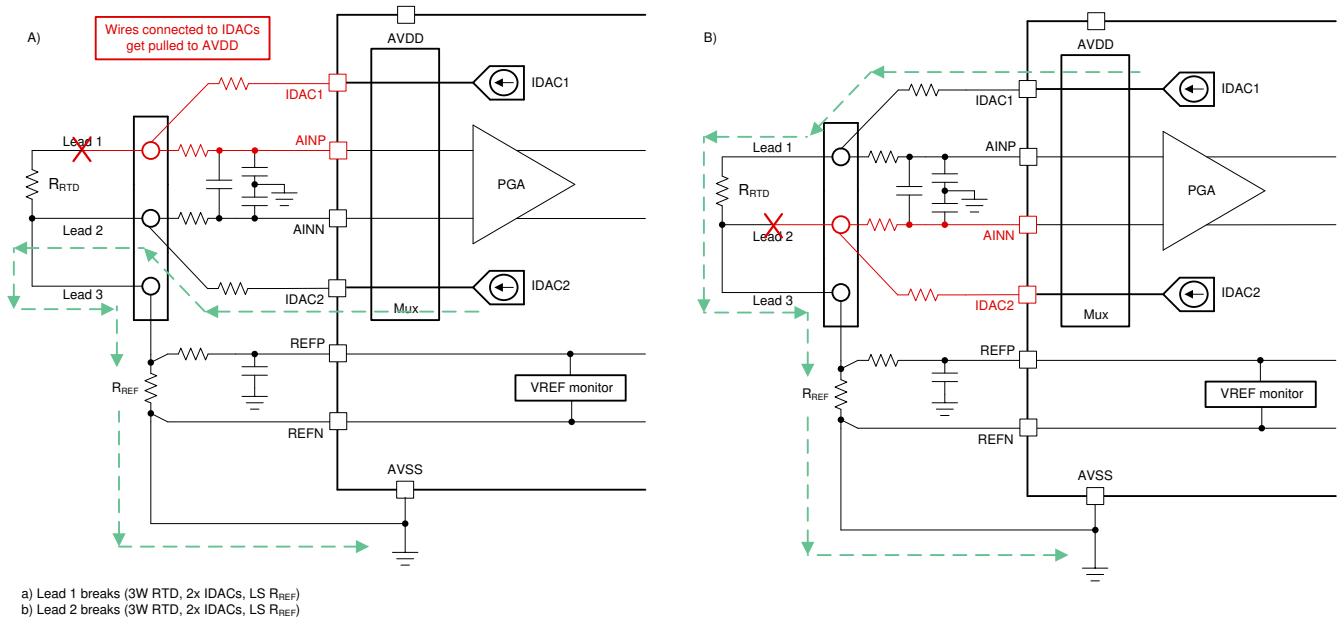


图 3-8. 采用低侧 R_{REF} 的双 IDAC、3 线 RTD 系统中引线 1 (左) 或引线 2 (右) 断开

如果图 3-8 上所示配置中这两条引线中的任一条断开, R_{REF} 上的电压都会相较于正常运行时减少一半。不过, 在各种情况下, 对于所有 ADC 来说, 这种电压的降低可能仍不足以触发 VREF 监控器。

这时需要执行诊断测量，与单 IDAC、3 线 RTD 系统中引线 2 断开时的情况相似。并且与任何会中断精确 RTD 测量的诊断测量相似，需要在延迟的增加与系统对故障情况的响应时间要求之间做出权衡，选择交错进行诊断测量的频率。

在采用低侧 R_{REF} 的双 IDAC、3 线 RTD 系统中，诊断测量非常简单：关闭仍在向 R_{REF} 提供电流的 IDAC，进而触发 V_{REF} 监控器。例如，若要检测引线 1 上的故障 (图 3-8a)，应关闭 IDAC2。若要检测引线 2 上的故障 (图 3-8b)，则应关闭 IDAC1。在这两种情况下， V_{REF} 监控器都可以检测故障，因为 R_{REF} 上没有电流流过。

3.2.2.2 在采用高侧 R_{REF} 的双 IDAC、3 线 RTD 系统中检测引线 1 或 2 断线问题

在高侧 R_{REF} 配置中，系统正常运行时只有一个 IDAC 电流流过 R_{REF} ，因而需要根据断开的是哪条引线来使用不同的故障检测方案。图 3-9 显示了引线 1 断开 (左) 时与引线 2 断开时电流流动方式有何不同。

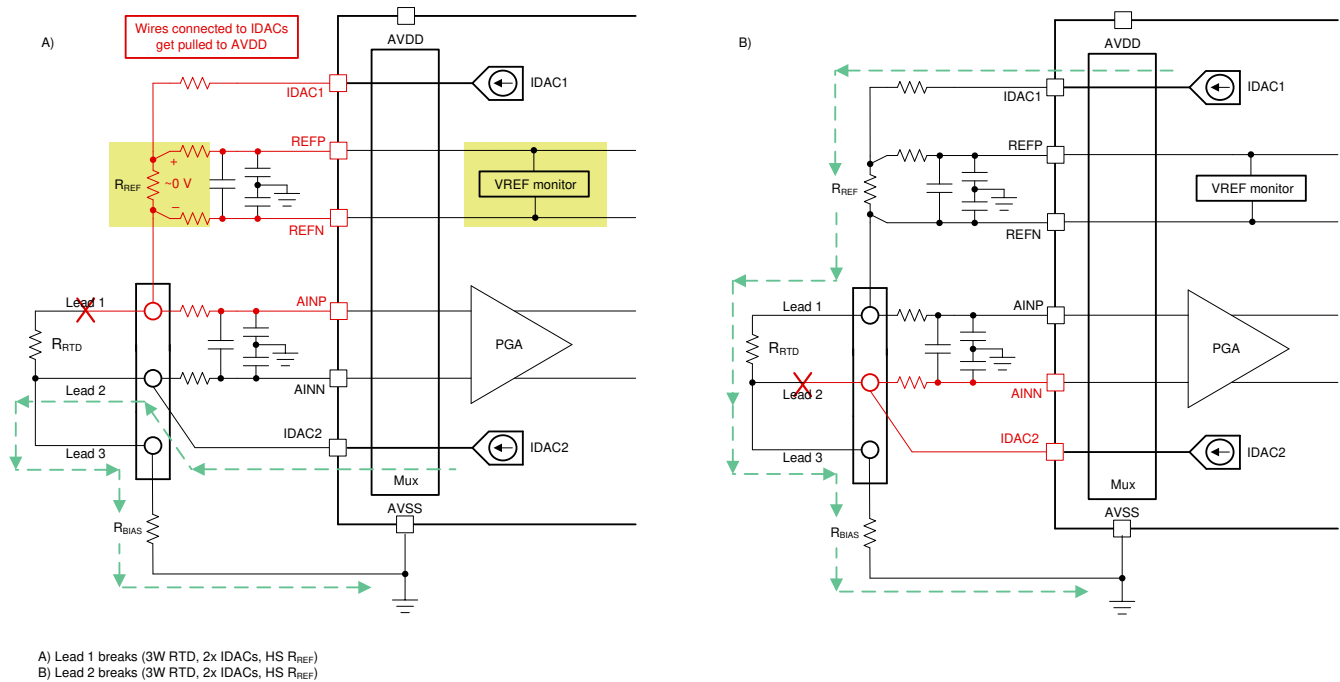


图 3-9. 采用高侧 R_{REF} 的双 IDAC、3 线 RTD 系统中引线 1 (左) 或引线 2 (右) 断开

如图 3-9a 所示， V_{REF} 监控器检测高侧 R_{REF} 配置中引线 1 上的断线问题。在这种情况下， V_{REF} 监控器会被触发，因为引线 1 断开会消除 IDAC1 的接地路径，使得 R_{REF} 上的电压接近零。来自 IDAC2 的电流仍会通过 R_{BIAS} 流入地，但并不影响 V_{REF} 监控器观察到的结果。

在高侧 R_{REF} 配置中， V_{REF} 监控器无法检测到引线 2 的断线情况。如图 3-9b 所示，IDAC1 电流仍会流过 R_{REF} ，因此 V_{REF} 监控器不会指示故障。这时根据测量结果上的变化来检测引线 2 的断线情况。

在采用高侧 R_{REF} 的双 IDAC、3 线 RTD 系统中，系统正常运行时， AIN_x 引脚上应该存在以下电压 (由方程式 8 和方程式 9 确定)：

$$V_{AINP} \text{ (no wire break)} = IDAC1 \cdot (R_{RTD} + R_{LEAD1} + R_{LEAD3} + R_{BIAS}) + IDAC2 \cdot (R_{LEAD3} + R_{BIAS}) \quad (8)$$

$$V_{AINN} \text{ (no wire break)} = IDAC1 \cdot (R_{LEAD3} + R_{BIAS}) + IDAC2 \cdot (R_{LEAD2} + R_{LEAD3} + R_{BIAS}) \quad (9)$$

$AINP$ 和 $AINN$ 之间产生的差分电压 $V_{IN} \text{ (no wire break)}$ 可以通过方程式 10 计算，其中假定 $R_{LEAD1} = R_{LEAD2} = R_{LEAD3}$ 且 $IDAC1 = IDAC2$ ：

$$V_{IN} \text{ (no wire break)} = V_{AINP} - V_{AINN} = IDAC1 \cdot R_{RTD} \quad (10)$$

因此，如果未发生导致电路运行方式发生改变的故障， $AINP$ 上的电压会始终大于 $AINN$ ，因为 IDAC 电流只会朝一个方向流动。因此，系统正常运行时始终会产生正输出代码。

相比之下，当引线 2 断开时，IDAC2 接地路径会消失，从而强制 IDAC2 电流进入高阻抗模拟输入 AINN。高阻抗作用相当于开路，因此当 IDAC 电路尝试保持恒定电流时，AINN 上的电压会升高。最终，此电压会被驱动至正电源 (AVDD)，使得目前的 AINN 也约等于 AVDD。

另外，Ainp 上的电压实际上会降低，因为 IDAC2 不再能够流过 R_{LEAD3} 和 R_{BIAS} ，进而导致 Ainp 处出现一个绝对电压，如方程式 11 所示：

$$V_{AINP(wire\ break)} = IDAC1 \cdot (R_{RTD} + R_{LEAD1} + R_{LEAD3} + R_{BIAS}) \quad (11)$$

如果 AINN 被拉至 AVDD 且 Ainp 幅度减小， $V_{AINN(wire\ break)}$ 会大于 $V_{AINP(wire\ break)}$ ，进而导致负输出代码。

此诊断例程与节 3.2.1.1.1 中采用高层 R_{REF} 的单 IDAC、3 线 RTD 系统所采用的例程非常相似，尽管在这种情况下无需切换至 ADC 内部基准或更改 IDAC 电流强度。实际上，在采用高侧 R_{REF} 的双 IDAC、3 线 RTD 系统中，两种检测方案都需要单独的诊断测量，以便在无需中断精确 RTD 测量的情况下进行断线检测。

3.2.2.3 双 IDAC、3 线 RTD 系统的断线检测总结

表 3-4 和表 3-5 分别总结了采用具有低侧和高侧 R_{REF} 的双 IDAC、3 线 RTD 系统时所有断线状况对应的断线检测方法 & 预期结果。

表 3-4. 采用低侧 R_{REF} 的双 IDAC、3 线 RTD 系统的断线检测总结

引线 1	引线 2	引线 3	断线方法及结果
连接	连接	断开	• VREF 监控器 → VREF 电压 ≈ 0V
连接	断开	连接	• 禁用 IDAC1 (连接到引线 1) • VREF 监控器 → VREF 电压 ≈ 0V
断开	连接	连接	• 禁用 IDAC2 (连接到引线 2) • VREF 监控器 → VREF 电压 ≈ 0V
连接	断开	断开	• VREF 监控器 → VREF 电压 ≈ 0V
断开	连接	断开	
断开	断开	连接	
断开	断开	断开	

表 3-5. 采用高侧 R_{REF} 的双 IDAC、3 线 RTD 系统的断线检测总结

引线 1	引线 2	引线 3	断线方法及结果
连接	连接	断开	• VREF 监控器 → VREF 电压 ≈ 0V
连接	断开	连接	• IDAC 电流会将 AINN 拉至 AVDD，因此 $V_{AINN} > V_{AINP}$ 且 $V_{IN} < 0V$
断开	连接	连接	• VREF 监控器 → VREF 电压 ≈ 0V
连接	断开	断开	
断开	连接	断开	
断开	断开	连接	
断开	断开	断开	

3.3 4 线 RTD 系统中的断线检测

4 线 RTD 是精度最高的配置，因为此类配置不存在 3 线 RTD 实现中固有的一些挑战：单 IDAC 系统中的多次测量问题，或者双 IDAC 系统中的电流源不匹配问题。因此，4 线 RTD 也是价格最贵的传感器，并且占用的 PCB 空间最大，因为它们需要四个端子。4 线 RTD 通常用于温度测量精度为最关键系统参数的情况。

与各种 3 线 RTD 故障检测方法相似，可以使用 VREF 监控器来检测 4 线 RTD 系统中的大多数断线问题。在正常运行条件下，包含引线 1 或引线 4 断开的任意断线组合始终都会导致 IDAC 的接地路径消失，因而可通过 VREF

监控器检测到相应的故障。图 3-10 显示了低侧 R_{REF} 配置中的此类结果，不过相同的检测方案也可用于高侧 R_{REF} 。

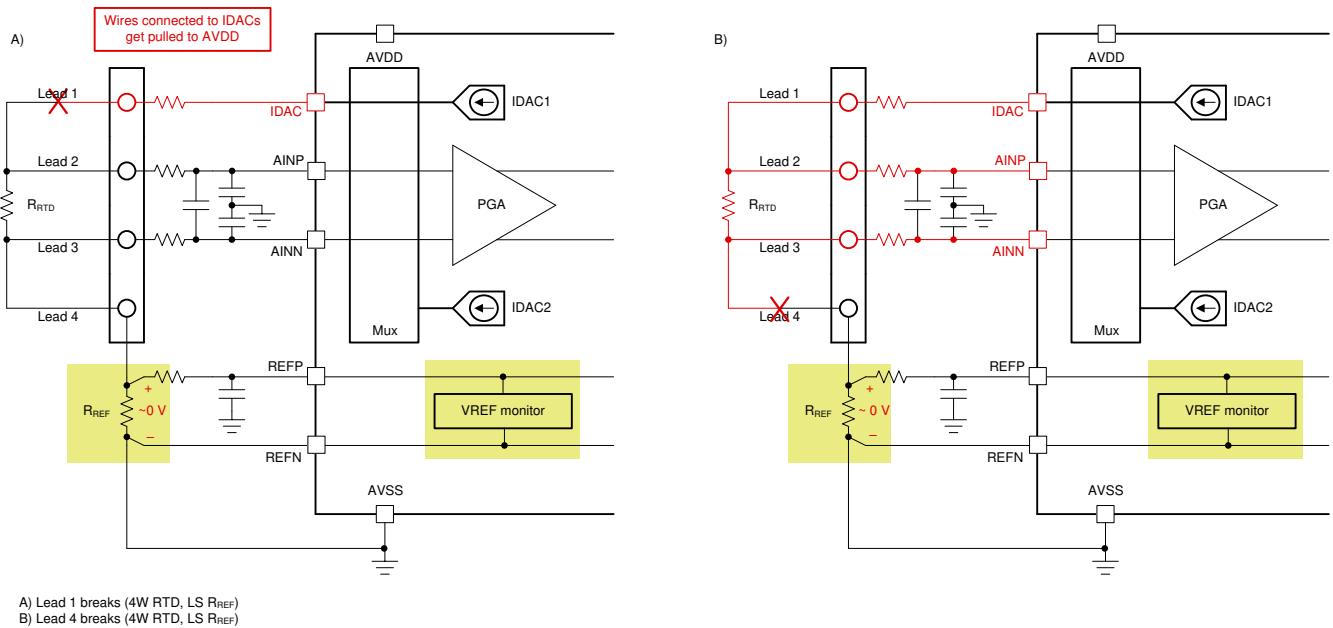


图 3-10. 4 线 RTD 系统中的引线 1 (左) 和引线 4 (右) 断开

在 4 线 RTD 系统中，VREF 监控器无法检测断线问题的仅有的几种情况是仅引线 2 或引线 3 断开，或者引线 2 和引线 3 同时断开。在这些情况下，断线问题可能会导致 ADC 输出偏离期望值，但不能假定其原因是断线而不是其他一些系统异常。

因此，需要使用 ADC 中的 IDAC 来执行诊断测量例程，与之前几节中所述相似。另外，如前所述，根据使用的是低侧还是高侧 R_{REF} 配置，该例程会有所不同。

3.3.1 在采用低侧 R_{REF} 的 4 线 RTD 系统中检测引线 2 和引线 3 上的断线问题

4 线 RTD、低侧 R_{REF} 情况下使用的诊断例程与节 3.2.2.1 中所述的方法相似：重新路由 IDAC 引脚，以驱动电流流过引线 2 和引线 3，然后检查 V_{REF} 监控器。图 3-11 显示了在假定引线 2 或引线 3 断开的情况下，执行这些诊断测量时的电流流动方式。

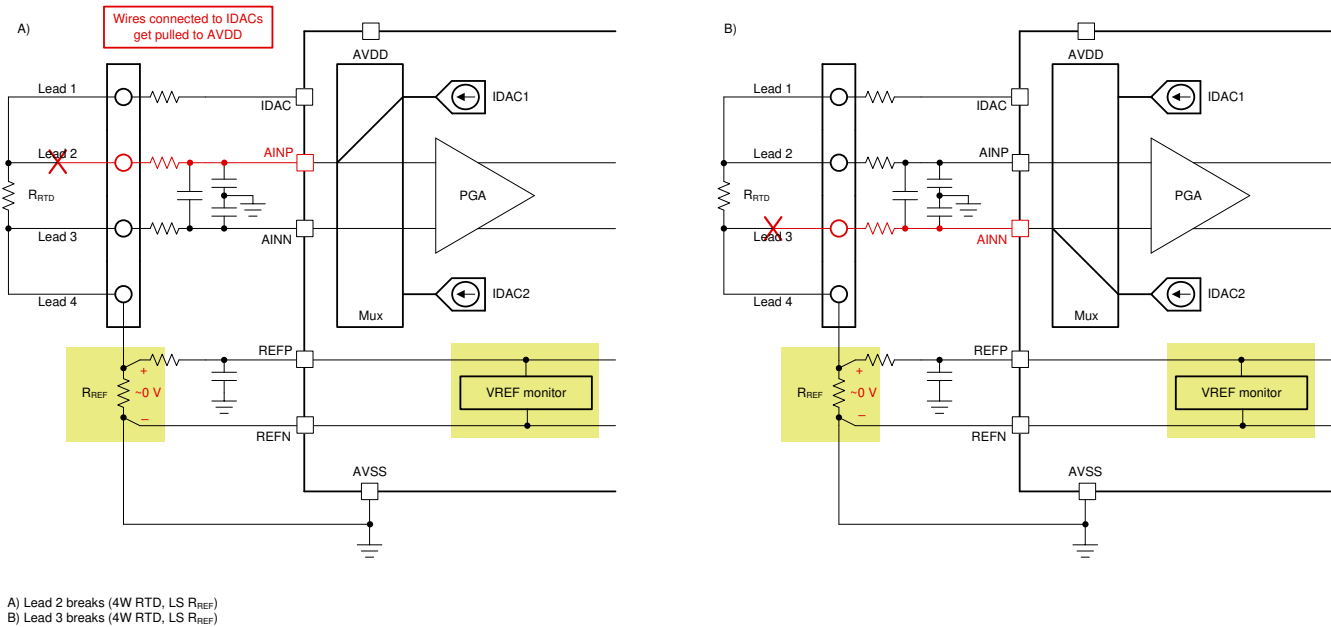


图 3-11. 诊断测量在采用低侧 R_{REF} 的 4 线 RTD 系统中检测引线 2 (左) 和引线 3 (右) 是否断开

3 线 RTD 系统中之前的诊断测量与 4 线 RTD 系统之间的主要区别是，后者需要通过两个步骤来完全确定引线 2 和引线 3 是否仍完好无损。换句话说，必须在诊断周期中实现两个测量步骤，与 3 线 RTD 系统相比，系统延迟会进一步增加。因此，在选择交错进行诊断测量的频率时，必须在这种延迟的增加与系统对故障情况的响应时间要求之间做出权衡。

3.3.2 在采用高侧 R_{REF} 的 4 线 RTD 系统中检测引线 2 和引线 3 上的断线问题

与采用低侧 R_{REF} 时相比，在采用高侧 R_{REF} 的 4 线 RTD 系统中，识别引线 2 或引线 3 上的断线问题更为困难。主要挑战在于无法强制电流从引线 2 或引线 3 流过 R_{REF} 来触发 V_{REF} 监控器这时应使用节 3.2.1.1.1 中详述的类似诊断例程。此例程涉及到以下配置更改：

- 切换 IDAC1 以在引线 2 上输出 (AINP)
- 切换 IDAC2 以在引线 3 上输出 (AINN)
- 选择 ADC 内部 V_{REF} 作为基准电压源
- 降低 PGA 增益 (必要时)
- 减小 IDAC 电流大小强度 (必要时)

正如节 3.2.1.1.1 中所述，诊断周期需要另一个基准源，以便检查对故障进行测量的结果，因为这种情况下无法强制电流流过 R_{REF} 。务务确保在诊断周期完成时重新选择外部 V_{REF} 输入。

另外，在必要时考虑使用最后两个步骤，因为系统可能已在诊断测量开始前进行了这样的配置。例如，系统可能正在测量较大的 RTD (例如 Pt1000)，其中 PGA 增益已设为 1V/V 并且 IDAC 电流强度较小。后两个步骤对于故障检测非常重要，节 3.2.1.1.1 末尾会更详细地介绍这方面内容。

图 3-12 显示了如何为采用高侧 R_{REF} 的 4 线 RTD 系统实现诊断测量。本例中假定引线 4 完好无损，因为 VREF 监控器并未触发。

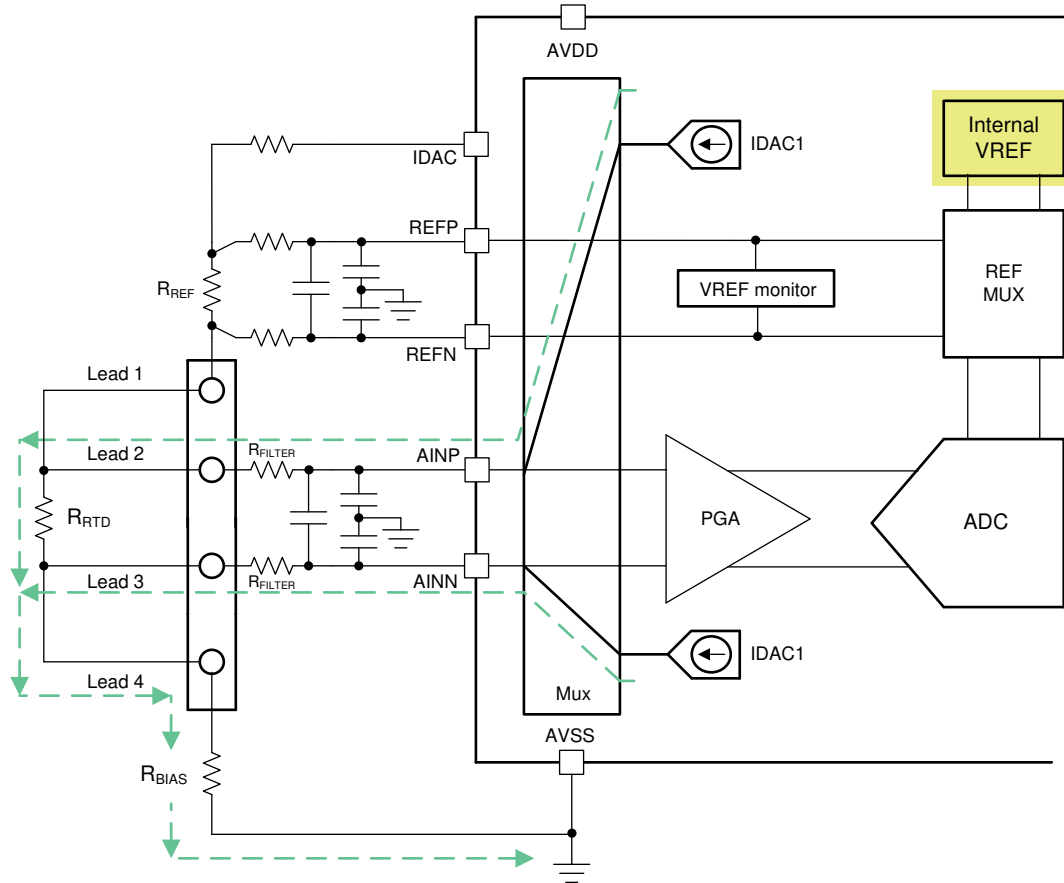


图 3-12. 诊断测量在采用高侧 R_{REF} 的 4 线 RTD 系统中检测引线 2 和引线 3 是否断开

通过监控此诊断测量周期内的转换结果并按如下方式解读 ADC 输出，可以确定是否发生了任何故障：

- 如果这两条引线都完好无损，转换结果为 $V_{IN} = V_{AINP} - V_{AINN} = IDAC1 \cdot R_{RTD}$ ，其中假定滤波电阻器匹配良好。此结果就相当于 RTD 上的电压，并有效地实现一个双 IDAC、3 线 RTD 系统，其中使用了内部基准电压源，而不是比例基准配置。
- 如果引线 2 断开，IDAC1 会将 AINP 拉至 AVDD，而 IDAC2 会将 AINN 驱动至 $IDAC2 \cdot (R_{FILTER} + R_{LEAD3} + R_{LEAD4} + R_{BIAS})$ 。所得到的输出代码是较大的正值，很容易与 RTD 上的电压区分开来。
- 如果引线 3 断开，IDAC1 会将 AINP 驱动至 $IDAC1 \cdot (R_{FILTER} + R_{LEAD2} + R_{RTD} + R_{LEAD4} + R_{BIAS})$ ，而 IDAC2 会将 AINN 拉至 AVDD。所得到的输出代码是较大的负值，很容易与 RTD 上的电压区分开来。
- 如果这两条引线都断开，IDAC1 会将 AINP 拉至 AVDD，而 IDAC2 也会将 AINN 拉至 AVDD。由于 $AINP \approx AINN$ ，所得到的输出代码近似为 0，表示发生了故障。

请参阅节 3.2.1.1.1 的末尾，以了解此诊断测量为什么需要较小的 IDAC 电流强度和更小的 PGA 增益以及为系统选择这些值的相关指南。

3.3.3.4 线 RTD 系统的断线检测总结

表 3-6 和表 3-7 分别总结了采用具有低侧和高侧 R_{REF} 的 4 线 RTD 系统时所有断线状况对应的断线检测方法及其预期结果。

表 3-6. 采用低侧 R_{REF} 的 4 线 RTD 系统的断线检测总结

引线 1	引线 2	引线 3	引线 4	断线检测方法及其结果
连接	连接	连接	断开	• VREF 监控器 → VREF 电压 $\approx 0V$
连接	连接	断开	连接	• 将 IDAC 设置为引线 3 • VREF 监控器 → VREF 电压 $\approx 0V$
连接	断开	连接	连接	• 将 IDAC 设置为引线 2 • VREF 监控器 → VREF 电压 $\approx 0V$
连接	断开	断开	连接	• 已由引线 2、引线 3 情况涵盖
断开	连接	连接	连接	• VREF 监控器 → VREF 电压 $\approx 0V$
连接	断开	连接	断开	
连接	连接	断开	断开	
断开	连接	连接	断开	
断开	连接	断开	连接	
断开	断开	连接	连接	
连接	断开	断开	断开	
断开	连接	断开	断开	
断开	断开	连接	断开	
断开	断开	断开	连接	
断开	断开	断开	断开	

表 3-7. 采用高侧 R_{REF} 的 4 线 RTD 系统的断线检测总结

引线 1	引线 2	引线 3	引线 4	断线检测方法及其结果
连接	连接	连接	断开	• VREF 监控器 → VREF 电压 $\approx 0V$
连接	连接	断开	连接	• 将 IDAC1 设置为引线 2 并将 IDAC 2 设置为引线 3 • 选择内部 VREF • 更改 AINx、增益、IDAC 强度 (必要时) • 检查转换结果
连接	断开	连接	连接	• 请参阅引线 3 断开的情况
连接	断开	断开	连接	
断开	连接	连接	连接	• VREF 监控器 → VREF 电压 $\approx 0V$
连接	断开	连接	断开	
连接	连接	断开	断开	
断开	连接	连接	断开	
断开	连接	断开	连接	
断开	断开	连接	连接	
连接	断开	断开	断开	
断开	连接	断开	断开	
断开	断开	连接	断开	
断开	断开	断开	连接	
断开	断开	断开	断开	

4 适用于 RTD 断线检测的稳定时间注意事项

在实现本档中讨论的断线检测方案时，一个实际的挑战是测量和基准输入通道中由模拟滤波器引起的稳定时间。本档中介绍的所有 RTD 配置都在两组输入上存在通用低通 RC 滤波器，用以降低噪声、防止出现混叠，并在过压情况下限制流入输入端的电流。这些图中都不包含器件值，因为具体系统所需的滤波量会有很大差异。若要进一步了解此主题，请参阅这篇简短的[应用手册](#)，其中讨论了选择低通 RC 滤波器器件值的一般过程。

不过，为设计选择的器件值会影响总体系统响应时间，进而影响电路对故障的响应速度。例如，[图 4-1](#) 显示了采用低侧 R_{REF} 时 2 线 RTD 系统中的 IDAC 电流流动方式。这张图中显示了示例性器件值，不过选择这些值是为了说明稳定时间挑战，并一定遵循最佳设计实践。

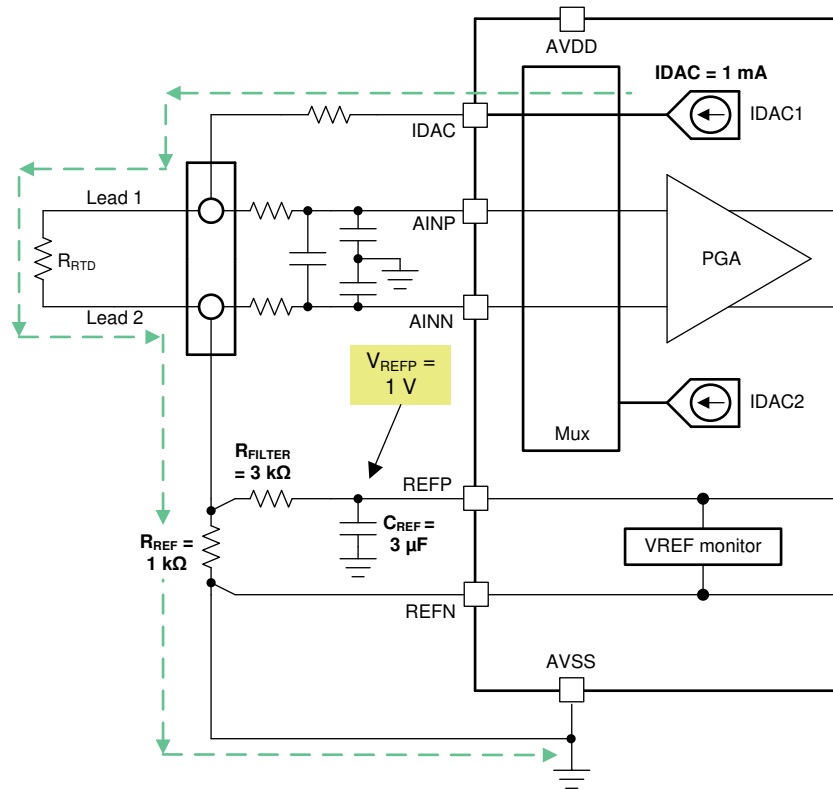


图 4-1. 正常运行期间 2 线 RTD 中 REFP 处的电压

根据[图 4-1](#) 所示的值，正常运行期间，REFP 处的电压等于 1V。当其中一条 RTD 引线断开时，IDAC 电流不再流过 R_{REF} ，因此 R_{REF} 上的电压等于 0V，如[图 4-2](#) 所示。

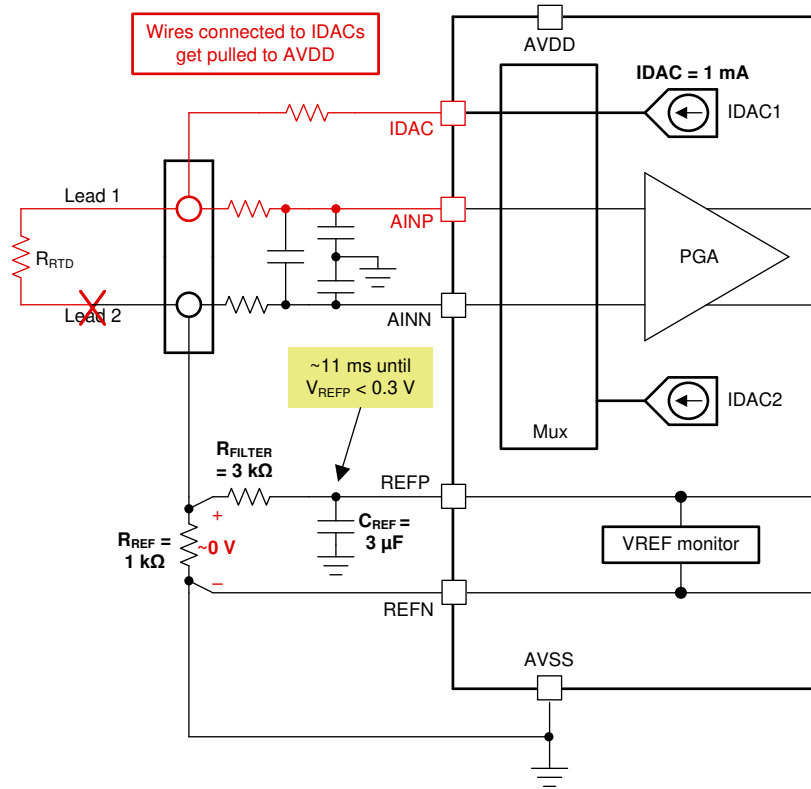


图 4-2. 因为 C_{REF} 放电而导致达到 V_{REF} 监控器阈值所需的稳定时间延长

此外，如图 4-2 所示，需要一些时间来使电容器 C_{REF} 放电，这样一来 $REFP$ 处的电压也会降至 $0V$ ，或者至少降至一定电平以下，从而触发持续 V_{REF} 监控器或可通过周期性 V_{REF} 监控器来准确识别。如果图 4-2 所示的系统中使用 ADS124S08，则大约需要 11 毫秒， V_{REFP} 才能降至 300 mV 的检测阈值以下，该阈值由此 ADC 中集成的持续 V_{REF} 监控器规定。如果 ADC 采样率为 1 kSPS （标称值为每次转换 1 ms ），则外部模拟滤波器无法足够快地稳定下来，从而使 ADC 能够在一次转换中识别故障。

尽管历经多次转换来识别故障在一些情况下是可以接受的，但是需要考虑当采用低侧 R_{REF} 的 4 线 RTD 在诊断周期内发生该延迟时可能出现的各种挑战，如节 3.3.1 所述。当将 IDAC 切换至引线 2 或引线 3 并检查 V_{REF} 监控器时，系统可能需要历经至少十次转换，才能识别出故障。如果主机控制器在设置时未考虑这些延迟，系统便无法准确而一致地检测 RTD 断线问题。

此外，当从诊断测量返回至精确 RTD 测量时，这些稳定时间相关挑战也会是个问题。如果诊断周期内会重新路由 IDAC，则测量和基准输入电容器上会存在较大的电压，需要多次转换才能完成放电。同样，如果主机控制器在设置时未考虑这些延迟，精确 RTD 测量数据可能对多次转换无效。

最后，需要考虑测量或基准输入上任何模拟滤波的响应时间，才能设计出有效的 RTD 断线检测方案。

5 总结

很多 Δ - Σ ADC 都集成了可在传感应用中用于断线检测的功能。本文档展示了如何仅使用集成式 IDAC 和 VREF 监控功能来检测所有常见 RTD 配置中的各种断线问题。

A 集成式 PGA 电源轨检测如何帮助识别断线问题

尽管可以像本文档通篇所述那样使用 IDAC 和 VREF 监控功能来实现断线检测，但一些 ADC 中集成了额外的功能，使断线检测变得更加简单。

其中一种此类功能是 PGA 电源轨检测，该功能让用户可以检测 PGA 输出（一些情况下为输入）是否过于接近电源轨。该功能可用于识别断线问题，因为 AINP 或 AINN 可以在 IDAC 不再具有接地路径时被拉至 AVDD，如图 A-1 所示。诊断测量例程中可以采用该功能来更准确地确定哪个引脚已断开。

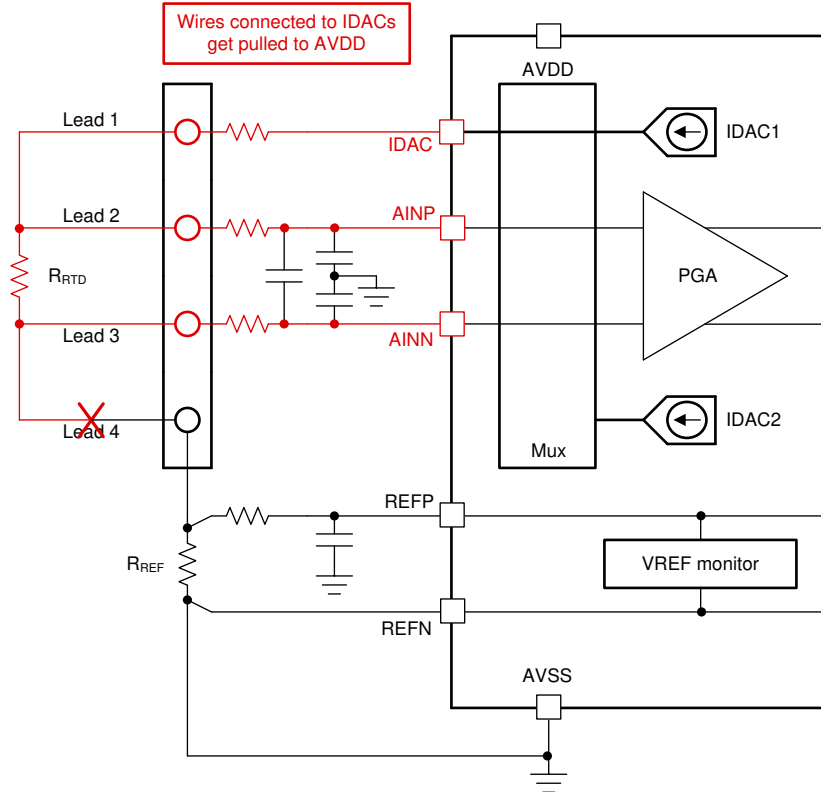


图 A-1. PGA 电源轨检测识别超范围输入

ADS124S08 就是一个集成了 PGA 电源轨检测功能的 ADC 例子。如果 ADS124S08 PGA 输出电压电平超过 $AVDD - 0.15V$ ，或者降至 $AVSS + 0.15V$ 以下，该 ADC 会设置一个标志，指示该输出超出了 PGA 的输出范围。每个 PGA 输出（OUTN 和 OUTP）均可触发过压或欠压标志，总共有四个标志：

- FL_P_RAILP (STATUS 字节的位 5) : V_{OUTP} 超过了 $AVDD - 0.15V$
- FL_P_RAILN (STATUS 字节的位 4) : V_{OUTP} 降到了 $AVSS + 0.15V$ 以下
- FL_N_RAILP (STATUS 字节的位 3) : V_{OUTN} 超过了 $AVDD - 0.15V$
- FL_N_RAILN (STATUS 字节的位 2) : V_{OUTN} 降到了 $AVSS + 0.15V$ 以下

有关特定 ADC 中 PGA 电源轨检测功能的更多信息，请参阅对应的 ADC 数据表。另外还可以参考表 A-1，以便快速比较可集成到表 1-1 中突出显示的精密 $\Delta - \Sigma$ ADC 中的可用功能。

表 A-1. 精密 $\Delta \Sigma$ ADC 中的 PGA 电源轨检测功能总结

器件	PGA 电源轨检测标志
ADS1120	不适用
ADS112C04	
ADS112U04	
ADS1220	
ADS122C04	
ADS122U04	

表 A-1. 精密 $\Delta \Sigma$ ADC 中的 PGA 电源轨检测功能总结 (continued)

器件	PGA 电源轨检测标志
ADS114S06B	<ul style="list-style-type: none"> • PGA 正输出 (OUTP) 过于接近 AVDD • PGA 正输出 (OUTP) 过于接近 AVSS • PGA 负输出 (OUTN) 过于接近 AVDD • PGA 负输出 (OUTN) 过于接近 AVSS
ADS114S08B	
ADS114S06	
ADS114S08	
ADS124S06	
ADS124S08	
ADS125H02	<ul style="list-style-type: none"> • PGA 正输入 (INP) 过于接近 HVDD • PGA 正输入 (INP) 过于接近 HVSS • PGA 负输入 (INN) 过于接近 HVDD • PGA 负输入 (INN) 过于接近 HVSS • PGA 正输出 (OUTP) 过于接近 HVDD • PGA 正输出 (OUTP) 过于接近 HVSS • PGA 负输出 (OUTN) 过于接近 HVDD • PGA 负输出 (OUTN) 过于接近 HVSS
ADS1260	<ul style="list-style-type: none"> • PGA 正/负输出 (OUTx) 过于接近 AVDD • PGA 正/负输出 (OUTx) 过于接近 AVSS
ADS1261	
ADS1262	<ul style="list-style-type: none"> • PGA 正/负输出 (OUTx) 过于接近 AVDD • PGA 正/负输出 (OUTx) 过于接近 AVSS • PGA 差分输出 > FS
ADS1263	

B 用于 RTD 断线检测的伪代码

以下各节提供了各种不同的 RTD 配置中用于确定断线问题的高级别代码。在每种情况下，VREF_MON = 1 表示持续 VREF 监控器检测到故障，而 CONV_RESULT 表示从连接到 AINx 的输入读取数据。通过使用持续 VREF 监控器，代码假定诊断例程中不会检查 VREF 监控状态（除非明确说明）。如果使用的是周期性 VREF 监控器，则会在同一周期内检查监控状态并运行诊断例程，因为这两种方法都必须中断 RTD 测量过程。

B.1 用于 2 线 RTD 系统（低侧或高侧 R_{REF}）的伪代码

```
Check STATUS byte

If VREF_MON = 1      // Lead 1 OR Lead 2 OR both leads are broken
Else                 // No leads are broken
```

B.2 用于单 IDAC、3 线 RTD 系统（低侧或高侧 R_{REF}）的伪代码

```
Check STATUS byte

If VREF_MON = 1      // Lead 1 AND/OR Lead 3 break, Lead 2 could also be broken
Else                 // Lead 2 could be broken, run a diagnostic measurement

    // Diagnostic measurement routine:
    Set IDAC1 to Lead 2
    If RREF = HIGH_SIDE

        Set IDAC2 to Lead 3
        Select internal VREF
        Change config settings          // If necessary

        If CONV_RESULT >> 0 V          // Lead 2 is broken
        Else                            // Lead 2 is not broken

    Else If VREF_MON = 1                // Lead 2 is broken
    Else                                // Lead 2 is not broken
```

B.3 用于双 IDAC、3 线 RTD 系统（低侧或高侧 R_{REF}）的伪代码

```
Check STATUS byte AND CONV_RESULT

// Detects --> (Lead 3 breaks) OR (Lead 1 AND Lead 2 break) OR (Lead 1 breaks AND
// RREF = HIGH_SIDE) OR (Lead 2 breaks AND RREF = HIGH_SIDE)
If VREF_MON = 1 OR (CONV_RESULT < 0 V AND RREF = HIGH_SIDE)

    // Lead 1 OR 2 could be broken, run a diagnostic measurement
    Else

        // Diagnostic measurement routine - Step 1
        Disable IDAC connected to Lead 1
        If VREF_MON = 1                // Lead 2 is broken
        Else                            // Lead 2 is not broken

        // Diagnostic measurement routine - Step 2
        Disable IDAC connected to Lead 2
        If VREF_MON = 1                // Lead 1 is broken
        Else                            // Lead 1 is not broken
```

B.4 用于 4 线 RTD 系统 (低侧或高侧 R_{REF}) 的伪代码

```
Check STATUS byte

// Detects if ≥1x lead breaks except if only Lead 2 AND/OR Lead 3 break
If VREF_MON = 1

// Lead 2 AND/OR Lead 3 could be broken, run a diagnostic measurement
Else

// Diagnostic measurement routine:
Connect IDAC1 to Lead 2 AND connect IDAC2 to Lead 3

If CONV_RESULT = 0 // Lead 2 AND Lead 3 are broken
Else If CONV_RESULT >> RTD*IDAC

    If CONV_RESULT > 0 // Lead 2 is broken
    If CONV_RESULT < 0 // Lead 3 is broken

Else // Lead 2 AND Lead 3 are not broken
```

重要声明和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2022，德州仪器 (TI) 公司