使用匹配的 N-JFET 消除三線 RTD 量測中的引線電阻誤差

John Caldwell
Technologist, linear amplifiers

三線感測是感測器介面中常用的方法，適用於感測器阻抗與連接感測器的引線阻抗量級相近程度。電阻溫度偵測器 (RTD) 是此類感測器的常見範例。Pt100 RTD 在 0°C 時的電阻為 100Ω。即使引線電阻為 1Ω，也可能導致測量出的溫度誤差超過 2.5°C。在三線量測中，使用匹配的電流來源，確保流經感測器連接引線的壓降相等，藉此從量測結果中消除引線電阻造成的影響。

圖 1 展示三線比率 RTD 量測電路，採用單晶片雙 N 通道 JFET **JFE2325** 和兩個電阻器，以簡單、低成本的方式建立兩個匹配的電流來源。此解決方案也能在供應電壓相對較低時運作。JFET 電流來源電路的壓降只需高於 JFET 的夾止電壓，即可正常運作。以 JFE2325 為例，其夾止電壓為 1.08V。

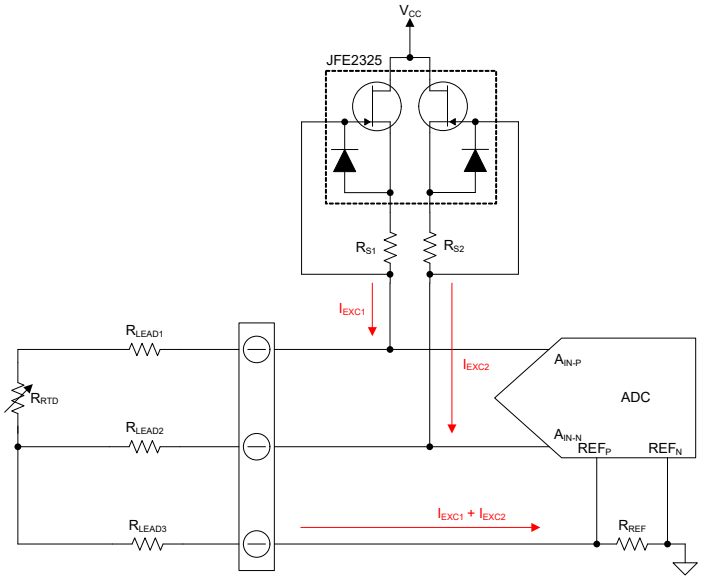


***圖 1.** 使用 JFE2325 雙 JFET 作為匹配電流來源的三線比率 RTD 量測*

為了瞭解三線方法的優點，我們可以推導 ADC 各輸入端電壓的方程式：

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

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

如果 $R_{LEAD1} = R_{LEAD2} = R_{LEAD}$ 且 $I_{EXC1} = I_{EXC2} = I_{EXC}$，則 ADC 感測的差動輸入電壓可以簡化為**方程式 3**：

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

第三條引線與參考電阻器上的壓降是 ADC 兩個輸入端的共通電壓，因此在測量時會相互抵消。

最後，由於量測為比率式，因此激磁電流的絕對值及其隨溫度變化的穩定性，遠不如兩個電流來源之間的匹配度重要。ADC 輸出僅取決於 RTD 電阻與參考電阻的比率，如**方程式 4** 所示：

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

電流來源計算

非常簡單的 JFET 電流來源可透過在 N-JFET 的源極串聯一個電阻器，並將閘極連接至該電阻器下方的節點來構成，如**图 2** 中所示。當電流流經來源電阻器 R_S 時，電阻會使 JFET 源極的電壓相對於閘極升高，進一步夾止 JFET 通道，並透過負回饋調節汲極至源極電流 I_{DS}。

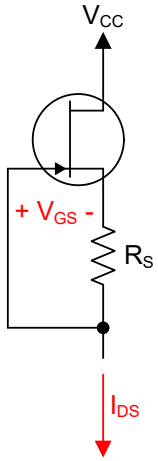


图 2. *透過將閘極連接至來源電阻器下方，所構成的簡易 JFET 電流來源*

判定 JFET 電流來源的輸出電流，最簡單的方法是參考 JFET 產品規格表中的 I_{DS} 與閘極至源極電壓 (V_{GS}) 曲線。**图 3** 中再現了 JFE2325 的這一曲線。

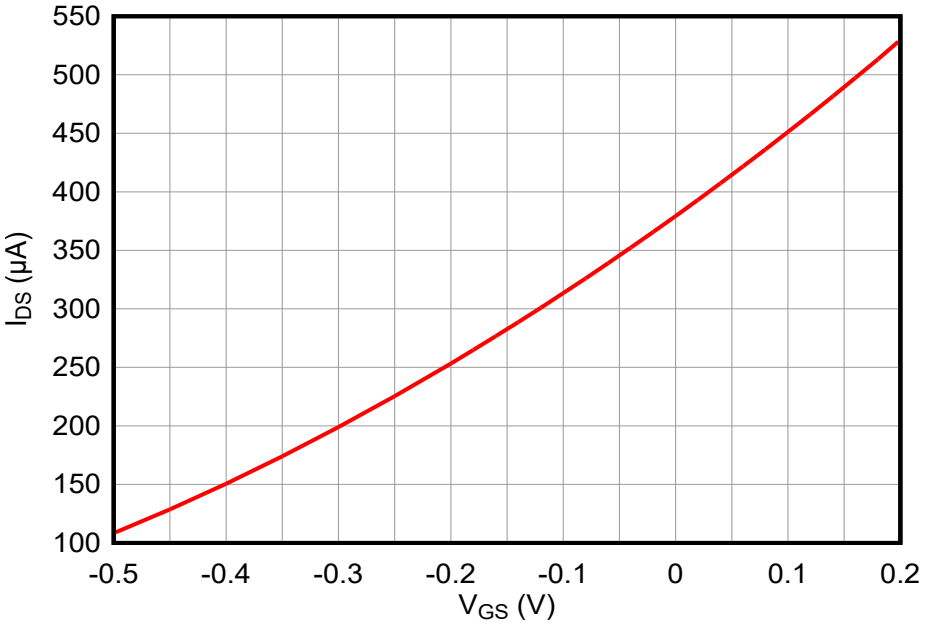


图 3. *JFE2325 的汲極至源極電流 (I_{DS}) 與閘極至源極電壓 (V_{GS}) 的關係*

考量到 R_S 兩端的電壓降與閘極至源極電壓相等、極性相反，因此可根據產生所需 I_{DS} 的 V_{GS}，計算出 R_S 的電阻值，如**方程式 5** 中所示：

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

在**圖 3** 中可以看到，當汲極電流為 200µA 時，JFE2325 所需的 V_{GS} 為 −0.3V。將此值代入 **方程式 5**，即可在**方程式 6** 中計算 R_S：

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

若已知 JFET 的夾止電壓 V_P 及汲極至源極飽和電流 I_{DSS}，即可根據**方程式 7** 直接計算 I_{DS}：

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

將 V_{GS} 代入 **方程式 5** 可計算出**方程式 8**：

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

可將**方程式 8** 展開並整理成標準二次方程式形式 *($ax^2 + bx + c = 0$)*，再使用二次方程式求根公式求解（**方程式 9** 和 **方程式 10**）：

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

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

其中 a、b 和 c 分別在**方程式 11**、**方程式 12** 和**方程式 13** 中定義：

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

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

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

此方法會得到兩個根，但只有其中一個是電流源輸出電流的有效解。使用 JFE2325 的 I_{DSS} 和 V_P 典型值（分別為 385µA 和 -1.079V），搭配 1.5kΩ 的來源電阻器，可得到 200.4µA 的 I_{DS}。

估計兩個電流來源之間不匹配的程度

計算兩個電流來源之間不匹配的程度時，必須分析 JFET 參數不匹配對產生的輸出電流的影響。離散式 JFET 的 I_{DSS} 和 V_P 值容差範圍極大。然而，由於 JFE2325 中的兩個 JFET 採用現代 IC 佈局技術，整合於同一晶粒上，因此兩者的參數高度匹配。**圖 4** 是 JFE2325 中兩個 JFET I_{DSS} 不匹配程度的生產直方圖，資料取自超過 74,000 個裝置。從直方圖可以看出，在

平均值的三個標準差範圍內，兩個 JFET 的 I_{DSS} 不匹配程度在 2% 以內。JFE2325 資料表中規定，I_{DSS} 的最大不匹配程度為 5%，相當於偏離平均值六個標準差。

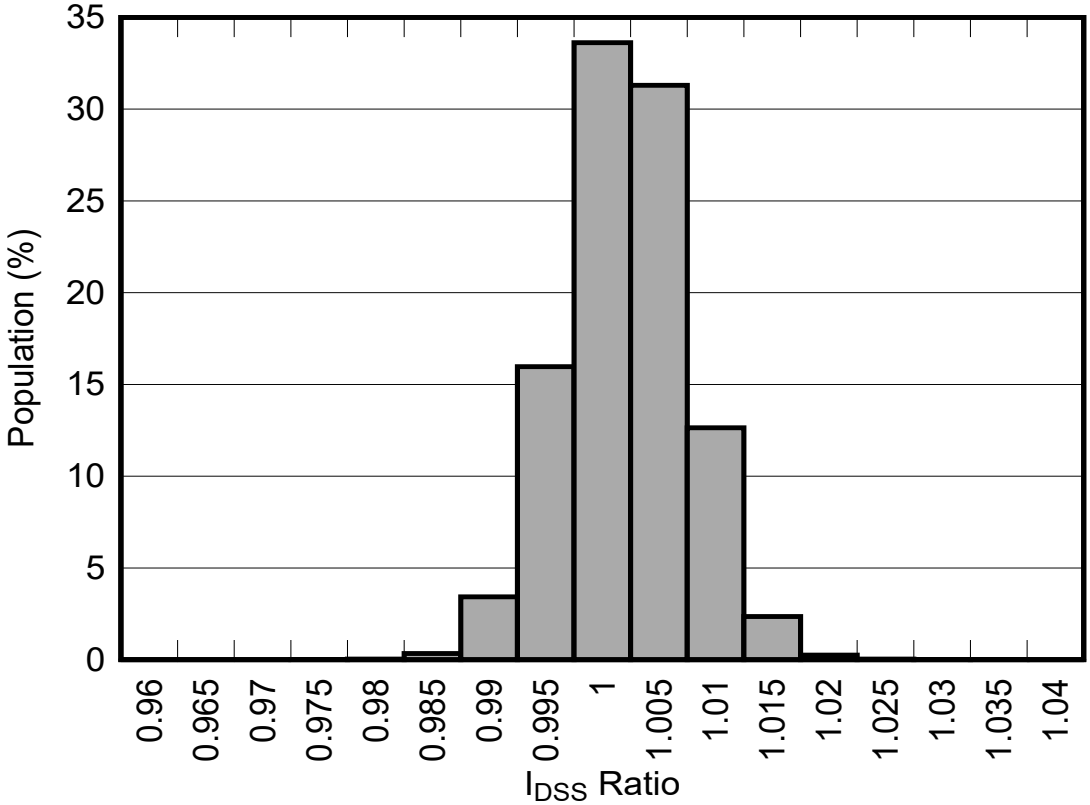


***图 4.** JFE2325 內部兩個 JFET 之間的 I_{DSS} 不匹配程度生產直方圖*

JFET I_{DSS} 和 V_P 非彼此獨立的參數。相反，這兩個數量是相關的，因此 I_{DSS} 增加時，V_P 也會距離零更遠。**图 5** 顯示 JFE2325 的 I_{DSS} 與 V_P 之間的相關性（圖中以閘極至源極截止電壓 V_{GSC} 表示）。

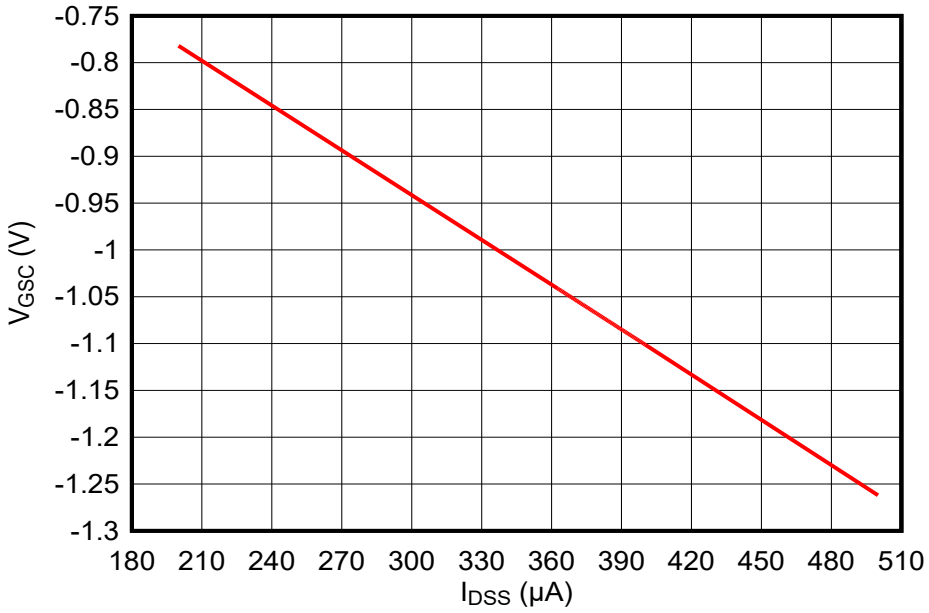


***图 5.** JFE2325 的夾止電壓（亦稱閘極至源極截止電壓 V_{GSC}）與 I_{DSS} 的關係*

我們可以根據此圖推導出一個線性方程式，根據 JFET 的特定 I_{DSS} 值估算其夾止電壓，從而得出**方程式 14**：

$$V_P = -1592.6 \times I_{DSS} - 0.4656V \quad (14)$$

表 1 顯示 JFE2325 中三個可能 JFET 的 I_{DSS} 和 V_P 值以及產生的 I_{DS}。JFET1 代表內部 JFET 的標稱情況。與 JFET1 相比，JFET2 的 I_{DSS} 不匹配程度為 2%，相當於偏離平均值三個標準差的單元。與 JFET1 相比，JFET3 的 I_{DSS} 不匹配程度為 5%，相當於偏離平均值六個標準差的單元。

	I_{DSS}	V_P	I_{DS} (R_S = 1.5kΩ
JFET1（標稱）	385.0µA	-1.079V	200.4µA
JFET2（不匹配程度 2%）	377.3µA	-1.066V	197.1µA
JFET3（不匹配程度 5%）	365.8µA	-1.048V	192.2µA

表 1. *JFE2325 中不匹配 JFET 的可能參數*

將各 JFET 對應的 I_{DSS} 和 V_P 值代入 **方程式 9** 求解，即可計算出分別以各 JFET 建立的電流源所產生的 I_{DS}。電流來源的不匹配程度在**方程式 15** 和**方程式 16** 中計算：

$$\text{Mismatch}(\pm 3\sigma,\ \%) = 100 \times \frac{|200.4\mu A - 197.1\mu A|}{200.4\mu A} = 1.647\% \quad (15)$$

$$\text{Mismatch}(\pm 6\sigma,\ \%) = 100 \times \frac{|200.4\mu A - 192.2\mu A|}{200.4\mu A} = 4.092\% \quad (16)$$

另外，如**圖 6** 中所示，將來源電阻器 R_S 的負載線加到 I_{DS} 與 V_{GS} 的關係圖中，也有助於理解其原理。I_{DS} 的值即為 JFET 曲線與 R_S 負載線的交點所對應的值。

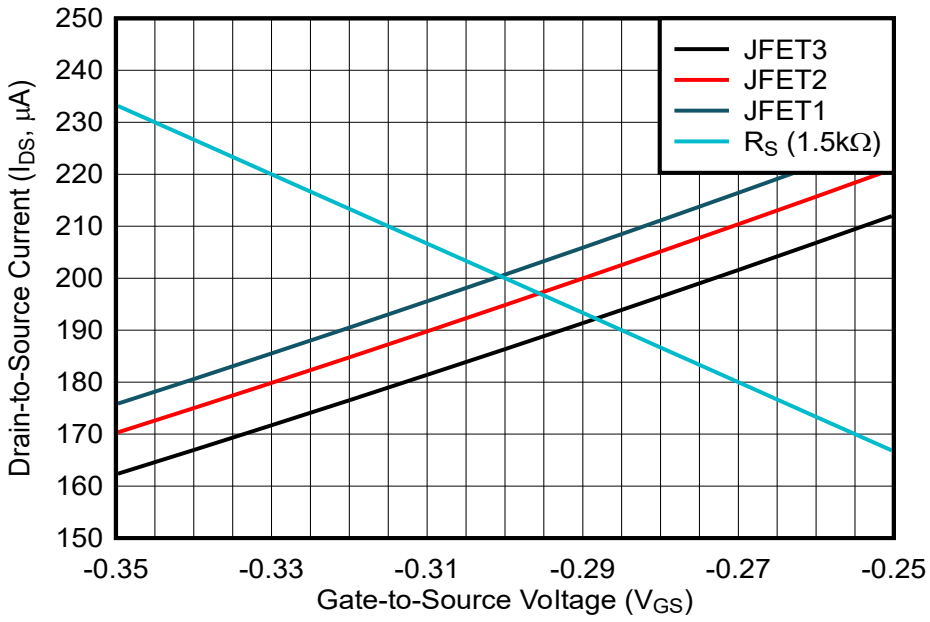


圖 6. *表 1 所列三個 JFET 的 I_{DS} 與 V_{GS} 關係圖，以及 1.5kΩ 負載線*

請注意，I_{DSS} 較低的 JFET2 和 JFET3，其曲線與 R_S 負載線的交點所對應的 V_{GS} 值更接近零，表示 JFET 通道的夾止程度較低。相反，若 JFET 的 I_{DSS} 增加，R_S 會使 V_{GS} 進一步偏離離 0V，讓 JFET 通道的夾止程度增加。因此，JFET 的 I_{DSS} 值

即使有 2% 的不匹配，電流源的輸出電流也不會因此產生 2% 的不匹配。增加 R_S 可降低兩個電流來源之間不匹配的程度，但缺點是會降低電流來源的輸出電流。

結論

三線配置是消除引線電阻對 RTD 量測所造成誤差的常見且有效的方法。然而，三線系統需要一對匹配良好的電流來源，才能有效消除誤差。建立這些匹配電流來源的簡單方法是使用單晶 N-JFET 對，例如 JFE2325。JFE2325 包括兩個匹配良好的 JFET 裝置，這兩個裝置位於超小型的 0.8mm × 1mm 封裝內的相同晶粒上。由於兩個 JFET 共用相同的矽晶面積，因此其參數的匹配度比離散式單一 JFET 更佳。此外，為 JFET 新增來源電阻器會引入負回饋，降低因 JFET 參數變更導致的輸出電流變化。此方法能以極低的成本提供兩個匹配度極高的電流來源，該解決方案尺寸小，且可在廣泛的電源電壓範圍內運作。

參考資料

1. Joseph Wu，「**RTD 量測基本指南**」。
2. 德州儀器，**適用於駐極體麥克風的 JFE2325 雙低功耗 N 通道 JFET**。

作者簡介

John Caldwell 是線性放大器 BU 的技術專家，參與所有產品線，定義新一代高性能訊號調整放大器。John 在線性放大器開發和精度、低雜訊及電路設計方面擁有超過 15 年的經驗。John 取得了弗吉尼亞理工學院電氣工程學士及碩士學位，擁有 3 項美國專利，並發表過 30 多篇文章。

重要聲明：本文所述德州儀器及其子公司相關產品與服務經根據 TI 標準銷售條款及條件。建議客戶在開出訂單前先取得 TI 產品及服務的最新完整資訊。TI 不負責應用協助、客戶的應用或產品設計、軟體效能或侵害專利等問題。其他任何公司產品或服務的相關發佈資訊不構成 TI 認可、保證或同意等表示。

所有商标均为其各自所有者的财产。

© 2026 Texas Instruments Incorporated

IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATASHEETS), DESIGN RESOURCES (INCLUDING REFERENCE DESIGNS), APPLICATION OR OTHER DESIGN ADVICE, WEB TOOLS, SAFETY INFORMATION, AND OTHER RESOURCES “AS IS” AND WITH ALL FAULTS, AND DISCLAIMS ALL WARRANTIES, EXPRESS AND IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR NON-INFRINGEMENT OF THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.

These resources are intended for skilled developers designing with TI products. You are solely responsible for (1) selecting the appropriate TI products for your application, (2) designing, validating and testing your application, and (3) ensuring your application meets applicable standards, and any other safety, security, regulatory or other requirements.

These resources are subject to change without notice. TI grants you permission to use these resources only for development of an application that uses the TI products described in the resource. Other reproduction and display of these resources is prohibited. No license is granted to any other TI intellectual property right or to any third party intellectual property right. TI disclaims responsibility for, and you fully indemnify TI and its representatives against any claims, damages, costs, losses, and liabilities arising out of your use of these resources.

TI’s products are provided subject to TI’s Terms of Sale, TI’s General Quality Guidelines, or other applicable terms available either on ti.com or provided in conjunction with such TI products. TI’s provision of these resources does not expand or otherwise alter TI’s applicable warranties or warranty disclaimers for TI products. Unless TI explicitly designates a product as custom or customer-specified, TI products are standard, catalog, general purpose devices.

TI objects to and rejects any additional or different terms you may propose.

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

Last updated 10/2025