

串联基准电压源误差计算

王浩 2024.08.15

基准电压源是一种专门设计且用来维持恒定输出电压的器件，根据不同设计分为串联电压基准源和并联电压基准源，而串联基准电压源以其高精度、低温度漂移特性在许多数据转换器应用中起着精确测量的重要作用。本文将主要介绍串联基准电压源的误差类别以及误差计算，为数据转换器或者其他应用评估基准电压源作为参考。

1. 串联电压基准源误差有多种，包括以下几种

a) 初始精度 (Initial Accuracy)

输出电压在给定温度 (通常为 25°C) 下测得的变化，用百分比来表示。对于单个器件的初始精度误差一般是固定的，可以通过校准来将其消除。

b) 温度漂移 (Temperature Drift)

输出电压与温度变化而引起的变化 (以 25°C 时的输出电压进行归一化处理)，用 ppm/°C 来表示。

多数厂家串联电压基准源温度漂移公式定义如下：

$$\text{Temperature Drift} = \left(\frac{V_{\text{out,max}} - V_{\text{out,min}}}{V_{\text{out}}} \right) / (T_{\text{max}} - T_{\text{min}}) \times 10^6 (\text{ppm}/^\circ\text{C})$$

其中： $V_{\text{out,max}}$ 和 $V_{\text{out,min}}$ 分别为指定温度范围内的最大和最小输出电压， T_{max} 和 T_{min} 分别为最高和最低温度， V_{out} 为 25°C 时输出电压。

c) 热迟滞 (Thermal Hysteresis)

输出电压经过规定的温度循环后引起的变化，用 ppm 来表示。

$$\text{Thermal Hysteresis} = \left(\frac{V_{\text{pre}} - V_{\text{post}}}{V_{\text{out}}} \right) \times 10^6 (\text{ppm})$$

其中： V_{pre} 为温度循环前输出电压， V_{post} 为温度循环后输出电压， V_{out} 为标称输出电压。

d) 噪声 (Noise)

噪声一般包括低频和高频噪声，低频噪声指 0.1Hz 至 10Hz 带宽内电压峰峰值，以 uVpp 或者 uVpp/V 表示。高频噪声指 10Hz 以上频率的电压值。

e) 线性调整率 (Line Regulation)

输出电压随输入电压变化而引起的变化，用 ppm/V 来表示。

f) 负载调整率 (Load Regulation)

输出电压因负载电流变化而引起的变化，用 ppm/mA 来表示。

g) 长期稳定性 (LTD)

输出电压相对于时间变化（1000 小时、2000 小时或其他时间）而引起的变化，用 ppm 来表示。

2. 串联电压基准源总误差计算

线性调整率误差与电压基准源的供电相关，本文假设基准电压源是使用线性稳压器（LDO）供电，假设其输入电压变化值为 0.1V。

负载调整率误差与数据转换器（ADC/DAC）的型号以及输出速率有关，本文假设基准电压源的输出负载电流为 0.5mA。

长期稳定性误差与具体的使用场景相关，对于需要长期不间断工作的场景需要重点考虑，本文忽略长期稳定性误差计算。

本文以思瑞浦高精度串联基准电压源 TPR5025 为例，假设工作温度范围为 -20~60°C，各种误差计算如下：

初始精度误差：

$$\text{Error}|_{\text{Accuracy}} = 0.05\% = 500\text{ppm}$$

温度漂移误差：

$$\text{Error}|_{\text{Temp}} = 5\text{ppm}/^{\circ}\text{C} \times (60^{\circ}\text{C} - (-20^{\circ}\text{C})) = 400\text{ppm}$$

热迟滞误差：

$$\text{Error}|_{\text{Hysteresis}} = (99 + 29)\text{ppm} = 128\text{ppm}$$

噪声误差：

$$\text{Error}|_{\text{Noise}} = 3\mu\text{Vpp}/\text{V} = 3\text{ppm}$$

线性调整率误差：

$$\text{Error}|_{\text{Line}} = 20\text{ppm}/\text{V} \times 0.1\text{V} = 2\text{ppm}$$

负载调整率误差：

$$\text{Error}|_{\text{Load}} = 20\text{ppm}/\text{mA} \times 0.5\text{mA} = 10\text{ppm}$$

电压基准源中的各种误差一般都是非相关的，所以本文采用更加接近真实误差的和方根（Root Sum Square, RSS）方法计算，可以计算出 RSS 误差为：

$$\begin{aligned} \text{Error}|_{\text{RSS}} &= \sqrt{\text{Error}|_{\text{Accuracy}}^2 + \text{Error}|_{\text{Temp}}^2 + \text{Error}|_{\text{Hysteresis}}^2 + \text{Error}|_{\text{Noise}}^2 + \text{Error}|_{\text{Line}}^2 + \text{Error}|_{\text{Load}}^2} = 653\text{ppm} \end{aligned}$$

对于电压基准源的误差，通过校准可以进一步减少，一般采用单个温度点校准（通常为常温校准，简称单点校准）或者多个温度点校准（简称多点校准）。

对于单点温度校准，可以消除初始精度误差。如果单点温度校准前经过整个温度范围的温度循环，那么可以进一步减少热迟滞误差，假设热迟滞误差减少 70%。此时 RSS 误差为：

$$\begin{aligned} \text{Error}|_{\text{RSS_Single_Cal}} &= \sqrt{\text{Error}|_{\text{Temp}}^2 + (\text{Error}|_{\text{Hysteresis}} \times 0.3)^2 + \text{Error}|_{\text{Noise}}^2 + \text{Error}|_{\text{Line}}^2 + \text{Error}|_{\text{Load}}^2} = 402\text{ppm} \end{aligned}$$

对于多点温度校准，可以进一步减小温度漂移误差，温度点数量越多，减少的误差就越多。本文假设减少 90% 的误差，此时 RSS 误差为：

$$\begin{aligned} \text{Error}|_{\text{RSS_Multi_Cal}} &= \sqrt{(\text{Error}|_{\text{Temp}} \times 0.1)^2 + (\text{Error}|_{\text{Hysteresis}} \times 0.3)^2 + \text{Error}|_{\text{Noise}}^2 + \text{Error}|_{\text{Line}}^2 + \text{Error}|_{\text{Load}}^2} = 56\text{ppm} \end{aligned}$$

思瑞浦串联基准电压源推出了多个系列，选择各系列 2.5V 输出基准，根据相同条件和假设计算各个系列产品误差汇总如下表：

误差	TPR3525	TPR3325	TPR3125	TPR5025	TPR7025
初始精度/ppm	2000	1500	500	500	500
温度漂移 (-20~60°C) /ppm	4000	2400	800	400	240
热迟滞/ppm	80	80	128	128	27
噪声/ppm	20	20	3	3	1
线性调整率/ppm	7	7	2	2	0.5
负载调整率/ppm	15	15	10	10	10
RSS/ppm	4473	2831	952	653	555

串联基准电压源误差计算

误差	TPR3525	TPR3325	TPR3125	TPR5025	TPR7025
单点校准 RSS/ppm	4000	2400	801	402	240
多点校准 RSS/ppm	402	243	89	56	27

串联基准电压源多数场景下与数据转换器 (ADC/DAC) 一起使用，数据转换器 (ADC/DAC) 不同位数其 1LSB 所对应 ppm 值见下表：

Bits	10	12	14	16
LSB(ppm)	977	244	61	15

对使用外置串联电压基准源的数据转换器，串联基准电压源误差要远小于 1LSB 才能不影响其性能。实际应用中可以根据设计要求，计算出串联基准电压源误差来评估是否符合。