

新穎的整合無損耗電流感測方案

文 • Ann Starks

關鍵字 • MOSFET、電流感測、電感、負載開關、雙晶片式、PCB

原設備製造商(OEM)在提升其產品設計的效能方面正面臨著不小的壓力。因此，能夠精確地監測關鍵電流通道的電流就極為重要，這樣才可以作出恰當的電源管理決策，並將系統性能提升至最高。現有的設計中使用了幾種不同的方法來實現此目的。然而，這些普通方法當中的每一種都有其明顯劣勢。對精密電流感測方法的需求已經催生了整合型雙晶片式方案，這種方案在提供精確的無損耗電流感測的同時，還將對印刷電路板(PCB)佈線及元件數量的影響減至最輕。

現有電流感測技術

傳統電流感測方法使用精密感測電阻，將其直接插入在要感測的電流通路中。精密電阻兩端的電壓降被量測，以計算流過電阻的電流。然而，這種方法會滋生顯著的功率損耗，特別是在大電流條件下。

其它常見電流感測技術包括使用下述元件或參數：

1. MOSFET 導通電阻 ($R_{DS(ON)}$)
2. 電感等效串聯電阻 (ESR)
3. 電感電壓
4. 平均電流
5. 比流器

MOSFET $R_{DS(ON)}$

雖然使用 MOSFET 導通電阻便無須使用額外元件，但不同 MOSFET 元件的導通電阻可能不同，而且導通電阻值會隨著溫度而變化。溫度從 27°C 升高至 100°C 時，導通電阻的變化幅度可能高達 35%。

電感 ESR

這種方法使用電感的等效串聯電阻來量測負載電流。簡單的低通電阻電容 (RC) 網路濾波器感測電感 ESR 兩端的電壓。然而，要使這種方法有效，必須知悉電感值。不同電感的電感值的差異可能多達 20%。

電感電壓

這種方法類似於上述電感 ESR 方法。量測電感電壓並使用式 (1) 來計算電流。然而，不同電感的電感值差異可能達到 20% 甚至更高，這會影響量測的準確度。

$$V_L = L * \frac{di}{dt} \quad (1)$$

比流器

這種方法最常用於大功率系統，通過使用比流器來感測電感電流的一小部分。但這種方法實施成本高，要求使用變壓器，並佔用較大的電路板空間。

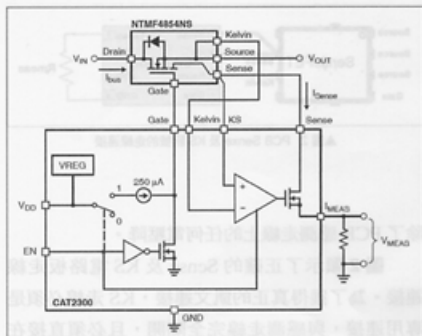
新穎的雙晶片式 (2-Chip) 無損耗電流感測方案

每種傳統電流感測方法都在準確度上有局限，影響了設計的整體效能，並可能佔用不小的電路板空間。基於這些原因，開發出新的精密無損耗電流感測方法。

新的無損耗量測方案使用單個 MOSFET 裸片。少量源極單元 (cell) 在裸片上隔離，並連接至單獨感測接腳，產生匹配的內部鏡像 MOSFET。源極單元與感測單元之比極大，當電流流經主 MOSFET 時，就通過鏡像 MOSFET 產生小得多的電流。兩個電流之間的關係稱作電流比 (I_{RATIO})，其定義如式 (2) 所示。典型的 I_{RATIO} 值是 400。源極及感測端子必須置於相同的電勢，從而使 I_{RATIO} 保持為已知的恆定值。

$$I_{RATIO} = \frac{I_{SOURCE}}{I_{SENSE}} \quad (2)$$

主 MOSFET 和鏡像 MOSFET 共用閘極及漏極連接，但有獨立源極。連接至主 MOSFET 源極的開爾文連接 (Kelvin connection) 提供途徑來監測源極電壓而不會影響其電壓值。這單裸片 MOSFET 通過量測流過鏡像 MOSFET 的小電流，提供無損耗的電流監測。由於是在主電流通道之外進行量測 (I_{SENSE} 比 I_{SOURCE} 小 400 倍)，對系統能效的影響被降至最低。因此，有可能量測感測電流，並因而精確地計算負載電流。單裸

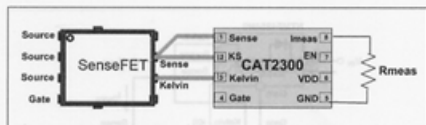


▲圖 1 量測電路

片 MOSFET 亦即 SENSEFET。

圖 1 顯示了安森美半導體開發的一種新穎的雙晶片式電流感測方案，此方案能夠進行精密的無損耗電流感測。其中，NTFM4854NS 是一款 SENSEFET，而 CAT2300 是一款 SENSEFET 控制器及電流監測元件，用於負載開關應用。CAT2300 能針對 0.9 V 至 1.5 V 電源軌監測 1 A 至 25 A 的負載電流。它的設計帶有雙重目的：無損耗電流監測和控制 SENSEFET 導通及關閉。SENSEFET 的閘極由 CAT2300 的邏輯電平 EN 接腳控制。邏輯高電平導通 SENSEFET，反之，邏輯低電平關閉 SENSEFET。閘極導通時間可以通過在 VDD 及閘極之間增加上拉電阻來調節（導通時間更快），或是通過在 SENSEFET 閘極與源極之間增加電容來調節（導過程更平滑）。

電流感測電路由放大器及 MOSFET 跟隨段 (follower stage) 組成。凱文訊號用於電壓參考，運算放大器 / 跟隨段通過將感測端子與凱文端子維持在相同電勢來精確追蹤感測電流。CAT2300 設計中包含額外的凱文感測 (KS) 接腳，作為鏡像 MOSFET 源極的凱文連接 (Sense 接腳)，從而消



▲圖 2 PCB Sense 及 KS 訊號的走線連接

除了 PCB 感測走線上的任何電壓降。

圖 2 顯示了正確的 Sense 及 KS 電路板走線連接。為了獲得真正的凱文連接，KS 走線必須是專用連接，與感測走線完全隔開，且必須直接在 Sense 接腳起線。遵循良好的佈線慣例很重要，從而將 PCB 走線的損耗降至最低。CAT2300 的佈局應盡可能地貼近 SENSEFET，保持較短的 PCB 走線長度；使用恰當的凱文連接將有正面作用。推薦使用帶有單獨接地層的 PCB。

外部電阻 R_{MEAS} 置於 CAT2300 的 I_{MEAS} 接腳與地之間，產生與流經鏡像 MOSFET 的感測電流成正比的可擴展電壓。此電壓 V_{MEAS} 的計算公式如下：

$$V_{MEAS} = I_{SENSE} * R_{MEAS} \quad (3)$$

通過結合等式 2 和 3 可以確定負載電流：

$$I_{LOAD} = I_{RATIO} * \frac{V_{MEAS}}{R_{MEAS}} \quad (4)$$

量測電阻選擇

R_{MEAS} 的值取決於幾項因素，包括應用的電壓軌及負載電流範圍。式 (5) 描述了針對設定應用所可能的最大 R_{MEAS} 值。 V_K 是 SENSEFET 凱文端子的電壓， I_{MAX} 是應用中使用的最大負載電流。 I_{RATIO} 取 SENSEFET 元件資料表規定的值。

$$R_{MEAS} = \frac{V_K - 0.1}{I_{SENSE}} = I_{RATIO} * \frac{V_K - 0.1}{I_{MAX}} \quad (5)$$

例如，假定安森美半導體 NTMFS4854NS SENSEFET 用於 1.5 V 電源軌應用，最大負載電流為 10 A。可以使用 SENSEFET 資料表中規定的最大 $R_{DS(on)}$ 值來計算最大負載電流時的 V_K ，如式 (6) 所示。

$$V_K = V_{IN} - I_{MAX} * R_{DS(ON)MAX} \quad (6)$$

NTMFS4854NS 的典型 I_{RATIO} 為 399，4.5 VGS 時最大 $R_{DS(ON)}$ 為 3.9mΩ。使用等式 6 即可知： $V_K = 1.5 \text{ V} - (10 \text{ A}) * (3.9\text{m}\Omega) = 1.461 \text{ V}$ 。負載電流為 10A 時，CAT2300 的 I_{MEAS} 接腳上能夠產生的最大電壓 1.461 V。

通過結合式 (5) 和式 (6) 可以計算 R_{MEAS} 最大值。一定不能超過此值。

$$R_{MEAS} = 399 * \left(\frac{1.461 - 0.1}{10} \right) = 54.3 \Omega \quad (7)$$

為了在完整輸入電壓範圍內獲得最佳量測結果，應該為 R_{MEAS} 選擇最大負載電流時在 CAT2300 I_{SENSE} 接腳產生 0.8 V 電壓的電阻值：

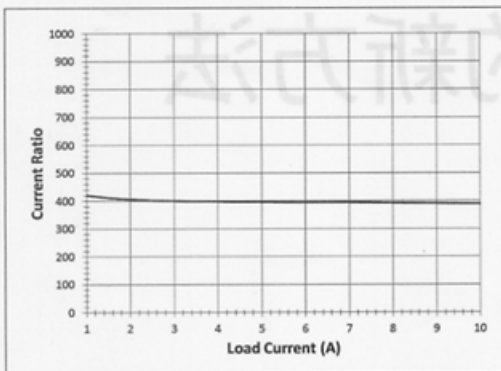
$$R_{MEAS} = V_{MEAS} * \frac{I_{RATIO}}{I_{LOAD}} = 0.8 \text{ V} * \frac{I_{RATIO}}{I_{LOAD}} \quad (8)$$

就此例而言，為了在滿載時在 V_{MEAS} 上獲得 0.8 V 電壓， R_{MEAS} 變為：

$$R_{MEAS} = 0.8 \text{ V} * \frac{399}{10 \text{ A}} = 31.9 \Omega \quad (9)$$

為了獲得最佳量測精度，推薦使用容限小於 1% 的電阻。

圖 3 顯示了使用安森美半導體雙晶片式方案，



▲圖 3 不同負載電流 (1 A 至 10 A) 條件下的 I_{RATIO}

負載電流範圍為 1 至 10 A 的負載開關應用所測得的 I_{RATIO} 值。如圖所示， I_{RATIO} 曲線在負載電流範圍內實際上非常平滑。由於 CAT2300 內部運算放大器的輸入偏置電壓的緣故，電流低於 1 A 時測

得的 I_{RATIO} 準確度較低。如前所述，源極及感測端子必須處於相同電勢以維持恆定的 I_{RATIO} 。運算放大器的輸入偏置電壓在兩個端子之間產生電壓差，導致量測誤差。在電流低於 1 A 時，這量測誤差的影響最大。

本文介紹的新雙晶片式無損耗電流感測方案能夠用於精確地量測電流，而無需繁瑣的多元件分立式方案。這新穎方案能夠節省電路板佔用面積、降低能耗、提升可靠性及降低物料單 (BOM) 成本。採用本文所述的應用電路，低至 1 A 的寬負載電流範圍內的 I_{RATIO} 保持為已知的恆定數值。●

本文作者 Ann Starks 任職於安森美半導體應用工程師