

超低静态电流 (I_Q) COT 控制同步降压转换器

摘要

随着便携式、穿戴式和物联网 (IOT) 设备的普及，闲置模式下超低能耗的需求成为延长电池寿命和降低维护成本的关键要求。在这类应用中，系统大部分时间处于待机或闲置模式。对于许多应用而言，降低静态电流 (I_Q) 是减少功耗和管理电池寿命的重要因素。较低的静态电流意味着在超轻负载条件下具有更高的效率，从而延长电池寿命。本文探讨了如何基于 M3TEK 专有的 COT 控制架构实现低 I_Q 技术，而不损害系统性能。此外，还针对 M3TEK 的 MT8351 系列超低静态电流设备，说明了测量超低 I_Q 系统轻载效率的方法。

目录

1. 引言
2. 低 I_Q 设计优化
3. 低 I_Q 设备的精确效率测量
4. 结论
5. 参考文献

引言

当今世界正变得更加依赖电池供电。随着便携式、穿戴式和物联网 (IoT) 设备的快速普及，这类全新的应用正在快速崛起。这些应用的主要电源来自于电池或环境中收集的能量，而系统大部分的运行时间都处于闲置或待机模式。为了延长电池寿命并降低维护成本，系统在闲置模式下必须实现极低的能耗。同时，电源管理系统还需要快速响应负载变化，并为传感器和无线通信设备等敏感电路提供严格稳定的电压轨道。

为实现这些目标，低静态电流 (I_Q) 是 DC-DC 转换器设计中的一个重要指标，因为它可以提升设备的待机时间并节约能量。因此，在待机或休眠模式下的静态电流 (I_Q) 是影响电池寿命或其他设备效能的限制因素。DC-DC 设备需要采用高效的电能转换技术、优化的控制架构以及合理化的电源管理模块，以实现低静态电流 (I_Q)。

低静态电流 I_Q 设计的优化

对于 DC-DC 转换器来说，静态电流 (I_Q) 与无负载时的输入电流有所不同，这一点有时会被工程师误解。静态电流 (I_Q) 的定义是在无负载且非切换模式下，设备处于启动状态且输出电压仍保持稳定时，DC-DC 转换器所消耗的电流。所谓的「无负载」是指没有电流流入输出端；而「非切换」表示高压侧和低压侧功率开关均处于关闭状态。静态电流 (I_Q) 通常来自 V_{IN} 、 V_{OUT} 或数据手册中定义的其他引脚。

在降压转换器中，如 M3TEK 的 MT8123 数据手册中所规定的， I_Q 仅来自 V_{IN} 。对于升压或升降压转换器，静态电流 (I_Q) 会从 V_{IN} 和 V_{OUT} 两端流入，例如在 M3TEK 的升压转换器 MT5070 中所指定的情况。

PARAMETER		TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
Quiescent Current I_Q		$V_{FB} = 0.63V$, Float OUT and SS pins		18	22	μA

表 1： 降压转换器的规格 I_Q 来自 MT8123 数据表。

PARAMETER			TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
I_Q	Quiescent current	V_{IN}	$V_{EN}=V_{IN}=1.2V$, $V_{OUT}=3.3V$		2		μA
		V_{OUT}			10		μA

表 2： 升压转换器的规格 I_Q 来自 MT5070 数据表。

对于 DC-DC 转换器而言，所有关键性能指针都必须达到要求，包括瞬时响应、噪声、输出电压精度和效率。而现在，降低静态电流 (I_Q) 也成为了一个重要目标，并需将其降低数个数量级。为了在满足低 I_Q 的同时平衡这些相互冲突的需求，DC-DC 芯片必须采用一系列技术和设计方法。

PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNIT
Quiescent Current	I_Q	$V_{IN} = 3.6V$ $V_{OS}=1.8V$, Switching and No-switching			350		nA
		100% Duty-Cycle Mode			500		nA
Shutdown Current	I_{SHDN}	$V_{EN} = 0V$, $V_{IN} = 5.5V$			0.1	0.15	μA
VOUT accuracy	$V_{OS_Accuracy}$			-1		+1	%
VOUT PIN leakage Current I_{OUT}	V_{OS_Leak}	$V_{EN}=5V$, $V_{SET}=10K$, $V_{OUT}=5V$	MT8351ADER		10		nA
			MT8351DDER				
			MT8351QDER		60		nA
EN Internal Pull Down Current	I_{EN}				15		nA

表 3： 低 I_Q 装置的规格来自 MT8351 数据表。

MT8351 是一款 1.5MHz、采用恒定导通时间 (COT) 控制的同步降压转换器，具有仅 350nA 的超低静态电流 (I_Q)。它可在 2.0V 至 5.5V 的输入电压范围内提供高达 1A 的输出电流。

MT8351 系列通过外部电阻选择输出电压，输出电压范围宽广，从 0.4V 到 3.6V。恒定导通时间 (COT) 控制方案简化了环路补偿设计，并提供出色的负载瞬时响应。MT8351 消耗极低的静态电流，因此可实现卓越的轻载效率。控制环路中的高增益误差放大器确保了优异的负载和线路调节性能。

当输入电压接近或低于所需的输出电压时，MT8351 将进入 100% 占空比 模式，此时高压侧开关 (HS) 会持续导通以供电输出。在此模式下，MT8351 即使是在无负载情况下，静态电流仍可保持在超低的 500nA。MT8351 具备逐周期电流限制和 间歇模式 (hiccup mode)，可在过载或短路故障情况下提供保护。

MT8351 采用小型 6 引脚 DFN 2x2mm 封装。

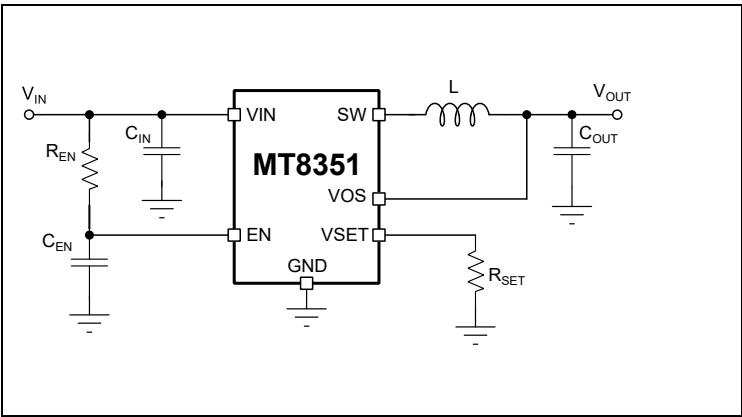


图 1： MT8351 应用电路

如图 2 所示，IQ 确实会随输入电压和温度变化而变化。

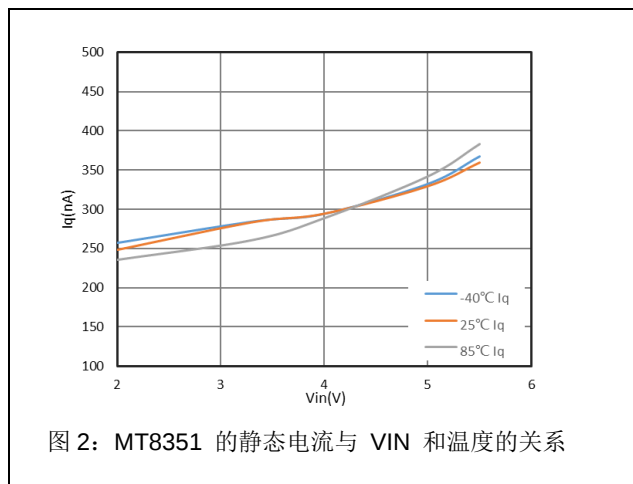


图 2：MT8351 的静态电流与 VIN 和温度的关系

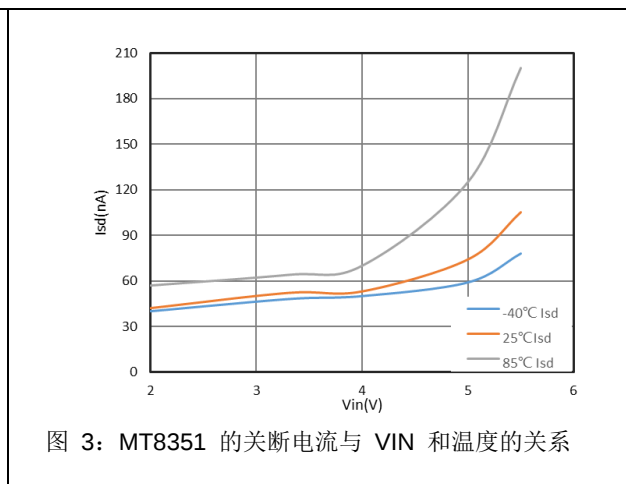


图 3：MT8351 的关断电流与 VIN 和温度的关系

为了实现这些性能，MT8351 采用了多种设计技术：

1. COT 控制架构与瞬时响应

电源转换器需要在保持输出电压稳定的同时，快速响应输入电压或负载的变化。对于低 IQ 器件而言，内部模拟电路的偏置电流必须降低，这将影响其响应时间。MT8351 采用了恒定导通时间 (COT) 控制架构，结合动态偏置电流控制，在确保超轻载效率的同时，实现了出色的负载瞬时响应，如图 4 所示。

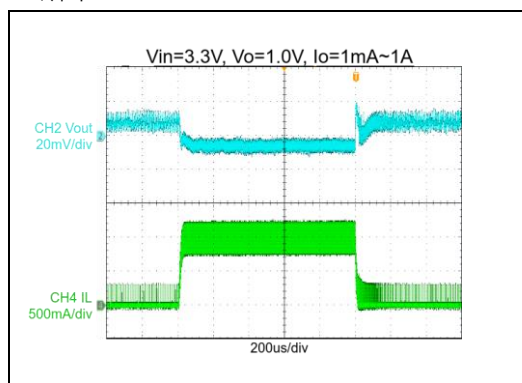


图 4：MT8351 的负载瞬态响应

MT8351 采用了内部补偿的恒定导通时间 (COT) 控制。当反馈电压 (FB) 低于参考电压时，控制电路会立即打开高压侧开关 (HS)，无需误差放大器来提升补偿电压。高压侧开关 (HS) 将开启一个预设的导通时间 (on-time)，以提升电感电流，然后低压侧开关 (LS) 会打开，让电感电流下降。如果反馈电压再次低于参考电压，该循环将重复执行。

由于能够对反馈电压下跌做出实时响应，并简化环路补偿，恒定导通时间 (COT) 控制相较于竞争对手的 COT 定时器，提供了更优异的瞬时响应。

2. R2D 转换

当负载电流仅在微安 (uA) 级别时，反馈分压电阻网络的电流消耗可能占总电流消耗的一个重要部分。为了解决这个问题，MT8351 将反馈网络整合到内部，并在启动期间使用一个外部电阻来设定输出电压。这项技术结合其他设计改进，使 MT8351 达到仅 350nA 的极低静态电流 (I_Q)。

当器件启动后，R2D (电阻转数字) 转换会开始，检测外部电阻 R_{SET} 的值。一个内部电流源会向外部电阻施加电流，内部的 ADC 会读取产生的电压，并将其转换为对应的数字码。接着，该数字码被储存以选择正确的输出电压，随后 R2D 转换电路会被关闭，以进一步减少电流消耗。

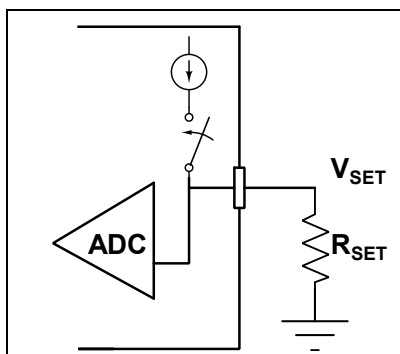


图 5: R2D 界面

启动延迟时间 (t_{Delay}) 会根据所选择的 V_{SET} 值而有所不同。如图 6 和图 7 所示，当 $V_{SET} = 0$ 时，启动延迟最短；当 $V_{SET} = 16$ 时，启动延迟最长。

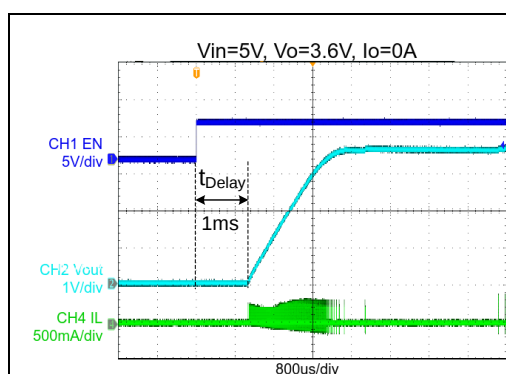


图 6: MT8351QDER $V_{SET}=0$ 时的启动延迟 1ms

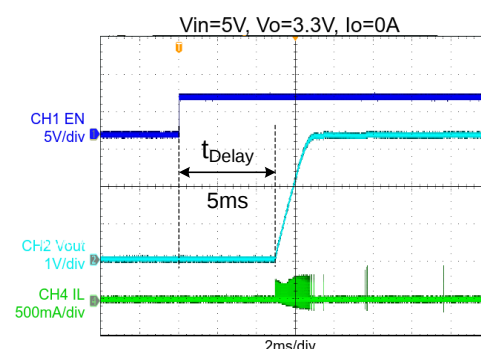


图 7: MT8351QDER $V_{SET}=16$ 时启动延迟 5ms

为确保 R2D 转换正确执行，请确保在 R2D 转换过程中， V_{SET} 引脚到接地 (GND) 之间没有额外的电流路径，且总电容不超过 30pF。否则，转换结果将产生错误的数字码，导致选择错误的输出电压。

下表 (表 4) 列出了 RSET 的正确电阻值，以设定 MT8351 的对应输出电压。R2D 转换器设计为与表 4 中的电阻值配合使用，并要求电阻精度达到 1%。

VSET	Output Voltage Setting [V]			RSET [Ω]
	MT8351ADER	MT8351DDER	MT8351QDER	
1	0.4	0.8	1.8	10k
2	0.425	0.85	1.9	12.1k
3	0.45	0.9	2.0	15.4k
4	0.475	0.95	2.1	18.7k
5	0.5	1.0	2.2	23.7k
6	0.525	1.05	2.3	28.7k
7	0.55	1.1	2.4	36.5k
8	0.575	1.15	2.5	44.2k
9	0.6	1.2	2.6	56.2k
10	0.625	1.25	2.7	68.1k
11	0.65	1.3	2.8	86.6k
12	0.675	1.35	2.9	105.0k
13	0.7	1.4	3.0	133k
14	0.725	1.45	3.1	162k
15	0.75	1.5	3.2	205k
16	0.775	1.55	3.3	249k
17	0.8	1.6	3.4	VIN
0	1.0	1.8	3.6	GND

表 4: MT8351 系列的 R2D 输出电压设置

3. 小型 6 pin 引脚封装

透过内部补偿、集成高性能功率器件以及单电阻设定输出电压，MT8351 采用小型 6 pin 引脚 DFN 2x2mm 封装，如图 8 所示。该器件仅需少量外部无源组件，即可实现一个高效率、快速且稳健的电源转换解决方案，非常适合需要超低静态电流 (IQ) 和精确稳压输出电压的应用。

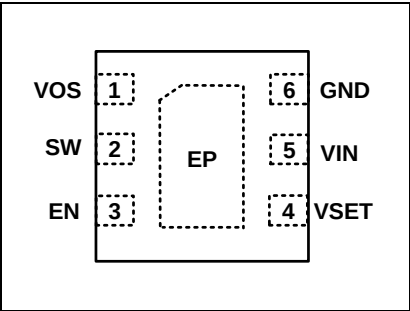


图 8：MT8351 封装

超低 I_Q 器件的准确效率测量

随着超低静态电流 (I_Q) DC-DC 转换器的静态电流降低至微安 (μA) 以下范围，在进行效率测量时必须特别小心。外部组件或测量仪器可能会影响测量结果的准确性。

电压表和电流表必须正确连接至适当的位置。例如，图 9 所示的测试设置可用于轻载运行时的效率测量。测量时，需从输入电流中扣除流入输入电压表的电流；而输出电流则需将输出电压表的漏电流与负载电流相加。

图 10 显示了 MT8351 的效率测量数据。在 5V 输入 / 3.3V 输出的 10 μA 轻载条件下，效率约为 85.5%，而在整个负载电流范围内，效率可高达 95%。

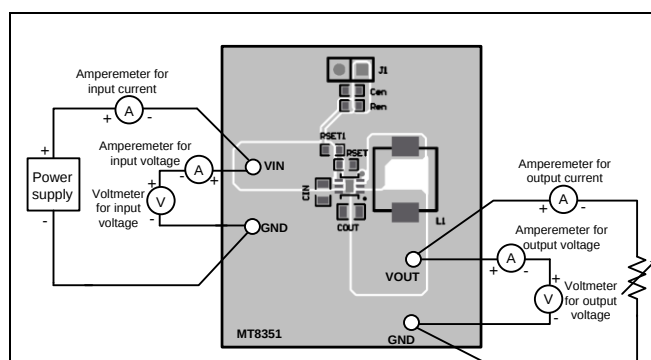


图 9：MT8351 低 I_Q 的效率测量方法

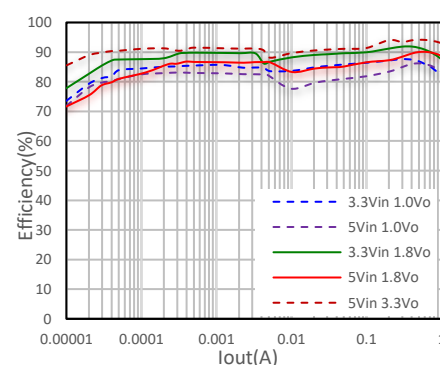


图 10：MT8351 低 I_Q 的效率测量数据

结论

随着电池技术、能量收集技术、低功耗系统集成 (SOC)、低功耗无线通信和传感器技术的进步，始终开启的电池供电设备逐渐普及到我们的家庭、办公大楼和工厂中。它们为我们提供了更安全、更舒适和更节能的工作和生活环境。低静态电流 (I_Q) 成为这些系统中的一个重要要求。通过低静态电流 (I_Q) 的电源管理解决方案，系统可以实现更低的维护成本、更长的设备寿命和更佳的用户体验。M3TEK 的 MT8351 是一款超低静态电流 (I_Q) 的 DC-DC 装置，能实现出色的轻载效率以及其他以下优势：

- 超低的静态电流 (I_Q) 350nA -- 整个负载电流范围内最高可达 95% 的效率。
- 在 500nA 以下的 I_Q 下实现 100% 占空比运行。
- 快速的 COT 控制和内部补偿的高增益误差放大器 -- 出色的负载瞬时响应和负载/线路调节。
- R2D -- 由单个电阻选择的 18 种输出电压范围从 0.4V 到 3.6V。
- 封装 -- 小型 DFN2x2mm_6L。

参考文献

- 一. “MT8351 同步降压转换器，具有 350nA 的超低 I_Q ” M3TEK 数据表。

关于作者

Amin 胡 是 M3Tek AE 部门 高级应用工程师。

Bo Yang 博士是 M3Tek AE 部门协理。

Yang Yang 是 M3Tek AE 部门经理。