

## 线性增益设置模式：详细说明

作者：Miguel Usach

### 简介

数字电位计通常用于对放大器中的增益进行数字化编程，或者设置电源稳压器的输出电压，如图1和图2所示。

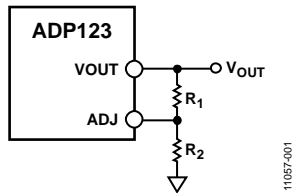


图1. 可调输出电压LDO

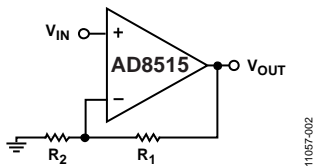


图2. 同相放大器

这两种情况下，传递公式取决于两个不同变量 $R_1$ 和 $R_2$ ，如LDO的公式1和同相放大器的公式2所示。

$$V_{OUT} = 0.5 \times \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \quad (1)$$

$$V_{OUT} = V_{IN} \times \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \quad (2)$$

在这些传递公式中，在电位计模式下使用数字电位计并不简单，因为两个电阻串 $R_{AW}$ 和 $R_{WB}$ 是互补的，换言之， $R_{AW} = R_{AB} - R_{WB}$ ，如图3所示。

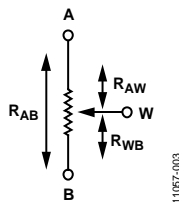


图3. 电位计电阻

如果电阻 $R_1$ 和 $R_2$ 被数字电位计直接取代，则传递函数成为对数函数。图4显示了LDO的示例。

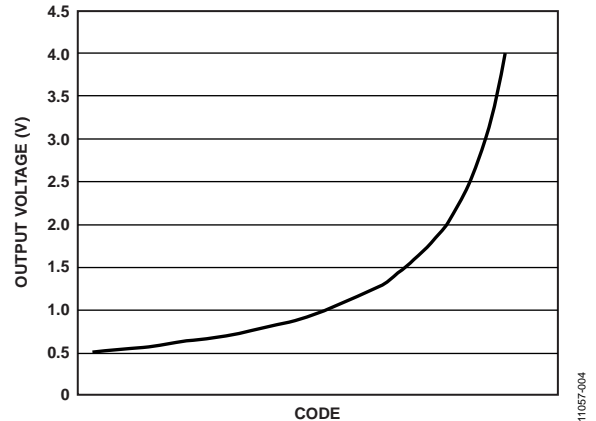


图4. LDO的对数传递函数

这个对数传递函数在某些应用中(例如光线或音频控制)可能适用，因为人体不是这些激励的线性接收体，但在很多电子应用中，则最好使用线性传递函数。

### 使输出线性化

有三种不同方法可以实现与数字电位计载入的编码成正比的线性输出。这三种方法将在以下部分进行详细介绍。

#### 在可变电阻器模式中使用数字电位计

数字电位计可在可变电阻器模式中使用，此时仅使用两个端子，如图5所示。

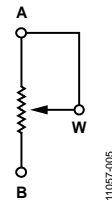


图5. 可变电阻器模式

此模式要求将分立电阻与数字电位计结合使用。同相放大器的示例如图6所示。

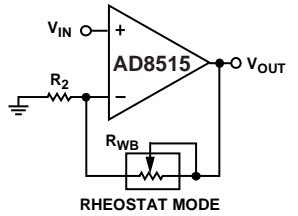


图6. 具有可变电阻器控制的同相放大器

使用此解决方案的主要好处是电路简易性、宽输出范围和快速建立时间。其缺点是，由于数字电位计中的典型容差误差最大值约为±20%，因此整体输出误差可能非常高。鉴于R<sub>2</sub>是固定的，这可能导致电阻不匹配。

ADI公司提供±8%和±1%电阻容差误差的数字电位计，以改进这些配置中的性能，如选型表中所示。

此外，对于LDO，通过与数字电位计串联一个电阻，可以减小输出误差，如图7所示。

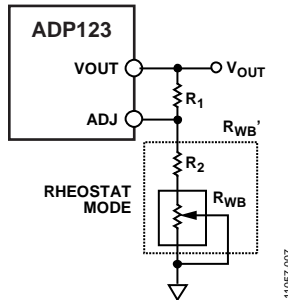


图7. 利用串联电阻减小容差误差

在此情况下，假定20%容差误差可忽略不计，R<sub>2</sub> >> R<sub>WB</sub>；换言之，通过降低可调节输出增益和增加建立时间，可以改进输出误差。最终电阻由公式3确定。

$$R_{WB}' = R_2 + R_{WB} \quad (3)$$

减小误差的第二种方法是为数字电位计放置并联电阻，如图8所示。

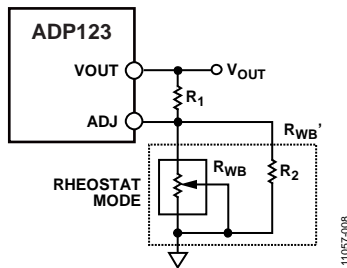


图8. 利用并联电阻减小容差误差

在此情况下，假设条件是R<sub>2</sub> << R<sub>WB</sub>，因为标称端到端电阻值为10 kΩ、50 kΩ和100 kΩ。

其结果与前一种方法相似，也就是可调节输出增益减小，但在这种情况下，由于R<sub>WB</sub>'值较小，建立时间会缩短，如公式4所示。

$$R_{WB}' = \frac{R_2 \times R_{WB}}{R_2 + R_{WB}} \quad (4)$$

由于整体并联电阻值较小，因此电阻噪声低于串联电阻方法。

为预防起见，请记住数字电位计有内部漏电流。如果所选并联电阻R<sub>2</sub>足够小，使通过数字电位计的电流不够大，则线性误差R-INL和R-DNL可能远高于数据手册中的额定值。

### 使电位计线性化

将数字电位计配置为游标DAC(如图9所示)时，A端和B端的电压受到串行电阻R<sub>1</sub>和R<sub>2</sub>位置的限制。

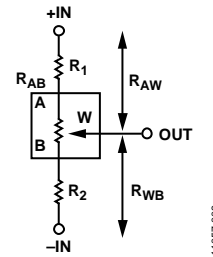


图9. 游标DAC

这种方法的思路是减小输出范围，从而针对两种不同配置产生更具线性的输出，如图10所示。

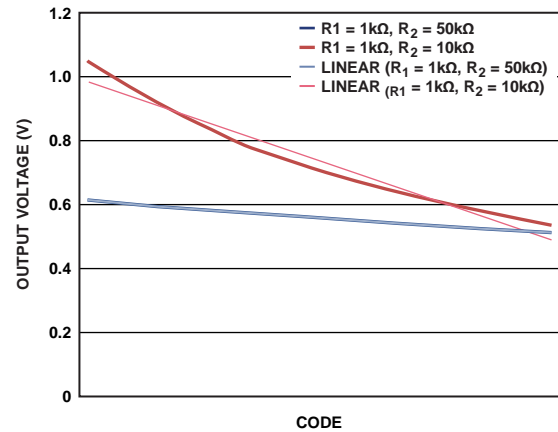


图10. 具有游标DAC的LDO电压

这种配置提供的线性误差低于在可变电阻器模式下使用数字电位计，而且它会得到较低的温度系数。

端之间的最终电阻由公式5和公式6定义。

$$R_1' = R_1 + R_{AW} \quad (5)$$

$$R_2' = R_2 + R_{WB} \quad (6)$$

建议使用低电阻容差误差的数字电位计，如 $\pm 8\%$ 和 $\pm 1\%$ 。请注意，容差越大，不匹配电阻误差越大。

在此情况下，我们使用典型的20%电阻容差误差，因此应与数字电位计并联一个电阻，以减小整体误差，如图11所示。

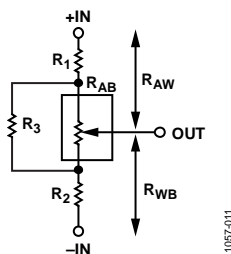


图11. 减小游标DAC中的容差误差

另外，在此配置中还必须考虑漏电流的影响。选择低并联值可以迫使电流通过 $R_3$ 。

计算端之间的最终电阻可能非常复杂，因此最佳方法是使用Y- $\Delta$ 变换，如图12所示。

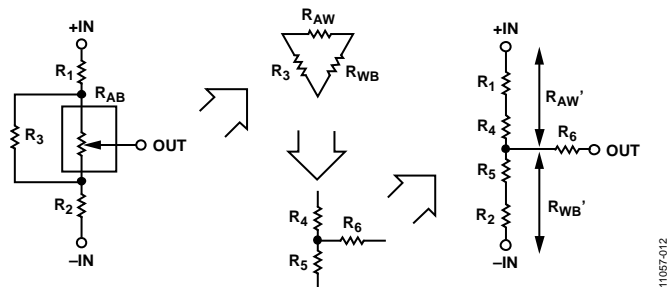


图12. Y- $\Delta$ 变换

其中：

$$R_4 = \frac{R_{AW} \times R_3}{R_{AB} + R_3} \quad (7)$$

$$R_5 = \frac{R_{WB} \times R_3}{R_{AB} + R_3} \quad (8)$$

$$R_{AW}' = R_1 + R_4 \quad (9)$$

$$R_{BW}' = R_2 + R_5 \quad (10)$$

$R_6$ 应该连接到高阻抗输入，使得此电阻的影响可以忽略。

## 使能线性增益设置模式

在线性增益设置模式中，内部电阻串 $R_{AW}$ 和 $R_{WB}$ 是相关的。[AD5144](#)、[AD5142](#)、[AD5124A](#)和[AD5141](#)中均实施了这种新获专利的架构，用于提高灵活性，允许对每个电阻串的值( $R_{AW}$ 和 $R_{WB}$ )进行独立编程，如图13所示。

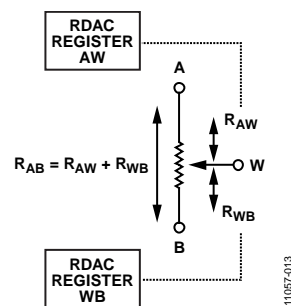


图13. 线性增益设置模式

使能此模式时，输出电压可以是线性的，固定一个电阻串的值(即 $R_{WB}$ )并设置另一个电阻串的值(即 $R_{AW}$ )。这种工作模式类似于在可变电阻器模式下将数字电位计与分立电阻结合使用，但在此情况下，整体容差误差低于1%，并且无需任何外部并联或串联电阻。

这是因为增益由电阻比决定，整体电阻容差误差在两个电阻串阵列中普遍存在，但可以忽略。

图14显示了从零电平至满量程的 $R_{AW}$ 扫描示例，其中对于10 k $\Omega$ 数字电位计，将 $R_{WB}$ 固定在中间电平。仔细分析图表可以看到，在较低编码处，当电阻 $R_{AW}$ 或 $R_{WB}$ 较小时，不匹配程度变得高于 $\pm 1\%$ 。这是因为内部CMOS开关电阻中的不可忽略效应会引入误差。

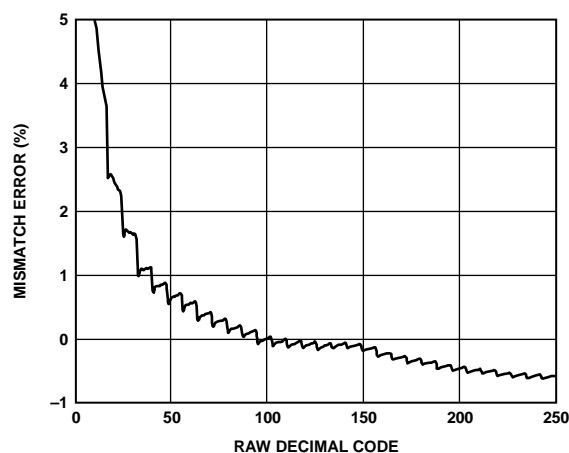


图14. 10 k $\Omega$ 电阻匹配误差

# AN-1169

可以通过选择高于1/4量程的编码来消除开关效应。

使能线性设置模式时，可以将A端和B端之间的最大电阻设置为标称数字电位计电阻的两倍。换言之，如果RAB电阻在电位计模式下为10 kΩ，则在线性设置模式中，在满量程下对两串电阻进行编程时， $R_{AB} = 20 \text{ k}\Omega$ 。

使用双通道数字电位计可以达到相似的性能，但这种解决方案会增加成本和大小，并延长建立时间。

使用此配置的另一个好处是温度系数较小，如图14所示。在此情况下，重点不是每串电阻的绝对温度系数，而是定义比率的特定编码的温度系数之差。

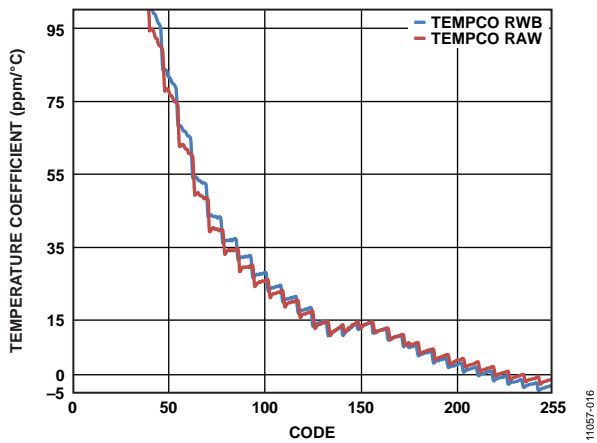


图15. 10 kΩ电阻温度系数

以图16中的电路为例。选择增益3时，代码率由公式11确定。

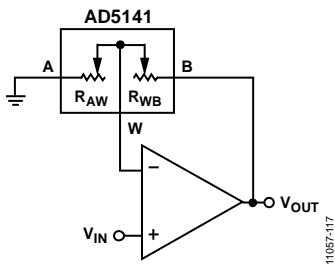


图16. 线性增益设置模式中的同相放大器和AD5141

$$Gain = 1 + \frac{R_{WB}}{R_{AW}} \Rightarrow 2 \times R_{AW} = R_{WB} \quad (11)$$

将 $R_{WB}$ 编码固定为250时， $R_{AW}$ 编码为125。作为粗略估计，整个温度范围内因温度系数而造成的整体误差为：

编码125的 $R_{AW}$ 为20 ppm/C

编码250的 $R_{WB}$ 为-2 ppm/C

由于 $R_{AW}$ 导致的增益误差为

$$Error_{RAW} = \frac{|Gain - Gain_{RAW}|}{Gain} = \frac{\left| 3 - \left( 1 + \frac{R_{WB}(250)}{R_{AW}(125) + \frac{20 \times R_{AW}(125) \times 100}{1e6}} \right) \right|}{3} = \frac{\left| 3 - \left( 1 + \frac{9765.625}{4882.8125 + 9.765} \right) \right|}{3} = 0.13\%$$

由于 $R_{WB}$ 导致的增益误差

$$Error_{RBW} = 0.04\%$$

因此，总误差定义为

$$GAIN_{ERROR} = Error_{RAW} + Error_{RBW} = 0.17\%$$

与电阻匹配误差相同，在较低编码处，开关电阻温度系数占主导地位，但这种效应在较高编码处显著减小。

如果要求温度对误差影响较小，则需要使用更大的端到端电阻，如图17所示，电阻为100 kΩ。在这种特殊情况下，温度系数在整个编码范围内更加平坦，因此预期误差也应该较小。

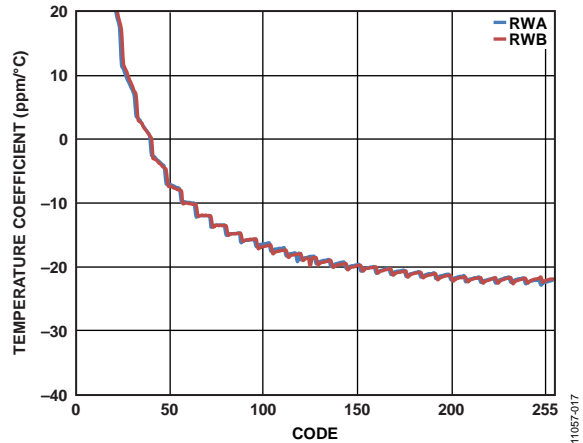


图17. 100 kΩ电阻温度系数

## 修订历史

2013年8月—修订版0至修订版A

更改公式2..... 1

2012年12月—修订版0：初始版