

# 在系统中成功运用 DC-DC 降压调节器

作者: Ken Marasco

智能手机、平板电脑、数码相机、导航系统、医疗设备和其它低功耗便携式设备常常包含多个采用不同半导体工艺制造的集成电路。这些设备通常需要多个独立的电源电压，各电源电压一般不同于电池或外部 AC/DC 电源提供的电压。

图 1 显示了一个采用锂离子电池供电的典型低功耗系统。电池的可用输出范围是 3 V 到 4.2V，而 IC 需要 0.8 V、1.8 V、2.5 V 和 2.8 V 电压。为将电池电压降至较低的直流电压，一种简单的方法是运用 **低压差调节器(LDO)**。不过，当  $V_{IN}$  远高于  $V_{OUT}$  时，未输送到负载的功率会以热量形式损失，导致 LDO 效率低下。一种常见的替代方案是采用 **开关转换器**，它将能量交替存储在电感的磁场中，然后以不同的电压释放给负载。这种方案的损耗较低，是一种更好的选择，可实现高效率运行。本文介绍 **降压型转换器**，它提供较低的输出电压。**升压型转换器**将另文介绍，它提供较高的输出电压。内置 FET 作为开关的开关转换器称为 **开关调节器**，需要外部 FET 的开关转换器则称为 **开关控制器**。多数低功耗系统同时运用 LDO 和开关转换器来实现成本和性能目标。

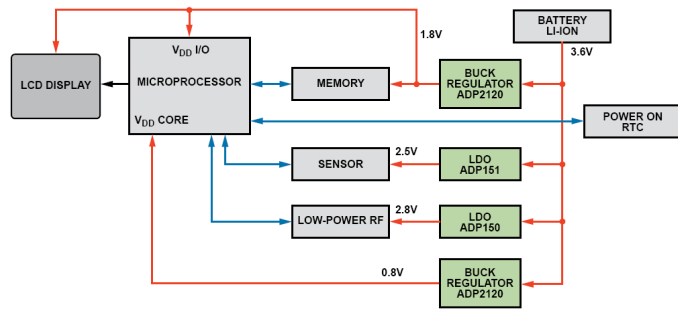


图 1. 典型低功耗便携式系统

降压调节器包括 2 个开关、2 个电容和 1 个电感，如图 2 所示。非交叠开关驱动机制确保任一时间只有一个开关导通，避免发生不良的电流“直通”现象。在第 1 阶段，开关 B 断开，开关 A 闭合。电感连接到  $V_{IN}$ ，因此电流从  $V_{IN}$  流到负载。由于电感两端为正电压，因此电流增大。在第 2 阶段，开关 A 断开，开关 B 闭合。电感连接到地，因此电流从地流到负载。由于电感两端为负电压，因此电流减小，电感中存储的能量释放到负载中。

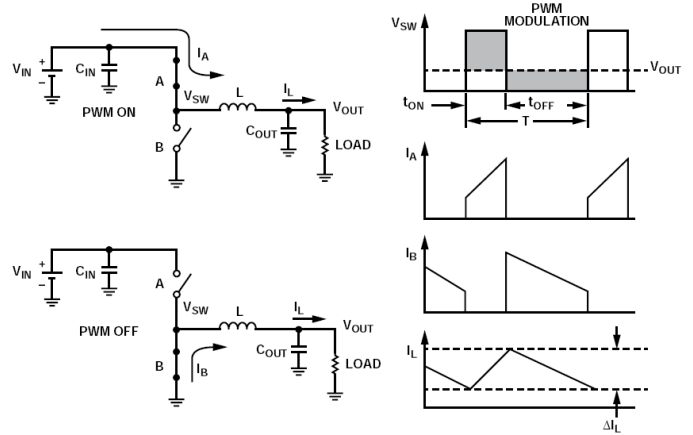


图 2. 降压转换器拓扑结构和工作波形

注意，开关调节器既可以连续工作，也可以断续工作。连续导通以 **连续导通模式(CCM)** 工作时，电感电流不会降至 0；以 **断续导通模式(DCM)** 工作时，电感电流可以降至 0。低功耗降压转换器很少在断续导通模式下工作。设计的 **电流纹波** (如图 2 中的  $\Delta I_L$  所示) 通常为标称负载电流的 20% 到 50%。

在图 3 中，开关 A 和开关 B 分别利用 PFET 和 NFET 开关实现，构成一个同步降压调节器。“同步”一词表示将一个 FET 用作低端开关。用肖特基二极管代替低端开关的降压调节器称为“异步”（或非同步）型。处理低功率时，同步降压调节器更有效，因为 FET 的压降低于肖特基二极管。然而，当电感电流达到 0 时，如果底部 FET 未释放，同步转换器的轻载效率会降低，而且额外的控制电路会提高 IC 的复杂性和成本。

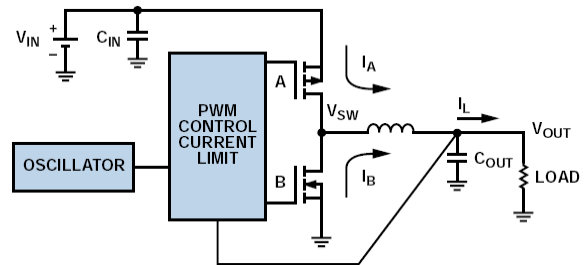


图 3. 降压调节器集成振荡器、PWM 控制环路和开关 FET

目前的低功耗同步降压调节器以脉宽调制 (PWM) 为主要工作模式。PWM 保持频率不变，通过改变脉冲宽度 ( $t_{ON}$ ) 来调整输出电压。输送的平均功率与占空比  $D$  成正比，因此这是一种向负载提高功率的有效方式。

$$D = \frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}} \approx \frac{V_{OUT}}{V_{IN}}$$

FET 开关由脉宽控制器控制，后者响应负载变化，利用控制环路中的电压或电流反馈来调节输出电压。低功耗降压转换器的工作频率范围一般是 1 MHz 到 6 MHz。开关频率较高时，所用的电感可以更小，但开关频率每增加一倍，效率就会降低大约 2%。

在轻载下，PWM 工作模式并不总是能够提高系统效率。以图形卡电源电路为例，视频内容改变时，驱动图形处理器的降压转换器的负载电流也会改变。连续 PWM 工作模式可以处理宽范围的负载电流，但在轻载下，调节器所需的功率会占去输送给负载的总功率的较大比例，导致系统效率迅速降低。针对便携应用，降压调节器集成了其它省电技术，如脉冲频率调制(PFM)、脉冲跳跃或这两者的结合等。

ADI公司将高效率轻载工作模式定义为“省电模式”(PSM)。进入省电模式时，PWM调节电平会产生偏移，导致输出电压上升，直至它达到比PWM调节电平高约 1.5%的电平，此时PWM工作模式关闭，两个功率开关均断开，器件进入空闲模式。C<sub>OUT</sub>可以放电，直到V<sub>OUT</sub>降至PWM调节电压。然后，器件驱动电感，导致V<sub>OUT</sub>再次上升到阈值上限。只要负载电流低于省电模式电流阈值，此过程就会重复进行。

ADP2138 是一款紧凑型 800 mA、3 MHz、降压 DC-DC 转换器。图 4 所示为典型应用电路。图 5 显示了强制 PWM 工作模式下和自动 PWM/PSM 工作模式下的效率改善情况。由于频率存在变化，PSM 干扰可能难以滤除，因此许多降压调节器提供一个 MODE 引脚（如图 4 所示），用户可以通过该引脚强制器件以连续 PWM 模式工作，或者允许器件以自动 PWM/PSM 模式工作。MODE 引脚既可以通过硬连线来设置任一工作模式，也可以根据需要而动态切换，以达到省电目的。

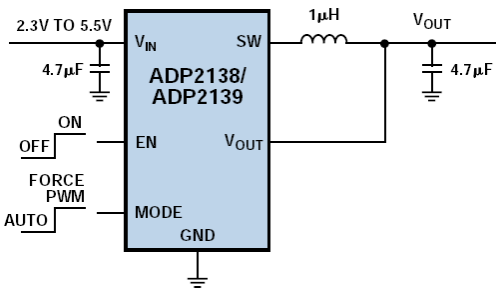


图 4. ADP2138/ADP2139 典型应用电路

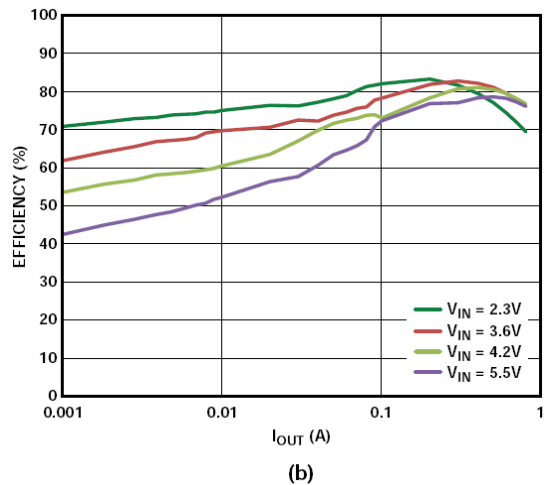
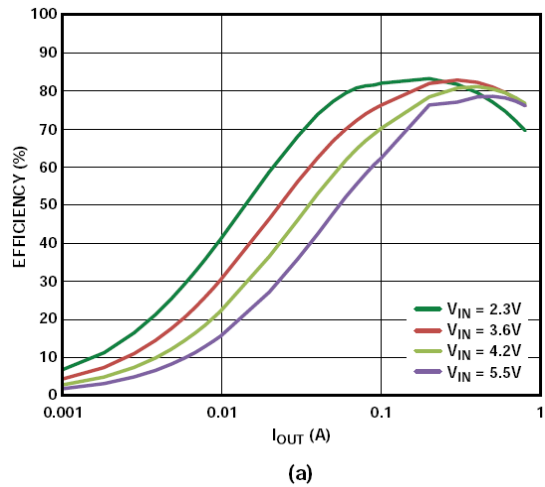


图 5. ADP2138 的效率：(a) 连续 PWM 模式；(b) PSM 模式  
降压调节器提高效率

电池的续航时间是新型便携式设备设计高度关注的一个特性。提高系统效率可以延长电池工作时间，降低更换或充电的频度。例如，一个锂离子充电电池可以使用 ADP125 LDO 以 0.8 V 电压驱动一个 500 mA 负载，如图 6 所示。该 LDO 的效率只有 19% ( $V_{OUT}/V_{IN} \times 100\% = 0.8/4.2 \times 100\%$ )。LDO 无法存储未使用的能量，因此剩余的 81% 的功率 (1.7 W) 只能以热量形式在 LDO 内部耗散掉，这可能会导致手持式设备的温度迅速上升。如果使用 ADP2138 开关调节器，在 4.2 V 输入和 0.8 V 输出下，工作效率将是 82%，比前一方案的效率高出 4 倍多，便携式设备的温度升幅将大大减小。这些系统效率的大幅改善使得开关调节器大量运用于便携式设备。

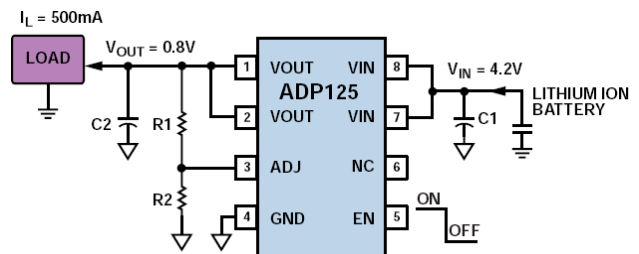


图 6. 低压差调节器 ADP125 可以驱动 500 mA 负载

## 降压转换器关键规格和定义

**输入电压范围：**降压转换器的输入电压范围决定了最低的可用输入电源电压。规格可能提供很宽的输入电压范围，但 $V_{IN}$ 必须高于 $V_{OUT}$ 才能实现高效率工作。例如，要获得稳定的 3.3 V 输出电压，输入电压必须高于 3.8 V。

**地电流或静态电流：** $I_Q$ 是未输送给负载的直流偏置电流。器件的 $I_Q$ 越低，则效率越高。然而， $I_Q$ 可以针对许多条件进行规定，包括关断、零负载、PFM工作模式或PWM工作模式。因此，为了确定某个应用的最佳降压调节器，最好查看特定工作电压和负载电流下的实际工作效率数据。

**关断电流：**这是使能引脚禁用时器件消耗的输入电流，对低功耗降压调节器来说通常远低于 1  $\mu$ A。这一指标对于便携式设备处于睡眠模式时电池能否具有长待机时间很重要。

**输出电压精度：**ADI 公司的降压转换器具有很高的输出电压精度，固定输出器件在工厂制造时就被精确调整到 $\pm 2\%$ 之内（25°C）。输出电压精度在工作温度、输入电压和负载电流范围条件下加以规定，最差情况下的不精确性规定为 $\pm x\%$ 。

**线路调整率：**线路调整率是指额定负载下输出电压随输入电压变化而发生的变化率。

**负载调整率：**负载调整率是指输出电压随输出电流变化而发生的变化率。对于缓慢变化的负载电流，大多数降压调节器都能保持输出电压基本上恒定不变。

**负载瞬变：**如果负载电流从较低水平快速变化到较高水平，导致工作模式在 PFM 与 PWM 之间切换，或者从 PWM 切换到 PFM，就可能产生瞬态误差。并非所有数据手册都会规定负载瞬变，但大多数数据手册都会提供不同工作条件下的负载瞬态响应曲线。

**限流：**ADP2138 等降压调节器内置保护电路，限制流经 PFET 开关和同步整流器的正向电流。正电流控制限制可从输入端流向输出端的电流。负电流限值防止电感电流反向并流出负载。

**软启动：**内部软启动功能对于降压调节器非常重要，它在启动时控制输出电压缓升，从而限制浪涌电流。这样，当电池或高阻抗电源连接到转换器输入端时，可以防止输入电压下降。器件使能后，内部电路开始上电周期。

**启动时间：**启动时间是指使能信号的上升沿至 $V_{OUT}$ 达到其标称值的 90%的时间。这个测试通常是在施加 $V_{IN}$ 、使能引脚从断切换到接通的条件下进行。在使能引脚连接到 $V_{IN}$ 的情况下，当 $V_{IN}$ 从关断切换到开启时，启动时间可能会大幅增加，因为控制环路需要一定的稳定时间。在调节器需要频繁启动和关闭以节省功耗的便携式系统中，调节器的启动时间是一个重要的考虑因素。

**热关断(TSD)：**当结点温度超过规定的限值时，热关断电路就会关闭调节器。极端的结温可能由工作电流高、电路板冷却不佳或环境温度高等原因引起。保护电路包括一定的迟滞，

防止器件在芯片温度降至预设限值以下之前返回正常工作状态。

**100%占空比工作：**随着 $V_{IN}$ 下降或 $I_{LOAD}$ 上升，降压调节器会达到一个限值：即使PFET开关以 100%占空比导通， $V_{OUT}$ 仍低于预期的输出电压。此时，ADP2138 平滑过渡到可使PFET开关保持 100%占空比导通的模式。当输入条件改变时，器件立即重新启动PWM调节， $V_{OUT}$ 不会过冲。

**放电开关：**在某些系统中，如果负载非常小，降压调节器的输出可能会在系统进入睡眠模式后的一定时间内仍然保持较高水平。然而，如果系统在输出电压放电之前启动上电序列，系统可能会发生闩锁，或者导致器件受损。当使能引脚变为低电平或器件进入欠压闭锁/热关断状态时，ADP2139 降压调节器通过集成的开关电阻（典型值 100  $\Omega$ ）给输出放电。

**欠压闭锁：**欠压闭锁(UVLO)可以确保只有在系统输入电压高于规定阈值时才向负载输出电压。UVLO 很重要，因为它只在输入电压达到或超过器件稳定工作要求的电压时才让器件上电。

## 结束语

低功耗降压调节器使开关DC-DC转换器设计不再神秘。ADI 公司提供一系列高集成度、坚固耐用、易于使用、高性价比的降压调节器，只需极少的外部元件就能实现高工作效率。系统设计师可以使用数据手册应用部分提供的设计计算，或者使用ADIsimPower™设计工具。欲查看有关ADI公司降压调节器的选型指南、数据手册和应用笔记，请访问：[www.analog.com/zh/power-management/products/index.html](http://www.analog.com/zh/power-management/products/index.html)。欲了解更多信息，请联系ADI公司应用工程师。

## 参考文献

(Information on all ADI components can be found at [www.analog.com](http://www.analog.com).)

Lenk, John D. *Simplified Design of Switching Power Supplies*. Elsevier. 1996. ISBN 13: 978-0-7506-9821-4.

Marasco, K. "How to Apply Low-Dropout Regulators Successfully." *Analog Dialogue*. Volume 43, Number 3. 2009. pp. 14-17.

## 附录

### 3 MHz 同步降压 DC-DC 转换器驱动 800 mA 负载

ADP2138和ADP2139降压DC-DC转换器针对无线手机、个人媒体播放器、数码相机和其它便携式设备应用进行了优化。二者既可以在强制脉冲宽度(PWM)模式下工作，以获得最低的纹波，也可以在PWM模式与省电模式之间自动切换，以便在轻负载下获得最高效率。2.3 V至 5.5 V输入范围支持使用标准电源，包括锂电池、碱性电池和镍氢电池。提供 0.8 V至 3.3 V范围内的多个固定输出电压选项，负载能力为 800 mA，精度为 2%。内置功率开关和同步整流器可提高效率并减少外置器件数量。ADP2139（如图A所示）另外增加了一个内部放电开关。ADP2138 和ADP2139 采用紧凑型 1 mm  $\times$  1.5 mm、6

引脚WLCSP封装，额定温度范围为-40°C至+125°C，千片订  
量报价为 0.90 美元/片。

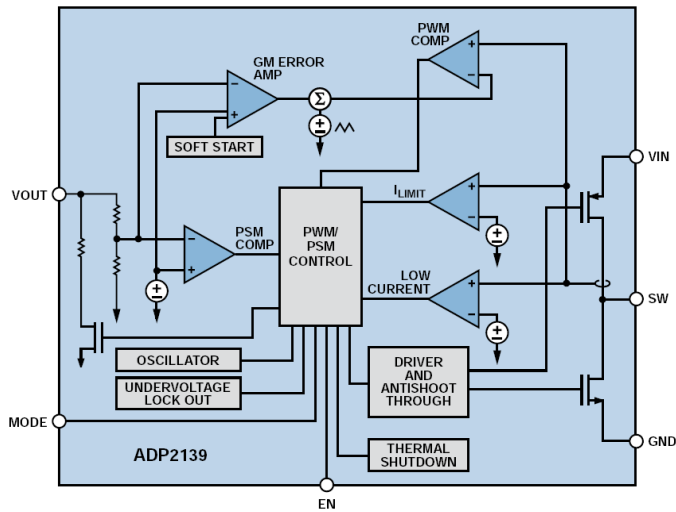


图 A. ADP2139 功能框图

## 作者简介

**Ken Marasco** [[ken.marasco@analog.com](mailto:ken.marasco@analog.com)]是ADI  
公司系统应用经理，负责便携式电源产品的技术  
支持，在ADI公司便携式应用小组已经工作  
了三年。他毕业于NYIT，持有应用物理专业  
学士学位，在系统和元件设计方面拥有 35 年  
的丰富经验。

