

如何校準 MAX12900 4-20mA 感測發送器

■作者：高峰 / Maxim Integrated 首席應用工程師

MAX12900 是一款超低功耗，高整合度的 4-20mA 感測發送器，該元件採用 PWM 輸入來調整環路電流，可以省去傳統方案中用於設置環路電流的 DAC，兩路 PWM 輸入分別用於粗調和細調，可以實現高達 16 位元的電流解析度，元件內部的低溫漂模組可以確保在整個工作溫度範圍具有非常低的溫漂，因此利用 MAX12900 實現的解決方案具有超高的電流輸出精度以及超低的溫度飄移。由於系統採用環路供電，MAX12900 內建的 LDO 還可以用為外部的低功耗處理器供電，這樣就會導致系統的初始電流無法確定，另外，週邊元件的選擇也會影響系統施加電流的精度，因此，在系統設計調試完成後，需要對系統進行校準，以確保環路輸出電流的精度。

PWM 發生器

目前市場上流行的各種處理器都帶有計時器 (計數器) 可以用來產生 PWM 波形輸出，PWM 有兩個重要的參數：PWM 頻率和 PWM 工作週期，計時器對輸入的時鐘訊號 (fclk) 進行計數來產生 PWM 訊號的頻率，元件內部有專門的暫存器 (F_counter) 來設置計數值以確定 PWM 頻率，同時還有一個暫存器 (duty_cycle_counter) 用來設置 PWM 工作週期，當計時器值小於 duty_cycle_counter 設置值時，PWM 輸出電平保持不變，當計時器值等於 duty_cycle_counter 的設置值時，PWM 輸出電平改變，直到計時器值達到 f_counter 的設置值之前，輸出電平保持不變，因此 PWM 訊號的輸出頻率和 PWM

工作週期可以表示為：

$$f_{PWM} = \frac{f_{clk}}{F_counter} \quad (1)$$

$$duty_cycle = \frac{duty_cycle_counter}{F_counter} \times 100\% \quad (2)$$

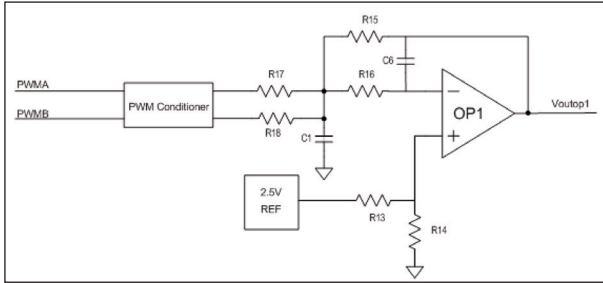
當 duty_cycle_counter 設置值在 0 至 F_counter 之間變化時，可以產生 0% 至 100% 工作週期的 PWM 訊號，當工作週期為 100% 時，將產生對應於 PWM 訊號高電平的 DC 電壓。MAX12900 內部的 PWM 穩壓器將處理器發送的 PWM 訊號轉換成高電平為 2.5V 基準電壓，低電平為零的 PWM 訊號，這樣就減輕了對處理器端 PWM 訊號電平的要求，然後透過低通濾波器可以將 PWM 訊號轉換成對應的 DC 電壓值，控制環路感測發送器的電流輸出。

PWM 輸入轉換成直流電壓輸出

圖 1 為 PWM 到直流輸入的轉換電路，關於該電路的工作原理以及公式的推導，請參考 MAX12900 資料手冊以及 MAXREFDES1161# 資料手冊，下面用到的公式都可以從 MAXREFDES1161# 資料手冊中找到。

在圖 1 中，OP1 運算放大器和週邊電阻電容構成反向低通濾波器，將兩路 PWM 輸入訊號轉換成 Voutop1 直流輸出，輸入到 R17 和 R18 的 PWM 訊號高電平為基準電壓，低電平為 0，按照 MAXREFDES1161# 中選擇的電阻值 (R17=R15=2.6kΩ, R18=1.5MΩ, R13=R14=294kΩ)，在不考慮電

圖 1: MAX12900 PWM 至 DC 輸出轉換器



阻誤差的情況下， V_{outop1} 的電壓值可以按照下面的公式進行計算：

$$V_{outop1} = (1 - DutyCycleA) \times V_{REF} + \frac{R15}{R18} \times (0.5 - DutyCycleB) \times V_{REF}$$

這裡， $DutyCycleA$ 和 $DutyCycleB$ 分別為輸入的 PWM 工作週期，由於濾波器為反向低通濾波器，所以在工作週期為 100% 時，輸出電壓最小（除上電預設狀態外，在實際應用中不能將 PWMA 和 PWMB 同時設置為 100%），為了方便說明並且和 MAX12900 評估板軟體對應起來，我們可以定義：

$$RDutyCycleA = 1 - DutyCycleA$$

$$RDutyCycleB = 1 - DutyCycleB$$

$$Rratio = \frac{R15}{R18}$$

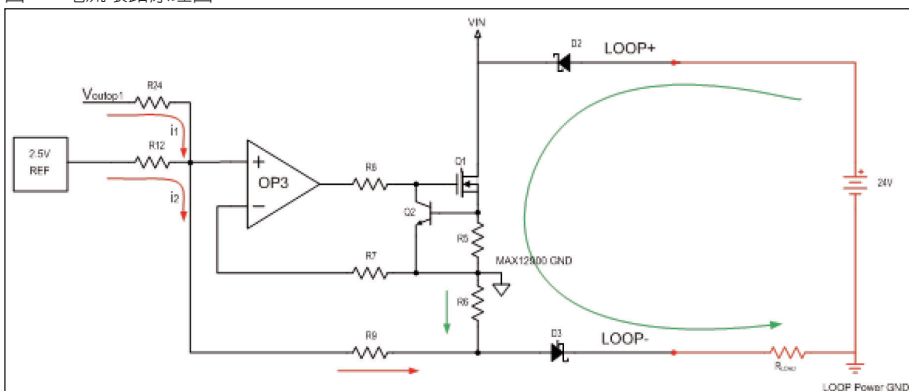
這樣，公式就可以寫為：

$$V_{outop1} = RDutyCycleA \times V_{REF} + Rratio \times RDutyCycleB \times V_{REF} - Rratio \times 0.5 \times V_{REF} \quad (3)$$

PWM 工作週期與環路電流的關係

電流環路原理圖如圖 2 所示，電流環路的輸出電流可以用下式來表示：

圖 2: 電流環路原理圖



$$I_{loop} = (I1 + I2) \times \frac{R9}{R6}$$

$$I_{loop} = \left(\frac{V_{outop1}}{R24} + \frac{V_{ref}}{R12} \right) \times \frac{R9}{R6}$$

同樣，在不考慮電阻誤差的情況下，利用 MAXREFDES1161# 中選擇的電阻值 ($R24=100k\Omega$, $R12=1M\Omega$, $R9=24.9k\Omega$, $R6=24.9\Omega$)，該公式可以寫為：

$$I_{loop} = 10 \times V_{outop1} + 2.5mA \quad (4)$$

把公式 (3) 代入公式 (4)，並替換 $V_{REF} = 2.5V$

$$Rratio = \frac{22.6}{1500} \text{ 和，公式可以寫為}$$

$$I_{loop} = 25 \times (RDutyCycleA + \frac{22.6}{1500} \times RDutyCycleB - \frac{22.6}{1500} \times 0.5) + 2.5mA \quad (5)$$

從該公式可以看出，當 PWMB 的工作週期為 50% 時，環路電流是由 PWMA 來確定的。由於外部電阻 ($R15$, $R18$, $R24$, $R12$, $R6$, $R9$) 的精度誤差，MAX12900 內部基準電壓 (V_{REF}) 以及放大器的失調電壓等都會對環路電流的輸出引入誤差，從公式可以看出，能夠調整的只有 PWMA 和 PWMB 的工作週期，因此可以修正 PWMA 和 PWMB 工作週期的增益誤差和失調誤差來實現對輸出電流的校準，假設 PWMA 的修正後增益為 $K1$ ，失調為 $b1$ ，PWMB 的修正後增益為 $K2$ ，失調為 $b2$ ，那麼最終的計算公式應為：

$$I_{loop} = 25 \times (K1 \times RDutyCycleA + b1 + K2 \times \frac{22.6}{1500} \times RDutyCycleB + b2 - \frac{22.6}{1500} \times 0.5) + 2.5mA \quad (6)$$

對於失調誤差 $b1$ 和 $b2$ ，在校準過程中可以作為固定值來計算，因此，可以寫作： $b = b1 + b2$ 。式 6 可以寫作：

$$I_{loop} = 25 \times (K1 \times RDutyCycleA + K2 \times \frac{22.6}{1500} \times RDutyCycleB - \frac{22.6}{1500} \times 0.5 + b) + 2.5mA \quad (7)$$

當設置不同工作週期的 PWMA 和 PWMB 時可以得到不同的環路電流輸出，通過 4 個不同的環路電流輸出值，就可以計算出增益和失調，實現對 MAX12900 輸出電流進行校準。

MAX12900 4-20mA 感測發送器的校準過程

接下來以 MAX12900 評估板的設置來介紹如何對 MAX12900 進行校準，在 MAX12900 評估板上採用的處理器系統時鐘頻率為 3MHz，當 F_counter 設置為 256 時可以產生 11.7kHz 的 PWM 訊號，在評估板進行校準時，為簡化計算，分別設置了兩組相同 PWMA 工作週期和兩組相同 PWMB 工作週期的電流輸出，如下圖所示：

Calibration Procedure

1. Coarse PWMB: 15 Fine PWMA: 128 Loop Current on DMM (mA)	Set 4.048000
2. Coarse PWMB: 175 Fine PWMA: 128 Loop Current on DMM (mA)	Set 19.623000
3. Coarse PWMB: 175 Fine PWMA: 96 Loop Current on DMM (mA)	Set 19.576000
4. Coarse PWMB: 175 Fine PWMA: 160 Loop Current on DMM (mA)	Set 19.670000

Calculate

然後代入 (7) 可得到如下算式：(注意：評估板上的 PWMB 對應於本文中的 PWMA)

$$4.048 = 25 \times (K1 \times \frac{15}{256} + K2 \times \frac{22.6}{1500} \times \frac{128}{256} - \frac{22.6}{1500} \times 0.5 + b) + 2.5mA$$

$$19.623 = 25 \times (K1 \times \frac{175}{256} + K2 \times \frac{22.6}{1500} \times \frac{128}{256} - \frac{22.6}{1500} \times 0.5 + b) + 2.5mA$$

$$19.576 = 25 \times (K1 \times \frac{175}{256} + K2 \times \frac{22.6}{1500} \times \frac{96}{256} - \frac{22.6}{1500} \times 0.5 + b) + 2.5mA$$

$$19.67 = 25 \times (K1 \times \frac{175}{256} + K2 \times \frac{22.6}{1500} \times \frac{160}{256} - \frac{22.6}{1500} \times 0.5 + b) + 2.5mA$$

計算可以得到：K1=0.9968，K2=0.99823，b=0.003527

這樣就完成了對 MAX12900 的校準。

MAX12900 評估板校準計算中採用了不同的校準計算方法，在評估板的校準計算中分別計算出了 PWMA 失調 b1 和 PWMB 失調 b2。由於採用了不同的校準計算方法，因此評估板計算出的 b1+b2 和本文中計算出的 b 並不相等，它們之間的對應關係

如下： $25 \times b - 25 \times \frac{22.6}{1500} \times 0.5 + 2.5 = 2.5 \times K1 + b1 + b2$ 如何根據預期電流計算 PWM 工作週期

從上面的式 7 可以看出，輸出電流是由 PWMA 和 PWMB 共同控制產生，PWMA 用於粗調，PWMB 用於細調，並且當 PWMB 的工作週期為 50% 時，輸出電流主要是由粗調來決定的，因此在計算粗調 PWMA 的工作週期時，將 PWMB 的工作週期先設置為 50%，計算出粗調 PWMA 的工作週期，然後根據計算出的粗調 PWMA 工作週期再計算細調 PWMB 的工作週期。計算 PWMA 時，可以根據式 7 得到：

$$RDutyCycleA = ((I_{loop} - 2.5mA) + 25 + \frac{22.6}{1500} \times 0.5 - K2 \times \frac{22.6}{1500} \times 0.5) + K1 \quad (8)$$

置 PWM 計數器的值和工作週期的關係如下：

$$RDutyCycleA = \frac{DutyCycleA_Counter}{256} \quad (9)$$

這樣就可以計算出 PWMA 計數器的設置值。然後根據式 7 來計算細調 PWMB 的工作週期：

$$RDutyCycleB = ((I_{loop} - 2.5mA) + 25 - K1 \times RDutyCycleA - b + \frac{22.6}{1500} \times 0.5) + K2 \times \frac{22.6}{1500} \quad (10)$$

在式 10 中，K1，K2 和 b 是校準得到的，RDuty CycleA 是式 8 計算得到的。這樣就可以得到細調 PWMB 的工作週期，同樣根據

$$RDutyCycleB = \frac{DutyCycleB_Counter}{256} \quad (11)$$

就可以計算出 PWMB 計數器的設置值，這樣就完成了預期輸出電流的設置。由於 PWMB 和 PWMA 在設置相同工作週期時對輸出電流的改變比例為 22.6/1500，約為 1/66，而不是 1/256。也就是說 PWMB 滿量程輸出產生的環路電流大於 PWMA 變化 1 時產生的環路電流，這樣，在輸出相同環路電流時，可能會對應不同的 PWMA 和 PWMB 組合。

系統校準後驗證輸出電流

在對 MAXREFDES1161 校準後，得到相應的 K1，K2 和 b。然後根據預期輸出電流值用式 8 和式 10 分別計算要施加的 PWM 工作週期，根據式 9 和式 11 得到 PWM 計數器的設置值，測試結果如下：

設置輸出 (mA)	PWMA 計數器	PWMB 計數器	實際輸出 (mA)	誤差 (uA)
4	15	95	3.999	-1
5	25	113	4.999	-1
6	36	65	6.000	0
7	46	83	7.000	0
8	56	101	8.000	0
9	66	119	8.999	-1
10	77	71	10.000	0
11	87	89	11.000	0
12	97	107	12.000	0
13	108	59	13.000	0
14	118	77	14.000	0
15	128	95	15.000	0
16	138	113	16.001	1
17	149	65	17.002	2
18	159	83	18.001	1
19	169	101	18.999	-1
20	179	119	20.002	2

從以上測試結果可以看出，經過校準後的 MAX12900 具有非常高的輸出電流精度。

結論：

MAX12900 4-20mA 感測發送器利用通用處理器輸出 PWM 訊號來實現輸出電流的控制，可以降低系統的成本，同時週邊元件的精度對輸出電流的精度有很大的影響，因此在使用 MAX12900 時需要對其進行系統校準，校準後的系統具有非常高的輸出電流精度，同時可以降低對週邊元件的精度要求。CTA

8 家國際風能開發商共同成立產業協會 宣示推動台灣離岸風電決心

為響應政府近年來力推台灣離岸風電的努力，以及全球共同節能減碳的趨勢，投資台灣最具代表性的 8 家風能開發商偕同 SEMI，在行政院政務委員龔明鑫、經濟部長沈榮津以及經濟部能源局局長游振偉的共同見證下，在台北舉辦「台灣離岸風電產業協會」啓航儀式，宣示產業共同開發與推動台灣離岸風電的決心。

此協會由上緯公司、台灣北陸能源發展有限公司 (NPI)、玉山能源股份有限公司 (Yushan Energy)、沃旭能源股份有限公司 (Ørsted)、哥本哈根風能開發股份有限公司 (CIP)、達德能源集團 (wpd)、麥格理資本 (Macquarie Capital)、台灣捷熱能源股份有限公司 (JERA) 及 SEMI 能源產業部共同發起，期望可以結合投資台灣的國際風能開發商、本土供應鏈以及 SEMI 長期經營台灣再生能源產業的經驗，共同推動風電產業鏈發展、建構台灣風力發電的未來發展藍圖，也希望能號召更多業者加入此協會的行列。

在政府的全力支持下，未來「台灣離岸風電產業協會」的主要任務與目標是整合與串聯投資台灣的離岸風電業者、建立產官學研間對話交流的平台、向政府溝通產業對公共政策的評估建議，並主動教育大眾與市場、推廣綠能教育及普及全民對綠電的認知水準。SEMI 全球行銷長暨台灣區總裁曹世綸表示，期望可以透過系統性、整體性的規劃，加速台灣能源轉型、早日達成能源自主的願景。