

實現利用廢熱供電無線感測器 超低電壓能量採集器達陣

文/David Salemo

由於量測和控制所需超低功率無線感測器用量激增，加上新型能量採集技術的運用，使製造由局部環境能量，而非由電池供電的全自主型系統成為可能。在替換或維護電池不方便、昂貴或危險時，這顯然是有好處的。

由採集能量供電的感測器節點可在建築物自動化、無線/自動量測、前瞻性維護以及其他很多工業、軍事、汽車和消費類應用中使用。能量採集的好處是顯而易見的，但是有效的能量採集系統則需要智慧電源管理電路，以將微量免費能量轉換成無線感測器系統可使用的形式。

工作週期為主要癥結點

很多無線感測器系統只消耗非常低的平均功率，從而成為由採集能量供電的主要對象。因為感測器節點常常用來監視緩慢變化的物理量，因此可不經常進行量測，也毋須經常發送量測資料，因此感測器節點是以非常低的工作週期工作，相對地，平均功率需求也很小，如若一個感測器系統在工作時需要3.3伏特/30毫安培(100毫瓦)，但是每10秒僅有10毫秒時間在操作中，那麼所需平均功率僅為0.1毫瓦，假定在傳送突發的間隔期間不工作時，感測器系統電流降至數微安培。

電源管理為能量採集過程缺失環節

僅消耗微瓦功率的微處理器和類比感測器以及小型、低成本、低功率RF收發器得到了廣泛採用。在實現實際的能量採集系統時，缺失的一環始終可以靠一個或多個常見免費能源工作的電源轉換器/電源管理元件。LTC3108能在輸入電壓低至20毫伏特時啟動，為熱能採集補上缺失的這一環。LTC3108採用3毫米×4毫米×0.75毫米、十二接腳雙扁平無鉛(DFN)或十六接腳縮小型封裝(SSOP)，為用熱電產生器(TEG)、以低至1°C的溫度差(ΔT)為無線感測器供電提供一個精巧、簡單和高度整合的電源管理解決方案。

LTC3108用一個小型升壓變壓器和一個內部金屬氧化物半導體場效電晶體(MOSFET)形成一個諧振振盪器(圖1)。變壓器的升壓比為1:100時，該轉換器能以低至20毫伏特的輸入電壓啟動。變壓器的次級繞組向充電泵和整流器電路饋送電壓，然後為該IC供電，並為輸出電容器充電。2.2伏特線性穩壓器(LDO)的輸出設計成首先進入穩定狀態，以盡快為微處理器(MPU)供電，之後，為主輸出電容器充電至由VS1和VS2接腳設定的電壓(2.35伏特、3.3伏特、4.1伏特或5伏特)，以為感測器、類比電路或射頻(RF)收發器供電。當無線感測器工作並發送資料，因而出現低工作週期負載脈衝時， V_{OUT} 儲存電容提供所需的突發能



量，同時提供一個開關輸出 (V_{OUT2})，以為沒有停機或休眠模式的電路供電。電源良好輸出提醒主機，主輸出電壓接近其穩定值。一旦 V_{OUT} 進入穩定狀態，所採集的電流就被導向 V_{STORE} 接腳，以為可選儲存電容或可再充電電池充電。若能量採集電源是間歇性的，此儲存元件就可用來為系統供電。還有一個 LTC3108-1 版本的元件，除了提供一套不同的可選輸出電壓 (2.5 伏特、3 伏特、3.7 伏特或 4.5 伏特) 以外，與 LTC3108 完全相同。

熱電產生器基本原理簡介

TEG 其實就是逆向工作的熱電冷卻器 (TEC)。熱電發生器應用席貝克效應 (Seebeck Effect) 將設備 (通過該設備產生熱量流動) 上的溫度差轉換成電壓。輸出電壓的幅度和極性取決於 TEG 上溫度差的幅度和極性，若 TEG 的熱端和冷端掉換過來，輸出電壓就改變極性。TEG 可用受溫度影響的電壓源模型加一個串聯電阻 (規定為 AC 電阻) 來代表。

TEG 的尺寸和電氣規格多種多樣。大多數模組都是方形的，每邊的長度從 10~50 毫米不等，標準厚度為 2~5 毫米，其開路輸出電壓視尺寸不同而有別，範圍為 10~50 mV/K。一般而言，對於給定的 ΔT ，較大的模組可提供較大的 V_{OUT} ，但是有更高的 AC 阻抗和更低的熱阻。就給定應用而言，所需要的 TEG 大小取決於可用的 ΔT 、負載需要的最大平均功率及用來冷卻 TEG 一側的散熱片熱阻。

為從 TEG 抽取可獲得的最大功率，轉換器輸入阻抗必須相對於 TEG AC 電阻提供合理的負載匹配。LTC3108 轉換器呈現約 2.5 歐姆的輸入阻抗，剛好

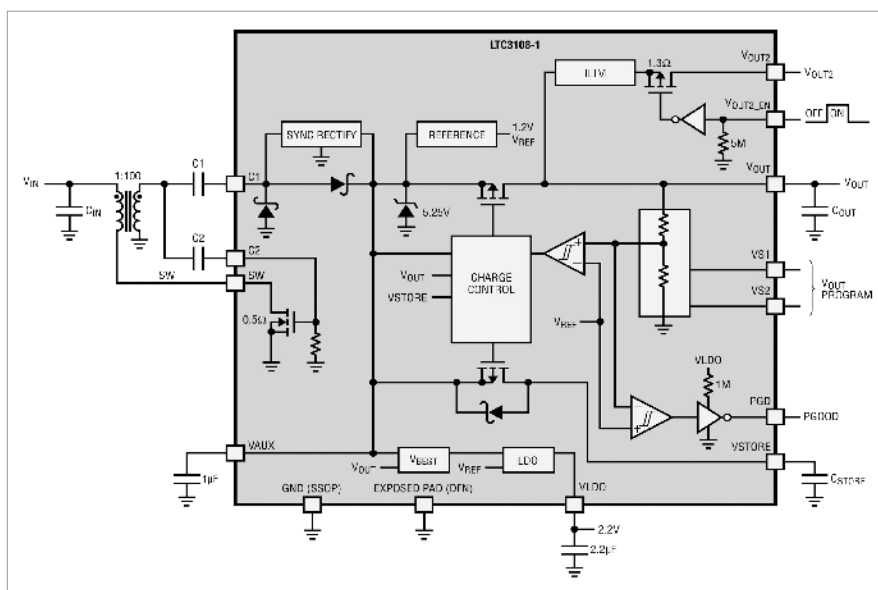


圖1 LTC3108方框圖

在大多數 TEG AC 電阻 (0.5~7.5 歐姆) 範圍的中間。

熱量評估不可或缺

當在一個溫暖的表面放置 TEG 以採集能量時，必須為 TEG 溫度較低的一側增加散熱片，以允許熱量傳送到周圍空氣中。由於散熱片的熱阻，在 TEG 上呈現的 ΔT 將低於溫暖表面和環境之間的溫度差，因 TEG 具有相對較低的熱阻 (典型情況下在 1~20 °C/W 範圍內)。

圖2所示的簡單熱模型，考慮如下例子，一個大型機器在周圍環境溫度為 25°C、表面溫度為 35°C 的情況下工作。將一個 TEG 連接到這台機器上，同時在 TEG 溫度較低 (環境溫度) 的一側加上一個散熱片。

散熱片和 TEG 的熱阻會確定 10°C 總溫差 (ΔT) 的哪一部分存在於 TEG 的兩端。假定熱源 (R_S) 的熱阻可忽略不計，若 TEG 的熱阻為 4°C/W，散熱片的熱阻 (R_{HS}) 亦為 4°C/W，落在 TEG 上的 ΔT 僅為 5°C。

由於較大的 TEG 表面積增大，所以大型 TEG 比小型 TEG 熱阻低，因此需要較大的散熱片才有利。在受

載脈衝期間允許 V_{OUT} 有0.33伏特的下降。請注意， I_{PULSE} 包括 V_{LDO} 、 V_{OUT2} 及 V_{OUT} 上的負載，但充電電流未包括在內，因為與負載相比，它可能非常小。

$$C_{OUT}(\mu F) = \frac{I_{PULSE}(mA) \cdot t_{PULSE}(ms)}{dV_{OUT}} \dots\dots\dots (式子1)$$

考慮到這些要求， C_{OUT} 必須至少為 $454\ \mu F$ ，因此選擇一個 $470\ \mu F$ 的電容。採用所示TEG(以及大小合

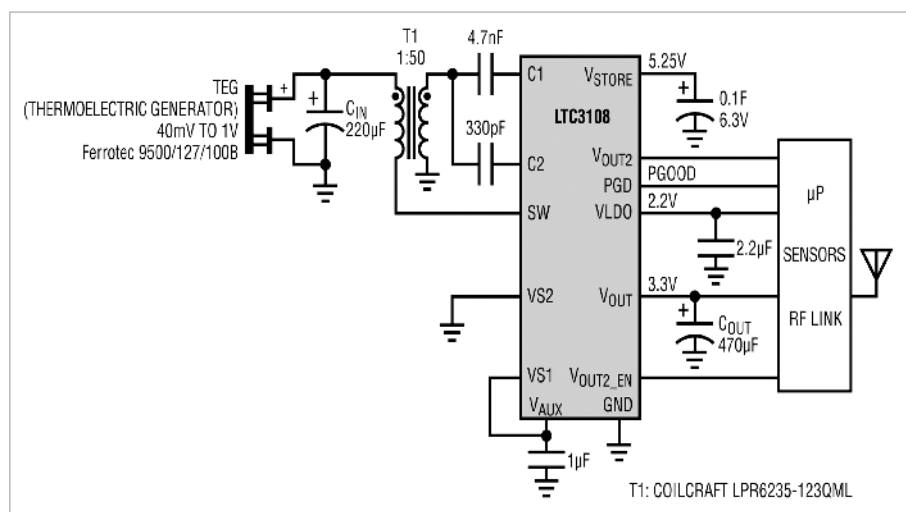
適的散熱片)，在 ΔT 為50 K時工作，LTC3108在3.3伏特時提供的平均充電電流約為560微安培。用這些資料，可計算出首次為 V_{OUT} 儲存電容充電須花多長時間，以及該電路能以多大頻度發送脈衝。假定充電階段 V_{LDO} 和 V_{OUT} 上的負載非常小， V_{OUT} 最初的充電時間為式子2：

.....(式子2)

Thermal equivalent circuit diagram of a TEG module. The diagram shows a vertical line representing the thermal path. At the top is 'AMBIENT TEMPERATURE'. Below it is a resistor labeled R_{HS} (THERMAL OF HEATSINK). Then a node labeled T_{COLD} . Below that is a resistor labeled R_{TEG} (THERMAL OF TEG). Then a node labeled T_{HOT} . Below that is a resistor labeled R_S (THERMAL OF HEAT SOURCE). At the bottom is 'HEAT SOURCE'. A bracket on the left labeled dT spans the distance between T_{COLD} and T_{HOT} .

$$dT = (T_{SOURCE} - T_{AMBIENT}) \cdot \frac{R_{TEG}}{R_S + R_{TEG} + R_{HS}}$$

圖2 TEG 和散熱片簡單的熱模型



根據式子1確定 C_{OUT} 儲存電容的大小，以在10毫秒的持續時間內支援15毫安培的總負載脈衝，從而在負

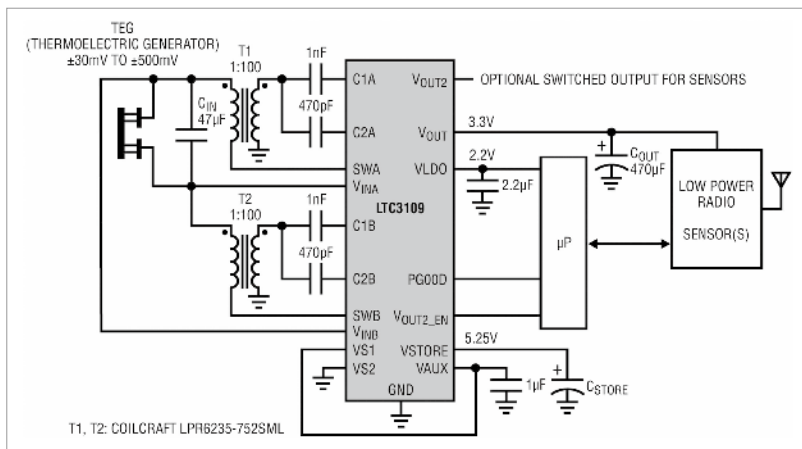


圖4 自動極性應用實例

發送速率的方法是，用從LTC3108可獲得的平均輸出功率(在本例情況下為3.3伏特×560微安培=1.85毫瓦)除以脈衝期間所需功率(在本例情況下為3.3伏特×15毫安培=49.5毫瓦)。採集器可支援的最大工作週期為1.85毫瓦/49.5毫瓦=0.037或3.7%。因此最大脈衝發送速率為0.01/0.037=0.27秒或約為3.7Hz。

請注意，若平均負載電流(如發送速率所決定的那樣)是採集器所能支持的最大電流，則不會有剩餘的採集能量為儲存電容器充電。因此，在此例子中，發送速率設定為2Hz，從而留出幾乎一半的可用能量為儲存電容充電。 V_{STORE} 電容提供的儲存時間利用公式3計算：

$$t_{STORE} = \frac{0.1F \cdot (5.25V - 3.3V)}{6\mu A + 15mA \cdot \frac{0.01}{0.5}} = 637 \text{ seconds}$$

.....(式子3)

上述計算包括LTC3108所需的6微安培靜態電流，且假定發送脈衝之間的負載極小。一旦儲存電容達到滿充電狀態，就能以2Hz的發送速率支援負載637秒，或支援總共一千二百七十四個發送脈衝。

熱量採集應用需要自動極性

有些熱量採集應用(如無線HVAC感測器或地熱供電的感測器)要求電源管理器不僅能以非常低的輸入電壓工作，且能以任一極性工作，因為TEG上的 ΔT 的極性可能改變。

LTC3109是唯一適合克服這種挑戰的元件。LTC3109運用兩個具1:100升壓比的變壓器，能以低至±30毫伏特的輸入電壓工作。LTC3109與LTC3108的功能相同，包括一個LDO、一個數位可編程的輸出電壓、

一個電源良好輸出、一個開關輸出和一個能量儲存輸出。LTC3109採用4毫米×4毫米、二十接腳四方扁平無接腳封裝(QFN)和二十接腳SSOP封裝。圖4顯示LTC3109在自動極性應用中的一個典型例子。圖5所示，該轉換器的輸出電流隨 V_{IN} 變化的曲線說明，該元件在任一極性的輸入電壓時，都能同樣良好地工作。

LTC3108和LTC3109可在輸入電壓低至20毫伏特時工作，或者以非常低的任一極性電壓工作，獨特地提供簡單和有效的電源管理解決方案，其能實現熱能採集，可用常見的熱電元件為無線感測器和其他低功率應用供電。這些產品採用十二接腳DFN或十六接腳SSOP封裝(LTC3108和LTC3108-1)和二十接腳QFN

或SSOP封裝(LTC3109)，提供前所未有的低壓能力和高整合度，可將小解決方案面積縮減至最小。LTC3108、LTC3108-1和LTC3109提供與現有低功率基本元件無縫式連接所需的所有輸出，因此可支援自主型無線感測器應用。💡

(本文作者為凌力爾特設計部主管)

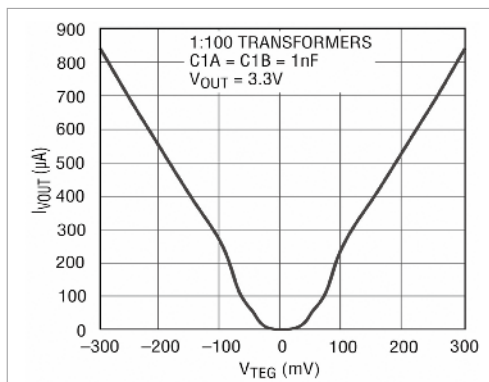


圖5 圖4中轉換器的輸出電流隨 V_{IN} 變化的曲線