

如何利用电压输入到输出控制自动优化LDO稳压器的效率

Kristian Cruz, 应用工程师

摘要

低压差(LDO)稳压器是为噪声敏感设备供电的可靠工具。除了提供直接电源轨外，LDO稳压器还能对其他电源进行后置调节。来自开关转换器的噪声会渗透到许多设计中，通常需要下游LDO稳压器来消除噪声。LDO稳压器虽然有效，但其功耗可能对系统效率产生负面影响。专门设计的电压输入到输出控制(VIOC)引脚可通过单一连接降低功耗并提高效率。VIOC引入了对开关转换器的自动控制，可使系统实现出色效率。本文重点介绍一款超低噪声LDO稳压器，其性能优于无VIOC的LDO稳压器。

引言

人们在日常生活的许多领域都依赖精密电子设备。这些设备可以提供精密医疗诊断，对最终产品进行质量控制，准确测量水和空气中的化学物质浓度，等等。测试设备和仪器仪表中内置的精密硬件由对噪声敏感的器件组成，在设计和测试中需要复杂的规划以降低噪声。降低系统噪声的一个关键方面是电源轨。电源轨必须能够提供噪声和纹波极小的电压，以便在噪声敏感型应用中提供优异性能。相反，为信号链提供高噪声电源轨会导致系统性能不佳。LDO稳压器是一种能提供低噪声电源的器件。

LDO稳压器通过简单的电阻分压器设置或单电阻设置可靠地降低并调节直流电压。LDO稳压器提供干净的低噪声输出，但与另一种稳压器件，即开关模式电源(SMPS)相比，存在效率较低的缺点。现代SMPS器件的效率超过90%。然而，由于电感上电流的快

速切换，开关转换器会产生类似于三角波形的电流，导致其输出具有高噪声。电感的电压与流经其中的电流的差分电流成正比。图1显示了电流波形的示例。

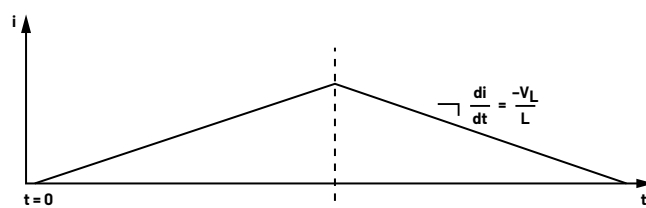


图1. 降压转换器的输出电流。

开关转换器还会产生频率为其开关频率的电压杂散和更高频谐波。这可以在任何开关转换器的频谱噪声内容中显示出来。电压噪声图像如图2所示。

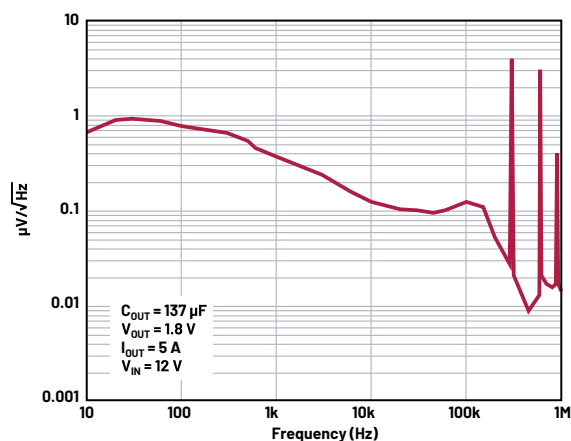


图2. 开关转换器的电压噪声。

对开关转换器的输出进行滤波可降低噪声。然而，这需要大容量电容，会引入等效串联电阻(ESR)之类的寄生效应。ESR会增加电源的功耗，并且可能导致效率降低。除了开关噪声纹波之外，开关转换器还容易受到宽带噪声、高频尖峰和振铃的影响。

将开关转换器与后置调节LDO稳压器相结合可减轻噪声。在开关转换器下游使用LDO稳压器，既能获得开关转换器的效率，又能获得LDO稳压器固有的电源抑制比(PSRR)，使高噪声输出得以净化。然而，受LDO稳压器上的压降影响，这种方案仍然存在效率低下的问题。

ADI公司专门设计的VIOC技术通过降低下游LDO稳压器的压降来满足低噪声和高效率这两个相互矛盾的要求。VIOC是一种主动控制系统，可提供来自LDO稳压器的反馈以调节开关转换器的输出电压。采用VIOC的LDO稳压器可自动优化开关转换器的输出电压。本文将讨论VIOC功能的技术细节，提供效率改进的实验证据，并考虑VIOC用于可变下游电源轨的其他可能方式。

用于后置调节的LDO稳压器

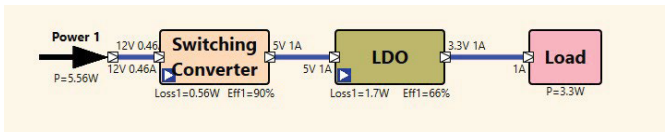


图3. 处于后置调节状态的LDO稳压器的框图。

在图3中，开关转换器降低输入电压，为LDO稳压器供电。此输出通常包含纹波，如图4所示。

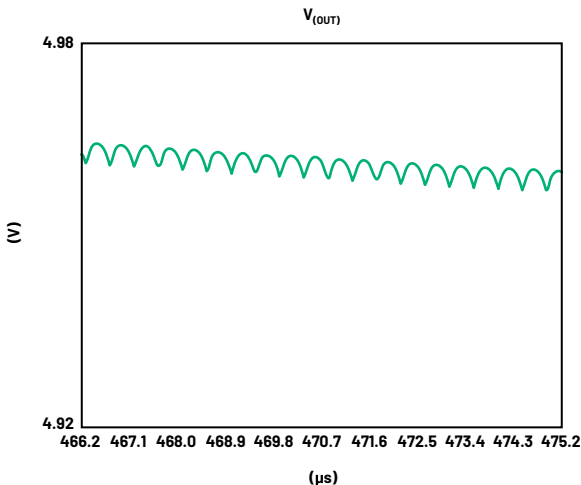


图4. 开关转换器的输出电压。

LDO稳压器降低开关转换器的输出电压，并将其调节至编程设定的输出电压，从而产生精密信号链所需的干净电压信号。PSRR是决定LDO稳压器降噪效果的指标。PSRR可以使用公式计算： $PSRR = |20 \log(\Delta V_{\text{INPUT}}) / (\Delta V_{\text{OUTPUT}})|$ ；此测量通常在10 Hz至1 MHz的

宽频谱上进行。具有高PSRR（例如1 MHz时80 dB）的LDO稳压器可以非常好地衰减开关噪声，因而是净化失真输出电压的理想器件。LDO稳压器输出轨的示例如图5所示。

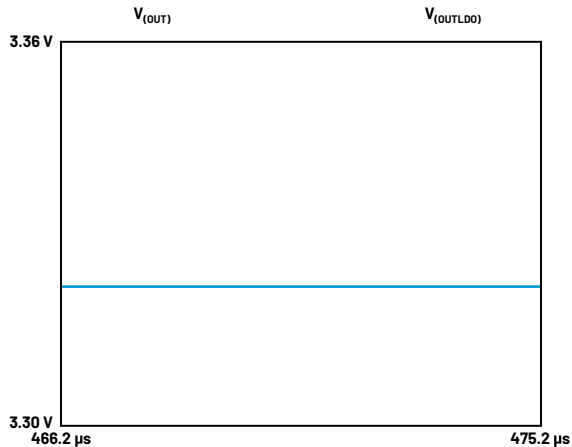


图5. LDO稳压器的输出电压。

虽然后置调节LDO稳压器可以有效地降低电源轨的噪声，但该解决方案效率低下。在图3所示的系统中，开关转换器的效率为90%，而LDO稳压器的效率为66%，整体效率约为59%。

无VIOC的后置调节LDO稳压器的设计挑战

后置调节LDO稳压器面临的挑战是设计一个效率非常高的系统。图3中的低效率表明LDO稳压器存在相当大的功耗，这是较大的输入到输出压差和负载电流导致的。公式1显示了如何计算LDO稳压器的功耗。

$$P_{DISS} = (V_{IN(LDO)} - V_{OUT(LDO)}) \times I_{LOAD} \quad (1)$$

使用ADI公司的具有VIOC功能的超低噪声LDO稳压器，并将其与开关转换器搭配，可提高系统效率。VIOC引脚会使开关转换器将其输出电压调节至理想水平，通过降低LDO稳压器上的压降来提高其效率。

VIOC工作原理

图6演示了具有VIOC功能的LDO稳压器LT3041与上游开关转换器的连接。VIOC和开关转换器反馈(FB)引脚之间的连接确保LDO稳压器上的电压差将被设置为开关转换器FB引脚的稳压电压。通过选择具有低FB电压（通常小于1V）的开关转换器，可以充分地减小LDO稳压器上的电压差，从而提高整体效率。在一个例子中，LT8648S用作上游转换器，其FB引脚电压为600 mV，LDO稳压器上将保持恒定的600 mV压降。通过此连接，VIOC引脚将影响开关转换器的输出，产生满足公式2的输入电压信号。

$$V_{OUT(SWITCHER)} = V_{IN(LDO)} = V_{OUT(LDO)} + V_{VIOC} \quad (2)$$

通过设置LDO稳压器上的电压差，VIOC降低了开关转换器的输出电压，使LT3041成为可靠的省电工具。

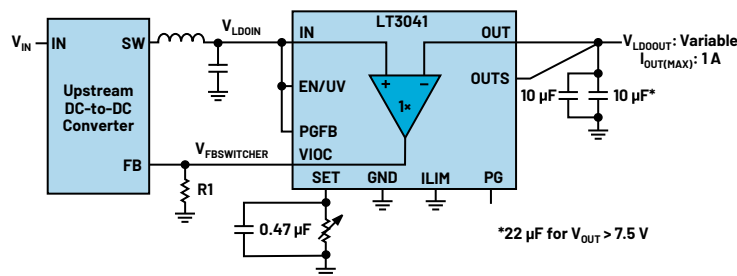


图6. 典型应用电路。

VIOC的优势

图7显示的后置调节LDO稳压器解决方案用于通过实验证明VIOC影响。LT3041的评估套件位于ADI Silent Switcher® 2器件LT8648S的评估套件下游。该开关转换器的FB引脚稳压值约为600 mV, 当FB引脚和VIOC引脚相连接时, LDO稳压器上的电压差约为600 mV。LT8648S评估套件产生5 V输出电压, LT3041评估套件输出3.3 V。以下部分比较了该系统不使用VIOC和使用VIOC时的性能。每个实验都使用来自电源的12 V DC为LT8648S供电。实验结果如表1和表2所示。

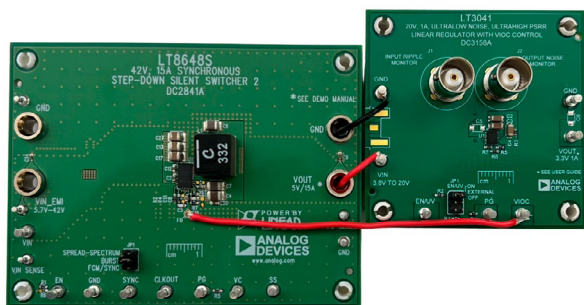


图7. 评估板连接。

在第一个实验中，VIOC引脚未连接，开关转换器将电压调节至接近5V来为LDO稳压器供电。表1显示LDO稳压器的效率约为67%，这与图3中预期的相同，因为LDO稳压器的主要功能是对开关转换器的输出进行后置调节。虽然该解决方案可产生干净的电源轨，但效率低下。如前所述，效率低下的原因是LDO稳压器因电压差而消耗大量功率。

表1. LT3041后置调节LT8648S，不使用VIOC

I_{OUT} (A)	V_{IN} LDO (V)	V_{OUT} LDO (V)	VI_{OC} (V)	P_D LDO (mW)	LDO效率
0.1	4.981	3.310	1.667	167	66.4
0.5	4.948	3.308	1.629	815	66.8
1	4.904	3.306	1.577	1577	67.4

在第二个实验中, LT8648S和LT304I之间的V_{IOC}连接导致开关电源将其输出电压调节至 $V_{\text{OUT(LDO)}} + V_{\text{VIOC}}$ 。当V_{IOC}引脚连接到反馈引脚时, $V_{\text{VIOC}} = V_{\text{FB}} = 600 \text{ mV}$ 。LT304I的 V_{OUT} 为3.3 V, 因此LDO稳压器的输入电压结果约为3.9 V。表2显示了所产生的LDO稳压器输入电压。

表2. LT3041后置调节LT8648S. 使用VIOC

I _{OUT} (A)	V _{IN} LDO (V)	V _{OUT} LDO (V)	V _{IO} C (V)	P _D LDO (mW)	LDO效率
0.1	3.926	3.309	0.610	61.02	84.3
0.5	3.904	3.308	0.584	291.89	84.7
1	3.901	3.306	0.575	574.70	84.7

具有VIOC功能的LT3041成功降低了LDO稳压器上的电压差，从而提高了效率。VIOC引脚不是传递来自开关转换器的5 V信号，而是强制开关转换器产生约3.9 V的电压。通过VIOC连接，LDO稳压器压差降至约600 mV，而其他实验则有1.7 V的电压差。LDO稳压器的输入电压降低后，效率达到约84%（如表2所示），与之前的实验相比，效率提高了17%，功耗降低了2.7倍。尽管这两个系统输出相同的功率，但功耗却有很大差异。对于任何给定负载，使用VIOC的LDO稳压器的性能将优于不使用VIOC的LDO稳压器。借助VIOC，系统能够为LDO稳压器提供理想的电压。

VIOC和开关转换器反馈引脚之间的连接并不能保证实现VIOC的省电优势。VIOC可以降低但不能提高开关转换器的输出电压。遵循不等式 $V_{OUT(SWITCHER)} > V_{OUT(LDO)} + V_{VIOC}$ 可确保VIOC带来省电的好处。如果违反上述不等式，则LT3041仍会调节其输出电压，但不会优化开关转换器的输出电压。

以下实验是系统突破其临界值以确保省电的示例。在此测试中，LDO稳压器的输出电压发生变化，产生标称4.32 V输出。从表3可以看出， $V_{OUT(LDO)} + V_{VIOC}$ 尚未超过开关转换器的5 V稳压输出电压，这使得VIOC能够进行省电方面的优化。请注意，开关稳压器提供的输入电压满足 $V_{IN(LDO)} = V_{OUT(LDO)} + V_{VIOC}$ 。此外，LDO稳压器通过VIOC保持约600 mV的压降。如果不使用VIOC，LDO稳压器将传递约5 V的输入电压。表4显示了不使用VIOC的系统，开关转换器输出为5 V。请注意，LDO稳压器的输入电压比表3中的值更接近5 V。虽然采用VIOC的LDO稳压器的效率略有提高，但表3和表4中的数据表明，VIOC会降低功耗，即使幅度较小。

表3. LT3041后置调节LT8648S，使用VIOC

I_{OUT} (A)	V_{IN} LDO (V)	V_{OUT} LDO (V)	V_{IOC} (V)	P_D LDO (mW)	LDO效率
0.1	4.96	4.33	.607	62.2	87.4%
0.5	4.94	4.33	.581	305.2	87.6%
1	4.90	4.33	.561	559.8	88.5%

表4. 不使用VIOC的输入电压

I_{OUT} (A)	V_{IN} LDO (V)	V_{OUT} LDO (V)	LDO效率
0.1	4.989	4.34	86.9%
0.5	4.987	4.34	87.0%
1	4.982	4.34	87.1%

一些具有可变负载电压的应用会导致 $V_{OUT_LDO} + V_{VIOC}$ 超过开关稳压器的稳压输出电压。考虑具有5 V稳压输出和600 mV FB电压的LT8648S稳压器，其与LT3041搭配，但后者现在输出5 V电压。当使用VIOC时，基于公式 $V_{IN(LDO)} = V_{OUT(LDO)} + V_{VIOC}$ ，这些器件的组合导致LDO稳压器的输入电压为5.6 V。此值远大于开关稳压器的5 V输出。这种情况会使LDO稳压器的省电功能无效。

针对可变负载的省电

在负载可变的情况下，可以使用三个电阻对VIOC进行编程，如图8所示。这种配置可以通过设置电阻R1、R2和R3来对输入到输出压差进行编程。要正确调整这三个电阻的大小，请参阅LT3041数据手册。虽然这种方法在省电方面不如将VIOC直接连接到开关转换器的反馈引脚那么有效，但对于具有可变负载的应用来说仍然可靠。通过将电压差编程为设定电压，尽管输出电压可变，用户仍能够利用LDO稳压器上的恒定压降。图8是带有和不带有这些电阻的可变负载场景的示例。

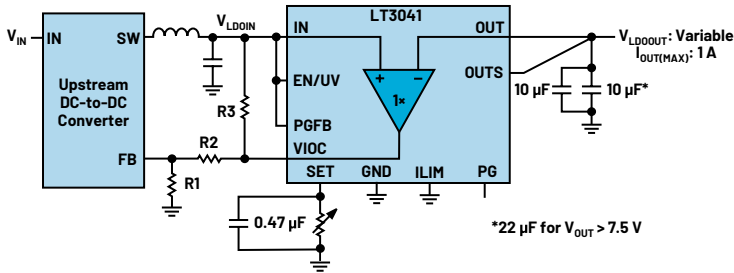


图8. 可变负载电路配置。

考虑图9中的框图，它表示一个LDO稳压器，不使用VIOC对开关转换器进行后置调节。开关转换器产生6.5 V输出，LDO稳压器产生5 V输出。

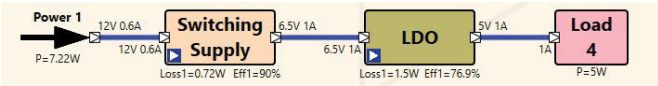


图9. 无VIOC的5 V LDO稳压器输出。

该系统导致LDO稳压器上的压降为1.5 V，功率损耗为1.5 W。由于负载可变，LDO稳压器的输出电压会发生变化。在此示例中，LDO稳压器的输出电压降至3.3 V，如图10所示。



图10. 不使用VIOC的3.3 V输出。

新的3.3 V负载导致LDO稳压器上的压降为3.2 V，功率损耗为3.2 W，LDO稳压器效率从79.9%降至50.8%。

相比之下，设置图8所示的电阻可以消除可变负载下功耗和效率的波动。考虑先前的场景，如图10所示，但LDO稳压器使用VIOC，三个电阻将电压差设置为1.5 V。开关转换器将输出 $V_{OUT(SWITCHER)} = V_{DIFFERENTIAL(LDO)} + V_{OUT(LDO)}$ 。当可变负载导致输出电压从5 V降至3.3 V时，开关转换器的输出电压降至4.8 V，而不是其编程设定的6.5 V输出，如图11所示。

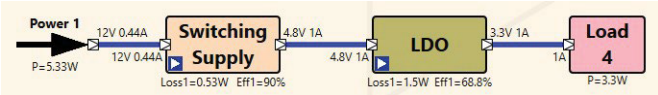


图11. 使用VIOC的3.3 V输出。

通过三个电阻对电压差进行编程，将LDO稳压器上的压降设置为恒定的1.5 V。对于1 A负载，LDO稳压器会损失1.5 W的功率，而不是3.2 W的功率。借助VIOC和三个电阻，当负载电压降至3.3 V时，LDO稳压器可节省一倍以上的功耗。该连接使得3.3 V负载的效率达到68.8%，而对于相同的负载，之前场景的效率为50.8%。虽然这两个系统提供相同的功率，但采用VIOC的LDO稳压器供电效率更高。

结论

总体而言，使用VIOC的LDO稳压器的性能优于不使用VIOC的LDO稳压器。具有VIOC功能的ADI超低噪声LDO稳压器实现了效率和输出

信号质量的理想平衡。VIOC和LDO稳压器PSRR的结合使LT3041成为一种两用工具，既能处理高噪声输入，又能优化系统效率。当负载变化时，VIOC引脚会自动调整以优化系统。在所有条件下，使用VIOC的LDO稳压器都被证明更优越。它还提高了效率，降低了功耗。使用VIOC的LDO稳压器与不使用VIOC的LDO稳压器之间的主要区别在于VIOC引入的控制功能。通过自动控制，LDO稳压器可以对上游DC-DC转换器进行实时动态调整，从而实现出色效率。自动控制推动ADI技术紧跟电源电路的遥测趋势。随着人们越来越多地使用PMBus®和其他方法收集数据以改善电源系统，VIOC提供了另一重自动电源控制。



作者简介

Kristian Cruz曾加入ADI公司应届大学毕业生轮换计划。Kristian曾任职于核心应用部门，为客户的技术咨询提供支持，也曾任职于电源事业部。他现在是湾区销售部的应用工程师。Kristian拥有加州州立理工大学圣路易斯奥比斯波校区电气工程学士学位。

