

超低靜態電流 (IQ) COT 控制同步降壓轉換器

摘要

隨著便攜式、穿戴式和物聯網 (IOT) 設備的普及，閒置模式下超低能耗的需求成為延長電池壽命和降低維護成本的關鍵要求。在這類應用中，系統大部分時間處於待機或閒置模式。對於許多應用而言，降低靜態電流 (I_Q) 是減少功耗和管理電池壽命的重要因素。較低的靜態電流意味著在超輕負載條件下具有更高的效率，從而延長電池壽命。本文探討了如何基於 M3TEK 專有的 COT 控制架構實現低 I_Q 技術，而不損害系統性能。此外，還針對 M3TEK 的 MT8351 系列超低靜態電流設備，說明了測量超低 I_Q 系統輕載效率的方法。

目錄

1. 引言
2. 低靜態電流 I_Q 設計的最佳化
3. 低 I_Q 設備的精確效率測量
4. 結論
5. 參考文獻

引言

當今世界正變得更加依賴電池供電。隨著便攜式、穿戴式和物聯網 (IoT) 設備的快速普及，這類全新的應用正在快速崛起。這些應用的主要電源來自於電池或環境中收集的能量，而系統大部分的運行時間都處於閒置或待機模式。為了延長電池壽命並降低維護成本，系統在閒置模式下必須實現極低的能耗。同時，電源管理系統還需要快速響應負載變化，並為傳感器和無線通訊設備等敏感電路提供嚴格穩定的電壓軌道。

為實現這些目標，低靜態電流 (I_Q) 是 DC-DC 轉換器設計中的一個重要指標，因為它可以提升設備的待機時間並節約能量。因此，在待機或休眠模式下的靜態電流 (I_Q) 是影響電池壽命或其他設備效能的限制因素。DC-DC 設備需要採用高效的電能轉換技術、最佳化的控制架構以及合理化的電源管理模組，以實現低靜態電流 (I_Q)。

低靜態電流 I_Q 設計的最佳化

對於 DC-DC 轉換器來說，靜態電流 (I_Q) 與無負載時的輸入電流有所不同，這一點有時會被工程師誤解。靜態電流 (I_Q) 的定義是在無負載且非切換模式下，設備處於啟動狀態且輸出電壓仍保持穩定時，DC-DC 轉換器所消耗的電流。所謂的「無負載」是指沒有電流流入輸出端；而「非切換」表示高壓側和低壓側功率開關均處於關閉狀態。靜態電流 (I_Q) 通常來自 V_{IN} 、 V_{OUT} 或數據手冊中定義的其他引腳。

在降壓轉換器中，如 M3TEK 的 MT8123 數據手冊中所規定的， I_Q 僅來自 V_{IN} 。對於升壓或升降壓轉換器，靜態電流 (I_Q) 會從 V_{IN} 和 V_{OUT} 兩端流入，例如在 M3TEK 的升壓轉換器 MT5070 中所指定的情況。

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：降壓轉換器的規格 I_Q 來自 MT8123 資料表。

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：升壓轉換器的規格 I_Q 來自 MT5070 資料表。

對於 DC-DC 轉換器而言，所有關鍵性能指標都必須達到要求，包括暫態響應、噪聲、輸出電壓精度和效率。而現在，降低靜態電流 (I_Q) 也成為了一個重要目標，並需將其降低數個數量級。為了在滿足低 I_Q 的同時平衡這些相互衝突的需求，DC-DC 晶片必須採用一系列技術和設計方法。

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			
EN Internal Pull Down Current	I_{EN}			15		nA

表 3： 低 I_Q 裝置的規格來自 MT8351 資料表。

MT8351 是一款 1.5MHz、採用**恆定導通時間 (COT)** 控制的同步降壓轉換器，具有僅 350nA 的超低靜態電流 (I_Q)。它可在 2.0V 至 5.5V 的輸入電壓範圍內提供高達 1A 的輸出電流。

MT8351 系列通過外部電阻選擇輸出電壓，輸出電壓範圍寬廣，從 0.4V 到 3.6V。恆定導通時間 (COT) 控制方案簡化了環路補償設計，並提供出色的負載暫態響應。MT8351 消耗極低的靜態電流，因此可實現卓越的輕載效率。控制環路中的高增益誤差放大器確保了優異的負載和線路調節性能。

當輸入電壓接近或低於所需的輸出電壓時，MT8351 將進入 **100% 占空比** 模式，此時高壓側開關 (HS) 會持續導通以供電輸出。在此模式下，MT8351 即使在無負載情況下，靜態電流仍可保持在超低的 500nA。MT8351 具備逐週期電流限制和 **間歇模式 (hiccup mode)**，可在過載或短路故障情況下提供保護。

MT8351 採用小型 6 引腳 **DFN 2x2mm** 封裝。

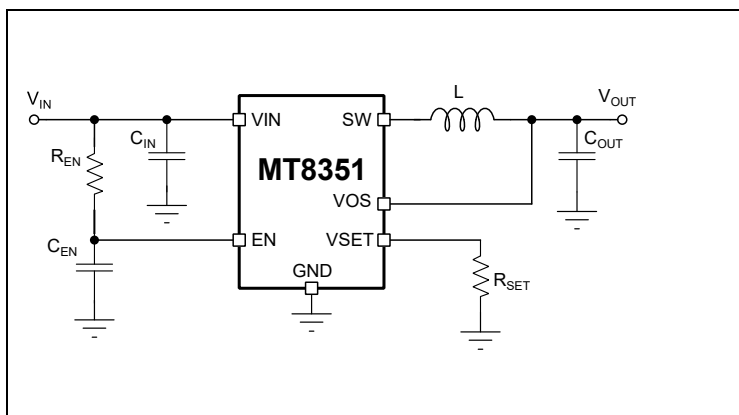


圖 1： MT8351 應用電路

如圖 2 所示，IQ 確實會隨輸入電壓和溫度變化而變化。

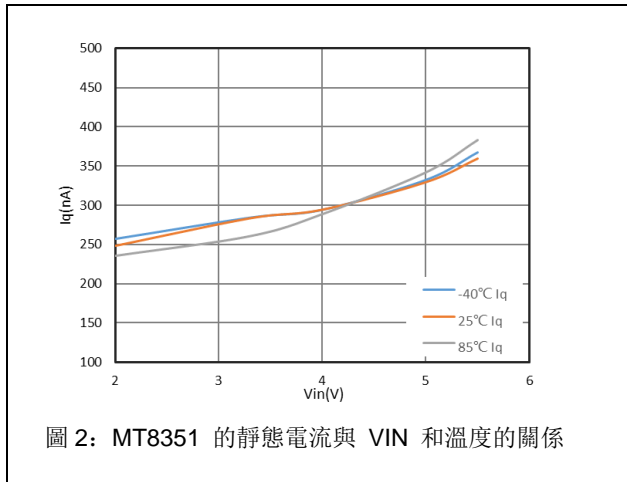


圖 2: MT8351 的靜態電流與 VIN 和溫度的關係

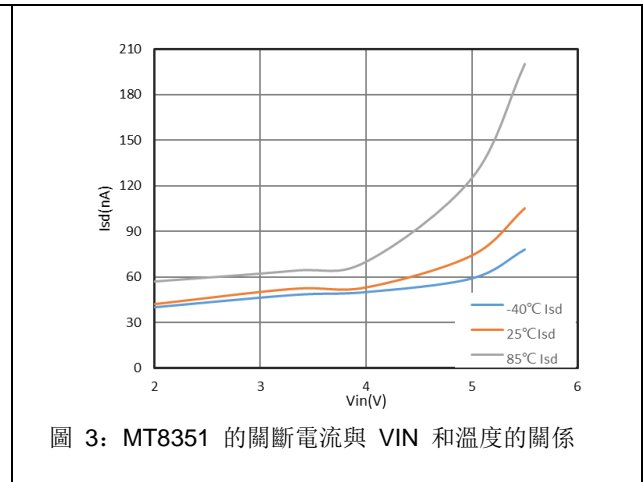


圖 3: MT8351 的關斷電流與 VIN 和溫度的關係

為了實現這些性能，MT8351 採用了多種設計技術：

1. COT 控制架構與暫態響應

電源轉換器需要在保持輸出電壓穩定的同時，快速響應輸入電壓或負載的變化。對於低 IQ 器件而言，內部類比電路的偏置電流必須降低，這將影響其響應時間。MT8351 採用了恆定導通時間 (COT) 控制架構，結合動態偏置電流控制，在確保超輕載效率的同時，實現了出色的負載暫態響應，如圖 4 所示。

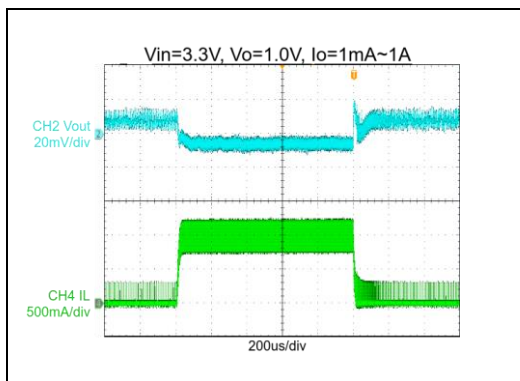


圖 4: MT8351 的負載瞬態回應

MT8351 採用了內部補償的恆定導通時間 (COT) 控制。當反饋電壓 (FB) 低於參考電壓時，控制電路會立即打開高壓側開關 (HS)，無需誤差放大器來提升補償電壓。高壓側開關 (HS) 將開啟一個預設的導通時間 (on-time)，以提升電感電流，然後低壓側開關 (LS) 會打開，讓電感電流下降。如果反饋電壓再次低於參考電壓，該循環將重複執行。

由於能夠對反饋電壓下跌做出即時響應，並簡化環路補償，恆定導通時間 (COT) 控制相較於競爭對手的 COT 定時器，提供了更優異的暫態響應。

2. R2D 轉換

當負載電流僅在微安 (uA) 級別時，反饋分壓電阻網絡的電流消耗可能佔總電流消耗的一個重要部分。為了解決這個問題，MT8351 將反饋網絡整合到內部，並在啟動期間使用一個外部電阻來設定輸出電壓。這項技術結合其他設計改進，使 MT8351 達到僅 350nA 的極低靜態電流 (I_Q)。當器件啟動後，R2D (電阻轉數位) 轉換會開始，檢測外部電阻 R_{SET} 的值。一個內部電流源會向外部電阻施加電流，內部的 ADC 會讀取產生的電壓，並將其轉換為對應的數位碼。接著，該數位碼被儲存以選擇正確的輸出電壓，隨後 R2D 轉換電路會被關閉，以進一步減少電流消耗。

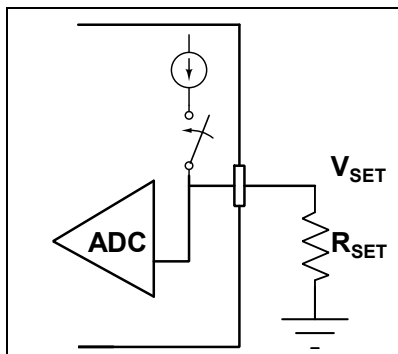


圖 5: R2D 介面

啟動延遲時間 (t_{Delay}) 會根據所選擇的 V_{SET} 值而有所不同。如圖 6 和圖 7 所示，當 $V_{SET} = 0$ 時，啟動延遲最短；當 $V_{SET} = 16$ 時，啟動延遲最長。

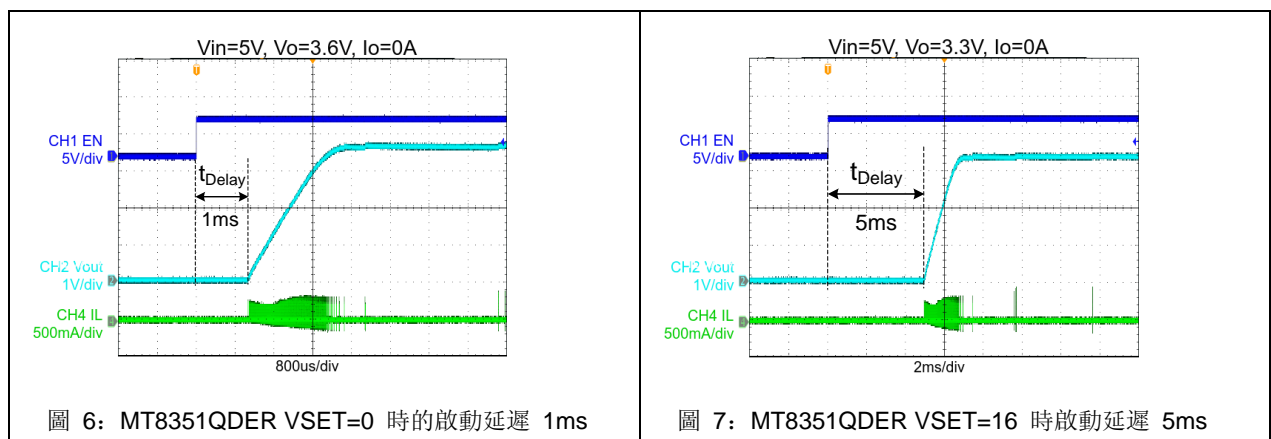


圖 6: MT8351QDER $V_{SET}=0$ 時的啟動延遲 1ms

圖 7: MT8351QDER $V_{SET}=16$ 時啟動延遲 5ms

為確保 R2D 轉換 正確執行，請確保在 R2D 轉換 過程中， V_{SET} 引腳到接地 (GND) 之間沒有額外的電流路徑，且總電容不超過 30pF。否則，轉換結果將產生錯誤的數位碼，導致選擇錯誤的輸出電壓。

下表 (表 4) 列出了 RSET 的正確電阻值，以設定 MT8351 的對應輸出電壓。R2D 轉換器設計為與表 4 中的電阻值配合使用，並要求電阻精度達到 1%。

VSET	Output Voltage Setting [V]			R _{SET} [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	V _{IN}
0	1.0	1.8	3.6	GND

表 4：MT8351 系列的 R2D 輸出電壓設置

3. 小型 6 pin 引腳封裝

透過內部補償、集成高性能功率器件以及單電阻設定輸出電壓，MT8351 採用小型 6 pin 引腳 DFN 2x2mm 封裝，如圖 8 所示。該器件僅需少量外部無源元件，即可實現一個高效率、快速且穩健的電源轉換解決方案，非常適合需要超低靜態電流 (I_Q) 和精確穩壓輸出電壓的應用。

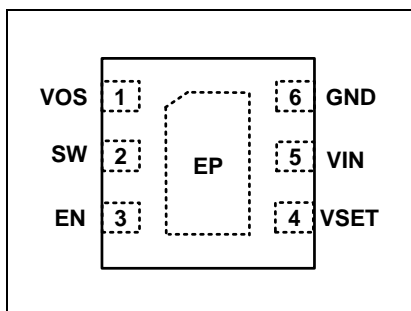


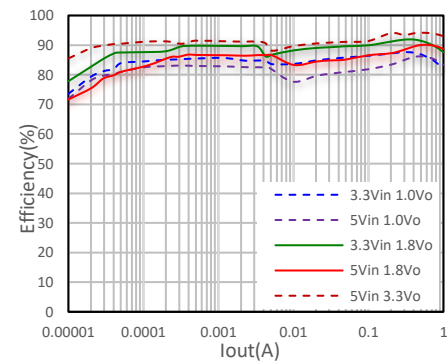
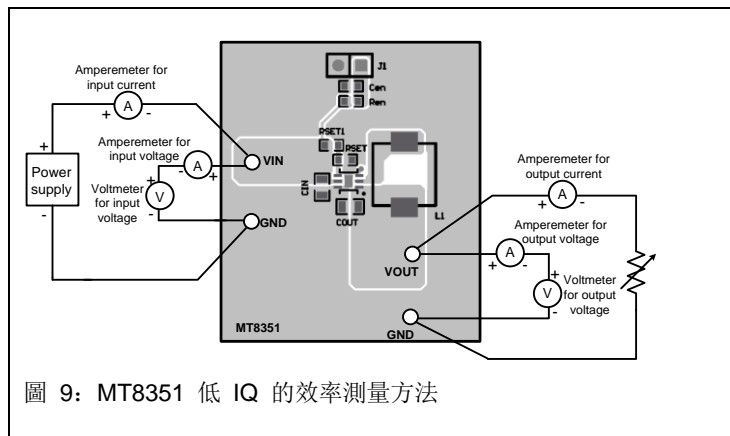
圖 8：MT8351 封裝

超低 I_Q 器件的準確效率測量

隨著超低靜態電流 (I_Q) DC-DC 轉換器的靜態電流降低至微安 (μA) 以下範圍，在進行效率測量時必須特別小心。外部元件或測量儀器可能會影響測量結果的準確性。

電壓表和電流表必須正確連接至適當的位置。例如，圖 9 所示的測試設置可用於輕載運行時的效率測量。測量時，需從輸入電流中扣除流入輸入電壓表的電流；而輸出電流則需將輸出電壓表的漏電流與負載電流相加。

圖 10 顯示了 MT8351 的效率測量數據。在 5V 輸入 / 3.3V 輸出的 10 μA 輕載條件下，效率約為 85.5%，而在整個負載電流範圍內，效率可高達 95%。



結論

隨著電池技術、能量收集技術、低功耗系統集成 (SOC)、低功耗無線通訊和傳感器技術的進步，始終開啟的電池供電設備逐漸普及到我們的家庭、辦公大樓和工廠中。它們為我們提供了更安全、更舒適和更節能的工作和生活環境。低靜態電流 (I_Q) 成為這些系統中的一個重要要求。通過低靜態電流 (I_Q) 的電源管理解決方案，系統可以實現更低的維護成本、更長的設備壽命和更佳的用户體驗。

M3TEK 的 MT8351 是一款超低靜態電流 (I_Q) 的 DC-DC 裝置，能實現出色的輕載效率以及其他以下優勢：

- 超低的靜態電流 (I_Q) 350nA -- 整個負載電流範圍內最高可達 95% 的效率。
- 在 500nA 以下的 I_Q 下實現 100% 占空比運行。
- 快速的 COT 控制和內部補償的高增益誤差放大器 -- 出色的負載暫態響應和負載/線路調節。
- R2D -- 由單個電阻選擇的 18 種輸出電壓範圍從 0.4V 到 3.6V。
- 封裝 -- 小型 DFN2x2mm_6L。

參考文獻

- 一. “MT8351 同步降壓轉換器，具有 350nA 的超低 I_Q ” M3TEK 數據表。

關於作者

Amin 胡 是 M3Tek AE 部門 高級應用工程師。

Bo Yang 博士是 M3Tek AE 部門協理。

Yang Yang 是 M3Tek AE 部門經理。