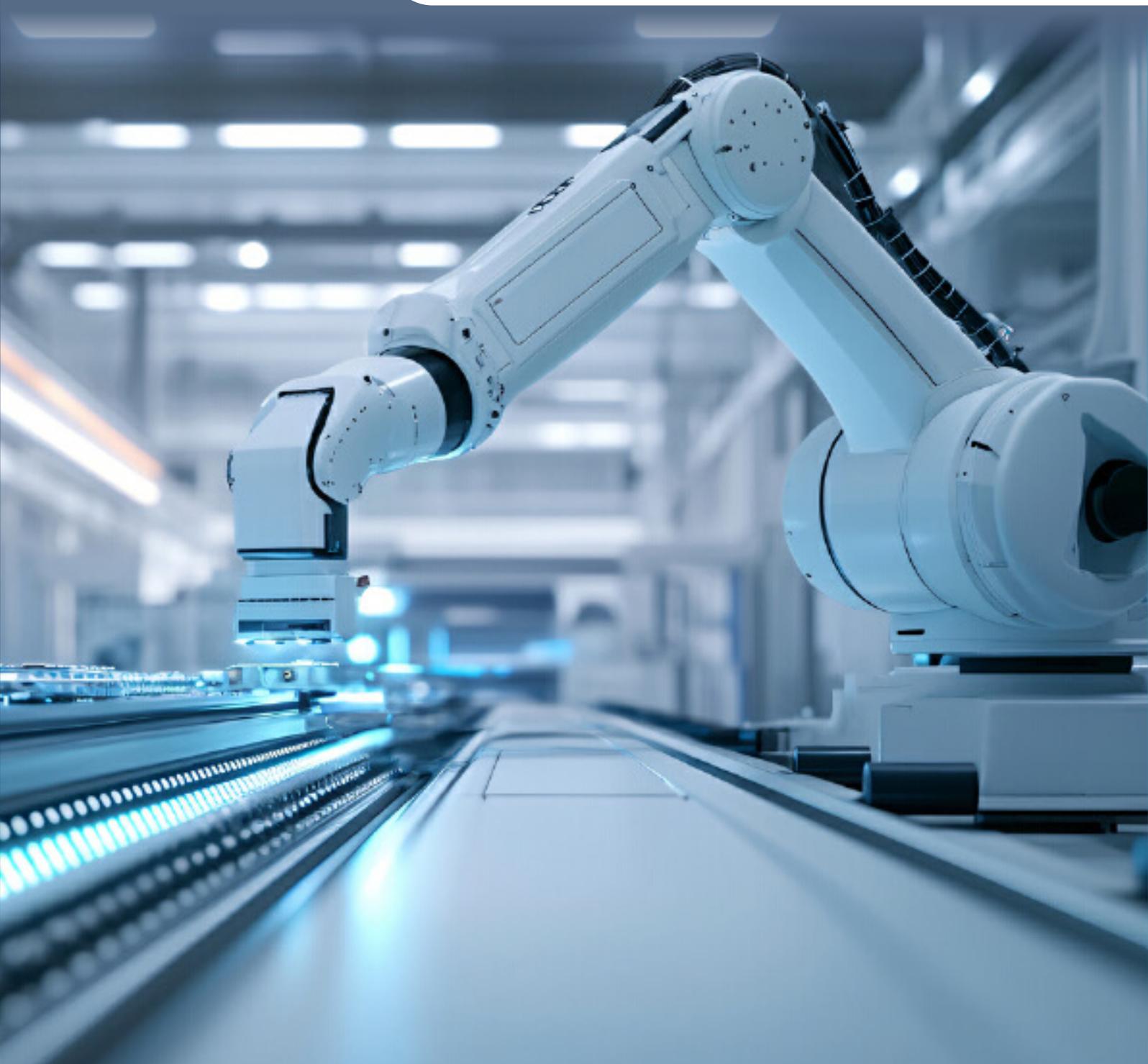


比例式三线制和四线制的 RTD测量系统

AN-11-0007

作者：Wei YU, Xiaoqing YI



比例式三线制和四线制的RTD测量系统

摘要

本文介绍了如何使用NSAD124x实现比例式三线制和四线制RTD测量，该设计包含了三线制和四线制测量拓扑，激励电流源、PGA增益和基准电阻的选择。分析了三线制和四线制测量系统的误差来源和误差大小，分别选取PT100和PT1000正常工作范围内的若干个电阻值进行测量，将阻值的测量精度转换为温度的测量精度，分析测量误差，并通过系统校准的方法改善测量精度。

目录

1. 电路及测量转换	2
1.1. 三线制测量拓扑及测量转换	2
1.2. 四线制测量拓扑及测量转换	4
2. 组件选择	5
2.1. RTD的工作范围	5
2.2. 选择ADC	5
2.3. 选择IDAC激励电流	7
2.4. 选择基准电阻和PGA增益	8
3. PT100测量误差分析	10
3.1. 三线制PT100测量误差分析	10
3.2. 四线制PT100测量误差分析	14
4. PT1000测量误差分析	16
4.1. 三线制PT1000测量误差分析	16
4.2. 四线制PT1000测量误差分析	20
5. 基于NSAD124x测量结果	22
5.1. 三线制PT100测量结果	23
5.2. 三线制PT1000测量结果	24
5.3. 四线制PT100测量结果	25
5.4. 四线制PT1000测量结果	26
5.5. 系统校准改善测量精度	27
6. 修订历史	30

比例式三线制和四线制的RTD测量系统

1. 电路及测量转换

RTD测量通常使用比例式测量方法，在已知基准电阻的前提下通过比例计算得到RTD阻值，而无须将ADC输出Code转换成电压，因此也无须知道激励电流的精确值。基础的比例式测量RTD是采用两线制测量拓扑，但两线制测量无法消除引线电阻带来的误差，是影响测量精度的主要原因之一。本文使用三线制和四线制的RTD测量方式减小或者消除引线电阻带来的误差，提高测量精度。

1.1. 三线制测量拓扑及测量转换

图 1-1和图 1-2分别显示了使用NSAD124x系列和NSAD1249时，低侧基准和两个IDAC电流源的三线制RTD测量拓扑。电流源IDAC2驱动 R_{RTD} ，电流源IDAC1和IDAC2共同驱动基准电阻 R_{REF} 。电流源IDAC1补偿引线电阻误差，如果使用匹配的IDAC电流源，引线电阻压降导致的测量误差可以被消除。关于NSAD124x系列和NSAD1249分别使用不同测量拓扑的相关设计细节请参考章节2.2. 选择ADC。

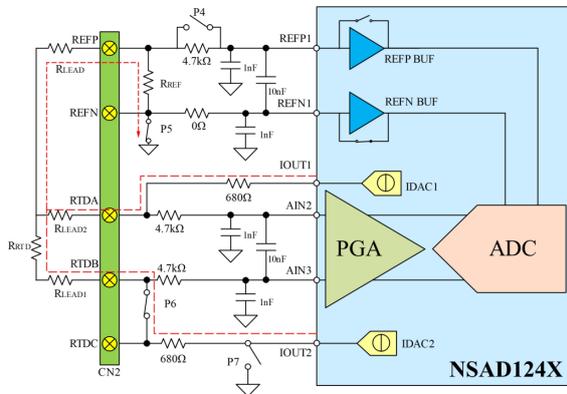


图 1-1 未开启System Chop的三线制RTD测量拓扑 (NSAD124x系列)

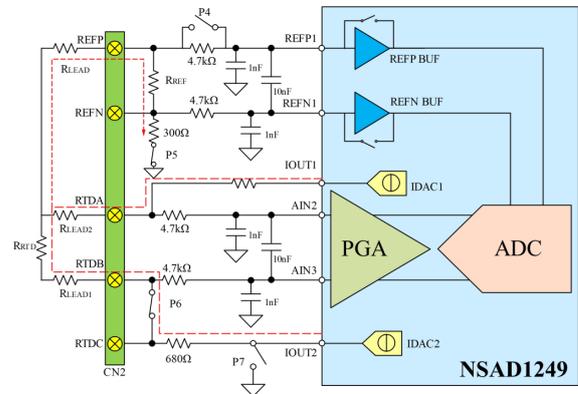


图 1-2 开启System Chop的三线制RTD测量拓扑 (仅NSAD1249)

根据三线制测量拓扑可以罗列以下方程：

$$V_{AIN3} = [I_{IDAC2} \cdot (R_{RTD} + R_{LEAD1})] + [(I_{IDAC2} + I_{IDAC1}) \cdot (R_{REF} + R_{LEAD2})] \quad (1)$$

$$V_{AIN2} = [I_{IDAC1} \cdot R_{LEAD2}] + [(I_{IDAC2} + I_{IDAC1}) \cdot R_{REF} + R_{LEAD1}] \quad (2)$$

可以得到 ADC 输入电压：

$$V_{AIN3} - V_{AIN2} = V_{RTD} = I_{IDAC2} \cdot (R_{RTD} + R_{LEAD1}) - I_{IDAC1} \cdot R_{LEAD2} \quad (3)$$

若引线电阻相等 $R_{LEAD1} = R_{LEAD2}$ ，且电流源匹配 $I_{IDAC1} = I_{IDAC2} = I_{IDAC}$ ，则可等效为：

$$V_{RTD} = I_{IDAC} \cdot R_{RTD} \quad (4)$$

电流源 IDAC1 和 IDAC2 共同驱动基准电阻 R_{REF} ，ADC 引脚 REFP1 和 REFN1 以开尔文连接方式与 R_{REF} 相连接，消除电路中 R_{REF} 引线压降带来的误差：

$$V_{REF} = (I_{IDAC1} + I_{IDAC2}) \cdot R_{REF} = 2 \cdot I_{IDAC} \cdot R_{REF} \quad (5)$$

比例式三线 and 四线制的RTD测量系统

ADC 测量转换如下：

$$\text{Outout Code} = 2^{23} \cdot \text{Gain} \cdot V_{\text{RTD}}/V_{\text{REF}} \quad (6)$$

代入式(4)(5)可得：

$$R_{\text{RTD}} = R_{\text{REF}}/(2^{22} \cdot \text{Gain}) \cdot \text{Outout Code} \quad (7)$$

假设引线电阻相等 $R_{\text{LEAD1}} = R_{\text{LEAD2}} = R_{\text{LEAD}}$ ，但电流源不是理想匹配 $I_{\text{IDAC1}} = 1.01 \cdot I_{\text{IDAC2}}$ ，则可以得到：

$$V_{\text{RTD}} = I_{\text{IDAC2}} \cdot R_{\text{RTD}} + R_{\text{LEAD}} \cdot (I_{\text{IDAC2}} - 1.01 \cdot I_{\text{IDAC2}}) = I_{\text{IDAC2}} \cdot R_{\text{RTD}} - 0.01 \cdot I_{\text{IDAC2}} \cdot R_{\text{LEAD}} \quad (8)$$

$$V_{\text{REF}} = (1.01 \cdot I_{\text{IDAC2}} + I_{\text{IDAC2}}) \cdot R_{\text{REF}} = 2.01 \cdot I_{\text{IDAC2}} \cdot R_{\text{REF}} = 2 \cdot (1.005 \cdot I_{\text{IDAC2}} \cdot R_{\text{REF}}) \quad (9)$$

对比式(4)(5)和式(8)(9)，由于 $R_{\text{LEAD}} \ll R_{\text{REF}}$ ，因此电流源不匹配主要影响基准电压，由式(9)可以看出，电流源 1% 的不匹配度，会导致基准电压 0.5% 的误差，从而使系统产生 0.5% 的增益误差。

如果需要克服电流源不匹配带来的测量误差以进一步提高精度，可以通过修改寄存器配置交换电流源 IDAC1 和 IDAC2 的输出通道前后分别进行两次测量，并对两次测量的结果求平均，这种做法我们称为电流斩波。

V_{RTD1} 表示第一次测量结果， V_{RTD2} 表示第二次测量结果：

$$V_{\text{RTD1}} = I_{\text{IDAC2}} \cdot (R_{\text{RTD}} + R_{\text{LEAD1}}) - I_{\text{IDAC1}} \cdot R_{\text{LEAD2}} \quad (10)$$

$$V_{\text{RTD2}} = I_{\text{IDAC1}} \cdot (R_{\text{RTD}} + R_{\text{LEAD1}}) - I_{\text{IDAC2}} \cdot R_{\text{LEAD2}} \quad (11)$$

对第一次测量和第二次测量结果取平均，可得：

$$V_{\text{RTD}} = (V_{\text{RTD1}} + V_{\text{RTD2}})/2 = [(I_{\text{IDAC1}} + I_{\text{IDAC2}}) \cdot (R_{\text{RTD}} + R_{\text{LEAD1}}) / 2] - [(I_{\text{IDAC1}} + I_{\text{IDAC2}}) \cdot R_{\text{LEAD2}} / 2] \quad (12)$$

代入式(6)可得：

$$\begin{aligned} \text{Average Outout Code} &= \frac{2^{23} \cdot \text{Gain} \cdot \{[(I_{\text{IDAC1}} + I_{\text{IDAC2}}) \cdot (R_{\text{RTD}} + R_{\text{LEAD1}}) / 2] - [(I_{\text{IDAC1}} + I_{\text{IDAC2}}) \cdot R_{\text{LEAD2}} / 2]\}}{(I_{\text{IDAC1}} + I_{\text{IDAC2}}) \cdot R_{\text{REF}}} \\ &= \frac{2^{23} \cdot \text{Gain} \cdot [(R_{\text{RTD}} + R_{\text{LEAD1}}) / 2 - R_{\text{LEAD2}} / 2]}{R_{\text{REF}}} \end{aligned} \quad (13)$$

可以由式(13)发现， $I_{\text{IDAC1}} + I_{\text{IDAC2}}$ 项抵消，即由 IDAC 电流源不匹配引入的误差项抵消。

若引线电阻 $R_{\text{LEAD1}} = R_{\text{LEAD2}}$ ，则式(13)可以进一步化简为：

$$\text{Average Outout Code} = 2^{23} \cdot \text{Gain} \cdot R_{\text{RTD}} / (2 \cdot R_{\text{REF}}) = 2^{22} \cdot \text{Gain} \cdot R_{\text{RTD}} / R_{\text{REF}} \quad (14)$$

$$R_{\text{RTD}} = R_{\text{REF}} / (2^{22} \cdot \text{Gain}) \cdot \text{Average Outout Code} \quad (15)$$

若引线电阻 $R_{\text{LEAD1}} = R_{\text{LEAD2}} + \Delta R$ ，则式(13)可以等效为：

$$R_{\text{RTD}} = R_{\text{REF}} / (2^{22} \cdot \text{Gain}) \cdot \text{Average Outout Code} - \Delta R \quad (16)$$

24AWG 铜线的标称电阻为 0.08Ω/米，假设引线 LEAD1 和引线 LEAD2 横截面积相同的情况下相差 0.1 米，则对于 PT100 测量会引入 0.02°C 的测量误差，对于 PT1000 测量会引入 0.002°C 的测量误差。

1.2. 四线制测量拓扑及测量转换

三线制RTD测量电路中，引线误差是通过引入额外的电流源进行补偿。四线制RTD测量拓扑只需要使用一个电流源，并且不会引入引线电阻的误差。图 1-3和图1-4分别显示了使用NSAD124x系列和NSAD1249时低侧基准和一个IDAC电流源的四线制RTD测量拓扑，IDAC1电流源驱动 R_{RTD} 和 R_{REF} 。关于NSAD124x系列和NSAD1249分别使用不同测量拓扑的相关设计细节请参考章节2.2.选择ADC。

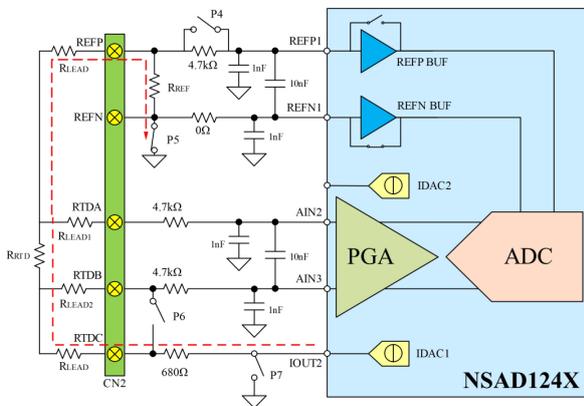


图 1-3未开启System Chop的四线制RTD测量拓扑 (NSAD124x系列)

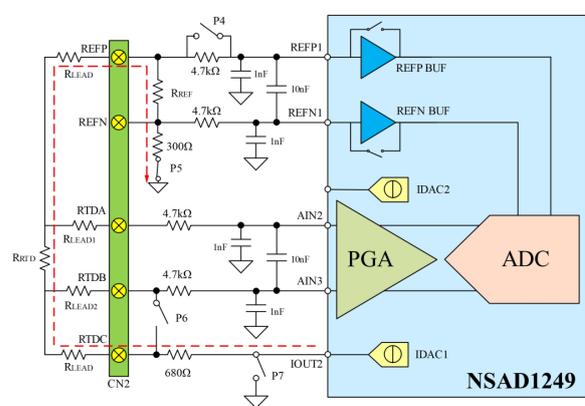


图 1-4 开启System Chop的四线制RTD测量拓扑 (仅NSAD1249)

根据四线制测量拓扑可以罗列以下方程：

$$V_{AIN3} = I_{IDAC} \cdot (R_{RTD} + R_{REF}) \quad (17)$$

$$V_{AIN2} = I_{IDAC} \cdot R_{REF} \quad (18)$$

可以得到ADC输入电压：

$$V_{RTD} = I_{IDAC} \cdot R_{RTD} \quad (19)$$

电流源 IDAC1 驱动基准电阻 R_{REF} ，ADC 引脚 REFP1 和 REFN1 以开尔文连接方式与 R_{REF} 相连接，消除电路中 R_{REF} 引线压降带来的误差：

$$V_{REF} = I_{IDAC} \cdot R_{REF} \quad (20)$$

ADC测量转换如下：

$$\text{Outout Code} = 2^{23} \cdot \text{Gain} \cdot V_{RTD} / V_{REF} \quad (21)$$

代入式(19)(20)，可得：

$$R_{RTD} = R_{REF} / (2^{23} \cdot \text{Gain}) \cdot \text{Outout Code} \quad (22)$$

比例式三线制和四线制的RTD测量系统

2. 组件选择

2.1. RTD的工作范围

PT100和PT1000的完整测温范围 -200°C 至 850°C ，在该工作范围内PT100的等效电阻范围约为 20Ω 至 400Ω ，PT1000的等效电阻范围约为 200Ω 至 4000Ω 。在 0°C 时PT100和PT1000的电阻值分别为 100Ω 和 1000Ω ，PT100工作范围内灵敏度为 $0.385\Omega/^{\circ}\text{C}$ ，PT1000为 $3.85\Omega/^{\circ}\text{C}$ 。PT100和PT1000从 -200°C 至 850°C 的电阻值变化曲线如图 2-1和图 2-2所示。

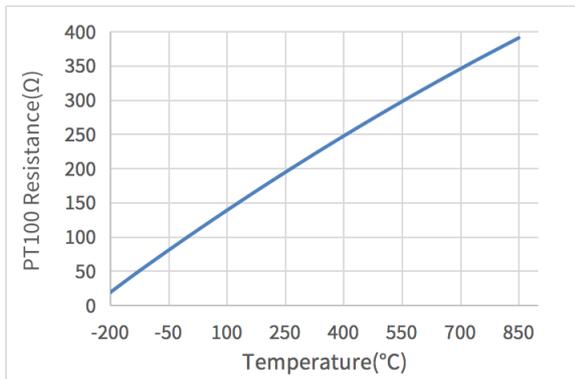


图 2-1 PT100 RTD -200°C 至 850°C 的电阻值变化曲线

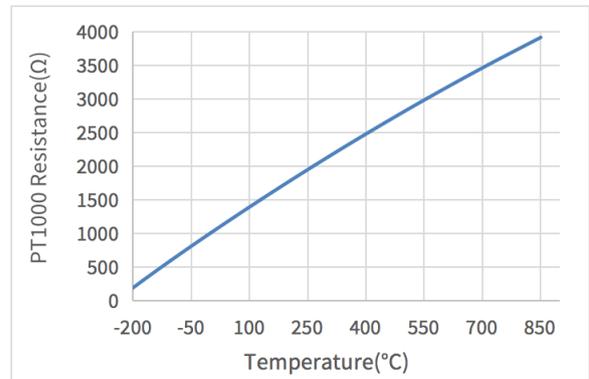


图 2-2 PT1000 RTD -200°C 至 850°C 的电阻值变化曲线

2.2. 选择ADC

本文提供了NSAD124x系列和NSAD1249作为RTD测量系统中的ADC，如图2-3和图2-4所示分别为使用NSAD124x系列和NSAD1249的四线制测量拓扑。

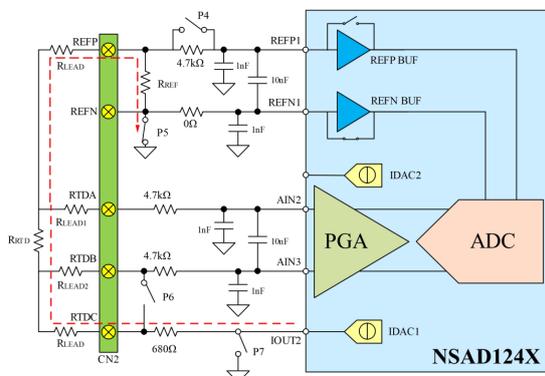


图 2-3 未开启System Chop的四线制RTD测量拓扑 (NSAD124x系列)

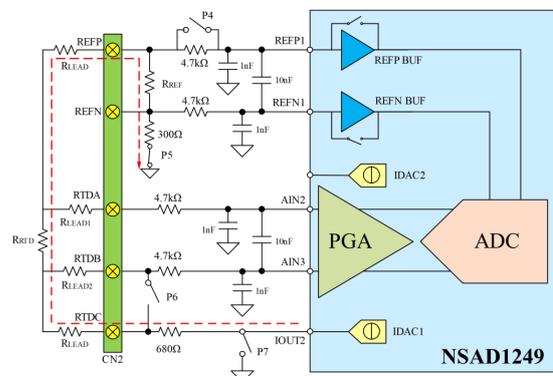


图 2-4 开启System Chop的四线制RTD测量拓扑 (仅NSAD1249)

ADC 具有基准电压缓冲器，如图 2-5显示NSAD124x系列中REFP 缓冲器默认开启，REFN 缓冲器默认旁路。在NSAD1249 中，可通过 REF_MON 寄存器(10h)中的 REFP_BUF 位和 REFN_BUF 位选择开启或关闭。

比例式三线制和四线制的RTD测量系统

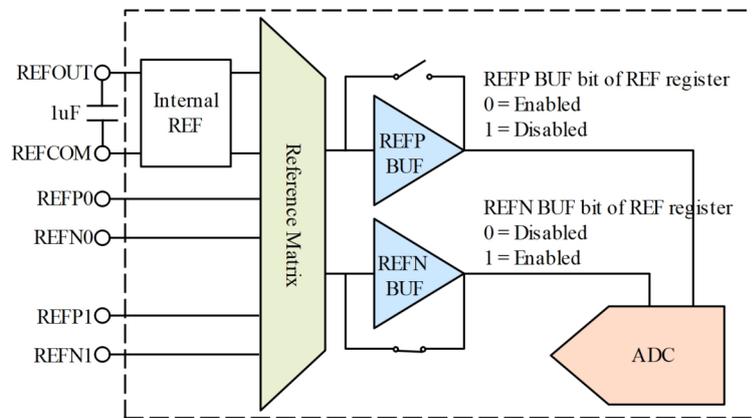


图2-5 基准电压连接

当REFN缓冲器默认旁路时，NSAD124x系列ADC内部的开关电容电路在采样阶段会汲取电流，REFN绝对输入电流为：

$$I_{REFN} = 5.5\mu\text{A}/\text{V} \cdot V_{REF} \quad (23)$$

若该输入电流通过共模滤波器的电阻，将导致测量误差。如图 2-3 拓扑中 REFN 端的共模滤波电阻器选择 0Ω ，由此产生的测量误差可以忽略不计。

NSAD1249 开启基准电压输入缓冲器时，REFN 绝对输入电流由公式(23)降低至 100pA 典型值，导致的测量误差可以忽略不计。但是当缓冲器开启时，基准电压输入端的绝对电压输入范围需满足：

$$AVSS + 0.1\text{V} < V_{REFP}, V_{REFN} < AVDD - 0.1\text{V} \quad (24)$$

如图 2-4 所示的测量拓扑，如果直接将基准电阻一端接 $AVSS$ ，那么 REFN1 引脚上的电压将超出允许输入范围。通过增加偏置电阻 R_{BIAS} 使 REFN1 引脚上的电压满足基准电压绝对输入电压范围。具体地，应使得：

$$IDAC \cdot R_{BIAS} > AVSS + 0.1\text{V} \quad (25)$$

本文中测量拓扑使用的激励电流源为 $250\mu\text{A}$ 至 1mA 之间，因此选择偏置电阻 R_{BIAS} 为 300Ω 。

此外，为了降低 ADC 的输入失调电压，可以开启 System Chop 模式(仅 NSAD1249)进行 RTD 测量，如图 2-4 所示开启 System Chop 模式(仅 NSAD1249)进行 RTD 测量。当该模式使能时，ADC 执行两次内部转换以消除输入失调电压，第一次以正常输入极性进行转换，然后 ADC 反转内部输入极性进行第二次转换。两次转换的反相平均产生最终的转换结果，消除失调电压。使用该功能后，ADC 的失调电压由 $(20/\text{Gain})\mu\text{V}$ 典型值(Gain=1 to 16)降低至 200nV 典型值。失调电压温漂由 $50\text{nV}/^\circ\text{C}$ 典型值(Gain=1 to 8)降低至 $2\text{nV}/^\circ\text{C}$ 典型值。但是，需要注意的是 System Chop 模式下的第一个采集数据会有延迟。使用低延迟滤波器时，数据可以单次转换建立。因此启用 System Chop 模式后，两次转换后会得到第一个转换结果。使用 SINC3 滤波器时，数据在三次转换后建立。如果启用了 System Chop 模式，则在六次转换后得到第一个转换结果。

对于放大器而言，通常都需要考虑器件的共模输入范围，确保输入电压保持在器件指定的共模输入范围内，其范围通常小于电源电压。但是，纳芯微在这个关键参数上做了设计上的创新，传统 PGA 使用的是三运放结构，不具备轨至轨的共模输入范围。纳芯微在此基础上升级为电容型 PGA，其优

比例式三线制和四线制的RTD测量系统

点是拥有更好的噪声性能，更好的匹配和温度漂移以及在所有增益下具有轨至轨的共模输入范围，这给 RTD 测量，特别是堆叠式 RTD 测量的电路设计工作带来极大的便利。

为了提高 ADC 的信噪比，本文中的 PGA 增益是以放大 RTD 电压信号至接近 PGA 输出电压轨的原则进行选择。但是在测量过程中，需要提防 PGA 输出电压至轨，导致测量误差。在 NSAD1249 中，PGA 集成了输出电压至轨监控功能，该功能通过系统控制寄存器 1 的 FL_RAIL_EN 位使能。

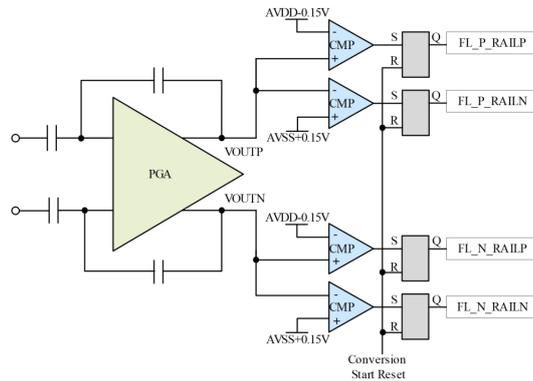


图 2-6 PGA 输出电压至轨监控

输出电压至轨监控功能框图如图 2-6 所示，如果 PGA 输出电压电平超过 $AVDD+0.15V$ 以上或降至 $AVSS+0.15V$ 以下，则触发 PGA 输出标记 (STATUS[5:2] 寄存器(0Fh))，锁存标记在每次数据转换后更新。PGA 输出 VOUTN 和 VOUTP 可以触发 过压或欠压标志，总共有四个标志。

RTD 测量过程中虽然 RTD 断线并不常见，但也是一个不可避免的问题。如果 ADC 本身具备故障识别功能，以便主机及时采取纠正措施，可以很大程度提高系统的鲁棒性。NSAD1249 提供了电压基准监控功能，用户可以通过该功能连续监控 ADC 基准电压是否正常，该功能通过 REF_MON 寄存器(10h)中的 FL_REF_EN[1:0] 使能。

电压基准监控将基准电压和两个电平阈值进行比较，第一个阈值为 $0.3V$ ，第二个阈值为 $(AVDD-AVSS)/3$ 。如果电压基准低于阈值，STATUS 寄存器(0Fh)中每次数据转换后更新一个锁存标记。小于 $0.3V$ 的基准电压表明基准电压可能存在短路，或者表明 RTD 和基准电阻之间存在断线。通过 REF_MON 寄存器(10h) FL_REF_EN[1:0] 置 01 使能该比较功能。如果基准电压小于 $0.3V$ ，STATUS(0Fh)中的 FL_REF_L0 位会被置 1。基准电压介于 $0.3V$ 和 $(AVDD-AVSS)/3$ 之间，可以指示 3 线 RTD 设置中的传感器激励线断裂。通过 REF_MON 寄存器(10h)中的 FL_REF_EN [1:0] 置 10 使能该比较功能。如果基准电压小于 $(AVDD-AVSS)/3$ ，STATUS(0Fh)中的 FL_REF_L1 位会被置 1。

2.3. 选择 IDAC 激励电流

通常来讲，增加 IDAC 激励电流能够提高测温的灵敏度，进而提升测温能力。但是，较大的激励电流也会引入额外的测量误差，激励电流在 RTD 上会产生自热效应，电流越大自热效应越大，与电流大小的平方成正比，往往会影响温度测量精度。此外，IDAC 激励电流大小的选择也受到电流源顺从电压的限制。因此，在选择激励电流值时，需要综合考虑自热效应和顺从电压。

比例式三线制和四线制的RTD测量系统

由于自热效应带来的最大温度测量误差为：

$$\Delta T = (I_{DAC})^2 \cdot R_{RTD} / E \quad (26)$$

其中E为自发热系数，单位为mW/°C。对于小型薄膜元件，E=2.5mW/°C，对于较大的线绕元件，E=65mW/°C。PT100最大阻值为400Ω，激励电流IDAC为1mA时，RTD功率耗散小于0.4mW，对于发热系数较大的RTD，发热导致的测量误差小于0.01°C。PT1000最大阻值为4000Ω，激励电流IDAC为500uA时，RTD功率耗散小于2mW，对于发热系数较大的RTD，发热导致的测量误差小于0.05°C。

同时，电流源的选取也需要满足其顺从电压，顺从电压大小与电流源大小有关。

若IDAC为1mA，对于开启System Chop的三线制测量拓扑(仅NSAD1249)：

$$I_{IDAC} \cdot R_{RTD_{MAX}} + 2 \cdot I_{IDAC} \cdot (R_{REF} + R_{BIAS}) < AVDD - 0.65V \quad (27)$$

对于开启System Chop的四线制测量拓扑(仅NSAD1249)：

$$I_{IDAC} \cdot (R_{RTD_{MAX}} + R_{REF} + R_{BIAS}) < AVDD - 0.65V \quad (28)$$

若IDAC为500uA，对于开启System Chop的三线制测量拓扑(仅NSAD1249)：

$$I_{IDAC} \cdot R_{RTD_{MAX}} + 2 \cdot I_{IDAC} \cdot (R_{REF} + R_{BIAS}) < AVDD - 0.4V \quad (29)$$

对于开启System Chop的四线制测量拓扑(仅NSAD1249)：

$$I_{IDAC} \cdot (R_{RTD_{MAX}} + R_{REF} + R_{BIAS}) < AVDD - 0.4V \quad (30)$$

2.4. 选择基准电阻和PGA增益

对于比例式的RTD测量，基准电阻 R_{REF} 的精度直接影响到温度的测量精度，其公差会导致RTD测量中出现增益误差。因此，基准电阻 R_{REF} 必须选择高精度和低温漂的精密电阻器。

基准电阻 R_{REF} 必须大于最大RTD电阻值，其和PGA增益决定了测量的正满量程范围。此外，基准电阻的选择要满足ADC的基准电压输入范围，对于三线制测量：

$$0.5V < 2 \cdot I_{IDAC} \cdot R_{REF} < AVDD \quad (31)$$

对于四线制测量：

$$0.5V < I_{IDAC} \cdot R_{REF} < AVDD \quad (32)$$

PT100的测量中，选取基准电阻 R_{REF} 为2500Ω，公差0.1%。对于三线制测量，使用激励电流IDAC为500uA，最大RTD电压 V_{RTD} 为200mV，基准电压 V_{REF} 为2.5V，将PGA增益设置为8。对于四线制测量，使用激励电流IDAC为1mA，基准电压 V_{REF} 为2.5V，最大RTD电压 V_{RTD} 为400mV，基准电压 V_{REF} 为2.5V，将PGA增益设置为4。

PT1000的测量中，选取基准电阻 R_{REF} 为4020Ω，公差0.1%。对于三线制测量，使用激励电流IDAC为250uA，最大RTD电压 V_{RTD} 为1V，基准电压 V_{REF} 为2.01V，将PGA增益设置为2。对于四线制测量，使用激励电流IDAC为500uA，最大RTD电压 V_{RTD} 为2V，基准电压 V_{REF} 为2.01V，将PGA增益设置为1。

比例式三线制和四线制的RTD测量系统

表2-1显示了三线制测量和四线制测量时IDAC激励电流大小和PGA增益的选择。

RTD	PT100		PT1000	
拓扑	低侧基准和两个IDAC 三线制RTD测量	四线制RTD测量	低侧基准和两个IDAC 三线制RTD测量	四线制RTD测量
IDAC激励电流	500uA	1mA	250uA	500uA
PGA增益	8	4	2	1

表 2-1 RTD测量系统的IDAC激励电流大小和PGA增益选择

3.PT100测量误差分析

本文采用了三线制和四线制测量拓扑对PT100进行测量。在三线制测量系统中，采用两个电流源可以消除引线电阻误差，但是如果未使用电流斩波，则测量误差主要来源于基准电阻的公差和电流源的失配误差。若使用电流斩波，则电流源失配的误差被消除，系统测量误差主要来源于基准电阻的公差。在四线制测量系统中，不存在引线电阻误差，测量误差主要来源于基准电阻的公差。

3.1.三线制PT100测量误差分析

引线电阻：

在低侧基准和两个IDAC电流源的三线制RTD测量拓扑中，若未使用电流斩波消除电流源失配误差，根据章节1.1的分析，两个IDAC电流源失配会导致测量过程中出现增益误差。在PT100的三线制测量中，IDAC激励电流为500uA，电流源失配值 $\pm 0.2\%$ ，会给测量系统带来 $\pm 0.1\%$ 的增益误差。对于PT100在 0°C 的阻值 100Ω ，造成的电阻值测量误差为 $\pm 0.1\Omega$ 。当使用电流斩波消除电流源失配误差后，误差主要来源于引线电阻补偿误差，即图 1-1中LEAD1和LEAD2的走线电阻差值，本文使用的LEAD1和LEAD2的电阻差值小于 0.005Ω ，基本可以忽略不计。

基准电阻公差：

在PT100的三线制测量中，基准电阻标称值 2500Ω ，公差为 $\pm 0.1\%$ 。基准电阻会给测量系统带来 $\pm 0.1\%$ 的增益误差，对于PT100在 0°C 的阻值 100Ω ，造成的电阻值最大测量误差为 $\pm 0.1\Omega$ 。

失调电压：

对于未开启System Chop的测量拓扑而言，失调电压最大值为 $120\mu\text{V}/\text{Gain}$ 。在PT100的三线制测量中，IDAC激励电流为500uA，PGA Gain设置为8，失调电压最大值为 $15\mu\text{V}$ ，造成的电阻值最大测量误差为 $\pm 0.03\Omega$ 。对于开启System Chop的测量拓扑(仅NSAD1249)而言，失调电压能降低至约 200nV ，造成的电阻值最大测量误差远小于 $\pm 0.001\Omega$ 。

增益误差：

在PT100的三线制测量中，PGA Gain设置为8，增益误差最大值为 100ppm ，对于PT100在 0°C 的阻值 100Ω ，造成的电阻值最大测量误差为 $\pm 0.01\Omega$ 。

积分非线性：

在PT100的三线制测量中，PGA Gain设置为8，积分非线性误差典型值为 $\pm 5\text{ppmFSR}$ ，满量程为 2500Ω ，造成的电阻值测量误差为 $\pm 0.0125\Omega$ 。

峰峰值噪声：

当使用低延迟(Low Latency; LL)滤波器，PGA Gain设置为8，5SPS的数据输出率下，噪声有效值为 $0.09\mu\text{V}$ ，峰峰值为 $0.52\mu\text{V}$ ，折算到电阻值测量噪声峰峰值为 $\pm 0.00104\Omega$ 。

表 3-1统计了PT100三线制测量的误差源以及误差大小。

比例式三线制和四线制的RTD测量系统

误差源	条件	误差计算 @100Ω	最大误差 @100Ω	最大误差 @0°C
引线补偿误差	三线制测量(电流斩波)	0.005Ω	0.005Ω	0.013°C
基准电阻公差	选择低公差基准电阻	100Ω*0.1%	0.1Ω	0.26°C
电流源失配	三线制测量(电流不斩波)	100Ω*0.1%	0.1Ω	0.26°C
失调电压误差	未开启System Chop	15uV/500uA	0.03Ω	0.078°C
	开启System Chop(仅NSAD1249)	200nV/500uA	0.0004Ω	0.001°C
增益误差	PGA Gain=8	100Ω*0.01%	0.01Ω	0.026°C
积分非线性	PGA Gain=8	2500Ω*5ppm	0.0125Ω	0.032°C
峰峰值噪声	FILTER=LL, ODR=5SPS	520nV/500uA	0.00104Ω	0.0027°C
合计 (线性误差计算)	未开启System Chop的三线制测量 (电流不斩波)	/	0.25354Ω	0.6587°C
	开启System Chop(仅NSAD1249) 进行三线制测量(电流不斩波)		0.22394Ω	0.5817°C
	未开启System Chop的三线制测量 (电流斩波)		0.15854Ω	0.4117°C
	开启System Chop(仅NSAD1249) 进行三线制测量(电流斩波)		0.12894Ω	0.3347°C
合计 (均方根误差计算)	未开启System Chop的三线制测量 (电流不斩波)	/	0.1455Ω	0.37°C
	开启System Chop(仅NSAD1249) 进行三线制测量(电流不斩波)		0.1423Ω	0.3781°C
	未开启System Chop的三线制测量 (电流斩波)		0.1057Ω	0.2749°C
	开启System Chop(仅NSAD1249) 进行三线制测量(电流斩波)		0.1014Ω	0.2636°C

表 3-1 PT100三线制测量系统的误差源和误差大小

比例式三线制和四线制的RTD测量系统

三线制测量系统未使用电流斩波，电流源失配误差会是影响测量精度的主要误差源。如图3-1和图3-2所示，ADC的误差主要由电流源失配所贡献。

- 失调电压误差
- 增益误差
- 积分非线性误差
- 峰峰值噪声
- 电流源失配

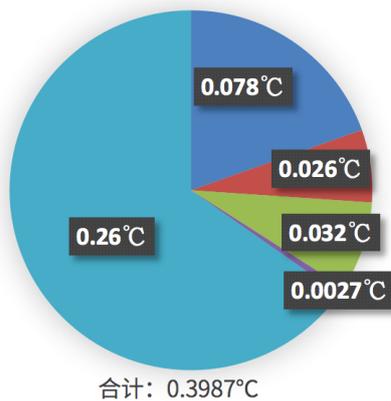


图 3-1 未开启System Chop的
三线制测量ADC误差分布

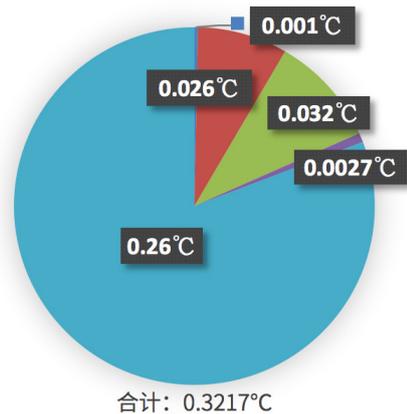


图 3-2 开启System Chop的
三线制测量ADC 误差分布

对于整个测量系统的误差比例如图3-3和图3-4所示。

- 失调电压误差
- 增益误差
- 积分非线性误差
- 峰峰值噪声
- 电流源失配
- 基准电阻公差

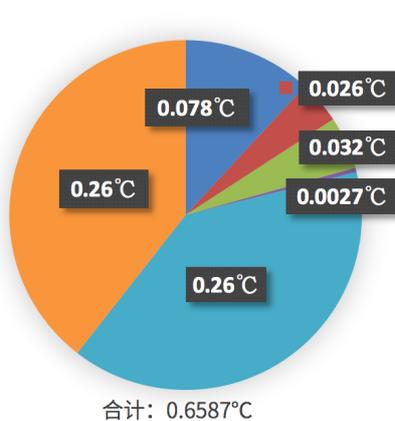


图 3-3 未开启System Chop的
三线制测量系统误差分布

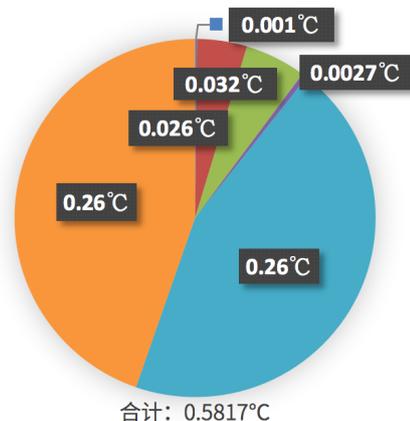


图 3-4 开启System Chop的
三线制测量系统误差分布

观察饼图可以发现测量系统的主要误差来源于电流源失配误差和基准电阻的公差。

三线制测量中，通过电流斩波的方式消除电流源失配误差，ADC的误差分布如图3-5和图3-6所示。对于未开启System Chop模式的测量系统，失调电压误差占比超过50%，成为主要的误差源。而使用NSAD1249开启System Chop模式之后，失调电压误差仅为0.001°C，误差主要来源于积分非线性。

比例式三线制和四线制的RTD测量系统

- 失调电压误差
- 增益误差
- 积分非线性误差
- 峰峰值噪声

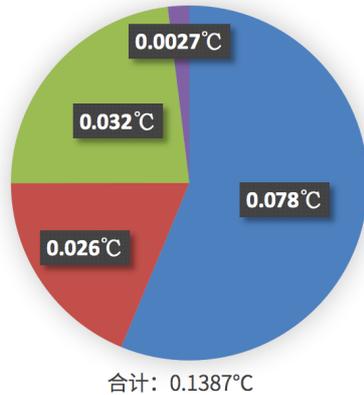


图 3-5 未开启System Chop的
三线制测量ADC误差分布（电流斩波）

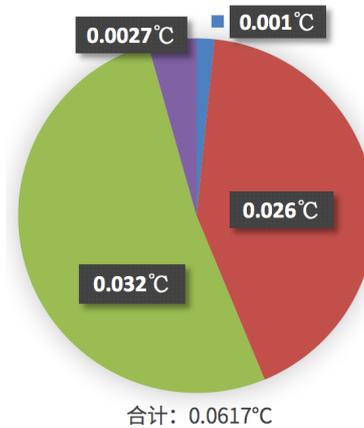


图 3-6 开启System Chop的
三线制测量ADC误差分布（电流斩波）

对于整个测量系统的误差比例如图3-7和图3-8所示，由饼图可以看出，测量系统的主要误差源来自于基准电阻公差。

- 失调电压误差
- 增益误差
- 积分非线性误差
- 峰峰值噪声
- 基准电阻公差
- 引线补偿误差

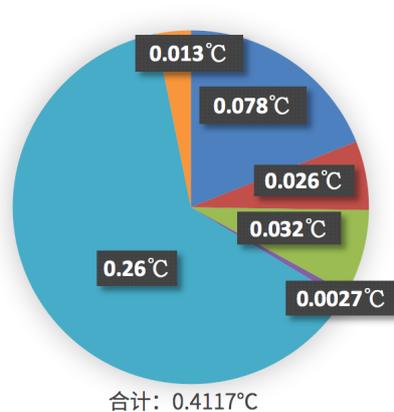


图 3-7未开启System Chop的
三线制测量系统误差分布（电流斩波）

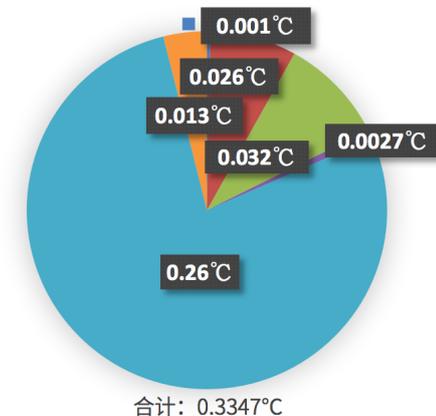


图 3-8开启System Chop的
三线制测量系统误差分布（电流斩波）

综上所述，采用三线制RTD测量时，若不使用电流斩波，电流源的失配是测量系统的主要误差来源。而当使用电流斩波时，基准电阻公差是测量系统的主要误差来源。对于未开启System Chop的测量系统，ADC的总误差占比小于40%，折算到温度测量误差小于0.2°C；开启System Chop模式的测量系统，ADC的总误差占比不超过20%，折算到温度测量误差小于0.1°C。

比例式三线 and 四线制的RTD测量系统

3.2. 四线制PT100测量误差分析

引线电阻：

在四线制RTD测量拓扑中，不存在引线电阻误差。

基准电阻公差：

在PT100的四线制测量中，基准电阻标称值2500Ω，公差为±0.1%。基准电阻会给测量系统带来±0.1%的增益误差，对于PT100在0°C的阻值100Ω，造成的电阻值最大测量误差为±0.1Ω。

失调电压：

对于未开启System Chop的测量拓扑而言，失调电压最大值为120uV/Gain。在PT100的四线制测量中，IDAC激励电流为1mA，PGA Gain设置为4，失调电压最大值为30uV，造成的电阻值最大测量误差为±0.03Ω。对于开启System Chop的测量拓扑(仅NSAD1249)而言，当System Chop使能时，失调电压能降低至约200nV，造成的电阻值最大测量误差远小于±0.001Ω。

PGA增益误差：

在PT100的四线制测量中，PGA Gain设置为4，增益误差最大值为100ppm，对于PT100在0°C的阻值100Ω，造成的电阻值最大测量误差为±0.01Ω。

积分非线性误差：

在PT100的四线制测量中，PGA Gain设置为4，积分非线性误差典型值为±5ppmFSR，满量程为2500Ω，造成的电阻值测量误差为±0.0125Ω。

峰峰值噪声：

当使用低延迟(Low Latency; LL)滤波器，PGA Gain设置为4，5SPS的数据输出率下，噪声有效值为0.16uV，峰峰值为0.96uV，折算到电阻值测量噪声峰峰值为±0.00096Ω。

表3-2统计了PT100四线制测量的误差源以及误差大小。

误差源	方案	误差计算 @100Ω	最大误差 @100Ω	最大误差 @0°C
引线误差	四线制测量	0	0Ω	0°C
基准电阻公差	选择低公差基准电阻	100Ω*0.1%	0.1Ω	0.26°C
失调电压误差	未开启System Chop	30uV/1mA	0.03Ω	0.078°C
	开启System Chop (仅NSAD1249)	200nV/1mA	0.0002Ω	0.0005°C
增益误差	PGA Gain=4	100Ω*0.01%	0.01Ω	0.026°C
积分非线性	PGA Gain=4	2500Ω*5ppm	0.0125Ω	0.032°C
峰峰值噪声	FILTER=LL, ODR=5SPS	960nV/1mA	0.00096Ω	0.0025°C
合计 (线性误差计算)	未开启System Chop的四线制测量	/	0.1535Ω	0.3986°C
	开启System Chop(仅NSAD1249)的四线制测量		0.1237Ω	0.3212°C
合计 (均方根误差计算)	未开启System Chop的四线制测量	/	0.1056Ω	0.2742°C
	开启System Chop(仅NSAD1249)的四线制测量		0.1013Ω	0.2631°C

表 3-2 PT100四线制测量系统的误差源和误差大小

比例式三线制和四线制的RTD测量系统

ADC的误差分布如图3-9和图3-10所示，对于未开启System Chop的四线制测量，失调电压误差占比超过50%，是误差的主要来源。而开启System Chop模式之后，失调电压误差仅占1%，误差主要来源于增益误差和积分非线性。

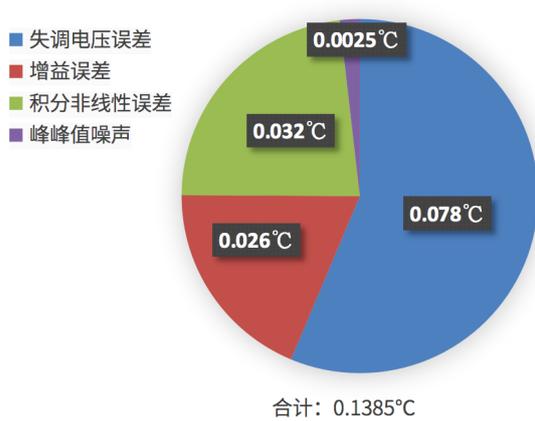


图 3-9 未开启System Chop的四线制测量ADC误差分布

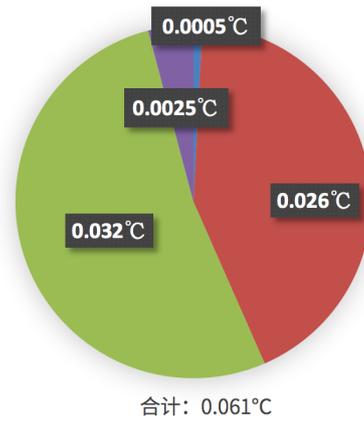


图 3-10 开启System Chop的四线制测量ADC误差分布

对于整个四线制测量系统误差，误差比例如图3-11和图3-12所示：

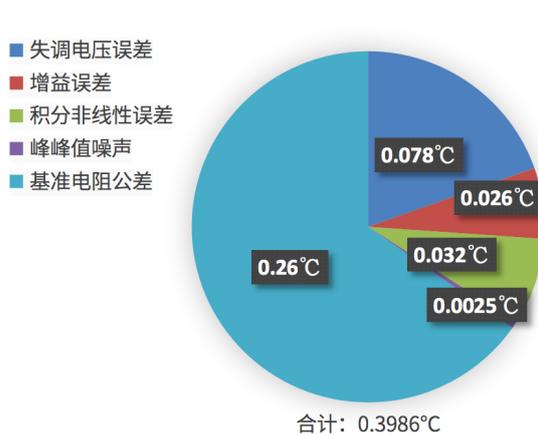


图 3-11 未开启System Chop的四线制测量系统误差分布

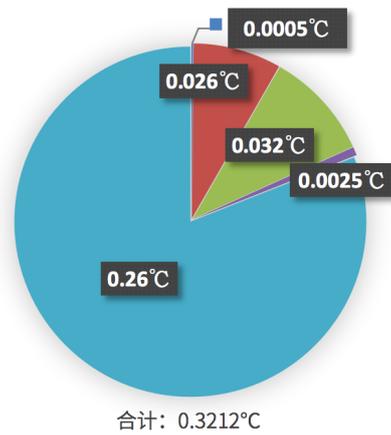


图 3-12 开启System Chop的四线制测量系统误差分布

综上所述，采用四线制RTD测量时，基准电阻公差是测量系统的主要误差来源，特别是使用NSAD1249开启System Chop模式之后，ADC的总误差占比不超过20%，远小于0.1°C。

4. PT1000测量误差分析

本文采用了三线制和四线制测量拓扑对PT1000进行测量。在三线制测量系统中，采用两个电流源消除引线电阻误差，但是如果未使用电流斩波，则测量误差主要来源于基准电阻的公差和电流源的失配误差。若使用电流斩波，则电流源失配的误差被消除，系统测量误差主要来源于基准电阻的公差。在四线制测量系统中，不存在引线电阻误差，测量误差主要来源于基准电阻的公差。

4.1. 三线制PT1000测量误差分析

引线电阻：

在低侧基准和两个IDAC电流源的三线制RTD测量拓扑中，若未使用电流斩波消除电流源失配误差，根据章节1.1的分析，两个IDAC电流源失配会导致测量过程中出现增益误差。在PT1000的三线制测量中，IDAC激励电流为250uA，电流源失配值 $\pm 0.2\%$ ，会给测量系统带来 $\pm 0.1\%$ 的增益误差，对于PT1000在 0°C 的阻值 1000Ω ，造成的电阻值测量误差为 $\pm 1\Omega$ 。当使用电流斩波消除电流源失配误差后，误差主要来源于引线电阻补偿误差，即图1-1中LEAD1和LEAD2的走线电阻差值，本文使用的LEAD1和LEAD2的电阻差值小于 0.005Ω ，基本可以忽略不计。

基准电阻公差：

在PT1000的三线制测量中，基准电阻标称值 4020Ω ，公差为 $\pm 0.1\%$ 。基准电阻会给测量系统带来 $\pm 0.1\%$ 的增益误差，对于PT1000在 0°C 的阻值 1000Ω ，造成的电阻值最大测量误差为 $\pm 1\Omega$ 。

失调电压：

对于未开启System Chop的测量拓扑而言，失调电压最大值为 $120\mu\text{V}/\text{Gain}$ 。在PT1000的三线制测量中，IDAC激励电流为250uA，PGA Gain设置为2，失调电压最大值为 $60\mu\text{V}$ ，造成的电阻值最大测量误差为 $\pm 0.24\Omega$ 。对于开启System Chop的测量拓扑(仅NSAD1249)而言，失调电压能降低至约 200nV ，造成的电阻值最大测量误差小于 $\pm 0.001\Omega$ 。

增益误差：

在PT1000的三线制测量中，PGA Gain设置为2，增益误差最大值为 100ppm ，对于PT1000在 0°C 的阻值 1000Ω ，造成的电阻值最大测量误差为 $\pm 0.1\Omega$ 。

积分非线性：

在PT1000的三线制测量中，PGA Gain设置为2，积分非线性误差典型值为 $\pm 5\text{ppmFSR}$ ，满量程为 4020Ω ，造成的电阻值测量误差为 $\pm 0.02\Omega$ 。

峰峰值噪声：

当使用低延迟(Low Latency; LL)滤波器，PGA Gain设置为2，5SPS的数据输出率下，此时噪声有效值为 $0.32\mu\text{V}$ ，峰峰值为 $1.8\mu\text{V}$ ，折算到电阻值测量噪声峰峰值为 $\pm 0.0072\Omega$ 。

表 4-1统计了PT1000三线制测量的误差源以及误差大小。

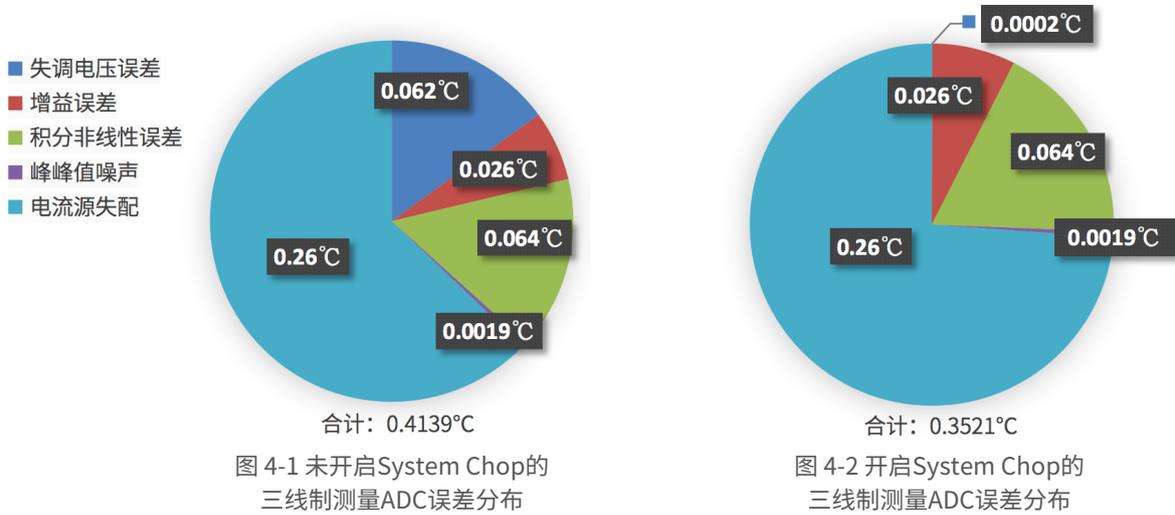
比例式三线制和四线制的RTD测量系统

误差源	条件	误差计算 @1000Ω	最大误差 @1000Ω	最大误差 @0°C
引线补偿误差	三线制测量(电流斩波)	0.005Ω	0.005Ω	0.0013°C
基准电阻公差	选择低公差基准电阻	1000Ω*0.1%	1Ω	0.26°C
电流源失配	三线制测量(电流不斩波)	1000Ω*0.1%	1Ω	0.26°C
失调电压误差	NSAD1248	60uV/250uA	0.24Ω	0.062°C
	NSAD1249(System Chop)	200nV/250uA	0.0008Ω	0.0002°C
增益误差	PGA Gain=2	1000Ω*0.01%	0.1Ω	0.026°C
积分非线性	PGA Gain=2	4020Ω*5ppm	0.02Ω	0.064°C
峰峰值噪声	FILTER=LL, ODR=5SPS	1.8uV/250uA	0.0072Ω	0.0019°C
合计 (线性误差计算)	未开启System Chop的三线制测量 (电流不斩波)	/	2.3672Ω	0.6739°C
	开启System Chop(仅NSAD1249) 进行三线制测量(电流不斩波)		2.128Ω	0.6121°C
	未开启System Chop的三线制测量 (电流斩波)		1.3722Ω	0.4152°C
	开启System Chop(仅NSAD1249) 进行三线制测量(电流斩波)		1.133Ω	0.3534°C
合计 (均方根误差计算)	未开启System Chop的三线制测量 (电流不斩波)	/	1.4600Ω	0.3792°C
	开启System Chop(仅NSAD1249) 进行三线制测量(电流不斩波)		1.4404Ω	0.3741°C
	未开启System Chop的三线制测量 (电流斩波)		1.0631Ω	0.2761°C
	开启System Chop(仅NSAD1249) 进行三线制测量(电流斩波)		1.0359Ω	0.2691°C

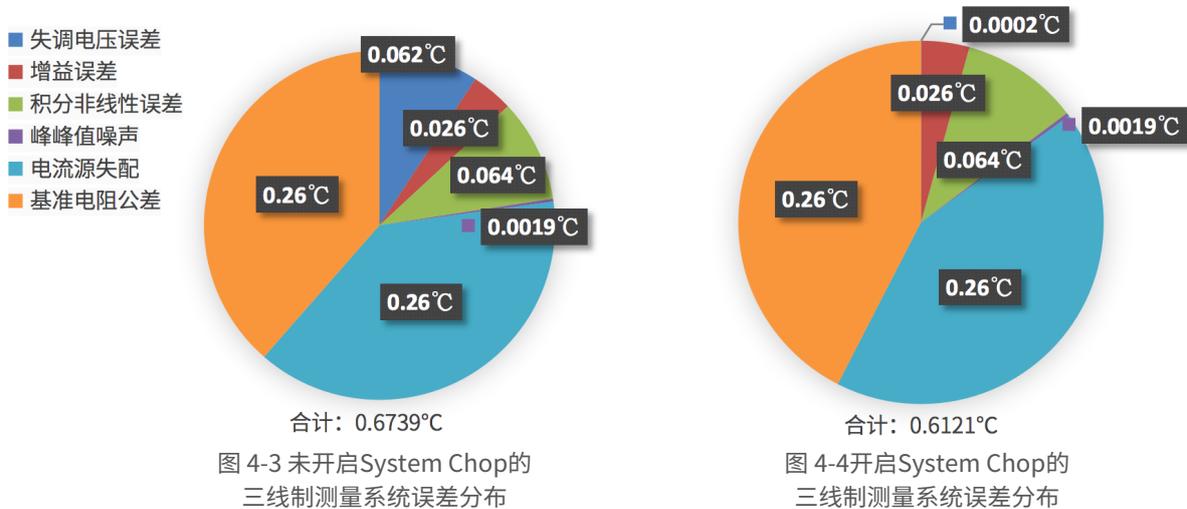
表 4-1 PT1000三线制测量系统的误差源和误差大小

若三线制测量系统未使用电流斩波，则电流源失配将是影响测量精度的主要误差源，如图4-1和图4-2所示，ADC的误差主要由电流源失配所贡献。

比例式三线制和四线制的RTD测量系统



对于整个系统的误差，各误差项比例如图 4-3和图 4-4所示。



观察饼图可以发现基准电阻的公差和电流源的失配误差是系统误差的主要来源。

三线制测量中，通过电流斩波的方式消除电流源失配误差，ADC的误差分布如图4-5和图4-6所示，对于未开启System Chop模式的测量系统，失调电压误差和积分非线性误差成为主要的误差源。而使用NSAD1249开启System Chop模式之后，失调电压误差仅为0.0002°C，误差主要来源于积分非线性。

比例式三线制和四线制的RTD测量系统

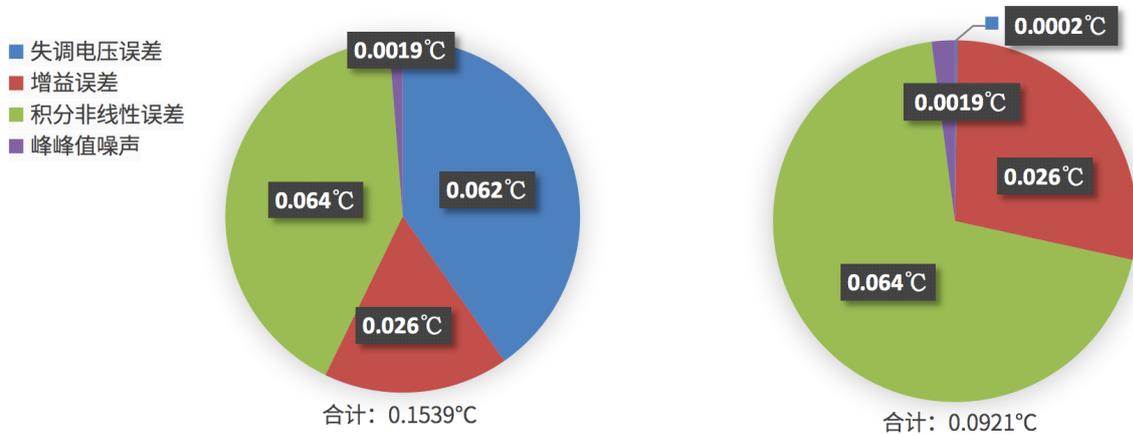


图 4-5 未开启System Chop的
三线制测量ADC误差分布 (电流斩波)

图 4-6 开启System Chop的
三线制测量ADC误差分布 (电流斩波)

对于整个系统误差，各误差项比例如图4-7和图4-8所示，基准电阻公差为测量系统的主要误差源。

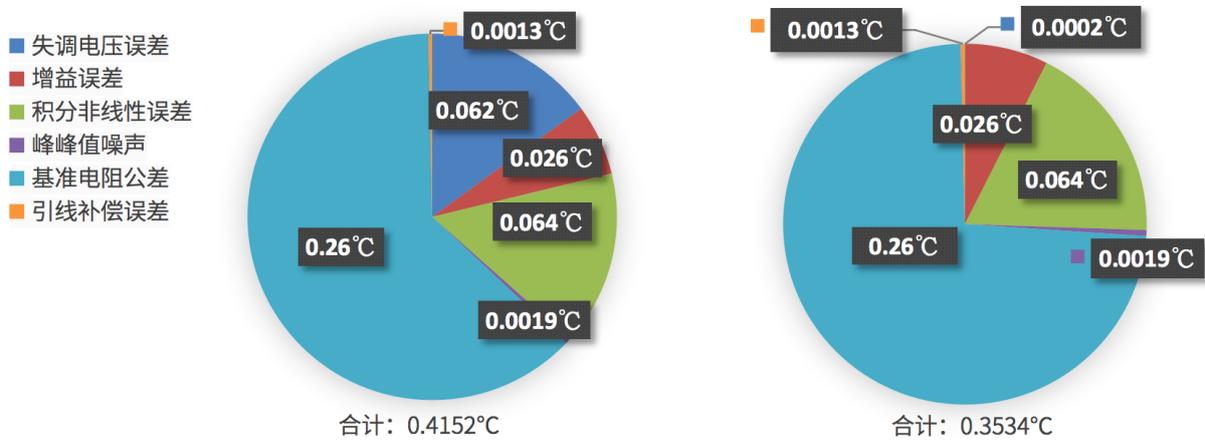


图 4-7 未开启System Chop的
三线制测量系统误差分布 (电流斩波)

图 4-8 开启System Chop的
三线制测量系统误差分布 (电流斩波)

综上所述，采用三线制RTD测量时，若不使用电流斩波，则基准电阻公差和电流源的失配是测量系统的主要误差来源。而使用电流斩波时，基准电阻公差是测量系统的主要误差来源，对于未开启System Chop的测量系统，ADC的总误差占比小于40%，折算到温度测量误差约为0.2°C；开启System Chop模式的测量系统，ADC的总误差占比不超过30%，折算到温度测量误差小于0.1°C。

比例式三线 and 四线制的RTD测量系统

4.2. 四线制PT1000测量误差分析

引线电阻：

在四线制RTD测量拓扑中，不存在引线电阻误差。

基准电阻公差：

在PT1000的四线制测量中，基准电阻标称值4020Ω，公差为±0.1%。基准电阻会给测量系统带来±0.1%的增益误差，对于PT1000在0°C的阻值1000Ω，造成的电阻值最大测量误差为±1Ω。

失调电压：

对于未开启System Chop的测量拓扑而言，失调电压最大值为120uV/Gain。在PT1000的四线制测量中，IDAC激励电流为500uA，PGA Gain设置为1，失调电压最大值为120uV，造成的电阻值最大测量误差为±0.24Ω。对于开启System Chop的测量拓扑(仅NSAD1249)而言，当System Chop使能时，失调电压能降低至约200nV，造成的电阻值最大测量误差小于±0.001Ω。

PGA增益误差：

在PT100的四线制测量中，PGA Gain设置为1，增益误差最大值为100ppm，对于PT1000在0°C的阻值1000Ω，造成的电阻值最大测量误差为±0.1Ω。

积分非线性误差：

在PT100的四线制测量中，PGA Gain设置为1，积分非线性误差典型值为±5ppmFSR，满量程为4020Ω，造成的电阻值测量误差为±0.02Ω。

峰峰值噪声：

当使用低延迟(Low Latency; LL)滤波器，PGA Gain设置为1，5SPS的数据输出率下，噪声有效值为0.63uV，峰峰值为3.6uV，折算到电阻值测量噪声峰峰值为0.0072Ω。表 4-2统计了PT1000四线制测量的误差源以及误差大小。

误差源	条件	误差计算 @1000Ω	最大误差 @1000Ω	最大误差 @0°C
引线误差	四线制测量	0	0Ω	0°C
基准电阻公差	选择低公差基准电阻	1000Ω*0.1%	1Ω	0.26°C
失调电压误差	未开启System Chop	120uV/500uA	0.24Ω	0.062°C
	开启System Chop (仅NSAD1249)	200nV/500uA	0.0004Ω	0.0001°C
增益误差	PGA Gain=1	1000Ω*0.01%	0.1Ω	0.026°C
积分非线性	PGA Gain=1	4020Ω*5ppm	0.02Ω	0.064°C
峰峰值噪声	FILTER=LL, ODR=5SPS	3.6uV/500uA	0.0072Ω	0.002°C

比例式三线制和四线制的RTD测量系统

合计 (线性误差计算)	未开启System Chop的四线制测量	/	1.3672Ω	0.4140°C
	开启System Chop(仅NSAD1249)的四线制测量		1.1276Ω	0.3521°C
合计 (均方根误差计算)	未开启System Chop的四线制测量		1.0629Ω	0.2761°C
	开启System Chop(仅NSAD1249)的四线制测量		1.0368Ω	0.2690°C

ADC的误差分布如图4-9和图 4-10所示，对于未开启System Chop的四线制测量，失调电压误差和积分非线性误差占比均超过40%，是误差的主要来源。而使用NSAD1249开启System Chop模式之后，失调电压误差仅占1%，误差主要来源于增益误差和积分非线性。

- 失调电压误差
- 增益误差
- 积分非线性误差
- 峰峰值噪声

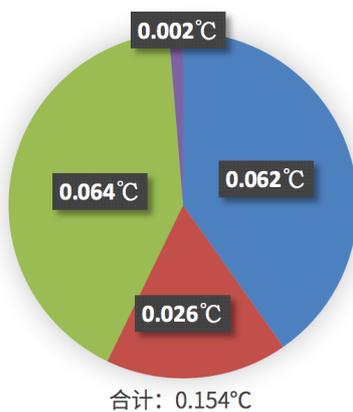


图 4-9 未开启System Chop的四线制测量ADC误差分布

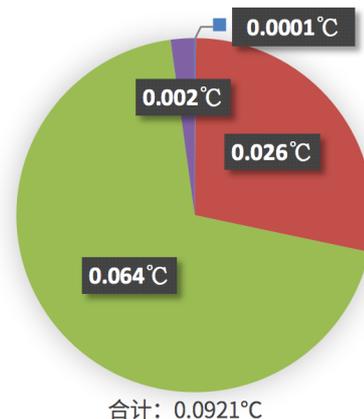


图 4-10 开启System Chop的四线制测量ADC误差分布

对于整个系统误差，误差比例如图 4-11和图 4-12所示：

- 失调电压误差
- 增益误差
- 积分非线性误差
- 峰峰值噪声
- 基准电阻公差

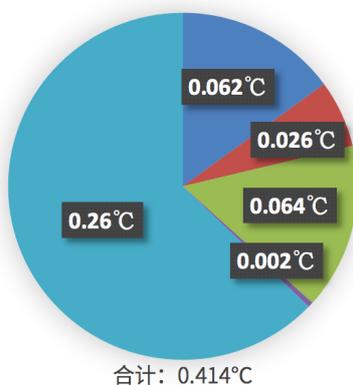


图 4-11 未开启System Chop的四线制测量系统误差分布

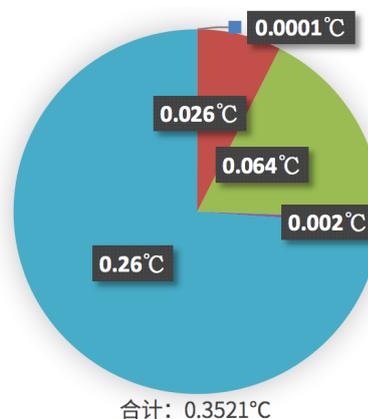


图 4-12 开启System Chop的四线制测量系统误差分布

观察饼图可以看到，采用四线制进行RTD测量时，基准电阻公差是测量系统的主要误差来源，占比超过60%。当使用NSAD1249开启System Chop模式之后，ADC的总误差占比不超过30%，远小于0.1°C。

比例式三线制和四线制的RTD测量系统

5.基于NSAD124x测量结果

本文利用如图5-1所示的NSAD124x评估模块(EVM)进行三线制和四线制的RTD测量，评估模块使用了一颗MCU与NSAD124x 器件进行通信，通过通用串行总线 (USB) 接口与PC端直接相连。



图 5-1 NSAD124xEVM 评估模块

在PT100和PT1000测温范围所对应的电阻值范围中选取若干个电阻值作为待测电阻值，待测电阻器选择VISHAY的高精度金属铂电阻，容差0.01%，温度系数2ppm/°C。

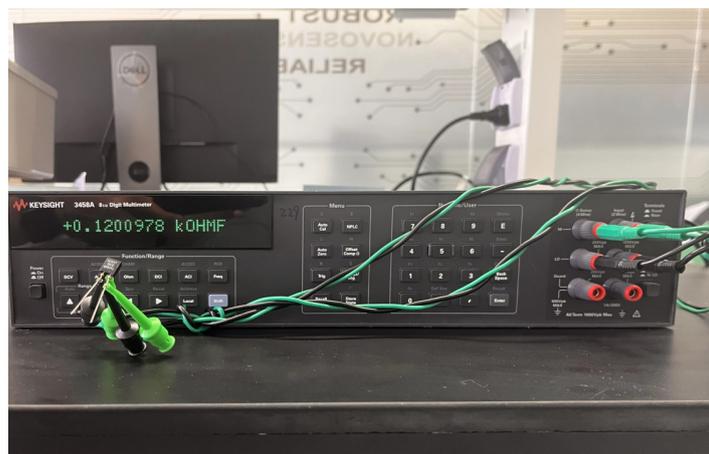


图 5-2 高精度金属铂电阻的标定

如图5-2所示电阻器使用Keysight 8.5位万用表3458A对阻值进行标定，作为电阻值，如图5-3所示EVM的测量结果作为测量值，将两个数值相减得到系统实际的阻值测量误差，并转换为温度误差。

比例式三线制和四线制的RTD测量系统

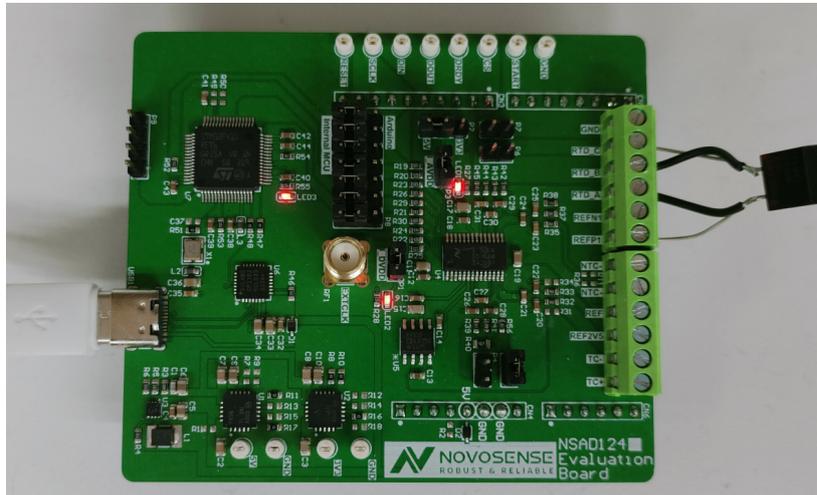


图 5-3 EVM测量高精度金属铂电阻

阻值测量误差由式(33)表示：

$$\text{Error}(R) = R_{\text{测量值}} - R_{\text{电阻值}} \quad (33)$$

本文采用了三线制和四线制RTD测量拓扑对PT100和PT1000进行测量。在三线制PT100和PT1000的测量系统中，采用两个电流源可以消除引线电阻误差，但是如果未使用电流斩波，则测量误差主要来源于基准电阻的公差和电流源的失配误差。测量结果也显示了此测量方式为本文介绍的三种测量方式中测量误差最大的一种。若使用电流斩波，则电流源失配的误差被消除，系统测量误差主要来源于基准电阻的公差。在四线制测量系统中，不存在引线电阻误差，测量误差主要来源于基准电阻的公差。

5.1. 三线制 PT100 测量结果

PT100 测温范围(-200°C 至 850°C)对应的电阻值范围约为 20Ω至 400Ω，从 20Ω至400Ω之间选取 6个电阻值作为待测电阻值，使用图1-1的三线制测量拓扑分别在电流斩波和电流不斩波的两种方式下测量电阻值。表 5-1 中展示了电流不斩波的情况下电阻的测量值和误差值。

电阻值(Ω)	测量值(Ω)	测量误差(Ω)	折合温度误差(°C)
50.0017	49.983524	0.018176	0.047210
100.012	99.979042	0.032958	0.085605
200.053	200.001526	0.051474	0.133699
249.973	249.911880	0.061120	0.158753
349.993	349.916473	0.076527	0.198771
400.040	399.948425	0.091575	0.237857

表 5-1 PT100 三线制电阻测量值和测量误差(电流不斩波)

比例式三线制和四线制的RTD测量系统

根据章节3.1的分析，使用两个电流源进行三线制RTD测量时，在不使用电流斩波的情况下，电流源的失配误差和基准电阻公差是误差的主要来源，电流源失配和基准电阻公差都可以等效为增益误差。观察表5-1可以看出在测量最大阻值400Ω时，测量误差最大，折算到温度测量误差约为0.24°C。

在使用两个电流源的三线制拓扑中，通过电流斩波的测量方式可以消除两个电流源的失配误差，表5-2中展示了电流斩波的情况下电阻的测量值和误差值。

电阻值(Ω)	测量值(Ω)	测量误差(Ω)	折合温度误差(°C)
50.0017	49.991310	0.010390	0.026987
100.012	99.995064	0.016936	0.043989
200.053	200.032516	0.020484	0.053205
249.973	249.951630	0.021370	0.055506
349.993	349.972870	0.020130	0.052285
400.040	400.012392	0.027608	0.071714

表 5-2 PT100三线制电阻测量值和测量误差(电流斩波)

对比表5-1和表5-2的测量数据，使用电流斩波的测量方式提高了测量精度，电流源失配导致的增益误差被消除，基准电阻公差占主要误差来源。根据章节3.1的分析，电阻公差在测量PT100阻值为100Ω(0°C)时会引入0.26°C的温度误差，由于实测该电阻公差远小于0.1%，引入的温度误差远小于0.26°C，由上表可以看到6个测量点的温度测量误差均小于0.1°C。

5.2. 三线制PT1000测量结果

PT1000测温范围(-200°C 至 850°C)对应的电阻值范围约为200Ω至 4000Ω，从200Ω至4000Ω之间选取6个电阻值进行测量，使用图1-1的三线制测量拓扑分别在电流斩波和电流不斩波的两种方式下测量电阻值。表5-3展示了电流不斩波的情况下电阻的测量值和误差值。

电阻值(Ω)	测量值(Ω)	测量误差(Ω)	折合温度误差(°C)
200.053	199.937607	0.115393	0.029972208
1000.014	999.607605	0.406395	0.105557143
1697.12	1696.535645	0.584355	0.151780519
2262.95	2262.219971	0.730029	0.189617922
2972.06	2971.149658	0.910342	0.236452468
3960.07	3958.952881	1.117119	0.290160779

表 5-3 PT1000三线制电阻测量值和测量误差(电流不斩波)

比例式三线制和四线制的RTD测量系统

根据章节4.1的分析，在不使用电流斩波的情况下，电流源的失配误差和基准电阻公差是误差的主要来源，电流源失配和基准电阻公差都可以等效为增益误差，因此观察上表不难看到测量最大阻值3960.07 Ω 时，测量误差最大，折算到温度测量误差约为0.29 $^{\circ}\text{C}$ 。在使用两个电流源的三线制拓扑中，通过电流斩波的测量方式可以消除两个电流源的失配误差，表5-4展示了电流斩波的情况下电阻的测量值和误差值。

电阻值(Ω)	测量值(Ω)	测量误差(Ω)	温度误差($^{\circ}\text{C}$)
200.053	199.972061	0.080939	0.021023117
1000.014	999.751648	0.262352	0.068143377
1697.12	1696.804321	0.315679	0.081994545
2262.95	2262.578125	0.371875	0.096590909
2972.06	2971.615967	0.444033	0.115333247
3960.07	3959.530273	0.539727	0.140188831

表 5-4 PT1000三线制电阻测量值和测量误差(电流斩波)

对比表5-3和表5-4的测量数据，使用电流斩波的测量方式提高了测量精度，电流源失配导致的增益误差被消除，基准电阻公差占主要误差来源。根据章节4.1的分析，电阻公差在测量PT1000阻值为1000 Ω (0 $^{\circ}\text{C}$)时会引入0.26 $^{\circ}\text{C}$ 的温度误差，由于实测该电阻公差远小于0.1%，引入的温度误差远小于0.26 $^{\circ}\text{C}$ ，由上表可以看到6个测量点的温度测量误差均小于0.15 $^{\circ}\text{C}$ 。

5.3.四线制PT100测量结果

根据章节5.1中选取的6个测量电阻，使用图1-3的四线制测量拓扑进行测量，表5-5中显示了PT100 6个电阻的测量值和测量误差。

电阻值(Ω)	测量值(Ω)	测量误差(Ω)	温度误差($^{\circ}\text{C}$)
50.0017	49.994516	0.007184	0.018660
100.012	99.998894	0.013106	0.034042
200.053	200.03335	0.019650	0.051039
249.973	249.952118	0.020882	0.054239
349.993	349.970443	0.022557	0.058590
400.040	400.014938	0.025062	0.065096

表 5-5 PT100四线制电阻测量值和测量误差

比例式三线制和四线制的RTD测量系统

根据章节3.2的分析，四线制的测量误差主要来源于基准电阻公差，基准电阻公差可以等效为测量过程中的增益误差，因此测量最大阻值400Ω时，测量误差最大。基准电阻公差在测量PT100阻值为100Ω(0°C)时会引入0.26°C的温度误差，由于实测该电阻公差远小于0.1%，引入的温度误差远小于0.26°C，由上表可以看到6个测量点的温度测量误差均小于0.1°C。

5.4.四线制PT1000测量结果

根据章节5.2中选取的6个测量电阻，使用图1-3的四线制测量拓扑进行测量，表5-6中显示了PT1000 6个电阻的测量值和测量误差。

电阻值(Ω)	测量值(Ω)	测量误差(Ω)	温度误差(°C)
200.053	199.976852	0.076148	0.019778701
1000.014	999.755493	0.258507	0.067144675
1697.12	1696.812256	0.307744	0.079933506
2262.95	2262.598145	0.351855	0.091390909
2972.06	2971.665039	0.394961	0.102587273
3960.07	3959.604736	0.465264	0.120847792

表 5-6 PT1000四线制电阻测量值和测量误差

根据章节4.2的分析，四线制的测量误差主要来源于基准电阻公差，基准电阻公差可以等效为测量过程中的增益误差，因此测量最大阻值3960Ω时，测量误差最大。基准电阻公差在测量PT1000阻值为1000Ω(0°C)时会引入0.26°C的温度误差，由于实测该电阻公差远小于0.1%，引入的温度误差远小于0.26°C，由上表可以看到6个测量点的温度测量误差均小于0.15°C。

通过本章节的测量结果可以看出，在使用两个电流源的三线制测量中，如果不使用电流斩波，则误差主要来源于电流源失配误差和基准电阻的公差。对于PT100，测量结果显示最大温度误差约0.24°C，对于PT1000，测量结果显示最大温度误差约0.29°C。而在使用电流斩波的三线制测量中，测量误差和四线制测量比较接近，两种测量方式主要的误差来源都是基准电阻的公差。对于PT100，测量结果显示最大温度误差均小于0.1°C，对于PT1000，测量结果显示最大温度误差均小于0.15°C。

比例式三线制和四线制的RTD测量系统

5.5. 系统校准改善测量精度

根据前面章节误差的分析和测量结果可以看出，使用两个电流源的三线制测量中不使用电流斩波的测量方式是本文介绍的三种测量方式中误差最大的一种。根据章节5.1的PT100三线制测量结果可以得到测量误差如图5-4所示。

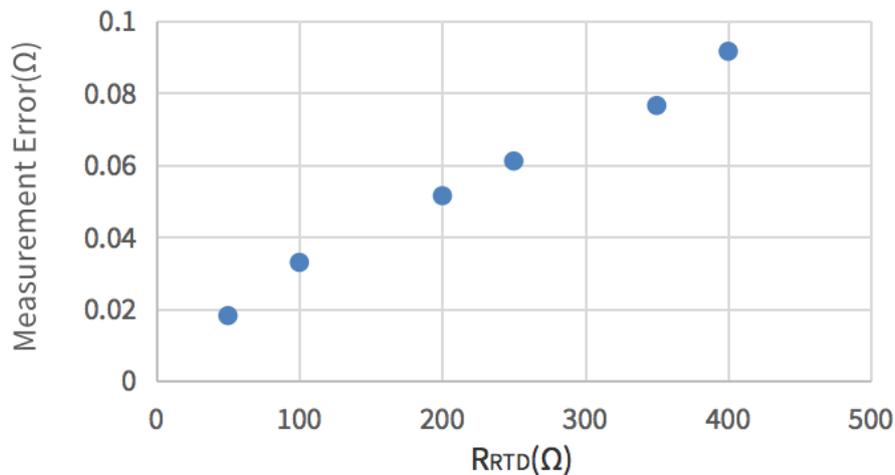


图 5-4 三线制电阻测量误差

通过系统校准可以提高系统测量精度，本文采用单点校准和双点校准两种校准方式来减少测量误差。PT100在0°C时电阻值为100Ω，选取电阻值100Ω进行单点校准，如图5-5所示，通过曲线拟合得到电阻测量误差的一次函数曲线 $Error(R)=0.00032954R$ 。

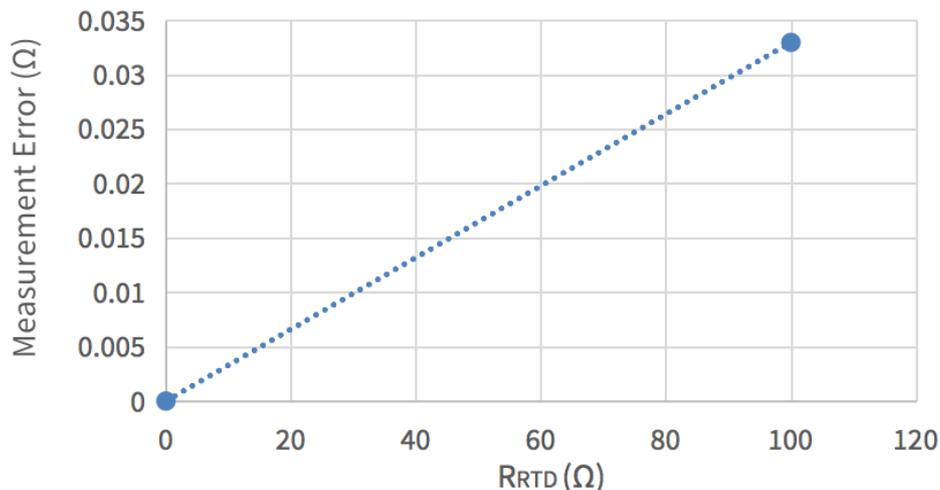


图 5-5 单点校准曲线

比例式三线制和四线制的RTD测量系统

通过误差函数对电阻测量值进行补偿，提升测量精度，结果如表5-7所示。

电阻值(Ω)	测量值(Ω)	测量误差(Ω)	温度误差($^{\circ}\text{C}$)
50.0017	49.99999557	0.001704	0.00442709
100.012	100.0139891	-0.001989	-0.00516648
200.053	200.0674345	-0.014435	-0.03749222
249.973	249.994236	-0.021236	-0.05515834
349.993	350.0317845	-0.038784	-0.10073889
400.040	400.080224	-0.040224	-0.10447793

表 5-7 单点校准后的测量结果

通过单点校准之后，系统测量精度有明显的提升，误差由原来大于 0.2°C 减小至约 0.1°C 。如果要进一步提升测量精度，可以采用双点校准的方式来校准系统，选取下限值和上限值电阻对系统进行双点校准，如图5-6所示，通过曲线拟合得到测量误差的一次函数曲线 $\text{Error}(R)=0.000210R+0.007691$ 。

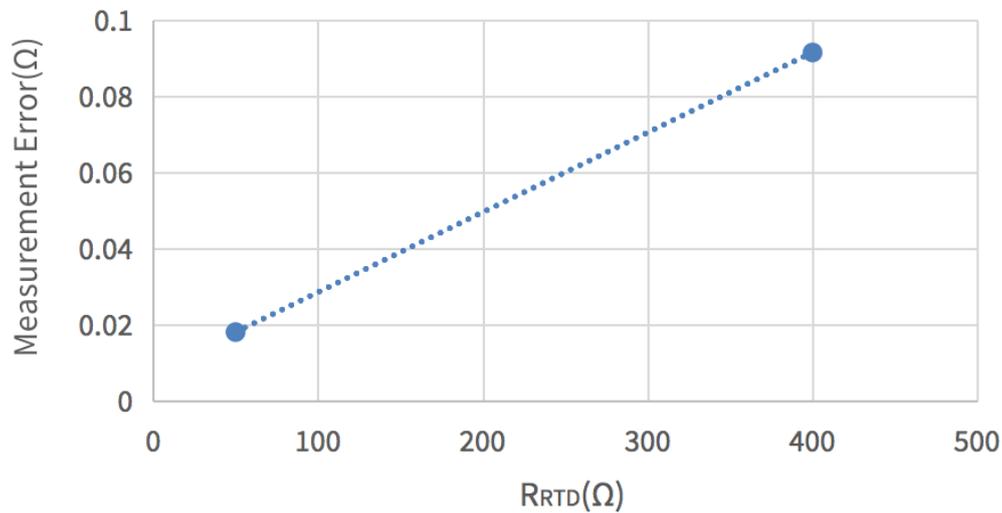


图 5-6 双点校准曲线

比例式三线制和四线制的RTD测量系统

通过误差函数对测量值进行补偿，结果如表5-8所示。

电阻值(Ω)	测量值(Ω)	测量误差(Ω)	温度误差($^{\circ}\text{C}$)
50.0017	50.001712	-0.000012	-0.000030
100.012	100.007729	0.004271	0.011095
200.053	200.051217	0.001783	0.004630
249.973	249.972052	0.000948	0.002461
349.993	349.997646	-0.004646	-0.012069
400.040	400.040105	-0.000105	-0.000273

表 5-8 双点校准后的测量结果

通过双点校准之后，系统测量误差从大于 0.2°C 优化到远小于 0.1°C ，系统的失调误差和增益误差基本消除，很大程度提升了测量精度。

6. 修订历史

版本	描述	作者	日期
1.0	创建应用笔记	Wei YU, Xiaoqing YI	2024/5/15

销售联系方式: sales@novosns.com; 获取更多信息: www.novosns.com

重要声明

本文件中提供的信息不作为任何明示或暗示的担保或授权，包括但不限于对信息准确性、完整性，产品适销性、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陈述或保证。

客户应对其使用纳芯微的产品和应用自行负责，并确保应用的安全性。客户认可并同意：尽管任何应用的相关信息或支持仍可能由纳芯微提供，但将在产品及其产品应用中遵守纳芯微产品相关的所有法律、法规和相关要求。

本文件中提供的资源仅供经过技术培训的开发人员使用。纳芯微保留对所提供的产品和服务进行更正、修改、增强、改进或其他更改的权利。纳芯微仅授权客户将此资源用于开发所设计的整合了纳芯微产品的相关应用，不视为纳芯微以明示或暗示的方式授予任何知识产权许可。严禁为任何其他用途使用此资源，或对此资源进行未经授权的复制或展示。如因使用此资源而产生任何索赔、损害、成本、损失和债务等，纳芯微对此不承担任何责任。

有关应用、产品、技术的进一步信息，请与纳芯微电子联系（www.novosns.com）。

苏州纳芯微电子股份有限公司版权所有