

在三线 RTD 测量中使用匹配的 N-JFET 消除引线电阻

John Caldwell

Technologist, linear amplifiers

三线检测是传感器接口的一种常见方法，其中传感器阻抗与连接到传感器的引线具有相似的幅度。电阻式温度检测器 (RTD) 就是此类传感器的常见示例。Pt100 RTD 在 0°C 处的电阻为 100Ω。即使是 1Ω 的引线电阻也会对测量温度产生大于 2.5°C 的误差。在三线测量中，使用匹配的电流源来确保传感器连接导线上的压降相等，从而可以在测量中将其消除。

图 1 展示了一种三线比例式 RTD 测量电路，该电路采用单片、双路、N 沟道 JFET JFE2325 和两个电阻器，作为一种简单、低成本的方法来创建两个匹配的电流源。该解决方案还能够在相对较低的电源电压下运行。JFET 电流源电路上的压降只需高于 JFET 的引脚关断电压 1.08V（对于 JFE2325），即可正常运行。

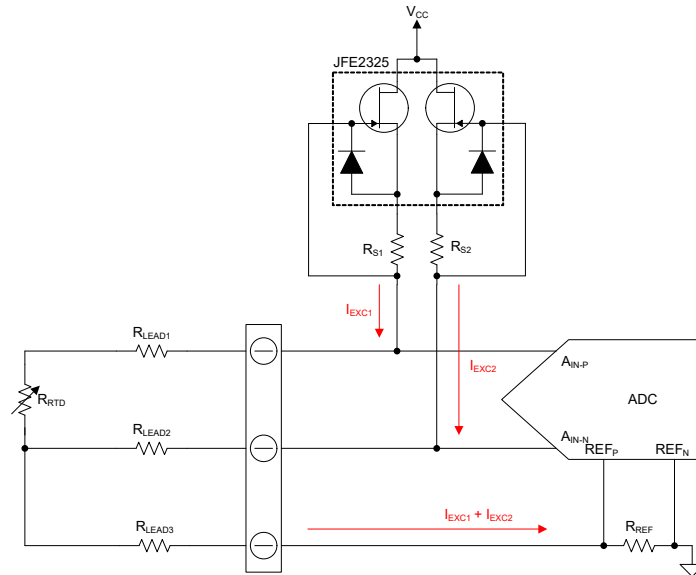


图 1. 使用 JFE2325 双路 JFET 作为匹配电流源的三线比例式 RTD 测量

为了解三线方法的优势，我们可以推导出 ADC 每个输入端的电压公式：

$$V_{AIN-P} = I_{EXC1}(R_{LEAD1} + R_{RTD}) + (I_{EXC1} + I_{EXC2})(R_{LEAD3} + R_{REF}) \quad (1)$$

$$V_{AIN-N} = I_{EXC2}(R_{LEAD2}) + (I_{EXC1} + I_{EXC2})(R_{LEAD3} + R_{REF}) \quad (2)$$

如果 $R_{LEAD1} = R_{LEAD2} = R_{LEAD}$ 且 $I_{EXC1} = I_{EXC2} = I_{EXC}$ ，则 ADC 检测到的差动输入电压可以简化为 **方程式 3**：

$$V_{ADC} = V_{AIN-P} - V_{AIN-N} = I_{EXC}(R_{LEAD} + R_{RTD}) + 2I_{EXC}(R_{LEAD3} + R_{REF}) - I_{EXC}R_{LEAD} - 2I_{EXC}(R_{LEAD3} + R_{REF}) = I_{EXC}R_{RTD} \quad (3)$$

第三个引线和基准电阻器上的压降是 ADC 两个输入所共有，因此可以消除。

最后，由于该测量是比例式的，激励电流的绝对值及其随温度的稳定性，不如两个电流源之间的匹配度那么重要。ADC 输出仅取决于 RTD 电阻与基准电阻之比，如**方程式 4** 所示：

$$\text{Output Code} = 2^n - 1 \times \frac{V_{\text{RTD}}}{V_{\text{REF}}} = 2^n - 1 \times \frac{I_{\text{EXC}} R_{\text{RTD}}}{2 \times I_{\text{EXC}} R_{\text{REF}}} = 2^{n-2} \times \frac{R_{\text{RTD}}}{R_{\text{REF}}} \quad (4)$$

电流源计算

一个非常简单的 JFET 电流源是通过将一个电阻器与 N-JFET 的源极串联并将栅极连接在电阻器下方形成，如**图 2** 所示。当电流流经源电阻器 R_S 时，电阻器会相对于其栅极升高 JFET 源极的电压，从而进一步引脚关断 JFET 沟道并通过负反馈调节漏源电流 I_{DS} 。

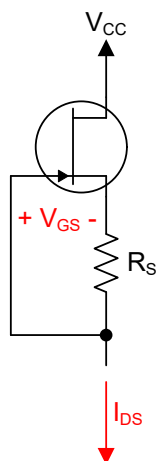


图 2. 通过将栅极连接到源电阻器下方来形成的简单 JFET 电流源

确定 JFET 电流源输出电流的最简单方法，是使用 JFET 数据表中的 I_{DS} 与栅源电压 (V_{GS}) 关系曲线。JFE2325 的此曲线在**图 3** 中重现。

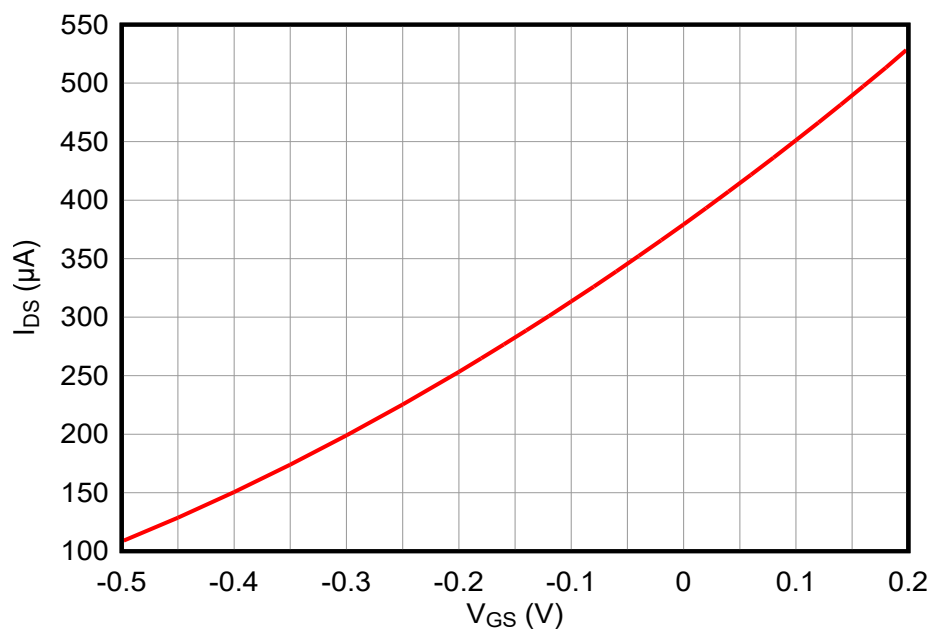


图 3. JFE2325 的漏源电流 (I_{DS}) 与栅源电压 (V_{GS}) 间的关系

考虑到 R_S 两端的压降与栅源电压相等，但极性相反，可以针对必要的 V_{GS} 计算 R_S 的值以生成所需的 I_{DS} ，如**方程式 5** 所示：

$$V_{GS} = -I_{DS}R_{DS} \rightarrow R_S = \frac{-V_{GS}}{I_{DS}} \quad (5)$$

从**图 3** 中可以看出，对于 $200\mu A$ 的漏极电流，JFE2325 需要 $-0.3V$ 的 V_{GS} 。将该值插入**方程式 5**，求解**方程式 6** 中的 R_S ：

$$R_S = \frac{-V_{GS}}{I_D} = \frac{-(-0.3V)}{200\mu A} = 1.5k\Omega \quad (6)$$

如果已知 JFET 引脚关断电压 V_P 和漏源饱和电流 I_{DSS} ，则可以从**方程式 7** 直接计算 I_{DS} ：

$$I_{DS} = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2 \quad (7)$$

为 V_{GS} 插入**方程式 5** 可得到**方程式 8**：

$$I_{DS} = I_{DSS} \left(1 - \frac{-I_{DS}R_S}{V_P}\right)^2 = I_{DSS} \left(1 + \frac{I_{DS}R_S}{V_P}\right)^2 \quad (8)$$

方程式 8 可以展开并放入标准二次方程 ($ax^2 + bx + c = 0$) 并使用二次方程（**方程式 9** 和**方程式 10**）求解：

$$\left(\frac{I_{DSS}R_S^2}{V_P^2}\right)I_{DS}^2 + \left(\frac{2I_{DSS}R_S}{V_P} - 1\right)I_{DS} + I_{DSS} = 0 \quad (9)$$

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (10)$$

其中， a 、 b 和 c 在**方程式 11**、**方程式 12** 和**方程式 13** 中定义：

$$a = \left(\frac{I_{DSS}R_S^2}{V_P^2}\right) \quad (11)$$

$$b = \left(\frac{2I_{DSS}R_S}{V_P} - 1\right) \quad (12)$$

$$c = I_{DSS} \quad (13)$$

该方法将给出两个根，但两个根中只有一个是来自电流源的输出电流的有效值。使用 JFE2325 的 I_{DSS} 和 V_P 典型值（ $385\mu A$ 和 $-1.079V$ ），在源电阻器为 $1.5k\Omega$ 时，可得出 I_{DS} 为 $200.4\mu A$ 。

估算两个电流源之间的失配

计算两个电流源之间的失配需要研究 JFET 参数中的失配对所产生的输出电流的影响。分立式 JFET 的 I_{DSS} 和 V_P 值具有极宽的容差。但是，由于 JFE2325 中的两个 JFET 是使用现代 IC 布局技术在同一裸片上构建的，因此两个 JFET 的参数彼此非常匹配。**图 4** 是 JFE2325 中两个 JFET 之间 I_{DSS} 失配的生产直方图，数据取自超过 74,000 个器件。从直方图中可以看出，在均值的三个标准偏差内，两个 JFET 的 I_{DSS} 匹配度在 2% 以内。JFE2325 的数据表中指定，最大 I_{DSS} 失配（对应偏离均值六个标准差）为 5%。

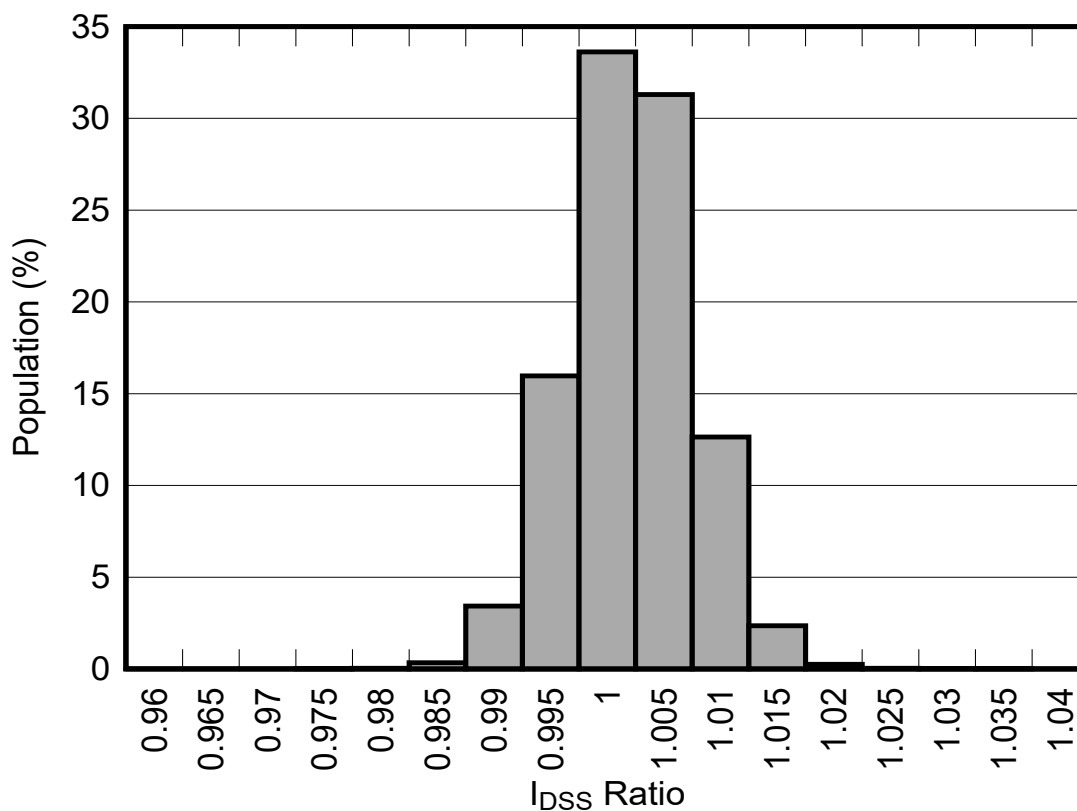


图4. JFE2325 的两个内部 JFET 之间的 I_{DSS} 失配的生产直方图

JFET I_{DSS} 和 V_P 不是独立的参数。相反，这两个量是相关的，因此， I_{DSS} 的任何增加都会导致 V_P 进一步偏离零。图5展示了 JFE2325 的 I_{DSS} 和 V_P （图中称为栅源截止电压 V_{GSC} ）之间的相关性。

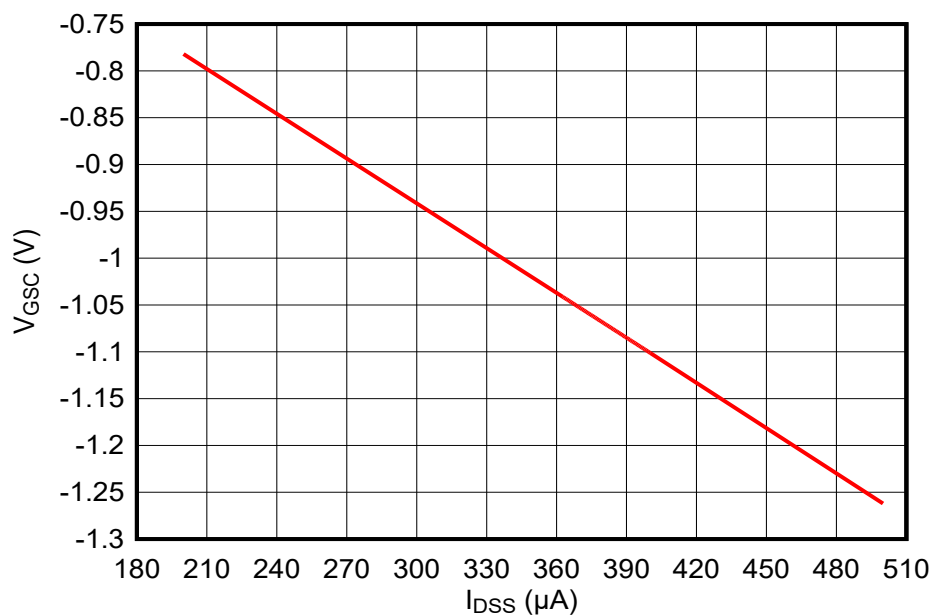


图5. JFE2325 的引脚关断电压或栅源截止电压 (V_{GSC}) 与 I_{DSS} 间的关系

我们可以从该图中提取一个线性方程，以便在已知特定 I_{DSS} 值的情况下估算 JFET 的引脚关断电压，从而得出[方程式 14](#)：

$$V_P = -1592.6 \times I_{DSS} - 0.4656V$$

(14)

表 1 显示 JFE2325 中三个可能 JFET 的 I_{DSS} 和 V_P 值，以及产生的 I_{DS} 。JFET1 是内部 JFET 的标称情况。与 JFET1 相比，JFET2 的 I_{DSS} 中有 2% 的失配，这相当于器件与均值存在三个标准差。与 JFET1 相比，JFET3 的 I_{DSS} 中有 5% 的失配，这相当于器件与均值存在六个标准差。

	I_{DSS}	V_P	$I_{DS} (R_S = 1.5k\Omega)$
JFET1 (标称值)	385.0μA	-1.079V	200.4μA
JFET2 (2% 失配)	377.3μA	-1.066V	197.1μA
JFET3 (5% 失配)	365.8μA	-1.048V	192.2μA

表 1. JFE2325 中失配的 JFET 的可能参数

由每个 JFET 构建的电流源所产生的 I_{DS} ，是通过代入各自的 I_{DSS} 和 V_P 值求解**方程式 9** 来计算的。**方程式 15** 和**方程式 16** 计算了电流源失配情况：

$$\text{Mismatch}(\pm 3\sigma, \%) = 100 \times \frac{|200.4\mu A - 197.1\mu A|}{200.4\mu A} = 1.647\%$$

(15)

$$\text{Mismatch}(\pm 6\sigma, \%) = 100 \times \frac{|200.4\mu A - 192.2\mu A|}{200.4\mu A} = 4.092\%$$

(16)

如**图 6** 所示，在 I_{DS} 与 V_{GS} 的关系图上添加源极电阻 R_S 的负载线，也具有一定的指导意义。 I_{DS} 值将是 JFET 的曲线和 R_S 负载线相交的位置。

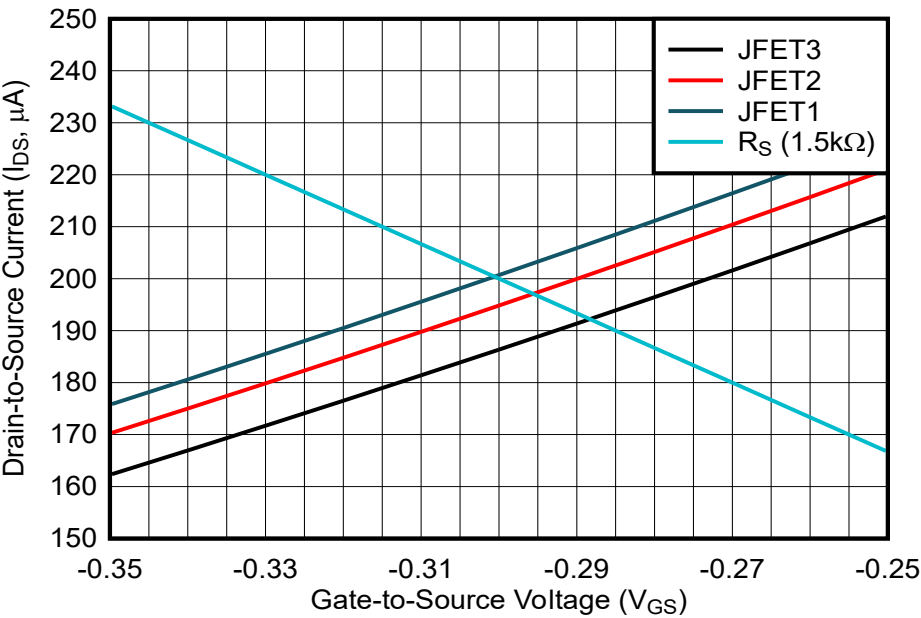


图 6. 表 1 中三个 JFET 在 1.5kΩ 负载线下的 I_{DS} 与 V_{GS} 关系图

请注意， I_{DSS} 较低的器件（JFET2 和 JFET3）与 R_S 负载线的交点对应的 V_{GS} 值更接近零，这实际上使 JFET 沟道的引脚关断程度更小。相反，如果 JFET 的 I_{DSS} 增大， R_S 会迫使 V_{GS} 进一步远离 0V，从而使 JFET 沟道引脚关断得更多。这就是为什么 JFET 的 I_{DSS} 值存在 2% 的失配，却不会导致电流源的输出电流出现 2% 的失配。增大 R_S 可以减小两个电流源之间的失配，但缺点是会降低电流源的输出电流。

结语

三线配置是消除引线电阻在 RTD 测量中引入的误差的一种常见有效方法。但是，三线系统需要一对匹配良好的电流源来有效地消除误差。创建这些匹配电流源的一种简单方法是使用单片 N-JFET，例如 JFE2325。JFE2325 在超小型 0.8mm × 1mm 封装内部的同一裸片上包含两个匹配良好的 JFET 器件。由于两个 JFET 共享同一器件面积，其参数匹配度远优于分立单 JFET。此外，向 JFET 添加源电阻器会引入负反馈，从而减少因 JFET 参数变化而导致的输出电流变化。这种方法以极低成本提供两个具有出色匹配的电流源，解决方案尺寸小，并且能够在宽电源电压范围内运行。

参考资料

1. Wu, Joseph, “[RTD 测量基本指南](#)。”
2. 德州仪器 (TI), [JFE2325 适用于驻极体麦克风的双路低功耗 N 沟道 JFET](#)。

关于作者

John Caldwell 是线性放大器业务部的技术专家，他在该部门跨所有产品线开展工作，致力于定义下一代高性能信号调节放大器。John 在线性放大器开发和高精度、低噪声电路设计方面拥有超过 15 年的经验。John 持有弗吉尼亚理工大学的电气工程学士学位和硕士学位，拥有三项美国专利，并发表了 30 多篇文章。

重要声明: 本文所提及德州仪器 (TI) 及其子公司的产品和服务均依照 TI 标准销售条款和条件进行销售。建议客户在订购之前获取有关 TI 产品和服务的最新和完整信息。TI 对应用帮助、客户的应用或产品设计、软件性能或侵犯专利不负任何责任。有关任何其它公司产品或服务的发布信息均不构成 TI 因此对其的认可、保证或授权。

所有商标均为其各自所有者的财产。

重要通知和免责声明

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、与某特定用途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安全、安保法规或其他要求。

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 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 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。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月