



电源工程师培训授证项目



西安电子科技大学
XIDIAN UNIVERSITY

电源中的低静态电流技术

西安电子科技大学 王新怀

2023年11月





电源工程师培训授证项目

目录

1

电源管理&低静态电流

3

应用及选型

2

低静态电流技术

4

小结



电源工程师培训授证项目

01

电源管理&低静态电流

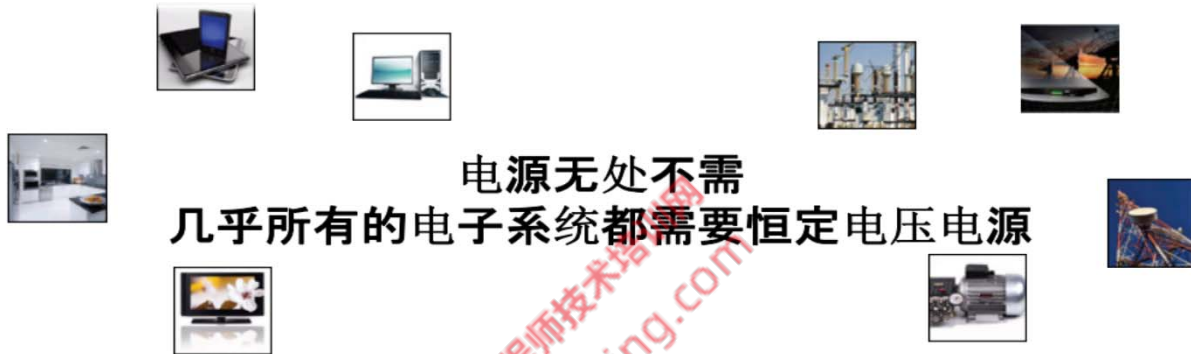
1.1 电源管理

1.2 低静态电流



电源工程师培训授证项目

电源管理



DC-DC 转换器是用于提供 DC 电源的电路

工业电源
 太阳能电池
 另一个转换器
 电池

DC-DC 电源转换器

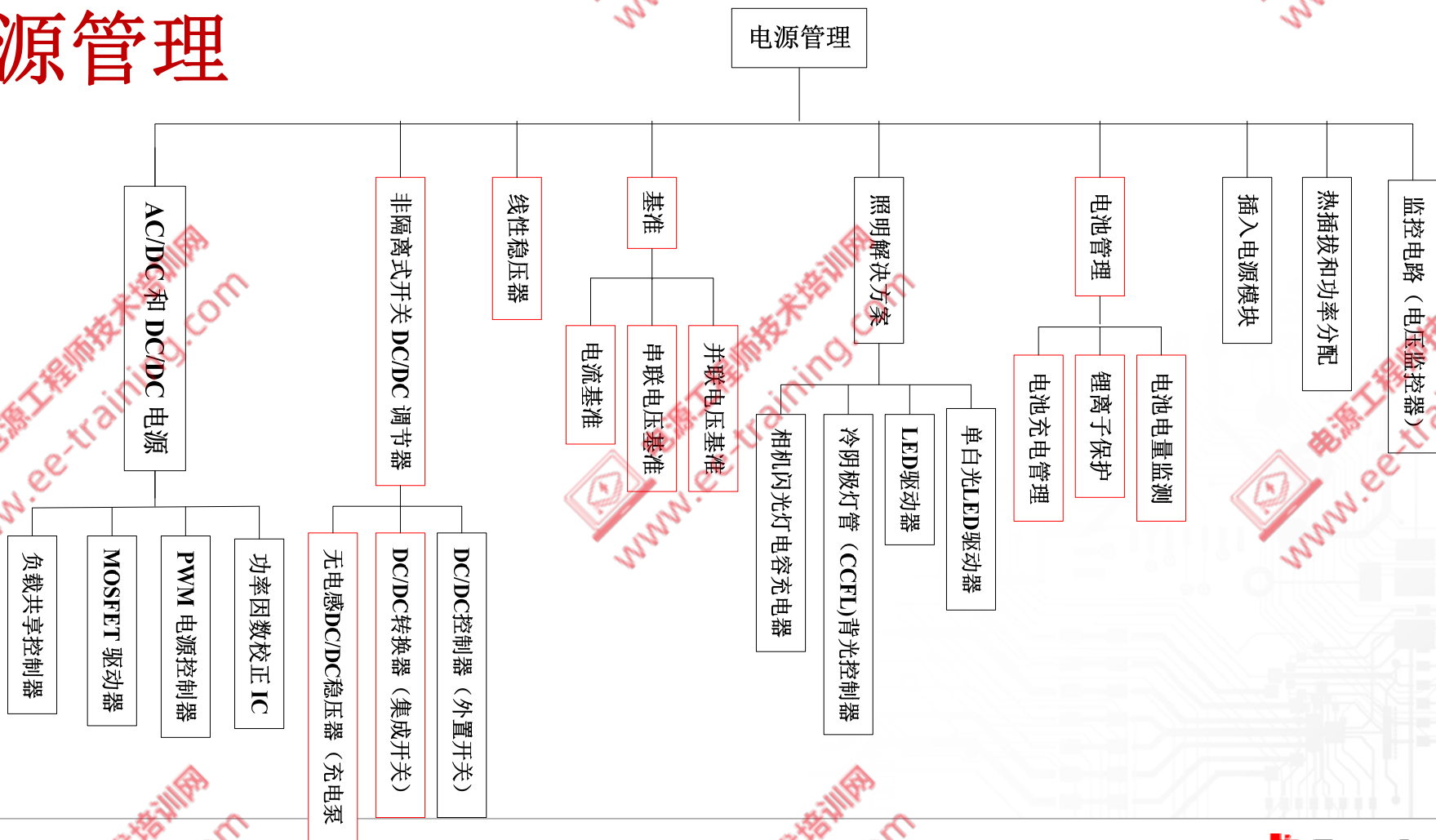
数据转换器
 放大器
 微处理器
 电阻器
 另一个转换器

负载

在设计电路时，最先考虑的就是电源电路的设计，电源电路是整个电路正常稳定工作的关键，也称**电源管理电路**。



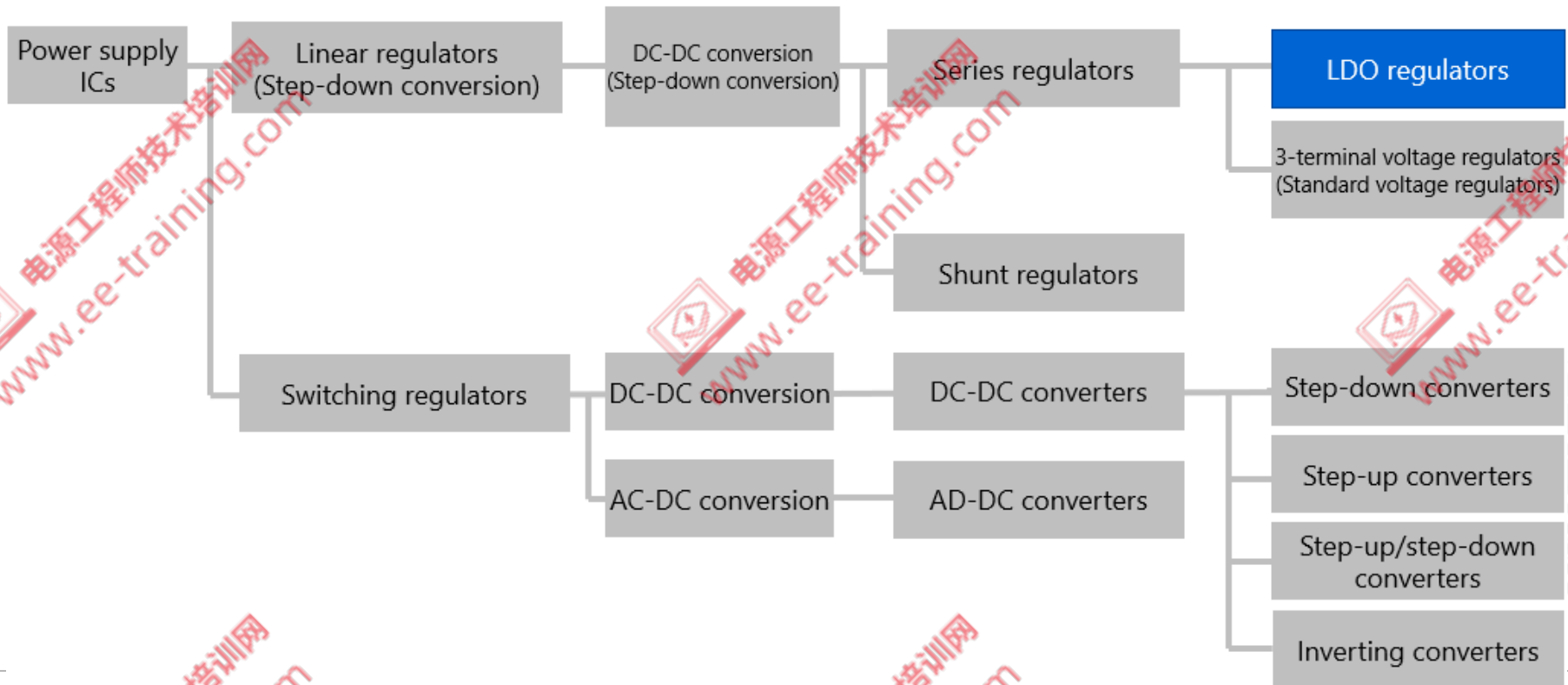
电源管理





电源管理

Linear regulators are capable of only step-down voltage conversion.





电源管理

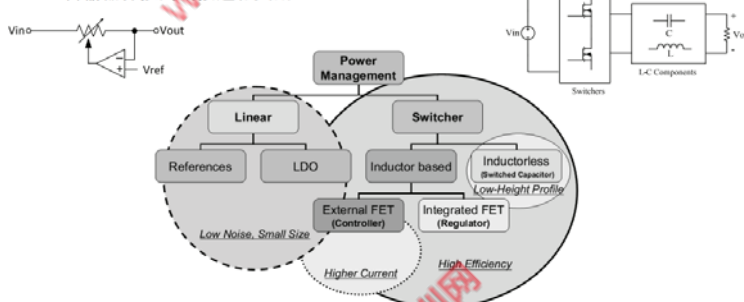
◆线性型

- 从电源向负载连续输送功率
- 传输元件（其负责调节从电源至负载的电流流动）工作于线性区

◆开关电源型

- 以脉冲串的形式从电源向负载输送功率
- 传输器件按周期接通和关断

- 传输器件按周期接通和关断



✓ 线性调压电源（DC-DC）



✓ 开关电源（DC-DC）



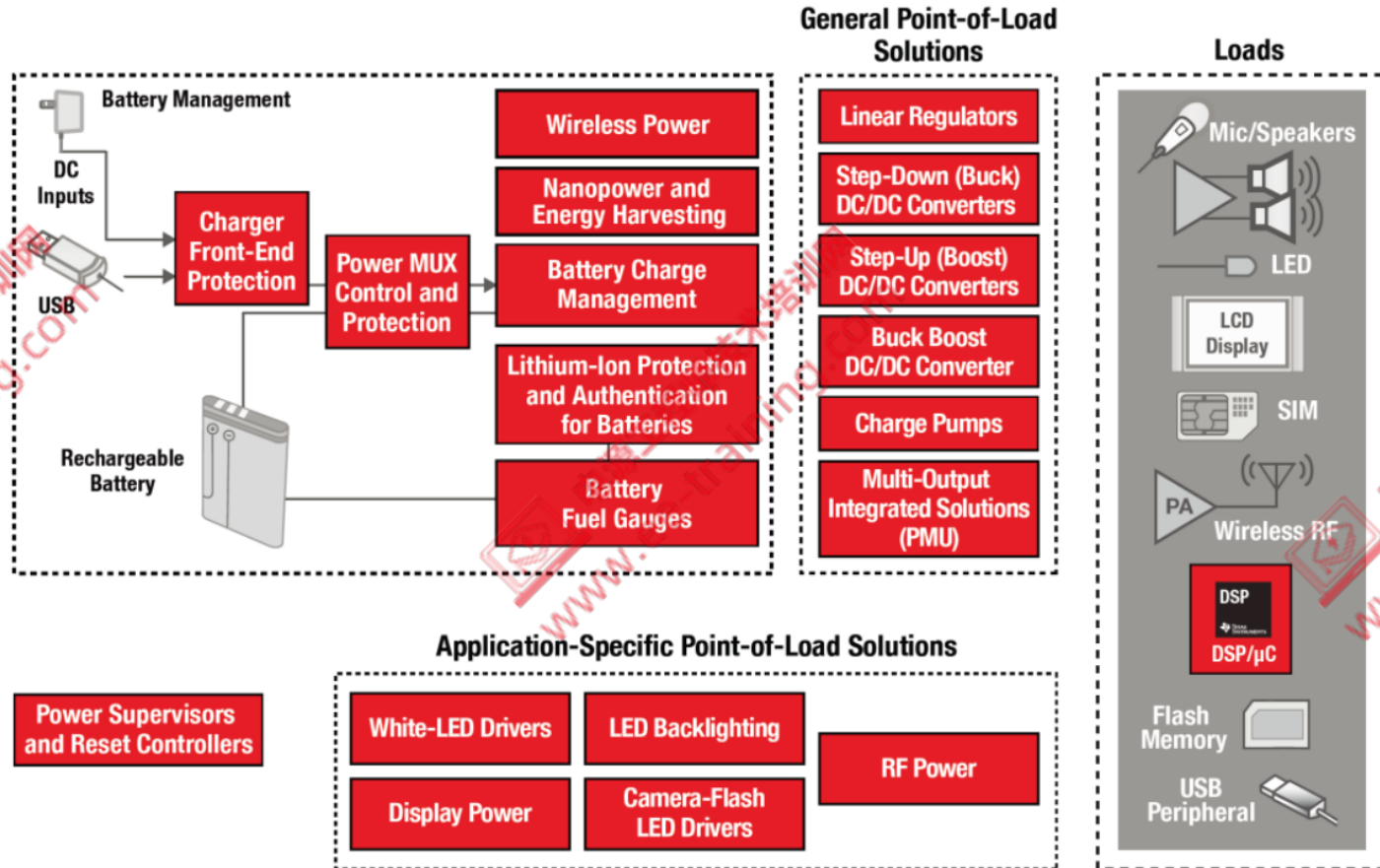


电源工程师培训授证项目

	线性稳压器	开关稳压器
降压转换	支持	支持
升压转换	不支持	支持
升压 / 降压转换	不支持	支持
反相转换	不支持	支持
元件数量	低	高
设计复杂性	简单	复杂
输入输出电压差	小 ^{*1}	大
输出电压波纹	小	大
噪声 (如EMI)	小	大



电源管理





电源工程师培训授证项目

电源管理

线性 and 低压降 (LDO) 稳压器

全部筛选条件 列表 重置表 623 个产品 (共 623 个) 电子邮件 下载 excel 文件 登录以查看库存 登录

Product number	Images	Output options	Iout (max) (A)	Vin (max) (V)	Vin (min) (V)	Vout (max) (V)	Vout (min) (V)	Fixed output options (V)	Noise (μVrms)	Package type	Pin count	Iq (typ) (mA)	Thermal resistance θJA (°C/W)	Price/Quant.. (USD)	Ti functional safety category	Rating	Load capacitance (min) (μF)	Status
<input type="checkbox"/> TPS7A21-Q1 - NEW Data sheet: PDF HTML		Fixed Output	0.5	6	2	5.5	0.8	1, 1.8, 2.8, 3.3, 5	7.7	VSON	8	0.0065	58.9	US\$0.278 1ku	-	Automotive	-	正在供货
<input type="checkbox"/> TPS7A96 - NEW Data sheet: PDF HTML		Adjustable Output	2	5.7	1.7	5.5	0	-	0.5	WSON	10	15	46.1	US\$3.920 1ku	-	Catalog	4.7	正在供货
<input type="checkbox"/> TPS7H1111-SEP - NEW Data sheet: PDF HTML		Adjustable Output	1.5	7	0.85	5.5	0.4	-	1.7	HTSSOP	28	19	24	US\$875.060 100u	-	Space	132	正在供货
<input type="checkbox"/> TPS7H1111-SP - NEW Data sheet: PDF HTML 查看备选方案		Adjustable Output	1.5	7	0.85	5.5	0.4	-	1.7	CFP	14	19	25.1	US\$2,625.1... 100u	-	Space	132	正在供货
<input type="checkbox"/> TPS748A-Q1 - NEW Data sheet: PDF HTML		Adjustable Output	1.5	6	0.8	3.6	0.8	-	7	VSON	10	0.55	47.2	US\$0.743 1ku	-	Automotive	10	正在供货
<input type="checkbox"/> TLV709 - NEW Data sheet: PDF HTML 查看备选方案		Adjustable Output, Fixed Output	0.15	30	2.5	28	1.2	3.3, 3.3, 5, 5	425	SOT-23, SOT-89	3, 5	0.003	195	US\$0.200 1ku	-	Catalog	-	正在供货
<input type="checkbox"/> TPS7A53A-Q1 - NEW Data sheet: PDF HTML		Fixed Output	3	6	1.13	1	1	1	5.6	WQFN	20	0.7	42.5	US\$1.500 1ku	Functional Safety-Capable	Automotive	10	正在供货
<input type="checkbox"/> TLV761 - NEW Data sheet: PDF HTML		Fixed Output	1	16	2.5	13	0.8	1.8, 3.3, 5	60	SOT-223	4	0.06	83.5	US\$0.190 1ku	-	Catalog	1	正在供货





电源工程师培训授证项目

01

电源管理低静态电流

1.1 电源管理

1.2 低静态电流

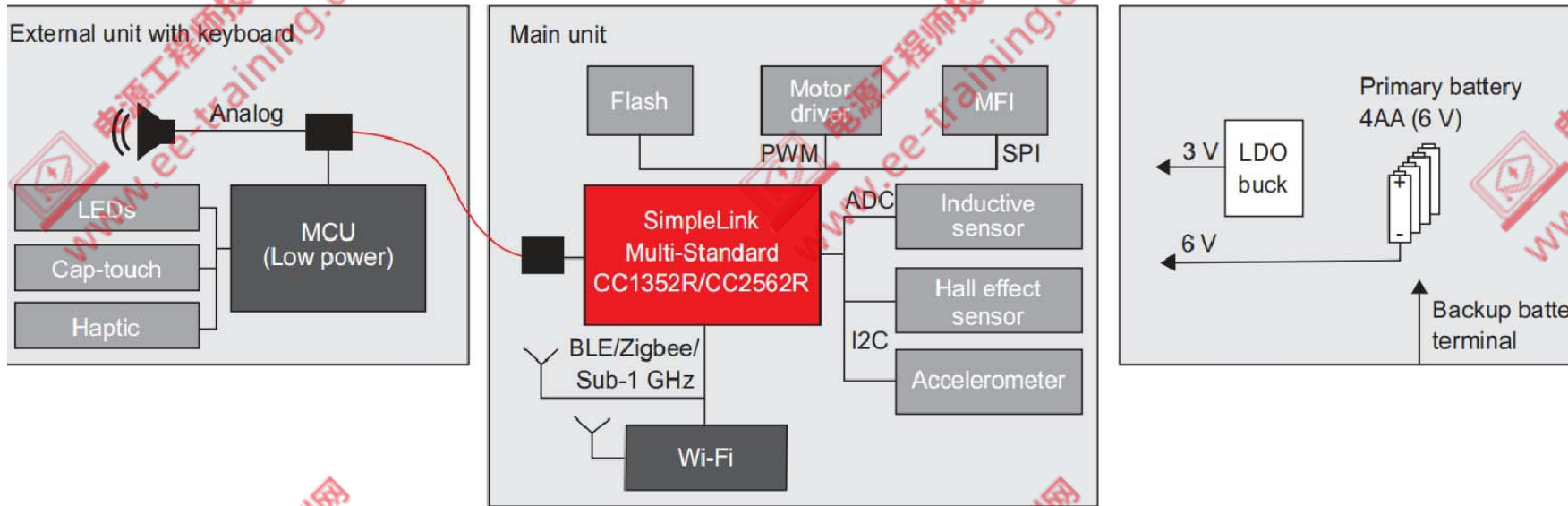


低静态电流 (I_Q)

什么是 I_Q ? **Quiescent** 不活动或休眠的状态或时期。

Quiescent Current

静态电流是系统在待机模式下消耗的电流。

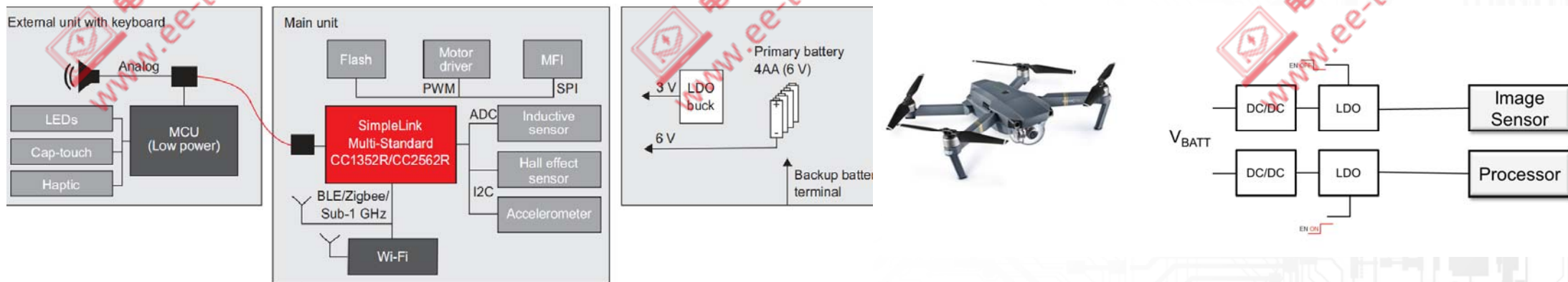




低静态电流 (I_Q)

注意： 静态电流 \neq 关断电流

关断电流通常是设备关闭时电池仍连着系统时消耗的电流。





低静态电流 (I_Q)

LDO的耗散功率:

$$P_D = (V_{IN} - V_{OUT}) * I_{OUT} + V_{IN} * I_Q$$

$$V_{IN} = 4.2V \mid V_{OUT} = 1.8V \mid I_{OUT} = 200mA \mid I_Q = 50\mu A$$

$$P_D = (V_{IN} - V_{OUT}) * I_{OUT} + (V_{IN} * I_Q)$$

Active Mode

Standby Mode

$$P_D = (4.2 - 1.8) * 0.2 + (4.2 * 0.00005)$$

$$P_D = 480.21 \text{ mW}$$

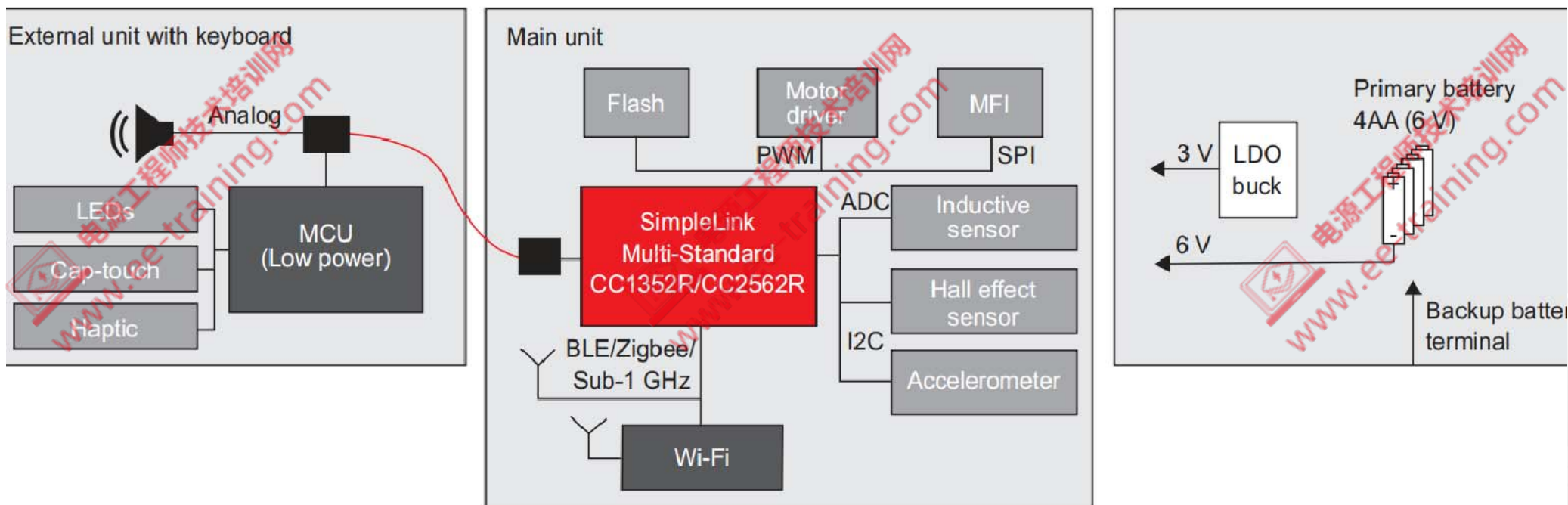
$$P_D = (4.2 - 1.8) * 0.0001 + (4.2 * 0.00005)$$

$$P_D = 0.45 \text{ mW}$$

0.21mW



最小化静态电流 (I_Q) 是降低功耗和管理电池寿命的关键因素。





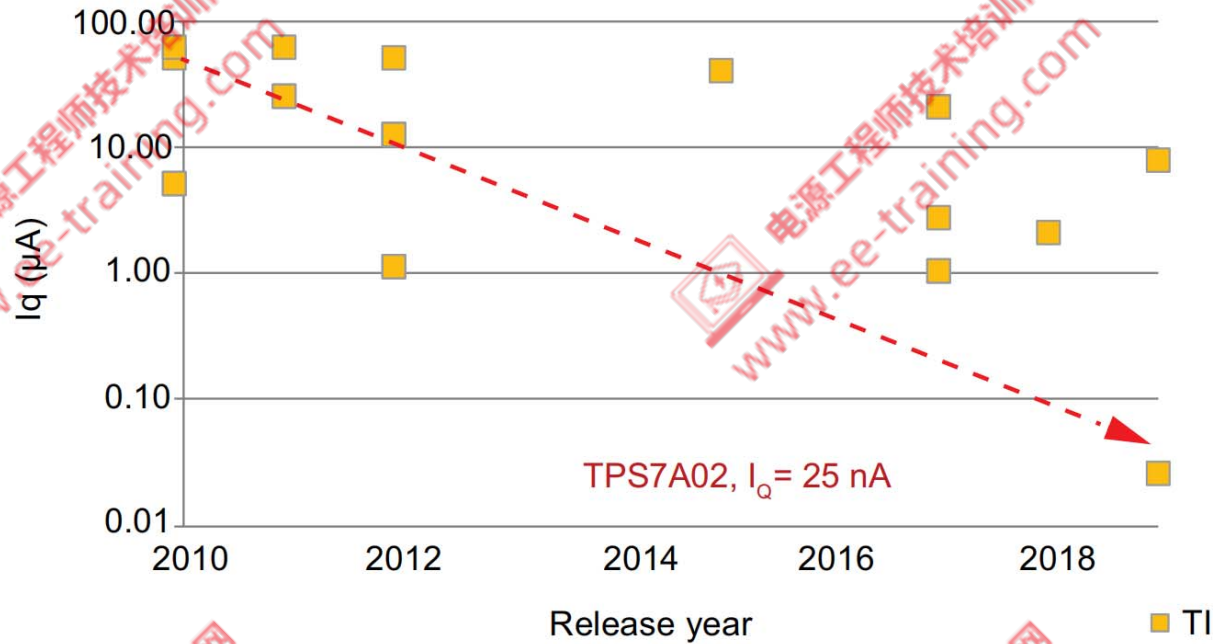
电源工程师培训授证项目

此类系统大多数 (>99%) 时间都处于待机模式精心优化低 I_Q 电源管理模块，可以将电池寿命从两年延长至五年以上。





在过去的 10 年中，5V LDO 中的 I_Q 每三年下降约 90%



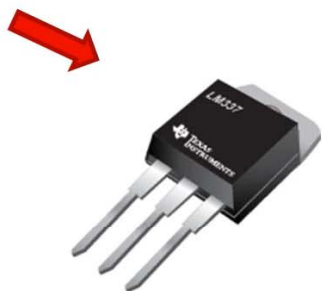
5V LDO I_Q 随着时间的变化



电源工程师培训授证项目



Huge



~10mm x 23mm



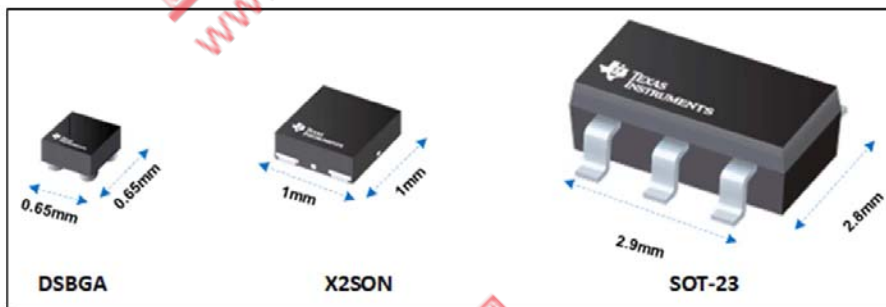
1mm x 1mm



0.65mm x 0.65mm

封装尺寸越来越小

Device	I_q
TPS7A05	1 μ A
TPS7A03	200nA
TPS7A02	25nA





电源工程师培训授证项目

02

低静态电流技术

2.1 I_Q 的影响因素

2.2 低 I_Q 技术



2.1 I_Q 的影响因素

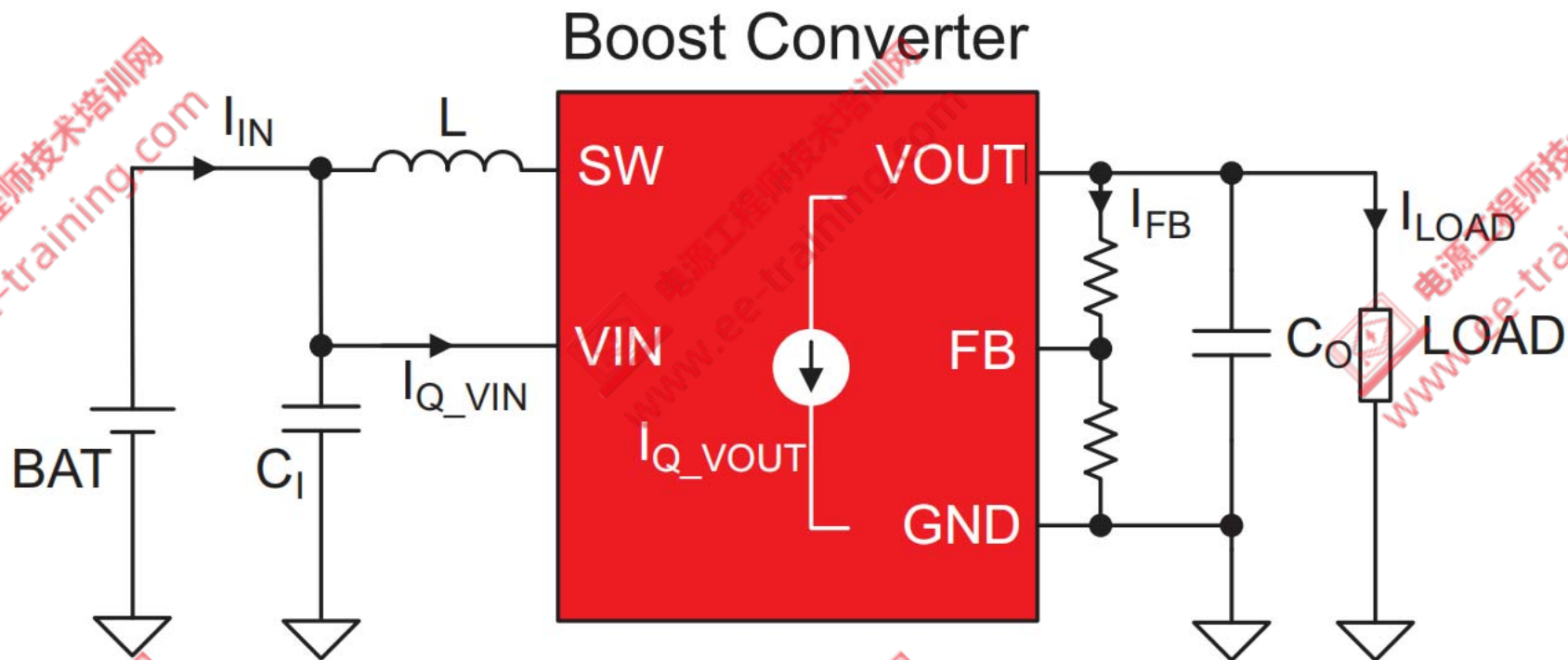
- ◆ 电源稳压器等常开功能的 I_Q 是待机时间较长的系统中总 I_Q 的重要组成部分。在电源稳压器内部，电压基准、误差放大器、输出分压器和保护电路都具有各自的工作电流。
- ◆ 确定从电池或电源汲取的总 I_Q 大小，必须考虑常开功能以及电容器、电阻器和电感器的泄漏源。
- ◆ 对于开关转换器的 I_Q ，必须做出一些区分。开关转换器通常包含节电模式，该模式可实现更长的非开关周期，从而降低平均 I_Q 。



电源工程师培训授证项目

2.1 I_Q 的影响因素

升压转换器系统中的电流





2.1 I_Q 的影响因素

$$I_{I(\text{standby})} = I_Q(V_{IN}) + I_{\text{Leakage}}(V_{IN}) + \frac{V_{OUT}}{V_{IN} \times \eta_1} \times [I_Q(V_{OUT}) + I_{FB} + I_{LOAD}]$$

- $I_Q(V_{IN})$ 是以 V_{IN} 为基准的 I_Q (IC 数据表值)。
- $I_{\text{Leakage}}(V_{IN})$ 是从电容器、电感器、二极管或开关在 V_{IN} 引脚上汲取的泄漏电压。
- V_{OUT} 是输出电压。
- V_{IN} 是电池电压 (LDO、升压转换器或降压-升压转换器的输入电压)。
- η_1 是转换器切换时的直流/直流效率。
- $I_Q(V_{OUT})$ 是在开关转换器的 V_{OUT} 引脚上汲取的 I_Q 。对于 LDO, $I_Q(V_{OUT}) = 0$ 。
- I_{FB} 是反馈电阻分压器的电流 (如适用)。
- I_{Load} 是待机模式下 V_{OUT} 上可能存在的负载电流。



电源工程师培训授证项目

2.1 I_Q 的影响因素

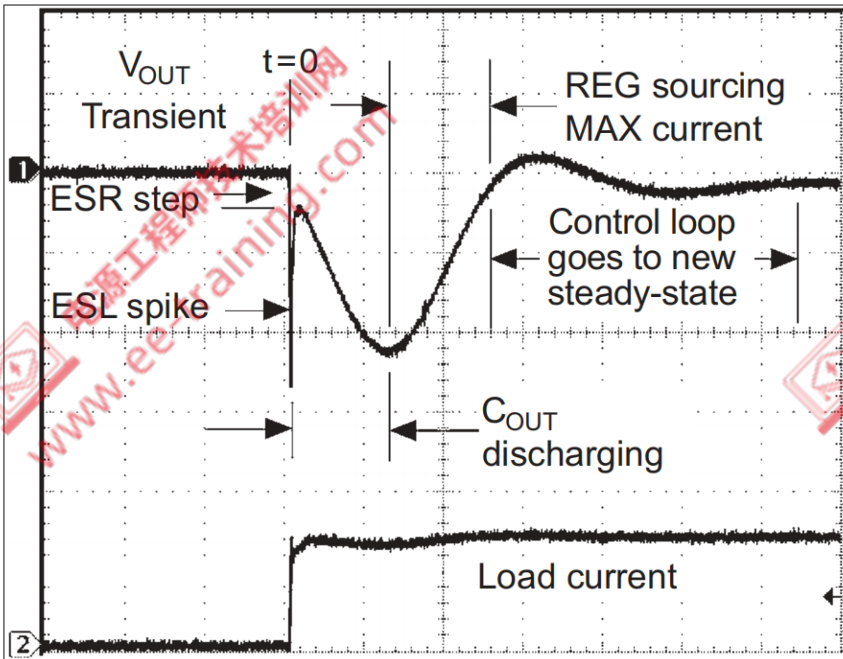
如果已知电池容量并计算了输入基准待机电流，则在待机模式下，重占空比低功耗系统的电池寿命大于 99.9% 的方程式估计时间为：

$$\text{Battery Lifetime} = \frac{\text{Battery Capacity}}{I(\text{standby}) + I_{\text{Battery leakage}}}$$

例如，待机电流为 $1.2\mu\text{A}$ 的占空比系统的电池在 100mAh 纽扣电池上可以使用 8.7 年。

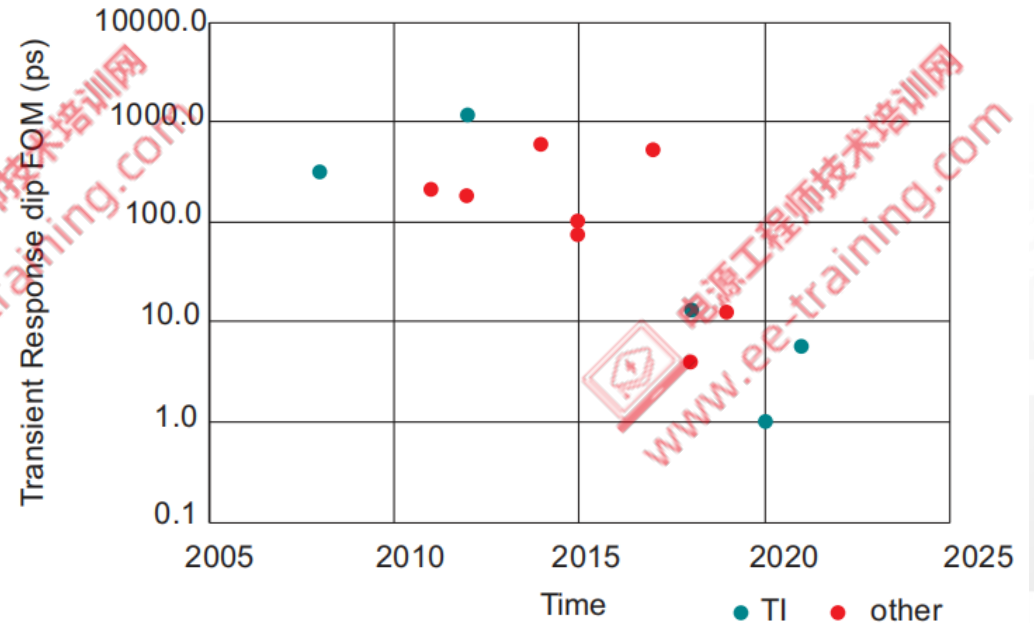


2.1 I_Q 的影响因素



输出电压瞬态

$$\text{Transient response dip FOM} = \frac{I_Q \times \Delta V \times C_O}{I_{O_MAX} \times \Delta I_O}$$



5V 降压/升压转换器的瞬态响应下降 FOM 随时间的变化



2.1 I_Q 的影响因素

纹波

另一种实现较低 I_Q 的方法是根据负载电流进入不同的节电模式。尽管这些模式之间的转换通常是自动发生的，但实现和性能却有很大的差异。需要注意的两点是在节电模式之间转换期间的电压纹波和输出电压精度。

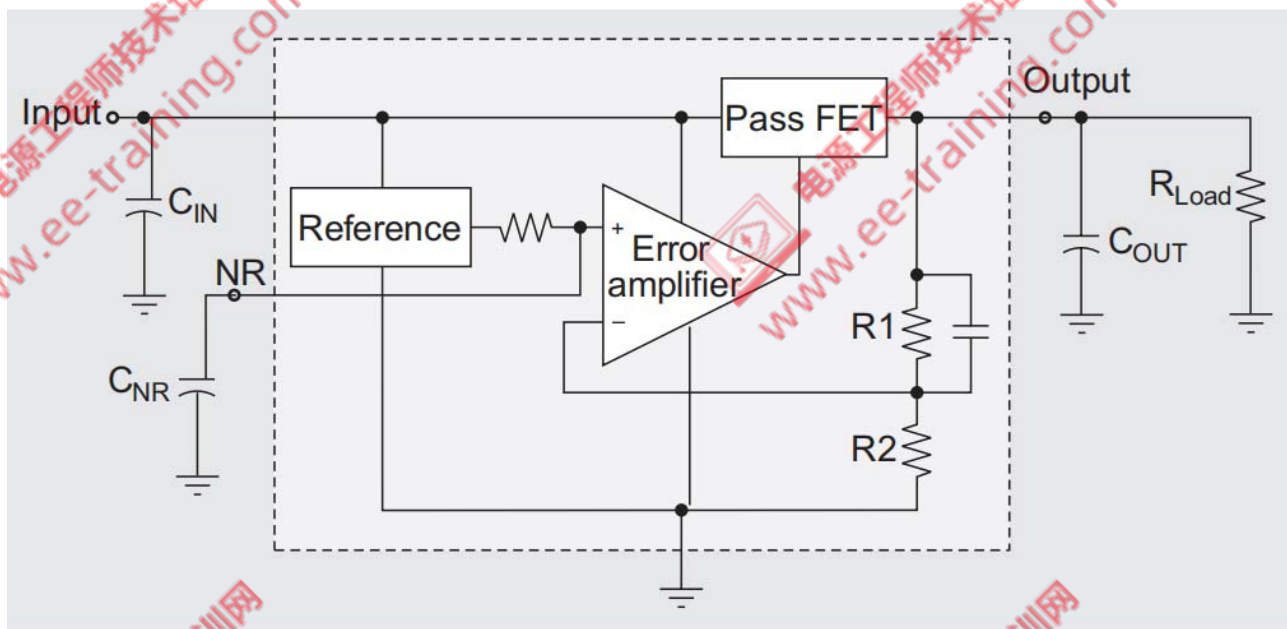
由于每种节电模式下的工作条件（例如在误差放大器中）通常是不同的，因此调整到不同工作点所需的转换时间会直接导致输出电压产生误差。此外，较低偏置电流下的比较器延迟较长，这可能导致电压阈值和零电流检测不准确，进而可能导致更高的输出电压纹波。



2.1 I_Q 的影响因素

噪声

另一个要克服的困难是放大器中伴随着较低 I_Q 偏置而增加的噪声。如图所示，在 LDO 中造成最大噪声的内部模块为基准系统（带隙）、误差放大器和缩放输出电压的电阻分压器。

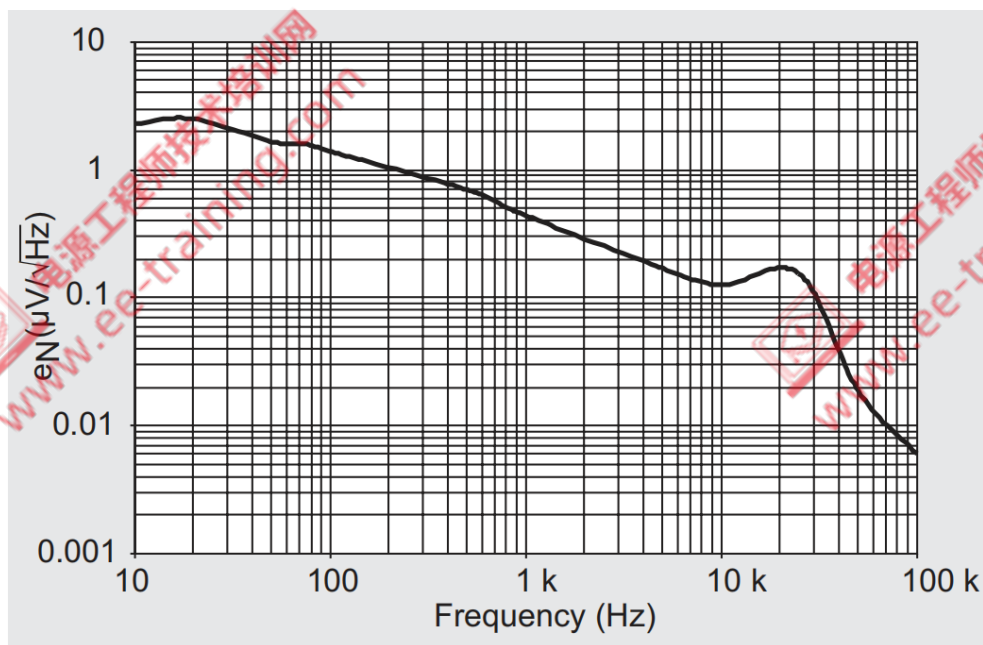


热噪声是超低 I_Q 设计中一个需要特别关注的问题。



2.1 I_Q 的影响因素

噪声



频谱噪声密度

闪烁噪声（也称为 $1/f$ 噪声），是一种低于 100Hz 的低频噪声，可以通过增大基准系统和误差放大器中差分对的尺寸来减轻。但这种较大的尺寸给设计带来了新问题，因为这会增大自感泄漏，并增大电容，从而减慢响应时间。



2.1 I_Q 的影响因素

芯片尺寸和解决方案面积

I_Q 降低也可能导致更大的无源器件或 IC 封装尺寸所需的电路板面积增加。较大的外部无源器件，（例如用于 LDO 和直流/直流转换器的大值电容器）在纳米功力器件中很常见，通常用于补偿较差的瞬态性能。芯片面积较大可直接导致封装面积较大。

在对 I_Q 小于 $1\mu\text{A}$ 的芯片拆卸目视检查时，电阻器和电容器占内部非场效应晶体管 (FET) 芯片面积的 20% 以上。尽管解决 I_Q -面积问题的解决方案有很多，但过滤市场上最佳解决方案的一种简单方法是应用简单的 FOM: I_Q 乘以最小封装面积。可以从数据表中获取相关信息来获得 FOM; 查看所提供的最小封装来提供有关较小芯片面积的线索。

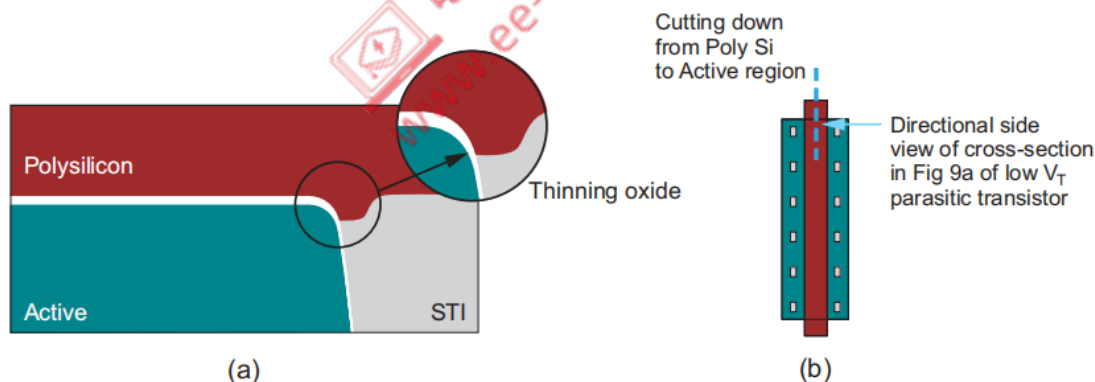
选择具有最低 I_Q 和最小可用封装的器件，意味可以实现良好的 I_Q -面积效率。



2.1 I_Q 的影响因素

泄漏和亚阈值操作

纳米工艺的目标可能与高性能深亚微米技术的目标相冲突，后者优先考虑速度和栅极密度，而非降低 I_Q 。尽管工艺技术可能有所不同，但绝大多数漏电都来自大型数字电路、存储器和高功率 FET。常开电路的精度往往受限于控制电阻器和电容器等元件的能力以及晶体管之间的不匹配。如果没有合适的组件来解决常开电路的泄漏和控制问题，则会体现在温度范围内 I_Q 比 I_{SHDN} 大、差。专用的低功耗工艺技术与合适的组件可以提供明显的制造优势。



2D 横截面 (a) 中的氧化物变薄导致的寄生低 V_T 和 (b) 布局视图



电源工程师培训授证项目

02

低静态电流技术

2.1 I_Q 的影响因素

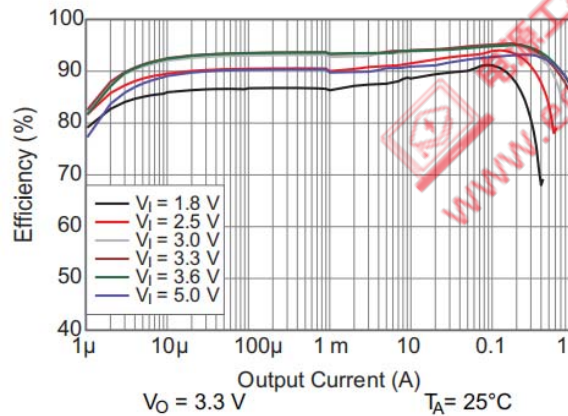
2.2 低 I_Q 技术



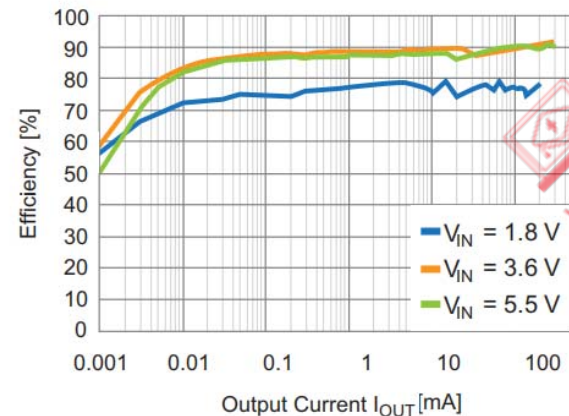
2.2 低 I_Q 技术

如何实现低 I_Q

优化 I_Q 需要解决多个相互冲突的设计难题。必须满足瞬态响应、噪声和精度方面的所有关键性能规格，同时将 I_Q 降低几个数量级。在评估性能规格的优缺点之前，必须量化整个输出负载范围内的 I_Q 和功率损耗。对于直流/直流开关转换器，查看负载电流下的功率效率，而对于 LDO，查看负载电流下的电流效率。



(a)



(b)

TPS63900 (a) 和其他同类产品 (b) 的效率



2.2 低 I_Q 技术

解决瞬态响应问题

改善瞬态响应关键是改进拓扑。例如，TPS61094 支持低 I_Q 和快速瞬态响应。TPS61094 是一款双向降压/升压转换器，在超级电容充电（降压）和超级电容放电（升压）模式下，其低 I_Q 为 60nA。TPS61094 监测输出端的 dv/dt 斜率，并在任一给定时刻调整其调节行为以优化瞬态性能。这样可以快速地检测输出电压降，同时保持低 I_Q 。因此，当 TPS61094 开始支持备用电源或超级电容器的峰值负载时，输出电压几乎保持恒定。

尽可能减少耗电块的数量，拓扑越简单越好。例如，具有 75nA I_Q 的 TPS63900 四开关降压/升压转换器使用单一模式来调节高于、低于或等于输入电平的输出电压。除核心架构之外，在进入轻负载时使用采样保持技术可将所有内部支持功能的 ISHDN 降至最低。



2.2 低 I_Q 技术

解决瞬态响应问题

可通过零电流反馈分压器、数字辅助控制和动态偏置来节省更多电流。但当工作电流仅为几纳安时，动态偏置技术就变得非常具有挑战性。为避免低偏置电流下的增益下降，可以将跨导和输出电阻作为偏置电流的函数进行适当整形，从而实现 I_Q 高效的恒定增益放大器。

另一项技术使用快速启动电路。通过缩短采样保持基准系统的启动时间，带隙核心和比例放大器电路的导通时间显著缩短。这样提高了开关时间比，从而将平均电流降低至纳安级范围内，同时保持噪声和精度水平。

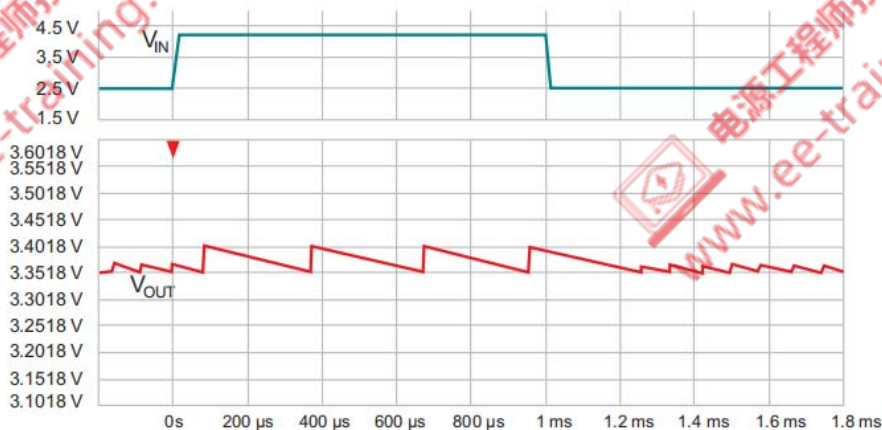
为了改善线路瞬态响应，前馈技术以节能的方式应用于电压调节环路。使用瞬态检测电路调节偏置电流或使能电路，进一步减小输出电压骤降，并缩短稳定时间。



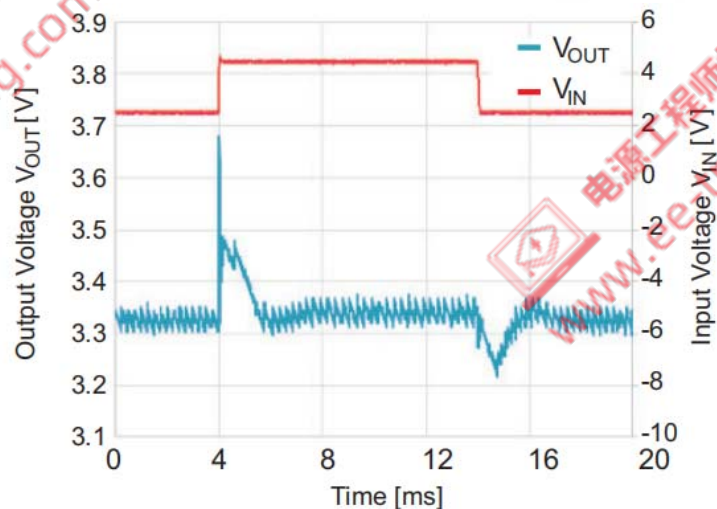
2.2 低 I_Q 技术

解决瞬态响应问题

TPS63900 应用了以上技术，线路瞬态在输出电压上几乎不可见，远低于开关纹波，而其他器件则表现出 100mV 的变化



(a)



(b)

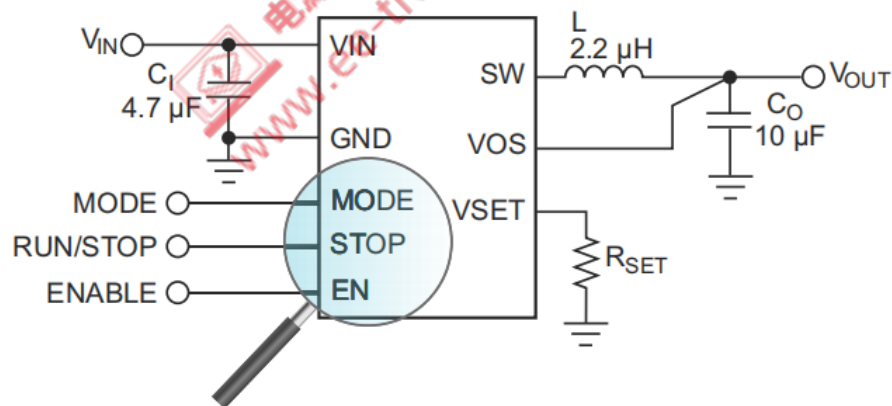
在 $V_{IN} = 2.5V$ 至 $4.2V$ 、 $V_{OUT} = 3.3V$ 、 $I_{OUT} = 1mA$ 时的线路瞬态响应：TPS63900 (a)；同类竞争器件 (b)。



2.2 低 I_Q 技术

解决开关噪声问题

在设计高精度数据应用时，首要任务是控制直流/直流转换器的开关噪声，尤其是在具有瞬态脉冲产生高输出电压纹波的节电模式下。降低纹波的一种方法是最大程度地减小开关周期中发送到输出端的能量包。但如果这还不够，应怎么办呢？具有 $60\text{nA } I_Q$ 的 TPS62840 降压转换器有一个 **STOP** 引脚，其在当前开关周期之后立即停止稳压器开关，从而打开完全切换静音窗口。



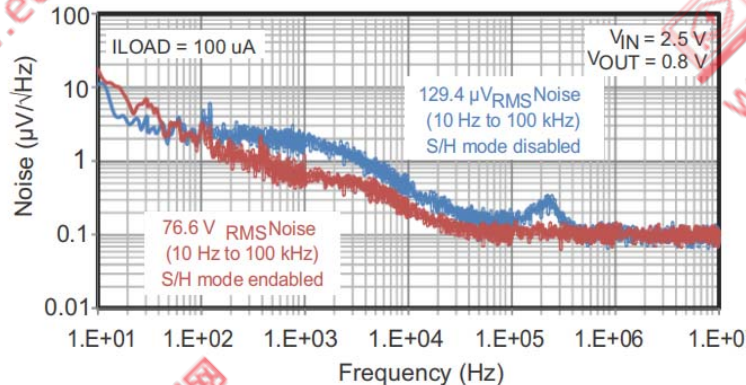
STOP 引脚功能的 TPS62840 上的零开关噪声



2.2 低 I_Q 技术

解决其他噪声问题

除开关噪声之外，在较低的 I_Q 偏置下，持续的自噪声以及 0.1Hz 至 100kHz 范围内的热噪声和闪烁噪声分量也是需要关注的问题。由于基准通常是最大的噪声产生因素，因此选择集成版本的采样保持技术来创建电压基准和电流基准，从而在器件的整个使用寿命期间在面积、噪声、 I_Q 和稳健性能（无漂移）之间有利取舍。此类采样保持电路的缺点是会产生较小的纹波误差。TPS7A02 器件的采样保持噪声整形功能在 10Hz 至 100Hz 频段内将积分噪声降低 40% 以上。



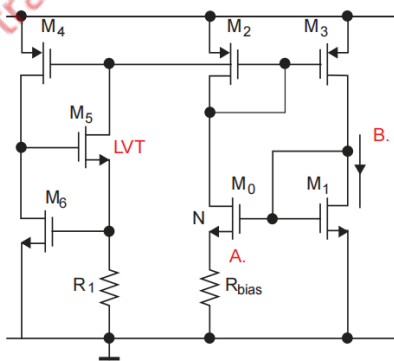
TPS7A02 上具有采样保持基准和不具有采样保持基准的噪声频谱。（来源：TPS7A02 上的 TI 内部硅测量）。



2.2 低 I_Q 技术

解决芯片尺寸和解决方案面积问题

在纳米工艺稳压器中面积最大的模块之一是电流基准，该基准负责生成 1 至 10nA 的偏置支路。电流基准模块内的电流偏置生成面积由电阻器元件决定。在低值电阻器上施加较小的电压偏置，可减小电阻器值。在形成基准偏置电流时，可以通过一项技术来生成 $\Delta V_{gst}/R$ 或 $\Delta V_{be}/R$ 电路。



A. $\Delta V_{GST} = 2 \times V_T \times \ln(N)$

B. $I_b = \frac{2 \times V_T \times \ln(N)}{R_{bias}} \times \frac{V_{GS6}}{R_1}$

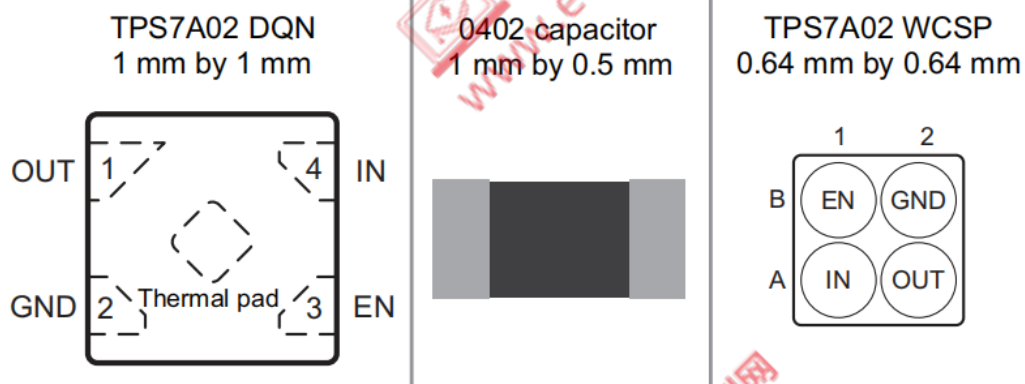
图中显示了一种巧妙的偏置电流实现方式，其温度系数几乎为零，通过电阻器 R_1 和 R_{bias} 之间较小的电压偏置来创建正负系数温度偏置电流。



2.2 低 I_Q 技术

解决芯片尺寸和解决方案面积问题

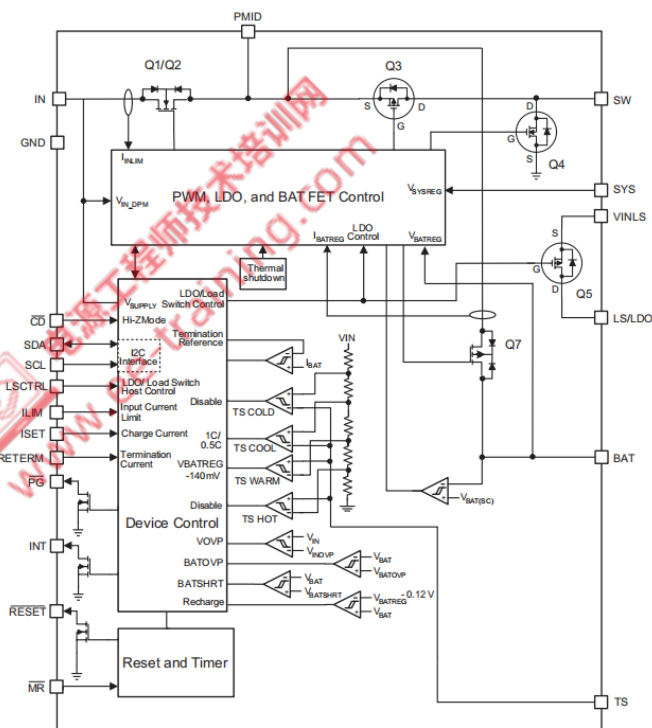
这些技术实现了更小的无源面积，并有效地缩小了芯片面积。 I_Q 乘以最小封装面积 FOM 是比较此类技术面积效率的最佳方法。TPS7A02 器件于 2019 年发布了 1mm x 1mm 双平面无引线 (Dual Flat No-Lead DQN) 封装，而其对应的晶片级封装 (Wafer Chip Scale Package WCSP) 于 2021 年发布。LDO 拥有行业最低的 I_Q -封装面积-效率 FOM，小于 10 nA-mm²。下图给出了典型 0402 电容器与为 TPS7A02 提供的 DQN 和 WCSP 封装的并排比较。





2.2 低 I_Q 技术

解决芯片尺寸和解决方案面积问题



纳安级充电器系统的系统级图

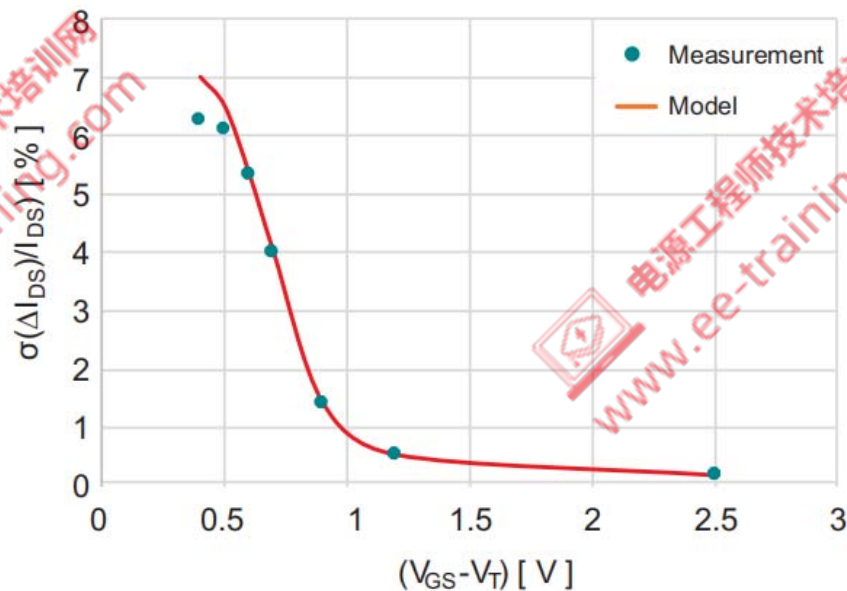
节省电路板面积的有效方法之一是将更多功能集成到单个芯片上。这种集成使监控器、基准系统、LDO、电池充电器和直流/直流转换器等模块能够共享通用构建块，同时减小总 I_Q 大小。左图展示了 BQ25125 电池充电管理 IC 通过 I2C 集成和灵活控制多种低 I_Q 的功能，I2C 为该器件提供了一项关键优势，能够将整个电源管理系统部署到可穿戴设备、计量和汽车传感器物联网应用中。



2.2 低 I_Q 技术

解决泄漏和亚阈值操作问题

电源工艺技术采用优化的低功耗设计元件。高密度电阻器和电容器与全新的电路技术相结合，能够同时减小 I_Q 和芯片面积。功率 FET 和数字逻辑提供低泄漏晶体管，同时优化速度；因此， I_{SHDN} 和面积完全不受影响。此外，在较低 $V_{GS}-V_T$ 水平下对亚阈值操作进行精确建模（如右图所示），可实现低至皮安/微米的偏置水平的可靠操作。





电源工程师培训授证项目

03

低静态电流技术应用及选型



3 低静态电流技术应用和选型

TPS7A02

电气特性

规定 $T_J = -40^\circ\text{C}$ 至 $+125^\circ\text{C}$ 、 $V_{IN} = V_{OUT(nom)} + 0.5\text{V}$ 或 2.0V （以较大者为准）、 $I_{OUT} = 1\text{mA}$ 、 $V_{EN} = V_{IN}$ 以及 $C_{IN} = C_{OUT} = 1\mu\text{F}$ （除非另有说明），典型值为 $T_J = 25^\circ\text{C}$ 条件下的值。

参数	测试条件	最小值	典型值	最大值	单位	
标称精度	$T_J = 25^\circ\text{C}$, $V_{OUT} \geq 1.5\text{V}$, $1\mu\text{A}(1) \leq I_{OUT} \leq 1\text{mA}$	-1		1	%	
	$T_J = 25^\circ\text{C}$; $V_{OUT} < 1.5\text{V}$	-15		15	mV	
在温度范围内的精度	$V_{OUT} \geq 1.5\text{V}$	$T_J = -40^\circ\text{C}$ 至 $+125^\circ\text{C}$	-1.5	1.5	%	
	$V_{OUT} \geq 1.5\text{V}$		-20	20	mV	
(ΔV_{IN}) 线性调整率	$V_{OUT(nom)} + 0.5\text{V} \leq V_{IN} \leq 6.0\text{V}$ (1)	$T_J = -40^\circ\text{C}$ 至 $+125^\circ\text{C}$		5	mV)	
ΔV_{OUT} (ΔI_{OUT}) 线路调节(2)	$1\text{mA} \leq I_{OUT} \leq 200\text{mA}$, $V_{IN} = V_{OUT(nom)} + 0.5\text{V}$ (2)	$T_J = -40^\circ\text{C}$ 至 $+85^\circ\text{C}$		20	38	mV
		$T_J = -40^\circ\text{C}$ 至 $+125^\circ\text{C}$			50	
I_{GND} 接地电流	$I_{OUT} = 0\text{mA}$	$T_J = 25^\circ\text{C}$	25	46	nA	
		$T_J = -40^\circ\text{C}$ 至 $+85^\circ\text{C}$		60		
I_{GND}/I_{OUT} 接地电流与负载电流间的关系	$5\mu\text{A} \leq I_{OUT} < 1\text{mA}$	$T_J = 25^\circ\text{C}$		1	%	
	$1\text{mA} \leq I_{OUT} < 100\text{mA}$			0.25		
	$I_{OUT} \geq 100\text{mA}$			0.15		
$I_{GND(DO)}$ 压降中的接地电流(3)	$I_{OUT} = 0\text{mA}$, $V_{IN} = 95\% \times V_{OUT(nom)}$	$T_J = 25^\circ\text{C}$		25	nA	
I_{SHDN} 关断电流	$V_{EN} = 0\text{V}$, $1.5\text{V} \leq V_{IN} \leq 5.0\text{V}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$	$T_J = 25^\circ\text{C}$	3	10	nA	

表1. TPS7A02 数据表中 I_{GND} 和 I_{SHDN} 的变化。

I_{Q-GND} 、 I_{SHDN} 和 V_{OUT} 精度的变化都是工艺技术组件可制造性的良好指标。TPS7A02 具有快速瞬态响应的毫微功耗 I_Q 、25nA、200mA 低压降稳压器数据表中的表1显示在 -40°C 至 85°C 温度范围内无负载情况下 I_{GND} 在 25nA 至 60nA 的范围内变化。这种温度变化代表了电流镜失配和 I_{BIAS} 生成控制。 I_{SHDN} 在室温下的变化范围为 3nA 至 10nA，是功率 FET 和数字逻辑泄漏控制的良好指标。 V_{OUT} 精度随温度变化小于 1.5%，体现了亚阈值失配控制的良好指标。



电源工程师培训授证项目

3 低静态电流技术应用和选型

Product number	Images	Output options	Iout (max) (A)	Vin (max) (V)	Vin (min) (V)	Vout (max) (V)	Vout (min) (V)	Fixed output options (V)	Noise (μ Vrms)	Package type	Pin count	Iq (typ) (mA)	Thermal resistance θ JA ($^{\circ}$ C/W)	PriceQ (USD)
<input type="checkbox"/> TPS7A02 数据表: PDF HTML 查看备选方案		Fixed Output	0.2	6	1.5	5	0.8	1, 1.2, 1.5, 1.75, 1.8, 1.85, 2, 2.2, 2.3, 2.5, 2.8, 3, 3.1, 3.3, 3.6	130	DSBGA, SOT-23, X2SON	4, 5	0.00025	179.1	US\$0.2
<input type="checkbox"/> TPS7A03 数据表: PDF HTML 查看备选方案		Fixed Output	0.2	6	1.5	5	0.8	0.9, 1, 1.2, 1.3, 1.5, 1.75, 1.8, 1.85, 2, 2.1, 2.2, 2.3, 2.5, 2.8, 3, 3.1, 3.3, 3.6, 5	130	DSBGA, SOT-23, X2SON	4, 5	0.0002	179.1, 201.1	US\$0.1
<input type="checkbox"/> TPS783 数据表: PDF HTML 查看备选方案		Fixed Output	0.15	5.5	2.2	4.2	1.8	1.8, 1.9, 2.6, 3, 4.2	86	SOT-23-THN	5	0.0005	193	US\$0.2
<input type="checkbox"/> TPS782-Q1 数据表: PDF		Fixed Output	0.15	5.5	2.2	3	1.8	2.5, 2.7, 2.8, 3	86	WSON	6	0.0005	67.2	US\$0.2
<input type="checkbox"/> TPS782 数据表: PDF HTML 查看备选方案		Fixed Output	0.15	5.5	2.2	3.6	1.8	1.8, 2.2, 2.3, 2.5, 2.7, 2.8, 3, 3.3, 3.6	86	SOT-23-THN, WSON	5, 6	0.0005	66	US\$0.2
<input type="checkbox"/> TPS780 数据表: PDF HTML 查看备选方案		Adjustable Output, Dual output, Fixed Output	0.15	5.5	2.2	5.25	1.2	1.8, 2, 2.2, 2.3, 2.5, 2.7, 3, 3.3	86	SOT-23-THN, WSON	5, 6	0.0005	66	US\$0.2
<input type="checkbox"/> TPS781 数据表: PDF 查看备选方案		Adjustable Output, Dual output, Fixed Output	0.15	5.5	2.2	5.25	1.2	2, 2.2, 2.5, 3.3	86	SOT-23-THN, WSON	5, 6	0.0005	65	US\$0.2



电源工程师培训授证项目

3 低静态电流技术应用和选型

Product number	Images	Output options	Iout (max) (A)	Vin (max) (V)	Vin (min) (V)	Vout (max) (V)	Vout (min) (V)	Fixed output options (V)	Noise (µVRms)	Package type	Pin count	Iq (typ) (mA)	Thermal resistance θJA (°C/W)	Price (USD)
<input type="checkbox"/> TPS7A05 数据表: PDF HTML 查看备选方案		Fixed Output	0.2	5.5	1.4	3.3	0.8	0.8, 1, 1.1, 1.2, 1.5, 1.8, 1.82, 2.2, 2.5, 2.7, 2.8, 2.85, 3, 3.1, 3.3	180	DSBGA, SOT-23, X2SON	3, 4, 5	0.001	144.1, 185.6, 198.0, 267.3	US\$0.0
<input type="checkbox"/> TPS706 数据表: PDF HTML 查看备选方案		Fixed Output	0.15	6.5	2.7	3.3	1.2	1.2, 1.5, 1.8, 2.5, 2.8, 3, 3.3	190	SOT-23, WSON	5, 6	0.001	73	US\$0.2
<input type="checkbox"/> TPS797-Q1 数据表: PDF 查看备选方案		Fixed Output	0.01	5.5	1.8	3.3	1.8	1.8, 3, 3.3	600	SOT-SC70	5	0.001	314	US\$0.2
<input type="checkbox"/> TPS797 数据表: PDF HTML 查看备选方案		Fixed Output	0.05	5.5	1.8	3.3	1.8	1.8, 2.85, 3, 3.3	600	SOT-SC70	5	0.001	231	US\$0.2
<input type="checkbox"/> TPS7A11 数据表: PDF HTML 查看备选方案		Fixed Output	0.5	3.3	0.75	3	0.5	0.5, 0.6, 0.75, 0.8, 0.9, 1, 1.05, 1.1, 1.2, 1.5, 1.8, 1.9, 2.5, 2.8, 3	93.9	DSBGA, WSON	5, 6	0.0016	77.3	US\$0.3
<input type="checkbox"/> TPS7A10 数据表: PDF HTML 查看备选方案		Fixed Output	0.3	3.3	0.75	3	0.5	0.6, 0.8, 1, 1.05, 1.1, 1.2, 1.5, 1.8, 2.5, 2.8, 3	110	DSBGA, WSON	5, 6	0.0016	169.4, 188.8	US\$0.1
<input type="checkbox"/> TPS79718-EP 数据表: PDF 查看备选方案		Fixed Output	0.01	5.5	2	1.8	1.8	1.8	600	SOT-SC70	5	0.005	396	US\$1.1
<input type="checkbox"/> TPS79730-EP 数据表: PDF 查看备选方案		Fixed Output	0.01	5.5	1.8	3	3	3	600	SOT-SC70	5	0.005	396	US\$1.1



电源工程师培训授证项目

3 低静态电流技术应用和选型

Product number	Images	Output options	Iout (max) (A)	Vin (max) (V)	Vin (min) (V)	Vout (max) (V)	Vout (min) (V)	Fixed output options (V)	Noise (µVrms)	Package type	Pin count	Iq (typ) (mA)	Thermal resistance θJA (°C/W)	Price (USD)
<input type="checkbox"/> TPS7A14 数据表: PDF HTML		Fixed Output	1	2.2	0.7	2	0.5	0.8, 0.85, 0.9, 1.05, 1.2, 1.3, 1.8	7.2	DSBGA, WSON	6	0.0056	136.7	US\$0.3
<input type="checkbox"/> TPS7A15 数据表: PDF HTML		Fixed Output	0.4	2.2	0.7	2.2	0.7	0.6, 0.8, 0.9, 1.2, 1.8	7.2	DSBGA, WSON	6	0.0057	148.5	US\$0.2
<input type="checkbox"/> TPS7A21-Q1 - NEW 数据表: PDF HTML		Fixed Output	0.5	6	2	5.5	0.8	1.1, 1.8, 2.8, 3.3, 5	7.7	VSON	8	0.0065	58.9	US\$0.2
<input type="checkbox"/> TPS7A20 数据表: PDF HTML 查看备选方案		Fixed Output	0.3	6	1.6	5.5	0.8	0.9, 1.05, 1.1, 1.2, 1.5, 1.8, 1.82, 1.85, 2, 2.2, 2.4, 2.5, 2.7, 2.8, 2.85, 2.9, 3, 3.1, 3.2, 3.3, 3.6, 4, 4.2, 4.5, 5, 5.5	7	DSBGA, SOT-23, X2SON	4, 5	0.0065	179.1, 199.6, 201.4	US\$0.1
<input type="checkbox"/> TPS7A21 数据表: PDF HTML 查看备选方案		Fixed Output	0.5	6	2	5.5	0.8	2.8, 3.3, 3.45	7.7	POWERWSP	4	0.007	187.1, 197.1	US\$0.2
<input type="checkbox"/> TPS727 数据表: PDF HTML 查看备选方案		Fixed Output	0.25	5.5	2	5	1	1.1, 1.1, 1.5, 1.8, 1.85, 1.9, 2.5, 2.7, 2.8, 2.85, 3, 3.3, 4.8, 5	33.5	DSBGA, WSON	4, 6	0.008	160	US\$0.2
<input type="checkbox"/> LP5910 数据表: PDF HTML 查看备选方案		Fixed Output	0.3	3.3	1.3	1.8	0.9	0.9, 1, 1.1, 1.2, 1.725, 1.8, 1.825	12	DSBGA, WSON	4, 6	0.012	79	US\$0.2
<input type="checkbox"/> LP5907-Q1 数据表: PDF HTML		Fixed Output	0.25	5.5	2.2	4.5	1.2	1.2, 1.3, 1.5, 1.8, 2.2, 2.5, 2.8, 2.85, 2.9, 3, 3.3, 3.8, 4.5	6.5	SOT-23, X2SON	4, 5	0.012	193, 195.1, 197.8	US\$0.1



电源工程师培训授证项目

3 低静态电流技术应用和选型

Product number	Images	Output options	Iout (max) (A)	Vin (max) (V)	Vin (min) (V)	Vout (max) (V)	Vout (min) (V)	Fixed output options (V)	Noise (µVrms)	Package type	Pin count	Iq (typ) (mA)	Thermal resistance θJA (°C/W)	Price (USD)
<input type="checkbox"/> TPS7A20 数据表: PDF HTML 查看备选方案		Fixed Output	0.3	6	1.6	5.5	0.8	0.9, 1.05, 1.1, 1.2, 1.5, 1.8, 1.82, 1.85, 2, 2.2, 2.4, 2.5, 2.7, 2.8, 2.85, 2.9, 3, 3.1, 3.2, 3.3, 3.6, 4, 4.2, 4.5, 5, 5.5	7	DSBGA, SOT-23, X2SON	4, 5	0.0065	179.1, 199.6, 201.4	US\$0.
<input type="checkbox"/> TPS7A21 数据表: PDF HTML 查看备选方案		Fixed Output	0.5	6	2	5.5	0.8	2.8, 3, 3.45	7.7	POWERWCSOP	4	0.007	187.1, 197.1	US\$0.
<input type="checkbox"/> TPS727 数据表: PDF HTML 查看备选方案		Fixed Output	0.25	5.5	2	5	1	1, 1.1, 1.5, 1.8, 1.85, 1.9, 2.5, 2.7, 2.8, 2.85, 3, 3.3, 4.8, 5	33.5	DSBGA, WSON	4, 6	0.008	160	US\$0.
<input checked="" type="checkbox"/> LP5910 数据表: PDF HTML 查看备选方案		Fixed Output	0.3	3.3	1.3	1.8	0.9	0.9, 1, 1.1, 1.2, 1.725, 1.8, 1.825	12	DSBGA, WSON	4, 6	0.012	79	US\$0.
<input type="checkbox"/> LP5907-Q1 数据表: PDF HTML		Fixed Output	0.25	5.5	2.2	4.5	1.2	1.2, 1.3, 1.5, 1.8, 2.2, 2.5, 2.8, 2.85, 2.9, 3, 3.3, 3.8, 4.5	6.5	SOT-23, X2SON	4, 5	0.012	193, 195.1, 197.8	US\$0.
<input type="checkbox"/> LP5907 数据表: PDF HTML 查看备选方案		Fixed Output	0.25	5.5	2.2	4.5	1.2	1.2, 1.5, 1.8, 1.9, 2.2, 2.5, 2.7, 2.75, 2.8, 2.825, 2.85, 2.9, 3, 3.1, 3.2, 3.3, 3.7, 4, 4.5	6.5	DSBGA, SOT-23, X2SON	4, 5	0.012	186.9, 191.6, 193, 194.1, 197.8	US\$0.
<input type="checkbox"/> LP3983 数据表: PDF		Fixed Output	0.005	6	2.7	2.5	2.5	2.5	-	DSBGA	5	0.014	255	US\$0.



TPS7A10

Low V_{IN} /Low V_{OUT} , Low I_Q 300mA LDO

Features

- V_{IN} Range: 0.75V to 3.3V
- V_{OUT} Range: 0.5V to 3.0V (fixed)
- Ultra Low Dropout: 70mV (max) at 300mA
- Low Quiescent Current
 - $V_{IN} I_Q = 1.6\mu A$ (typ)
 - $V_{BIAS} I_Q = 6\mu A$ (typ)
- 1.25% output accuracy over Load/Line/Temp(-40C to 85C)
- V_{BIAS} Range: 1.7V to 5.5V
- Packages available:
 - 0.74mmx1.09mm WCSP-5
 - 1.5mmx1.5mm WSON (DSE)

Benefits

- Low V_{IN} operation for optimizing solution efficiency
- Allows powering BIAS from as low as 2.5V rail
- Low V_{OUT} for support of new ASIC cores.
- Allows for minimum power loss at low V_{IN}
- Low quiescent current for minimum standby power
- Able to reject noise from upstream DC/DC stage
- Ideal for rails which require tight regulation.
- Ensures well controlled power-down event
- Small solution size for space constrained applications.



Applications

- Smart Watch and Fitness Trackers
- Wireless Headphones and Earbuds
- Camera Modules
- Smart Phones and Tablets
- Portable Medical Devices

Device	V_{IN} Range V_{BIAS} Range	I_{OUT}	$V_{IN} I_Q$ $V_{BIAS} I_Q$	V_{OUT} Range	Max V_{DO}	Package
TPS7A10	0.75V-3.6V 1.7V-5.5V	300mA	1.6 μA 6.0 μA	0.5V to 3.0V	70mV @ 300mA	1.5x1.5 DFN WCSP-5



TPS7A05

200mA, Ultra Low I_Q LDO in 1x1 package

Features

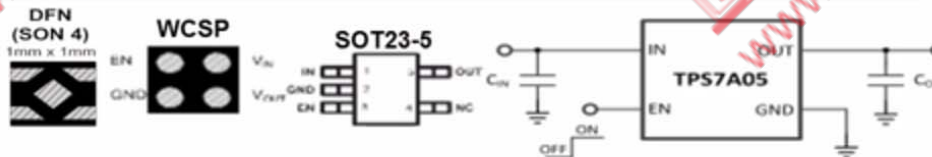
- Ultra Low I_Q: 1uA (typ); 2uA,max (-40C to +85C)
- 1% Typical Accuracy, 1.5% (-40C to +85C)
- Fast Transient Response
 - 1mA to 100mA load: 50us recovery
- Very Low Dropout
 - 235mV(max) @ I_{OUT}=200mA, V_{OUT}=3.3V
- Available in fixed output voltages 0.8V to 3.3V
- WCSP (0.65mm X 0.65mm), SON-4 (1x1)
- Available with Active Pulldown (P version)
- T_J = -40 to +125C operation

Benefits

- Low current for long battery life
- Stable output for low power applications
- Suited for applications with low duty cycles and long sleep durations
- Allows for maximum efficiency by optimizing upstream power for minimum power loss.
- Powers processor with sub 1.2V power rails
- Small packaging for space critical applications
- Allows for compliance loads requiring deterministic power down behavior.

Applications

- Wearable fitness devices
- Tablets, e-readers, Remote Controls
- Portable Consumer products
- Always-on power supplies



Device	V _{IN}	I _{OUT}	V _{DO}	I _Q	Package
TPS7A05	1.4V – 5.5V	200mA	235mV (max)	1uA	WCSP (0.35mm pitch) QFN-4 (1x1); SOT23-5



TPS6280x

600mA/1A Ultra Low Iq Buck Converter in 0.35mm pitch WCSP

Features

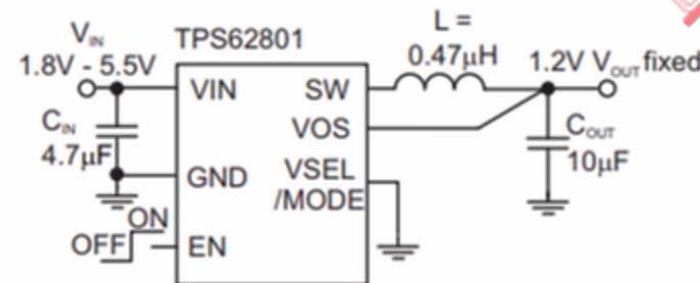
- DCS-Control™ Topology
- 1.8V to 5.5V Input Voltage Range
- Iq: 2.3uA
- 4MHz or 1.5 MHz switching frequency
 - Smallest size or highest efficiency
- Iout up to 1A/600mA
- Vout range 0.4V – 3.3V
- 1% Vout accuracy
- VSEL pin featuring 16 selectable Output Voltages
 - TPS62800 / 6: 0.4V – 0.775 (25mV steps), 0.7V Fixed
 - TPS62801 / 7: 0.8V – 1.55V (50mV steps), 1.2V Fixed
 - TPS62802 / 8: 1.8V – 3.3V (100mV steps), 1.8V Fixed
- WCSP 1.05 x 0.7 package, 0.35mm pitch

Applications

- Wearable devices
- Smartphones
- IoT
- Optical Modules

Benefits

- No external feedback divider network / fixed VOUT
- VSEL pin offers high flexibility in VOUT programming
- Super small WCSP package size
- 2.3uA Iq for high light load (sub 100uA load current) efficiency
- Supports 5mm² solution size and 0.6mm solution height (0402 inductor, 0201 capacitors)
- Optimized pinout for easy layout even with 0201 size passive components





TPS62740/2/3/31/5/6/8

360nA Buck Converter family in QFN, WCSP and module

Features

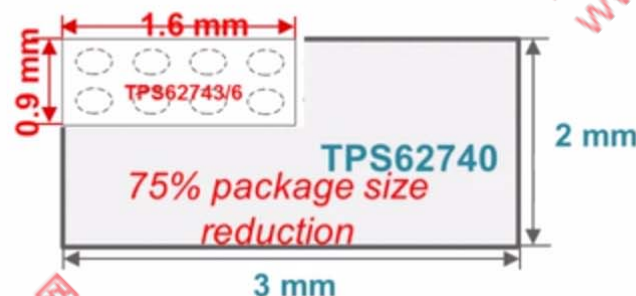
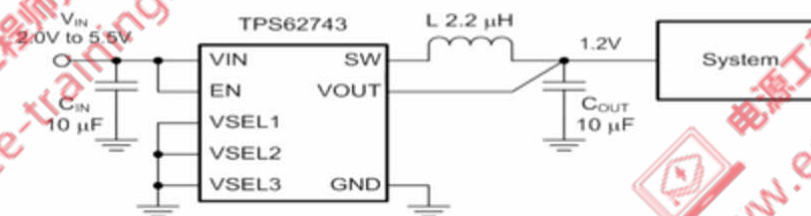
- VIN Range: 2.0V to 5.5V
- Ultra Low Quiescent Current of typical 360nA
- Up to 90% Efficiency @ 10 μ A Load Current
- 300mA / 400mA Output Current
- 3 options:
 - a) **x43**: 8 User Selectable Vout (1.2V, 1.5V, 1.8V, 2.1V, 2.5V, 2.8V, 3.0V, 3.3V)
 - b) **x46**: Integrated Vin switch & Selectable Output Voltages: 1.2V and 1.8V
 - c) **x48**: Integrated load switch & Selectable Output Voltages: 1.2V and 1.8V
 - d) **x431**: 1.3V, 1.4V, 1.6V, 1.7V, 1.9V, 2.0V, 2.9V, 3.1V (400mA)
- No Ripple True 100% Mode

Applications

- MCU, BLE and Sensor Supply
- Wearable Electronics
- Medical Healthcare
- Home Automation

Benefits

- RF Friendly DCS-Control™
- Discharge VOUT
- 3x2 QFN (TPS62740), 1.6 x 0.9 WCSP (TPS62743/6/8) and SIP module (TPS82740)
- Tiny WCSP8 package, 1.6mm x 0.9mm x 0.5mm, Pitch 0.4mm





TPS62840

60nA I_Q Buck Converter

Features

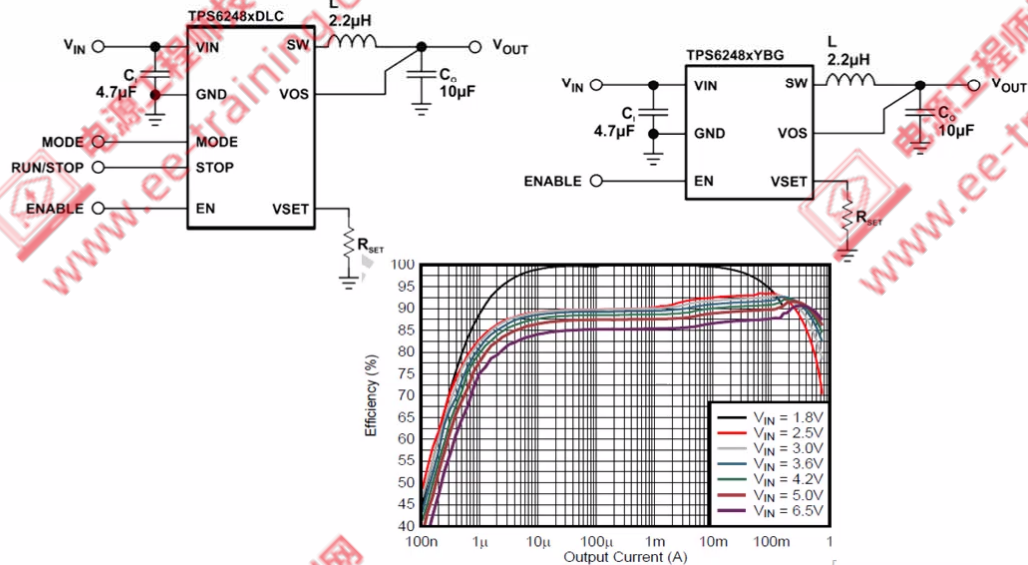
- 1.8V to 6.5V Input Voltage Range
- I_{OUT} up to 750mA
- I_Q: 60nA
- 100% Duty Cycle with 150nA I_Q
- 80% efficiency at 1μA I_{OUT} (3.6V_{IN} to 1.8V_{OUT})
- 16 V_{OUT} selectable with VSET
- V_{OUT} range:
 - 1.8V - 3.3V (100mV steps) TPS62840
 - 0.8V - 1.55V (50mV steps) TPS62841
- Selectable Forced-PWM and STOP modes
- Output Discharge function
- Package: 8 pin SON 1.5x2mm, 6 pin WCSP 1x1.5mm

Applications

- Smart meters, Smart Thermostat, Tracking devices
- Always-on Industrial Sensors, Medical portable devices
- Personal Electronics (IoT), Wearables

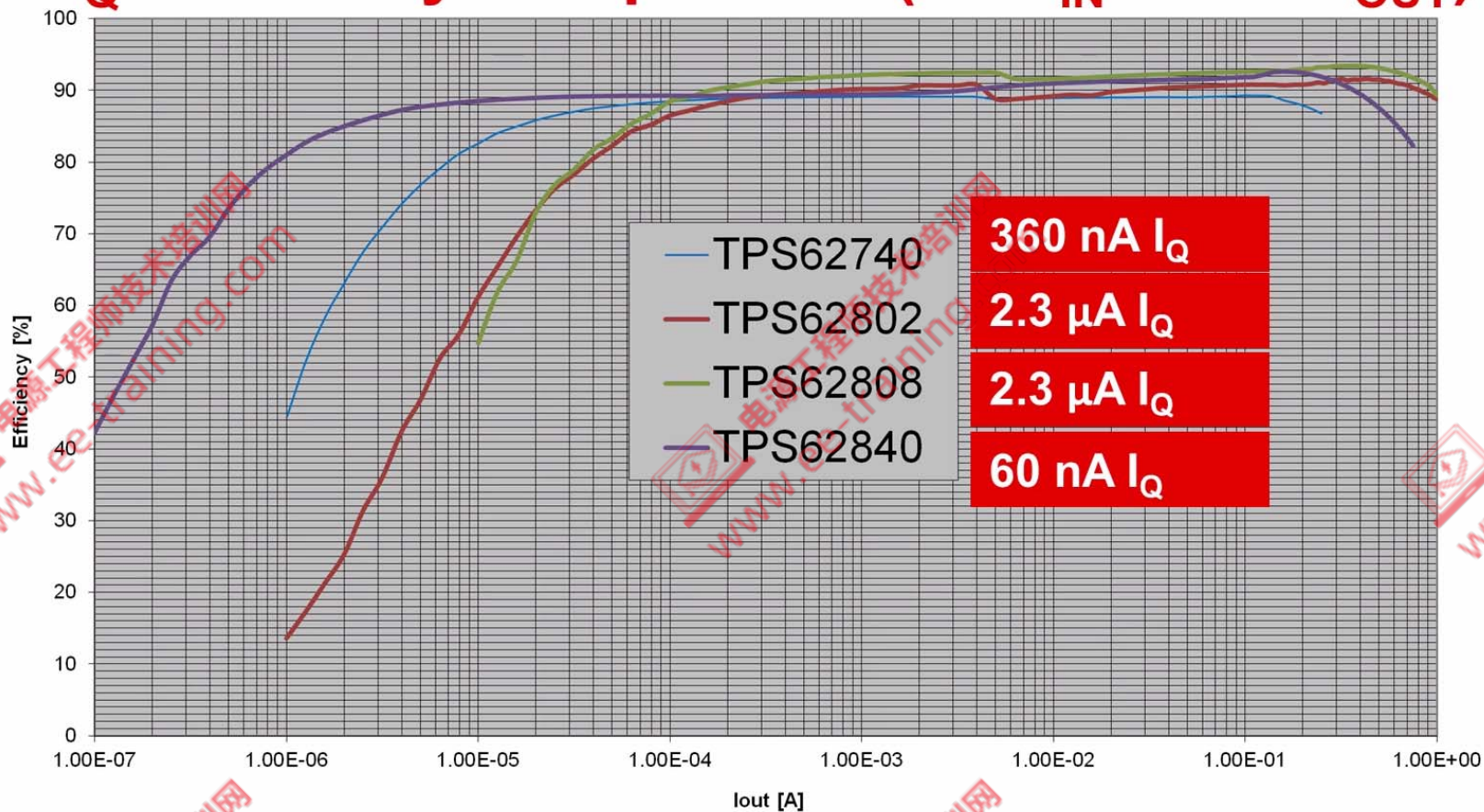
Benefits

- Higher light load efficiency → Longer battery life time
- Enables operation of Low Power MCU from various battery configurations: 2s-LiMnO₂, 1x LISOCL₂, 4s/2s Alkaline, Li-Po, Coin Cell
- Stop function for noise sensitive applications
- Small package / small solution size



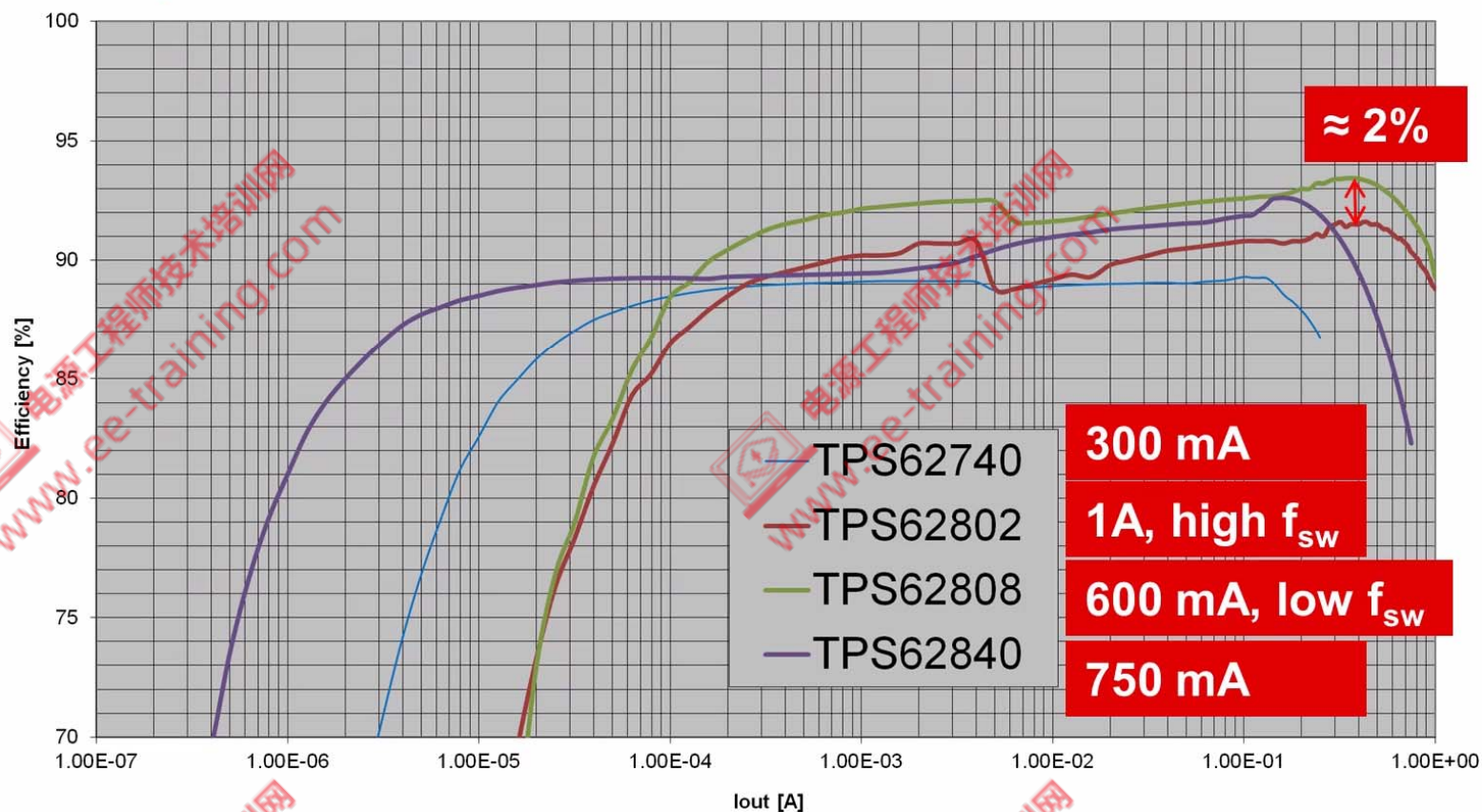


Low I_Q efficiency comparison ($3.6V_{IN}$ to $1.8V_{OUT}$)





Low I_Q efficiency comparison ($3.6V_{IN}$ to $1.8V_{OUT}$)





3 低静态电流技术应用和选型

Ultra-low power

Next generation is coming...

	old solution		new solution	
I_Q	TPS62 740 360nA	→	TPS62 840 60nA	← Extend battery run time
V_{IN}	2.2V to 5.5V	→	1.8V to 6.5V	← For more battery topologies
V_{OUT} (fixed / selectable)	1.8V to 3.3V	→	0.8V to 3.3V	← More flexibility, more use-cases
I_{OUT}	300mA	→	750mA	← More applications / projects
Temperature spec	-40 to +85°C	→	-40 to +125°C	← More headroom, more use-cases
Package	2x3 QFN	→	1.5x2 QFN	← Smaller board / more functionality
Efficiency	82% @ 10 μ A I_{OUT} 50% @ 1 μ A I_{OUT}	→	90% @ 10 μ A I_{OUT} 85% @ 1 μ A I_{OUT}	← Enable 'Always-On' systems



电源工程师培训授证项目

3 低静态电流技术应用和选型



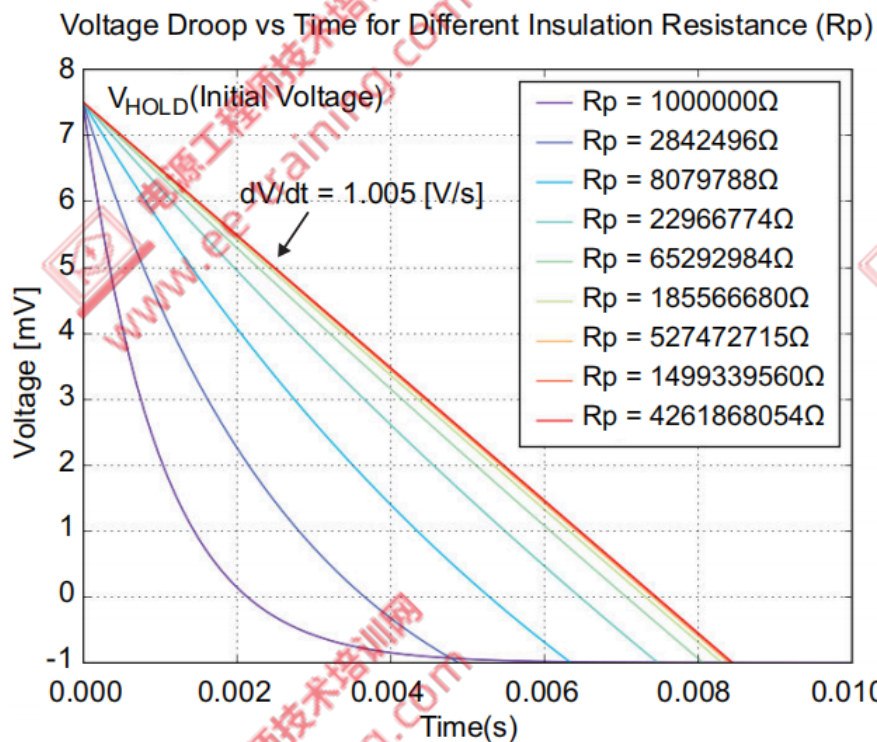
使用超低 IQ 降压转换器（如 60nA TPS62840）为常态化在线应用:智能电表），可实现 10 年的电池运行时间。

 **TEXAS INSTRUMENTS**



3 低静态电流技术应用和选型

外部电容器泄漏是一个问题。任何稳压器的输入和输出电容器都会使 I_Q 增大。下图给出一种评估外部电容器泄漏的方法，其中针对不同电容器绝缘电阻 (R_p) 规格测量了电容器的压降与时间的关系。将电容器充电至已知电压并监测压降随时间的变化可以很好地量化和比较不同的电容器。具有最大绝缘电阻的电容器随时间变化产生的压降最小。

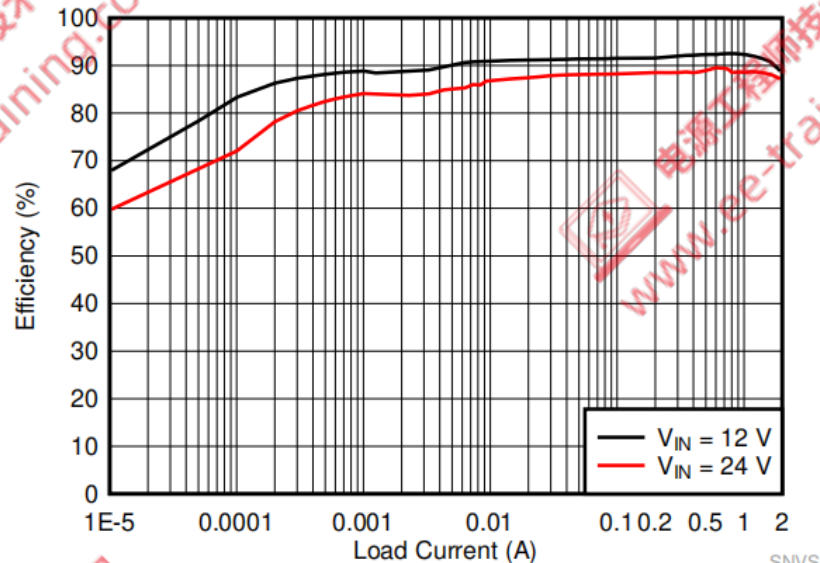
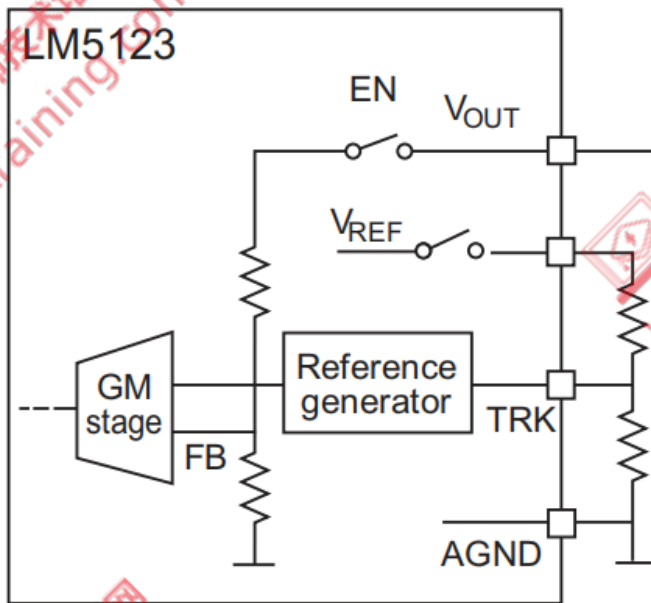


不同绝缘电阻的压降与时间的关系



3 低静态电流技术应用和选型 减少外部元件数量，从而降低汽车应用中的 IQ

LM5123-Q1 宽 VIN 升压控制器通过交换传统的外部反馈电阻器和内部低电压基准来实现较低的 I_Q ，从而以很低的成本实现低值电阻器。通过电压基准和反馈电阻器的这种创新布局，可实现比一般器件如 $300\mu\text{A}$ 的二十分之一还低的 I_Q 。



LMR43610/20 效率: $V_{OUT} = 3.3\text{V}$ (固定值), 2.2MHz

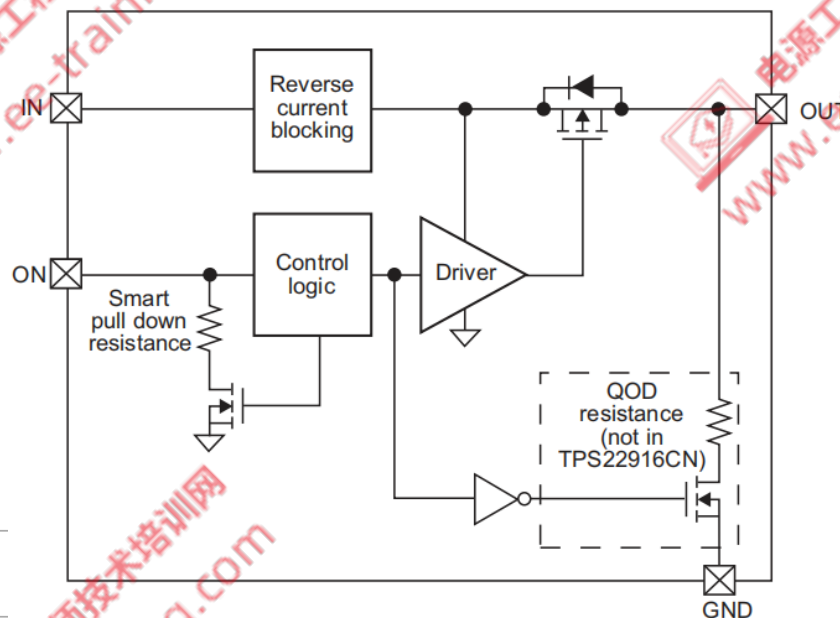


3 低静态电流技术应用和选型

支持系统级低 I_Q 的智能开启或启用功能

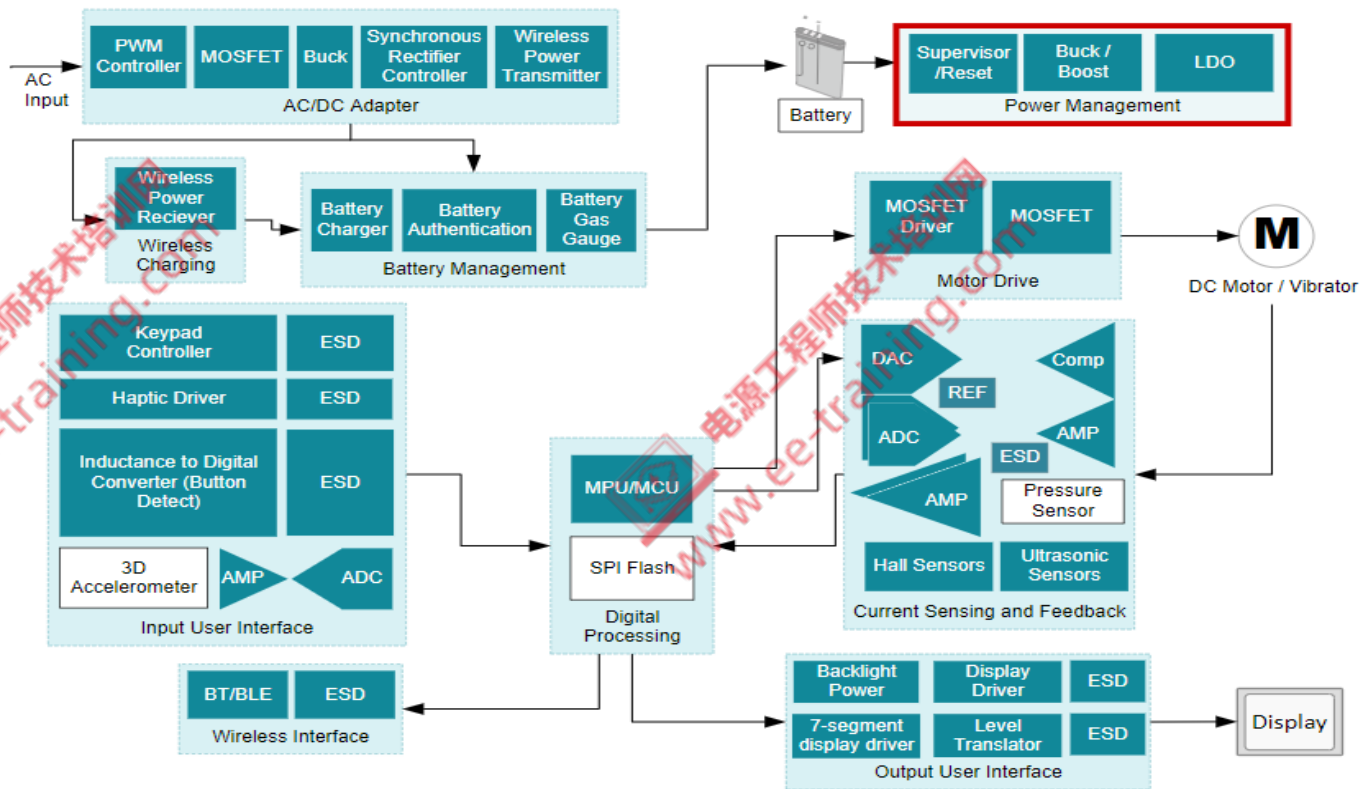
器件级别的改进可以简化系统级别的设计。其中一个例子是 **TPS22916** 上的智能启用功能，这是一款 **60mΩ**、**10nA** 泄漏负载开关。除超低漏电和 **I_Q** 性能之外，该器件还提供了一种智能方式来打开开关。通常，**ON** 引脚上有一个内部下拉电阻器，以确保在控制开关的微控制器进入高阻抗状态时电源开关不会意外打开，然而这些上拉和下拉电阻器会对系统级 I_Q 产生不利的影 响。与许多纳安级 I_Q 产品一样，**TPS22916** 具有智能启用或使能电路，可在软启动之后开启下拉，从而消除了之前常开的 I_Q ，并在器件断电后仍保证已知的低阻抗状态。

可在器件关闭后保证 **ON** 引脚低阻抗的智能使能电路





3 低静态电流技术应用和选型



使用低 Iq 电压监控器延长手持电子设备的电池寿命



电源工程师培训授证项目

04

小结



4 小结

I_Q 是现代低功耗 **DC/DC** 变换器中一个重要的 **IC** 设计参数，为了在空载或轻载条件下实现高效率，需电源解决方案在保持超低电源电流的同时严格调节输出。

TI 低 I_Q 技术的主要优势包括：

- 低功耗、常开型电源 - 超低漏电工艺技术和新型控制拓扑使电池运行时间延长。
- 快速响应时间 - 快速唤醒比较器和零 I_Q 反馈控制可在不影响低功耗性能的情况下实现快速动态响应。
- 外形尺寸小 - 电阻器和电容器的面积缩减技术有助于集成到空间受限的应用中，同时不影响静态功率。

低 I_Q 的主要产品类别

- 电池充电器 IC
- 降压/升压和反相稳压器
- 线性稳压器 (LDO)
- 电源开关
- 串联电压基准
- 并联电压基准
- 降压稳压器
- 升压稳压器
- 监控器和复位 IC



参考资料:

1. Texas Instruments, IQ: What It Is, What It Isn't, and How to Use I.
2. Texas Instruments, Extend Battery Life Using a DC-DC Converter with Programmable Input Current Limi.
3. Overcoming Low-IQ Challenges in Low-Power Applications

<https://www.ti.com/power-management/low-quiescent-current.html>



电源工程师培训授证项目



西安电子科技大学
XIDIAN UNIVERSITY

谢 谢

西安电子科技大学

2023年11月

