

# Analog Applications Journal

## BRIEF

### 了解线性稳压器的噪声

By John C. Teel • Analog IC Designer, Member Group Technical Staff

模拟电路的噪声多种多样，其中包括热噪声、闪烁噪声、散粒噪声 (shot noise) 等。在 LDO 应用中，噪声有时会与电源纹波抑制比 (PSRR) 相混淆。它们都是在输出端产生不需要的信号，因此二者常混在一起被称为“噪声”。这是不正确的。PSRR 是指输出的恒波量，它来自于输入中的纹波。而噪声纯粹是一个物理现象，晶体管与电阻器（电容器不产生噪声）在基本的水平上就会产生噪声。LDO 中的噪声以两种方式表达：一是频谱噪声强度 ( $\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ )，即噪声相对于频率的曲线；另一个是经过积分获得的输出噪声，通常称为输出噪声电压（单位为  $\mu\text{V}_{\text{rms}}$ ）；它是某个频率范围内的频谱噪声强度的积分，因而可被当作是特定频率范围内的总噪声。仅一个数字就能表示输出噪声电压，所以在做比较时输出噪声电压很有用。

通常情况下，LDO 内的噪声被定义为输出参考 (output-referred) 噪声（LDO 中产生噪声，但噪声最后必须要导入输出）。找到 LDO 的参考输出噪声的典型方法是：首先将所有噪声因素 (contributor) 导入 LDO 差分放大器的输入。所谓导入是指：根据存在于各噪声因素与运算放大器输入之间的增益，将各噪声因素区分开（假设噪声因素位于信号通道的下游）。第二步是通过乘以反馈网络的闭环增益来使总输入统考 (input-referred) 噪声的导入输出。

LDO 的闭环增益就是 VBG 为内部带隙参考电压的地方。在许多情况下 VBG 约等于 1.2 V（然而一些 LDO 具有次带隙参考电压，因而 VBG 小于 1.2 V）。输出电压为 3.0 V 的 LDO 的输出噪声电压几乎等于 1.5 V LDO 的两倍；所以在比较不同 LDO 的噪声时，应当比较具有相同输出电压的 LDO。当做不到这一点时，可以考虑两个输出电压之比以做近似比较。例如，当比较 3.0 V LDO 与 1.5 V LDO 的噪声电压时，将 1.5 V LDO 的噪声电压乘以 2，或将 3.0 V LDO 的噪声电压除以 2。

$$A_{\text{CL(DC)}} = \frac{V_{\text{OUT}}}{V_{\text{BG}}}$$

其中 VBG 为元件内部的能隙参考电压 (bandgap reference)，它在许多情形下约为 1.2 V（有些低压降压稳压器则内置次能隙参考电压，它们的 VBG 会小于 1.2 V）。3.0 V 稳压器的输出杂讯电压几乎是 1.5 V 稳压器的两倍，故在比较稳压器的杂讯时，应先确定它们提供同样的输出电压；若一定要比较不同输出电压的稳压器，我们也可将两个电压的比值列入考虑以取得近似结果，例如在比较 3.0 V 和 1.5 V 稳压器的杂讯电压时，我们可将 1.5 V 稳压器的杂讯电压加倍，或是将 3.0 V LDO 的噪声电压除以 2。

#### 最新一期的精采内容

- 了解线性稳压器的噪声
- 了解线性稳压器的电源纹波抑制
- 利用 M-LVDS 背板使信号完整性最大化
- 自动归零放大器简化高精度电路的设计
- 请访问 TI 网站 [www.ti.com/aaj](http://www.ti.com/aaj)，下载模拟应用期刊



图 1：简化的 LDO 结构图

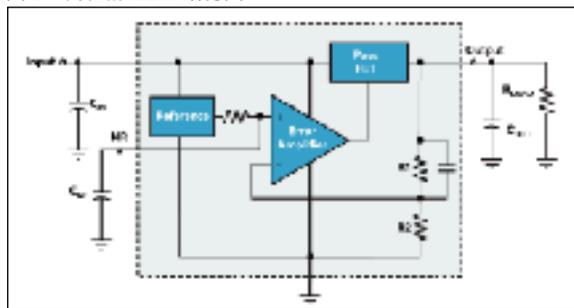


图 1 的简化结构图表示出了 LDO 的主要噪声源——带隙、电阻分压器以及运算放大器的输入级。如果正确了解了这些噪声源，就可以减小其中的部分噪声源。

LDO 中的主要噪声源通常是带隙。一般情况下的解决办法是为带隙输出添加一个大的低通滤波器 (LPF)，从而阻止噪声进入增益级。（此滤波器也可用于提高 PSRR）。此类 LPF 通常由一个大的内部电阻与一个外部电容构成。在多数情况下此滤波器的截止频率设定为 1 至 500 Hz 之间的某个值，所以滤掉了带隙的几乎所有噪声。在许多情表下，使用太大的 RC 滤波器的缺点是经过滤波的带隙的充电时间急剧增加，因而大大延缓了输出起动。使用一个低噪音噪声、高 PSRR 的 LDO 与一蹶快速充电电路（如 TPS793/4/5/6xx 或某 TPS799xx 系列产品）就可解决这个问题。甚至用一个相当大的 0.01  $\mu\text{F}$  噪声消除电容器，这些 LDO 仍然能在仅仅 50 至 100  $\mu\text{s}$  时间内起动。

LDO 内的另一个噪声源是电阻分压器网络。此噪声属热噪声，等于 4kTR（有时称为 4kTR 噪声），k 是 Boltzmann 常数，T 是温度，单位为绝对温度 K，R 是电阻。电阻分压器与 LDO 差分放大器的输入相连，因而 LDO 的闭环增益放大了这个噪声。当计算此噪声源时，可以仅用 R1 与 R2 并联，这是因谓运算放大器输入将 R1 与 R2 当作实

际上的并连。所以，要想抑制噪声源，最重要的是要记住较小的反馈电阻产生较少的热噪声。当然，使用较小电阻的缺点是反馈分压器会消耗更大的电流；但如果噪声要求很重要，就必须付出这个代价。

另一个噪声源是内部 LDO 差动放大器，它通常被设计为输入撰具有大量增益——更准确地说，是互导( $g_m$ )。这样，当来自输入撰之后信号通道中的器件的任何噪声被反馈回输入时，噪声就会被输入撰的增益减弱。除内部电路之外，臆有可以抑制该噪声源的其它办法。

许多人对巨大的电源导通 FET——通常占用 LDO 内裸片总面积的至少一半，但却不是主要的噪声因素而感到惊讶。而增益的缺乏是其原因。所有主要噪声源（湍噪、电阻分压器以及运算放大器输入级）都与差动放大器的输入相连，因而不受任何内部增益的抑制。须记住的是，寻找输出噪声的第一步是将各噪声因素导入运算放大器输入；要找到导通 FET 的噪声，须首先根据存在于它与运算放大器输入之间的闭环增益将它噪声因素区分开。这个增益一般相当大；所以通常可以忽略来自导通 FET 的噪声影响。

同样令人惊讶的是，输出电容、负载电流甚至输入电压对输出噪声都不产生任何直接影响（至少在一阶内）。然而，负载电流与输出电容的确有间接的二阶影响。如前文所述，输出噪声由闭环增益乘以输入参考噪声计算的。在整个频率范围内，闭环增益并不恒等于 $V_{OUT}/V_{BG}$ ，当然在高频时闭环增益会逐渐降低(roll off)。

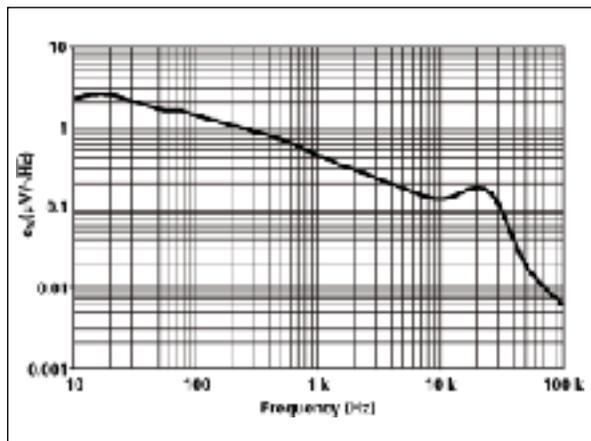
反馈分析的一个基本法则是低相位裕度会在单位增益频率附近产生闭环增益峰值。由于闭环增益会放大噪声，此峰值在那个频率范围内产生更大的噪声，因而增大了总的输出噪声。这种效应可常在频谱噪声强度图（如图 2）中看到。

由于高负载电流与低输出电容都会降低 LDO 的稳定性，减少相位裕度，因此二者均会产生输出噪声。相位裕度的减少增大了闭环增益的峰值，因而增大了输出噪声。另一个显著效应是大 ESR 电容实际上常常降低噪声。这是因为更大的 ESR 产生较低频率的零点，这常常能提高 LDO 的稳定性。最后，请注意峰值效应解释了为什么（如前文所述）3.0 V 稳压器的输出噪声电压通常并不等于 1.5 V 稳压器的输出噪声电压的两倍。由于 3.0 V 稳压器具有更小的反馈系数，因而它往往比 1.5 V 稳压器更稳定一些。经过改变的稳定性增大了相位裕度，降低了闭环峰值，因而降低了输出噪声电压。

最后一个偶尔用来降低噪声的方法是，在电阻反馈分压器的顶部电阻(top resistor)上添加一个电容。这种方法之所以有效是因为在高频时电容开始减小闭环增益，因而减小了噪声，所以这个系统看似一个不产生噪声增益的单位增益反馈配置。代价是可能显著延缓启动时间，因位电容器不得不由电阻分压器内的电流充电。TPS799xx 通过内部电容来实施这项技术，此外它还配置了一个快速充电电路。

总之，在 LDO 应用中有许多方法可降低噪声。最重要的是要从针对低噪声应用而精心优化的低噪声、高 PSRR LDO 著手，如

圖 2：頻譜雜訊密度的範例



TPS793/4/5/6xx 系列或低 Iq TPS799xx 产品系列。第二种方法是用于起动的噪声抑制电容应属可能地大，同时须注意的是电容增大至某个值时效果不再增加。最后，如果可能的话，电阻分压器网络采用小电阻（如果 LDO 可调），且采用小电容穿过顶部的电阻。还有一些效果不太明显的方法：优化输出电容与负载电流以获得最大的相位裕度，来降低闭环峰值。有时，通过研究 LDO 产品说明书提供的稳定性图表常常可以优化稳定性。

#### Related Web Sites

相關網頁 [www.ti.com/sc/device/partnumber](http://www.ti.com/sc/device/partnumber) 查找時，請用 TPS79301、TPS79401、TPS79501、TPS79601 或 TPS79901 代替部件號

## 重要声明

德州仪器 (TI) 及其下属子公司有权在不事先通知的情况下, 随时对所提供的产品和服务进行更正、修改、增强、改进或其它更改, 并有权随时中止提供任何产品和服务。客户在下订单前应获取最新的相关信息, 并验证这些信息是否完整且是最新的。所有产品的销售都遵循在订单确认时所提供的 TI 销售条款与条件。

TI 保证其所销售的硬件产品的性能符合 TI 标准保修的适用规范。仅在 TI 保修的范围内, 且 TI 认为有必要时才会使用测试或其它质量控制技术。除非政府做出了硬性规定, 否则没有必要对每种产品的所有参数进行测试。

TI 对应用帮助或客户产品设计不承担任何义务。客户应对其使用 TI 组件的产品和应用自行负责。为尽量减小与客户产品和应用相关的风险, 客户应提供充分的设计与操作安全措施。

TI 不对任何 TI 专利权、版权、屏蔽作品权或其它与使用了 TI 产品或服务的组合设备、机器、流程相关的 TI 知识产权中授予的直接或隐含权限作出任何保证或解释。TI 所发布的与第三方产品或服务有关的信息, 不能构成从 TI 获得使用这些产品或服务的许可、授权、或认可。使用此类信息可能需要获得第三方的专利权或其它知识产权方面的许可, 或是 TI 的专利权或其它知识产权方面的许可。

对于 TI 的数据手册或数据表, 仅在没有对内容进行任何篡改且带有相关授权、条件、限制和声明的情况下才允许进行复制。在复制信息的过程中对内容的篡改属于非法的、欺诈性商业行为。TI 对此类篡改过的文件不承担任何责任。

在转售 TI 产品或服务时, 如果存在对产品或服务参数的虚假陈述, 则会失去相关 TI 产品或服务的明示或暗示授权, 且这是非法的、欺诈性商业行为。TI 对此类虚假陈述不承担任何责任。

可访问以下 URL 地址以获取有关其它 TI 产品和应用解决方案的信息:

### 产品

放大器	<a href="http://www.ti.com.cn/amplifiers">http://www.ti.com.cn/amplifiers</a>
数据转换器	<a href="http://www.ti.com.cn/dataconverters">http://www.ti.com.cn/dataconverters</a>
DSP	<a href="http://www.ti.com.cn/dsp">http://www.ti.com.cn/dsp</a>
接口	<a href="http://www.ti.com.cn/interface">http://www.ti.com.cn/interface</a>
逻辑	<a href="http://www.ti.com.cn/logic">http://www.ti.com.cn/logic</a>
电源管理	<a href="http://www.ti.com.cn/power">http://www.ti.com.cn/power</a>
微控制器	<a href="http://www.ti.com.cn/microcontrollers">http://www.ti.com.cn/microcontrollers</a>

### 应用

音频	<a href="http://www.ti.com.cn/audio">http://www.ti.com.cn/audio</a>
汽车	<a href="http://www.ti.com.cn/automotive">http://www.ti.com.cn/automotive</a>
宽带	<a href="http://www.ti.com.cn/broadband">http://www.ti.com.cn/broadband</a>
数字控制	<a href="http://www.ti.com.cn/control">http://www.ti.com.cn/control</a>
光纤网络	<a href="http://www.ti.com.cn/opticalnetwork">http://www.ti.com.cn/opticalnetwork</a>
安全	<a href="http://www.ti.com.cn/security">http://www.ti.com.cn/security</a>
电话	<a href="http://www.ti.com.cn/telecom">http://www.ti.com.cn/telecom</a>
视频与成像	<a href="http://www.ti.com.cn/video">http://www.ti.com.cn/video</a>
无线	<a href="http://www.ti.com.cn/wireless">http://www.ti.com.cn/wireless</a>

邮寄地址: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265  
Copyright © 2006, Texas Instruments Incorporated