

# 测试24位LTC2400即时增量累加 (No Latency $\Delta\Sigma^{\text{TM}}$ ) 转换器的线性度

借助十九世纪的研究成果

Jim Williams

## 导言

验证 LTC2400 模数转换器的线性度需要特殊的考虑。典型非线性只有2ppm (0.0002%)。对此进行基准测试 (bench testing) 需要借助某些形式的电压源, 该电压源可为递增的数字输入产生等幅输出间距的电压。此外, 为了测量可信度, 期望源的线性度基本上要高于2ppm的指标要求。当然, 这是一个苛刻且痛苦的要求, 几乎接近当今最先进的技术。

最线性的“D 至A”转换器同时也是最古老的转换器之一, 即Lord Kelvin的Kelvin-Varley分压器(KVD), 其最先进形式的线性度可达0.1ppm。这种手动开关器件在 $10^7$ 中具有1千万个单独刻度。可以将KVD当成一个具有固定“端对端”(end-to-end)电阻和一个拥有一千万级滑动开关的3端电位计来考虑 (参见图1)。

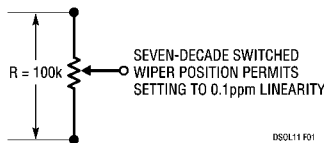


图1、概念中的Kelvin-Varley分压器

对于0.1ppm的KVD, 其实际构造之艺术和奇妙超出科学本身。但这个市场相对较小, 仅有少数供应商涉足, 因此售价非常昂贵。设想一下, 一包开关和电阻器要花费13,000美元, 你的感受如何? 如果无法容忍, 不妨试试搭建和验证你自己的KVD。图2给出了一个详细的电路图。

图中所示的KVD具有100k $\Omega$ 输入阻抗。这样做有一个后果, 那就是滑动输出电阻较大并随设置而变化, 所以, 需要一个输入电阻很高的跟随器来卸载KVD, 但这

不会引起明显的负载误差。现在, 我们的KVD看起来像图3。

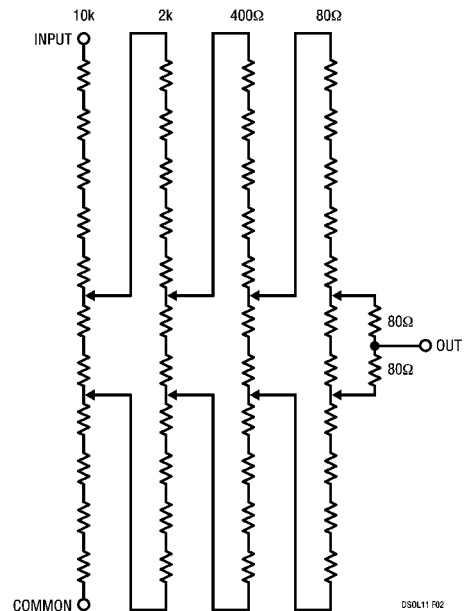


图2: 一个 $10^4$ 的Kelvin-Varley分压器。更多的十倍是通过打开最后的开关、去除两个相关的80 $\Omega$ 阻值以及连续 $\div 5$ 电阻系列得以实现的。

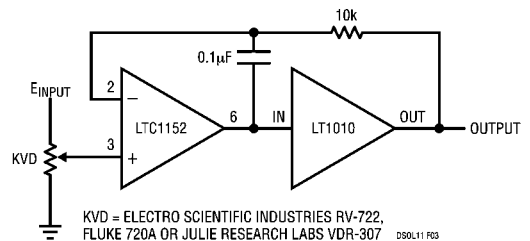


图3: 具有缓冲器的KVD 向输出提供驱动能力。

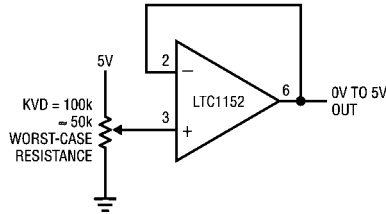
LT, LTC和LT是凌特公司的注册商标。  
No Latency  $\Delta\Sigma$  是凌特公司的商标。

# 设计方案11

这个电路图误以为简单，但在实践中，具体细节的构建极为重要。寄生热电耦（塞贝克效应）、线路板布局、接地、屏蔽，防护、电缆选择以及其它方面的问题都会影响所要达到的性能。实际上，就漂移、偏移、偏置电流和共模抑制比（CMRR）而言，如果追求亚ppm级的非线性表现，即使如削波稳定的LTC1152一般好，我们也要进行选择。图4是误差预算分析表，它给出了一些具体的选择准则。

在图 5，我们将偏移修整、第二个整体KVD和一个稳定的电源累加起来共同驱动主KVD。另外，由三个HP3458A伏特表所构成的整体负责监视输出。

偏移修整将一个微小的电流注入主KVD的接地回路，产生了一个几微伏的偏移修整范围。这不仅可从功能上消除全部的零误差源（放大器偏移，寄生电耦失配等），而且当主KVD设置为全零时，允许真正的零伏特输出。



误差源	最坏情况参数	现实的选择目标	误差PPM
$E_{OS}$	5 $\mu$ V	0.5 $\mu$ V	0.1
$E_{OS\Delta T}$	0.05 $\mu$ V/ $^{\circ}$ C	0.05 $\mu$ V/ $^{\circ}$ C	0.01/ $^{\circ}$ C
$I_b$	50pA	10pA	0.1
CMRR	110dB	140dB	0.1
FINITE GAIN	140dB	140dB	0.1

06DL11 F04

图4：KVD 缓冲器的误差预测分析允许选择 $\approx$ 0.4ppm 的预计线性误差

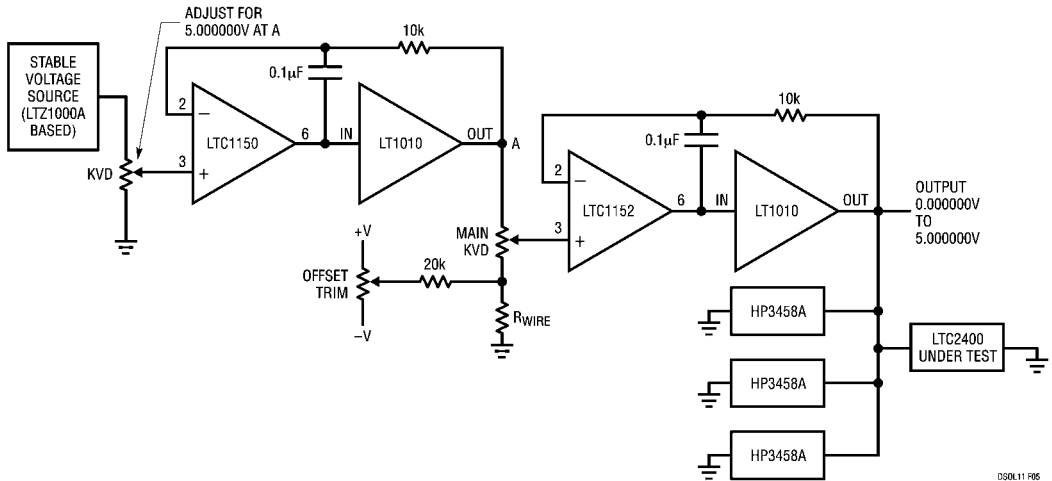


图5：简化的高线性电压源

那些在10V范围之内，非线性度规定小于1ppm的伏特表可用来“表决”(vote)电压源的输出。图6给出了一个更详细的电路，图7则着重强调那些备受关注的问题。

必不可少。这消除了与绝对标准的关系，并允许测量方案有一定的自由。特别需要指出的是，虽然采用了单点接地方式，但没有采用远程测量。这是一个慎重的选择，可将信号通道上可能导致误差的寄生电耦数目降至最少。

当研究采用方法时，将线性度和绝对精确度区分是

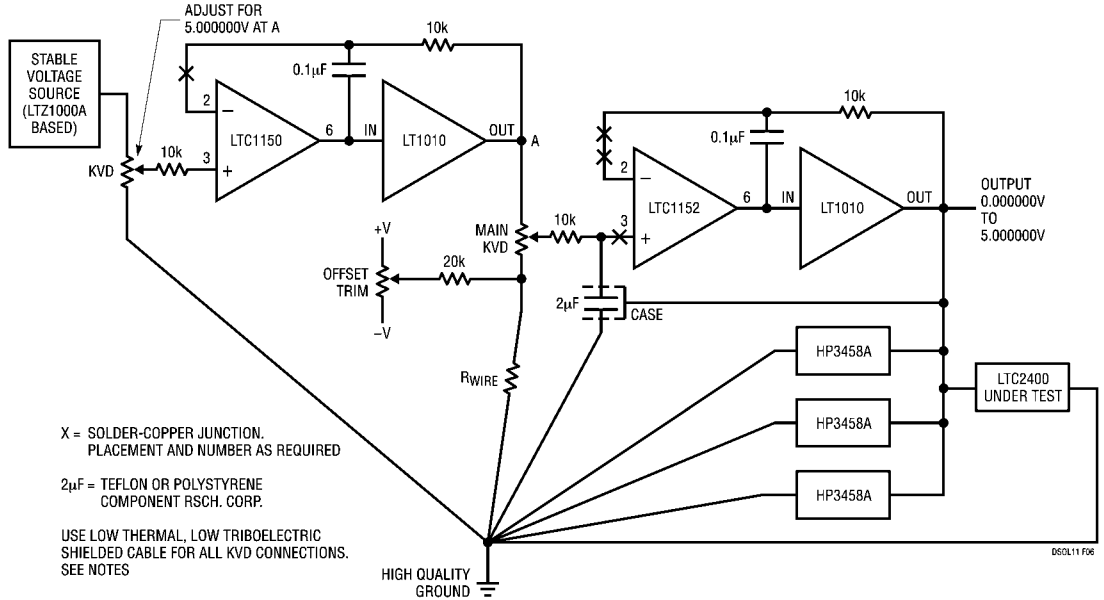


图6：完整的高线性电压源

- 通过驱动KVD接地回路进行偏移修整
- 高品质的接地
- 电缆选择——行业标准#SCW，KEITHLEY SC-93
- 低温插头、香蕉插头 - HP11053，8.11074
- 连接KVD和DVM的插头
- 慎重选择铜焊接点
- 在电容上加设屏蔽外壳并接到输出端以防范电容表面漏电
- “微伏特维持”(DE-OXIT, CAIG LABS)

DSOL11 F07

图7：电压源说明及特别注意事项

# 设计方案11

---

## 结论

这种基于KVD的高线性度电压源已在实验室里采用了大约一年的时间。在此期间，由电压源及其监察伏特表所定义的总线性度不确定性只有0.3ppm (参见图8)，这几乎比LTC2400的2ppm指标好10倍，因此，提升了我们测量的可信度。

## 致谢

作者非常感激Lord Kelvin及C. S. Draper Laboratory (前身是M.I.T. Instrumentation Laboratory) 标准实验室的Warren Little。大约三十年前，Warren以极大的耐心给我讲授KVD的奇迹，至今让我受益匪浅。

- 通过互相比较和独立的校准实验室验证KVD线性度
- 在0V到5V范围，每0.5V取最坏情况的伏特表整体偏差
- 运行100次 (每天10次，每1小时1次)
- 结果显示非线性度是0.3ppm

DSOL11 F08

图8：利用带“表决”伏特表的重复实验测试线性度