

ESR、稳定性和 LDO 调节器

作者：TI Jeff Falin

摘要 由于特定的 ESR 要求,为带有 PNP 或 PMOS 通路元件的 LDO 调节器选择输出电容器可能相当困难。本应用注释解释了为什么需要更高的 ESR 电容器,如何对其加以选择,以及如何确定调节器是否稳定。

正如图 1 给出的典型 PMOS 或 PNP 开环增益曲线图所示,在基于 PMOS 或 PNP 调整元件的 LDO 调节器中有三个重要的极点。主要极点 $F_{(DOM)}$ 在调节器的误差放大器中设置。负载极点 $F_{(LOAD)}$ 由输出电容器和负载形成,因此随负载电流的不同而有所差异。通路设备极点 $P_{(PASS)}$ 由通路元件的寄生电容形成。为了保证任何负反馈系统的稳定,系统的开环增益在相位为 360° 时应在 0dB 之下 (180° 的反馈信号加 180° 误差放大器的反相输入)。换言之,系统必须具备充分的相位边限,这就是说,相移量在增益为 0dB 时保持为 360° 。由于每个极点会产生 90° 的相移和 $20\text{dB}/10$ 倍频 (或 -1) 的增益滚降,因此为了保证三极点高增益系统的稳定,就需要进行补偿。如果开环增益曲线在达到 0dB 之前以 $20\text{dB}/10$ 倍频的速度滚降 (也就是说,像单极点系统一样),那么我们就说调节器无论在何种条件下都是稳定的 (也就是说,有足够的相位边限)。最常见的补偿方法是在系统中插入零来取消相移和一个极点的滚降。由于 LDO 已经就正常运行要求了一个输出电容器,因此使用输出电容器的 ESR 通常就是最简单也最廉价的生成零的方法。

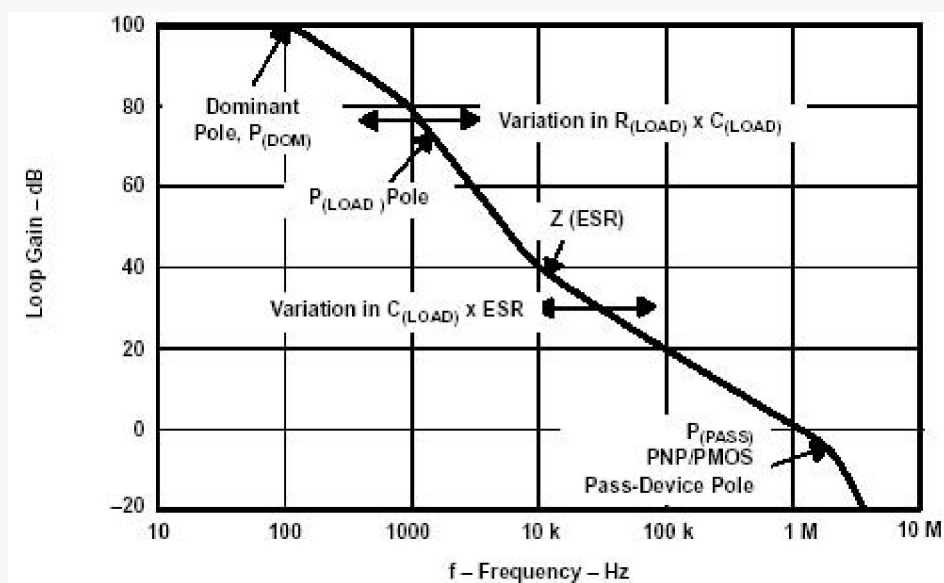


图 1、典型 PMOS 或 PNP LDO 调节器的开环响应

挑战在于如何选择一个具有正确 ESR 量的电容器。ESR 必须足够高,以降低 $f_{(ESR)}$ 频率,从而保证增益变化斜线在达到 0dB 时为 $-20\text{dB}/10$ 倍频,而不是 $-40\text{dB}/10$ 倍频 (-2),但它也要足够低,从而保证 $f_{(ESR)}$ 频率足够高,这样增益才能在 $F_{(PASS)}$ 之前达到 0dB 。

以下。

在 TI 的大多数调节器数据表单中，都会指定最低电容器值，并给出输出电容器（通常还有另一个电容器）的 ESR 和输出电流。图 2 显示了 TPS76050 的典型曲线。

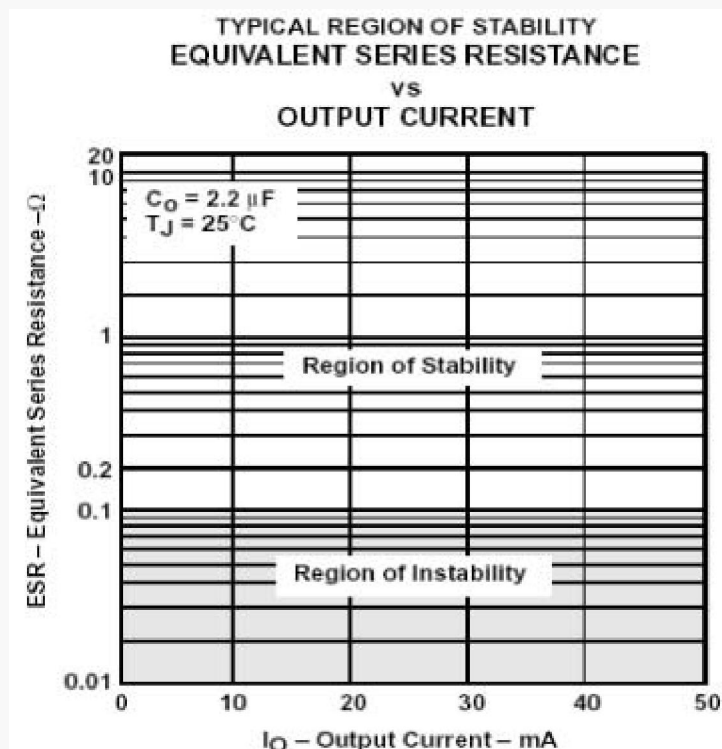


图 2、典型的 ESR - 输出电流

该设备的曲线就最低的 2.2-μF 输出电容器要求 ESR 必须在 0.1 和 20 之间。电容器的 ESR 一般不超过 2，因此这里 ESR 的上限通常可忽略。下限实际上设置了 $f_{(ESR)}$ 的最大值。就图 2 给出的 2.2-μF 电容器而言， $f_{(ESR)}$ 的最大值如下：

$$f_{(ESR)} = 1 / (2 \times 10^{-6} \times 2.2 \times 10^{-6} \times 100) = 72.5 \text{ kHz}$$

因此，任何大于 $0.1 \times 2.2 \times 10^{-6} = 2.2 \times 10^{-7}$ （但小于 $20 \times 2.2 \times 10^{-6} = 4.4 \times 10^{-5}$ ）的电容和 ESR 产品，只要其电容大于所要求最小值，就都是稳定的。图 2 给出的曲线反映了这一点。使用更大电容器的 LDO 调节器与较小的 ESR 在一起就是稳定的。事实上，更大的电容和 / 或较小的 ESR 值能够改善输出瞬时反应。

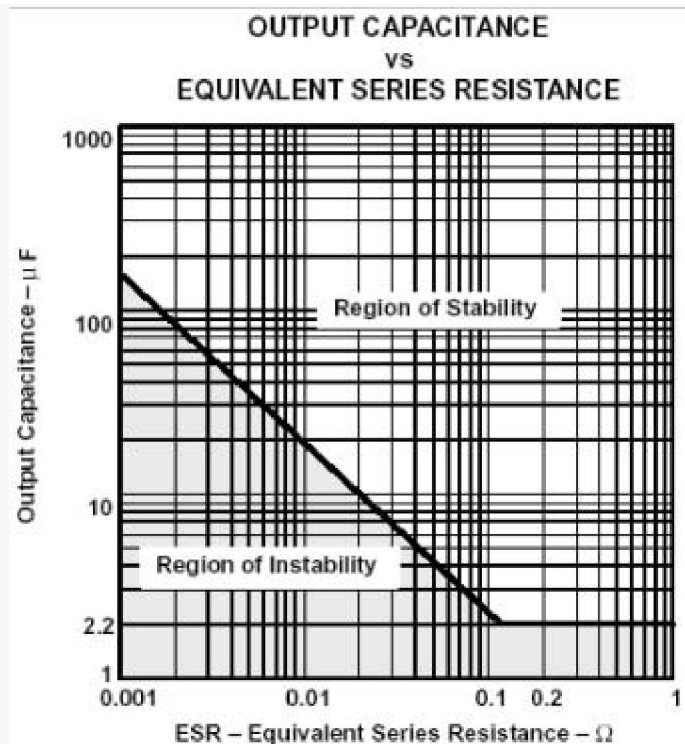


图 3、输出电容 - ESR 示例

图 4 显示了电容器阻抗曲线的一般形状。电容器开始具有电容性 (X_C)，随后在其谐振点附近带有电阻性 (ESR)，最后在高频率时带有电感性 (X_L)。曲线 (Z) 的阻抗是上述每个成分的结合。

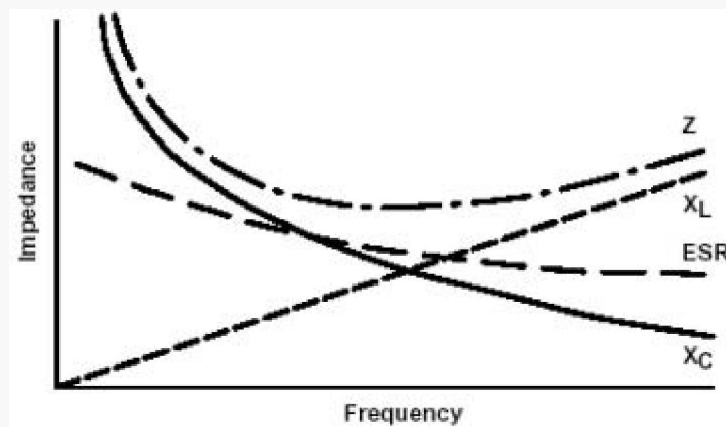


图 4、电容器阻抗曲线的一般形状

电容器通常都以特定频率上的最大 ESR 确定。该频率通常在 1k Hz 和 10k Hz 之间，且位于谐振点附近。为了保证电容器的最小 ESR 不低于最低 ESR 要求，设计人员应当向制造商处请求获得整个有关温度范围内的 ESR - 频率曲线。某些制造商可能提供此信息。如果阻抗曲线可用的话，那么曲线停止下降而保持水平的区域就是电容器的 ESR 决定电容的地方。

我们也可以将小型的低 ESR 的电阻器与陶瓷电容器串联在一起。该电阻器必须能够适应温度要求，能在稳定曲线许可范围内保持其值。

进行负载瞬变测试并观察输出的振荡量是确定所选电容是否稳定的最佳途径。图 5 显示了以 MOSFET 开关和函数生成器进行负载瞬变测试的测试设置。该设置适用于大多数电子负载，因为模拟的瞬变要快得多。

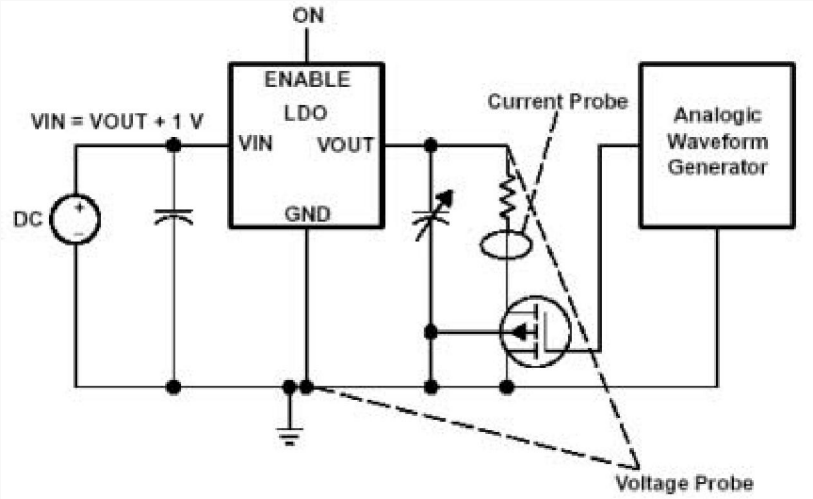


图 5、负载瞬变设置

图 6 显示了以带有 $2.2\mu\text{F}$ 陶瓷（低 ESR）电容器的 TPS7605 设备所得出的测量结果。图 7 显示了以带有 $2.2\mu\text{F}$ 陶瓷电容器和 1Ω 串联电阻器的 TPS7605 设备所得出的测量结果。图 6 中的结果显示了初始尖峰脉冲后的多次摆动和振荡，而图 7 中的结果则显示了稳定的负载瞬变。通常说来，四次或更少的振荡则反映出已具备足够的相位容限，设备能够保持稳定。

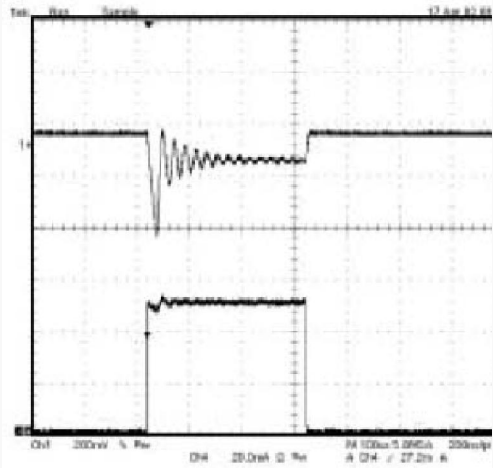


图 6、带有 $2.2\mu\text{F}$ 陶瓷电容器的 TPS7605 的负载瞬变

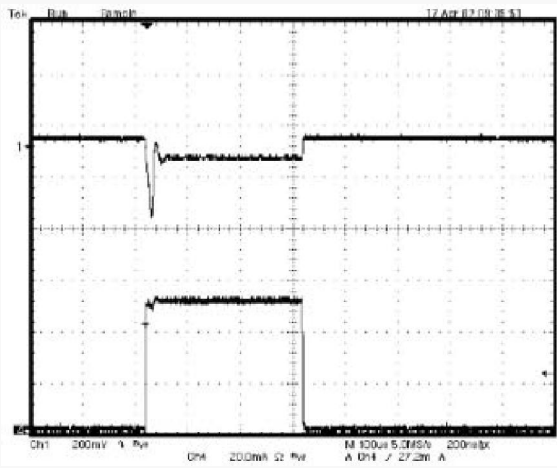


图 7、带有 $2.2\mu\text{F}$ 陶瓷电容器和 1Ω ESR 的 TPS7605 的负载瞬变