

Product Overview

适用于电池供电应用的低 I_Q 低压降稳压器



1 简介

现代低 I_Q LDO 旨在通过尽可能减少消耗的静态电流（尤其是在轻负载或空载条件下）来更大幅度地降低功耗。这种侧重于超低 I_Q 的设计可以实现更高效的电源管理，并简化主要在待机或空闲状态下运行的产品的系统设计。在这些状态下，必须尽可能降低功耗以更大幅度地延长电池寿命（图 1）。

德州仪器 (TI) 提供各种低 I_Q LDO（表 1），专为满足多种输入电压范围和输出电流要求而设计，可满足不同的系统需求。

表 1. 低 I_Q LDO 电压与电流间的关系

锂聚合物电池组电压 ⁽¹⁾	$I_{OUT} < 300\text{mA}$	$300\text{mA} \leq I_{OUT} \leq 500\text{mA}$
$V_{IN} > 60\text{V}$ ($V_{IN} > 14\text{s}$)	TPS7A43	-
$40\text{V} < V_{IN} \leq 60\text{V}$ ($9\text{s} < V_{IN} \leq 14\text{s}$)	TPS7A16A	-
$30\text{V} < V_{IN} \leq 40\text{V}$ ($7\text{s} < V_{IN} \leq 9\text{s}$)	TPS7E81	TPS7E82
$18\text{V} < V_{IN} \leq 30\text{V}$ ($4\text{s} < V_{IN} \leq 7\text{s}$)	TLV709	TPS7E72
$7\text{V} \leq V_{IN} \leq 18\text{V}$ ($1\text{s} < V_{IN} \leq 4\text{s}$)	TPS7A24	TPS7A26
$V_{IN} < 7\text{V}$ ($V_{IN} = 1\text{s}$)	TPS7A02	TPS7A11

(1) $Xs = 3.7\text{V}$ 乘以串联电芯数量 (X)

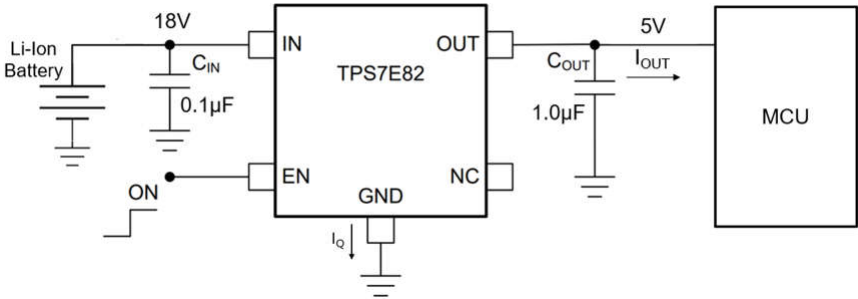


图 1. 由多节电池供电的 TPS7E82

表 2 重点介绍了按最大输入电压排序的 TI 新款高端低 I_Q LDO，并提供许多低 I_Q 系统设计人员用于选择器件的电气规格。

表 2. 低 I_Q LDO 电气规格

器件	输入电压 (最大值)	输出电流 (最大值)	静态电流 (I_Q)	关断电流 ($I_{SHUTDOWN}$) ⁽²⁾	精度 ⁽³⁾	可用封装	封装尺寸 ⁽¹⁾	热阻 ($R_{\theta JA}$)
TPS7A43	85V	50mA	5.5 μ A	710nA	$\pm 0.75\%$	HVSSOP	3mm $\times$ 4.9mm	53.7°C/W
TPS7A16A	60V	100mA	5 μ A	590nA	$\pm 2\%$	HVSSOP	3mm $\times$ 4.9mm	52.5°C/W
TPS7E82	40V	300mA	2.8 μ A	450nA	$\pm 1.2\%$	SOT-23	2.9mm $\times$ 2.8mm	190.9°C/W
						WSO	2mm $\times$ 2mm	90.2°C/W
TPS7E81	40V	150mA	2.8 μ A	450nA	$\pm 1.2\%$	SOT-23	2.9mm $\times$ 2.8mm	190.9°C/W
						WSO	2mm $\times$ 2mm	90.2°C/W
TPS7E72	30V	300mA	2.8 μ A	450nA	$\pm 1.2\%$	SOT-23	2.9mm $\times$ 2.8mm	190.9°C/W
						WSO	2mm $\times$ 2mm	90.2°C/W
TLV709	30V	150mA	3.2 μ A	-	$\pm 4\%$	SOT-89	4.5mm $\times$ 4.095mm	72.5°C/W
						SOT-23	2.9mm $\times$ 2.8mm	195.7°C/W
TPS7A26	18V	500mA	2 μ A	325nA	$\pm 1\%$	WSO	2mm $\times$ 2mm	73.3°C/W
TPS7A24	18V	200mA	2 μ A	325nA	$\pm 1.25\%$	SOT-23	2.9mm $\times$ 2.8mm	167.8°C/W
TPS7A02	6V	200mA	25nA	3nA	$\pm 1\%$	DSBGA	0.637mm $\times$ 0.637mm	201.1°C/W
						SOT-23	2.9mm $\times$ 2.8mm	181.9°C/W
						X2SON	1mm $\times$ 1mm	179.1°C/W
TPS7A11	3.3V	500mA	6 μ A	70nA ⁽⁴⁾	$\pm 1.5\%$	DSBGA	1.13mm $\times$ 0.78mm	169.4°C/W
						WSO	2mm $\times$ 2mm	77.3°C/W

(1) 封装尺寸 (长 $\times$ 宽) 为标称值, 并包括引脚 (如适用)。

(2) 25°C 时测得的典型值。

(3) 线路、负载和温度范围。

(4) 包括输入和偏置电流。

表 3. 低 I_Q LDO 特性比较

	TPS7A43	TPS7E82	TPS7E81	TPS7E72	TLV709	TPS7A26	TPS7A24	TPS7A16A	TPS7A02	TPS7A11
提供可调版本	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
使能逻辑	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓
内部使能上拉和下拉	上拉	上拉	上拉	上拉					下拉	
电源正常	✓					✓		✓		
工作结温 (T_J) 高达 150°C		✓	✓	✓						
瞬态性能 ⁽¹⁾	★★	★★★★	★★★★	★★★★	★	★★	★★	★	★★★★★	★★★★★ ★

(1) 排名基于 TI 对高性能的评定标准 (1 颗 ★ 最低 — 5 颗 ★ 最高)。排名由比较负载阶跃响应决定，并包括线路和负载瞬态。

2 可调反馈电压

虽然可调 LDO 能灵活满足非标准电压要求，但设置输出所需的外部电阻器反馈网络可能会显著增加系统总静态电流 (I_Q)。由于流经分压器的电流与网络的总电阻成反比，因此电阻器的选择直接影响系统的整体功率耗散。为优化电池供电应用的效率，系统必须利用高阻抗电阻网络，以最大限度地减小从输出端汲取的寄生电流。

不过，这种优化必须与调节精度要求之间取得平衡。如果电阻值过高，反馈电流可能与 LDO 内部漏电流相当，从而在反馈引脚处产生电压误差，使输出偏离预期输出。为兼顾系统级低功耗与高精度，一个不错的近似方法是保持流经分压器的电流至少是 LDO 最大预期漏电流的 100 倍。该方法可在不影响电压调节稳定性或精度的情况下显著降低系统总 I_Q 。

3 电源正常

具有电源正常 (PG) 功能的器件有一个集成比较器，可监测相对于内部基准电压的输出电压。

具有 MCU 的应用可配置为保持复位状态或低功耗待机模式，直至其检测到 PG 引脚上的变化。一旦 LDO 输出电压超过内部阈值且 PG 引脚置为高电平有效 (通常通过外部上拉电阻器)，MCU 就会收到电源轨已建立的信号。这可确保处理器仅在电气环境安全且稳定 (图 2) 的情况下开始工作。

此外，PG 引脚还提供初始启动之外的持续监控。如果输入电压显著下降，或如果负载突然变化导致输出电压骤降至安全水平以下，则 PG 引脚拉至低电平。

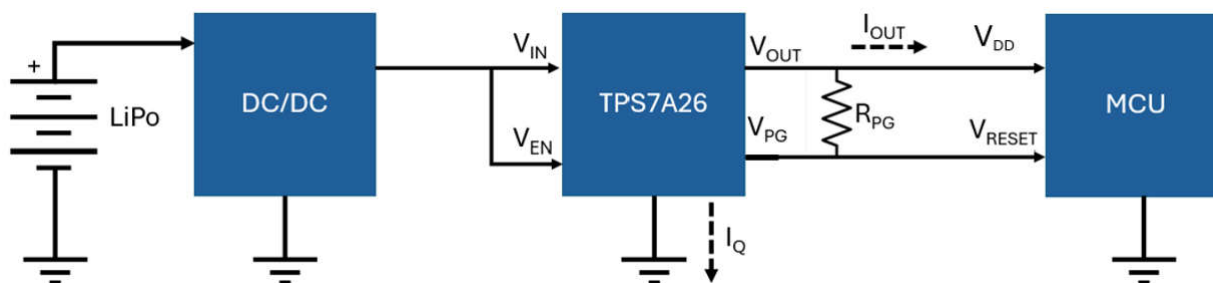


图 2. TPS7A26 使用电源正常状态指示功能

4 使能逻辑

LDO 上的使能 (EN) 引脚使设计人员能够动态打开和关闭 LDO，通过利用较低的关断电流 (I_{SHDN}) 而不是 I_Q 来节省功耗。

表 4 是这两个参数如何影响 TPS7E81 节能的详解示例。

表 4. 动态功率耗散使能

使能电平	条件	从 GND 引脚观察到的电流		输入电压	耗散的功率
		静态电流 (I_Q) ⁽¹⁾	关断电流 (I_{SHDN}) ⁽¹⁾		
$V_{EN} = 2V$ (高电平)	器件开启, $I_{OUT} = 0mA$	7.6 μA	-	12V	91.2 μW
$V_{EN} = 0V$ (低电平)	器件关断	-	1.5 μA		18 μW

(1) 在 TPS7E81 的工作温度范围内, 观察到的最大值为 $V_{OUT} + 0.5V \leq V_{IN} \leq 40V$ 。

LDO 的使能 (EN) 引脚有时带有内部上拉或下拉电阻器, 此时主要考虑的是器件默认状态以及该状态如何影响系统的功率曲线。内部上拉电阻可确保向器件施加输入电压后就会保持 LDO 默认使能状态。这非常适合必须立即激活以支持系统启动 (无需微控制器干预) 的常开电源轨。

相比之下, 当 EN 引脚悬空时, 内部下拉电阻会使 LDO 保持禁用状态。这使得 LDO 在引脚被驱动为高电平之前完全保持未激活状态。

精密 EN (如 TPS7A43 中) 是一项功能, 有助于在固定和准确的阈值电压下使能或禁用 LDO。在电池应用中, V_{IN} 可能会随着电池放电而波动。精密 EN 使系统能够在可预测的特定电压阈值下禁用 LDO, 从而保护下游元件并优化电源使用。

5 封装选择

选择 LDO 时的一个常见误解是认为选择物理尺寸更大的封装会产生更好的热性能, 但情况并非总是如此。LDO 热管理的一个关键因素是 PCB 布局, 如果布局良好, 电路板的散热效果通常优于采用大型封装但布局不良的设计。

表 2 使封装与热阻之间的关系不容忽视。例如, TPS7E82 提供两种业界通用封装: SOT-23 (190.9°C/W) 适用于高占位兼容性, 而 WSON 封装 (90.2°C/W) 适用于注重热性能的设计。尽管 WSON 比 SOT-23 小 50% 以上, 但其热阻改善超过 50%。选择低 $R_{\theta JA}$ 封装只是等式的一半, 因为数据表中发布的 $R_{\theta JA}$ 值根据 JEDEC 标准进行测量和定义。在真实 PCB 设计中, 实际热阻可能会显著优于或劣于理论值, 具体取决于器件周围布局的实现程度 (请参阅 [电路板布局布线对 LDO 热性能影响的经验分析 \[修订版 A\]](#))。

对于具有外露散热焊盘的封装 (例如 WSON 或 HVSSOP), 必须将散热焊盘直接焊接到 PCB 上的覆铜区域, 然后使热量在电路板上横向扩散。更大限度地增加该覆铜区域, 通过散热过孔将其拼接到多层电路板上的内层接地平面, 并避免在焊盘上使用散热连接, 这些措施都能将有效 θ_{JA} 大幅降低至远低于数据表规定值。

6 压降下的受控 I_Q

LDO 中的受控 I_Q 是指稳压器即使在器件处于压降状态工作时也能保持静态电流相对较低的能力。在电池供电的应用中, 当电池放电至 V_{IN} 与 V_{OUT} 之间的差值 (也称为余量 ($V_{HEADROOM}$)) 达到或低于压降电压 (V_{DO}) 时, 可能会发生压降。当 $V_{HEADROOM}$ 达到或低于压降电压时, 误差放大器会努力将导通元件驱动至所需的工作点并饱和, 从而消耗更多的电流, 如图 3 所示。

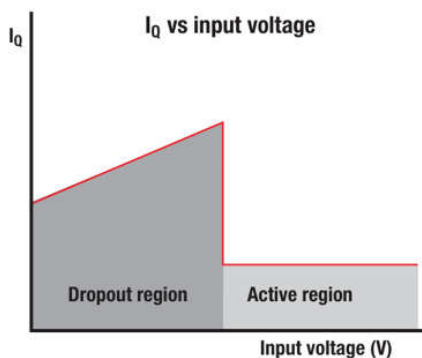


图 3. 压降条件下的典型 LDO I_Q 行为

比较图 3 和图 5 中的 I_Q 响应，突出显示内部电路饱和的影响。虽然图 3 显示了稳定的 I_Q 曲线，但图 5 表现出明显更严重的 I_Q 尖峰，这可能会导致电池消耗增加，并在压降条件下出现意外的电压骤降。

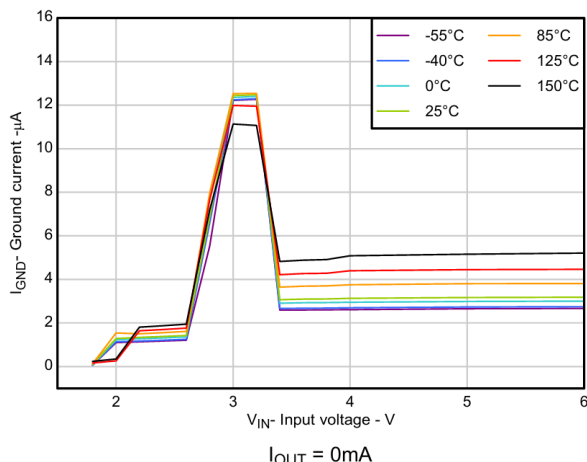


图 4. 比较压降下的 I_Q (受控 I_Q)

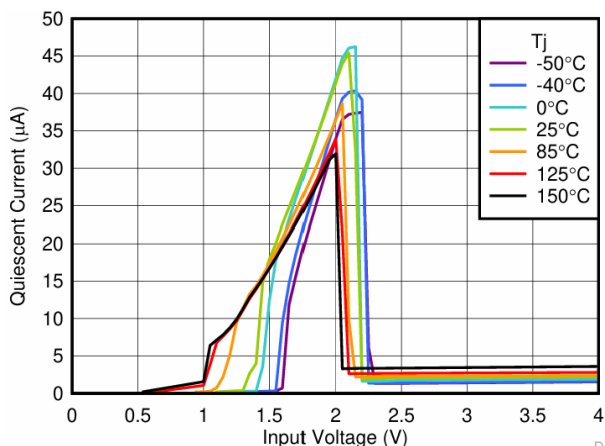


图 5. 比较压降下的 I_Q (典型值)

7 瞬态性能

负载瞬态性能描述了 LDO 在负载变化时保持输出电压的能力。关键指标包括负载阶跃期间的电压偏差 (下冲/过冲) 以及输出稳定回规格范围内所需的趋稳时间。尽可能地减小 LDO 瞬态响应中的这一峰值有助于缩短稳压器使其输出恢复至指定窗口内所需的时间，从而缩短总恢复时间。

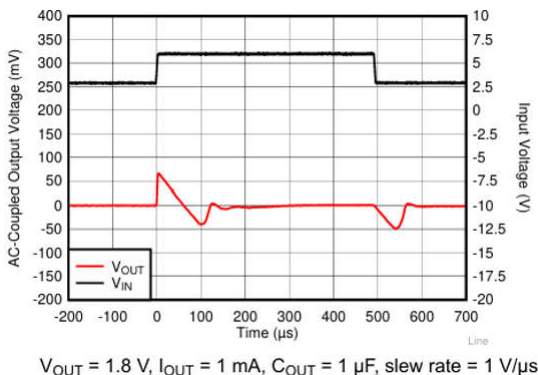


图 6. LDO 线路瞬态示例

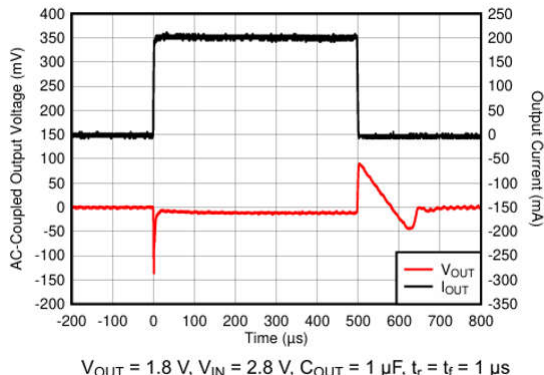


图 7. LDO 负载瞬态示例

当输入电压突然变化时，例如电池在重载使用下电压骤降时，就会发生线路瞬态。当电路的电流需求突然变化时，例如电机启动或 MCU 从睡眠模式唤醒时，就会发生负载瞬态。在这两种情况下，LDO 的输出电压都会短暂下降或出现尖峰，然后再调节回目标电压。在电动工具或家用电器等电池供电应用中，这一点很重要，因为意外的电压下降可能会触发错误的故障情况。具有良好瞬态响应的 LDO 可以快速从这些干扰中恢复，且电压偏差极小，即使在正常使用期间电池电量耗尽或负载开关也能保持可靠运行。请参阅表 3，了解 TI 低 I_Q 产品系列的瞬态性能比较情况。改善 LDO 的瞬态响应需要选择正确的输出电容器类型和值，并保持误差放大器具有足够的带宽，才能快速响应负载阶跃。

8 总结

本概述重点介绍了 TI 的高端低 I_Q LDO 如何因其极低的静态电流消耗，成为在待机或空闲电源应用中更大限度延长电池寿命的关键。除了超低 I_Q 外，这些现代 LDO 还提供集成保护电路和输出电压监测功能，可实现稳定的输出性能，并提升系统的整体功能。

此处查看我们完整的低 I_Q LDO 产品系列。

重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保法规或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月